摘要

在全球暖化的衝擊下，人類活動所造成的二氧化碳排放以及氣候變遷對於生態環境的影響，已在國際間倍受重視，由於森林資源特有的固碳能力，植林碳匯及森林碳管理為當前林業經營的重要課題；透過例行性森林生長、森林健康以及森林碳匯的監測，不僅能量化分析台灣現有的綠色資源，評估氣候變遷及環境污染對森林環境的衝擊，亦能提供國家溫室氣體排放清冊中有關林業碳匯移除量的參考資訊，以有效落實政府碳保存、碳吸存、以及碳替代的二氧化碳減量策略。

本計畫以美國地球觀測系統(EOS)系列衛星 Terra 及 Aqua 酬載的中級解析度成像分光輻射度計(MODIS)資料產品作為森林碳吸存、森林生長及森林健康評估的所需資料來源；MODIS 感測器具有 36 個波段頻道，其多光譜、拍攝像幅寬及再訪率高的感測能力，使其相較於其他資源衛星能獲取更多地表植生的動態資訊，並透過美國地球科學事業的資料校正及系統運算，提供植生指標(MOD13 NDVI/EVI)、葉面積指數(MOD15 LAI)、及植生初級生產力(MOD17 GPP/PSNnet)等陸域參數產品，透過此參數產品在時序及空間分佈上的分析，能瞭解台灣當前或歷年的植生綠度及其變遷情形，提供林業管理及植林碳匯所需的參考依據。

衛載遙測由於具有穩定的軌道週期，能提供穩定規律的地表觀測資訊，透過時序性的資料分析，不僅能掌握地表參數的空間性差異，亦能瞭解時序性的變遷。本計畫蒐集處理 2000 年 10 月至 2012 年 9 月 MODIS 初級生產力資料，完成台灣本島、各氣候區、植群帶、林區、以及特定人工林的森林碳匯評估，並藉由時序性的資料分析，瞭解總初級生產力、淨初級生產力的季節性變化，探討影響森林碳匯功能的可能因素。經由分析顯示，在 2000-2010 十年期間，藉由綠色植生的光合作用，台灣全島每年可吸存 22.2-29.9 百萬公噸碳量，約相當於 81.4-109.6 百萬公噸的二氧化碳，這包含林地、草生地、農地作物、以及濕地上所有草本、木本植物的貢獻，在這些地貌種類中，森林區域約佔碳吸存總量的 76%，在國有林區內，平均每年每公頃森林能吸存 7.5-10.2 公噸碳量，顯示林業經營在碳吸存、碳保存政策中的重要性。以空間分佈而言，在台灣本島所屬的七個地理氣候區中，森林碳匯大致呈現由南向北逐漸遞減的趨勢，最南

側的 SE 區由於充足的日照，以及相較於西部區域較不明顯的乾季，且以中低海拔的榕楠林及楠櫧林帶為主要林相，呈現出最高的淨初級生產力，平均每年每公頃區域能吸存 9.5-12.8 公噸的碳量，而位處最北側的 NE 區，為各地理氣候區中最低(平均吸存約 6.3-8.8 公噸碳量)，與其恆濕型的氣候型態及雲霧覆蓋影響有關。在台灣幾種主要的植群當中，中低海拔的常綠闊葉林呈現出較高的碳匯效能，且隨著海拔上升，林相由榕楠林、楠櫧林、櫟林，轉換為以鐵杉、雲杉、冷杉為主的高山植群，固碳能力呈現出逐漸遞減的趨勢。植物的碳吸存能力與光合作用有關，並呈現出明顯的季節性變化，總初級生產力約在夏至時達到高峰，但此時較高的生物量亦造成較高的維持性呼吸成本，淨光合作用(總初級生產力扣除維持性呼吸量)則早在 3-4 月份即達到最高，並反應在生長季初期時植生的迅速生長。

在地面驗證資料上，本計畫與國家實驗研究院颱風洪水研究中心及中興大學合作，蒐集霞雲水文站、巴陵氣象站、東石農場、嘉義氣象站、北東眼山的通量資料，分析二氧化碳的時序性變遷，並進行淨生態系統生產力、總初級生產力的推演，完成遙測成果的比對驗證。經由霞雲及巴陵測站的資料顯示，遙測與通量觀測的總初級生產力在時間趨勢上相吻合($R=0.79$)($p<0.05$)，但在量級上，遙測資料呈現較高數值(GPP 高約 30.0%, NPP 高約 18.9%)，可能與光合作用有效輻射分量的錯估，或遙測推演中假定的恆定光能利用效率有關。本計畫另彙整歷次永久樣區調查資料，分析各地理氣候區及植群帶的碳蓄積變化量、碳吸存量，以與遙測成果進行空間分佈上的比較；藉由永久樣區第一次(1997-2002)及第二次(2002-2007)調查的資料顯示，在七個地理氣候區中，以南部的 SE、SW、ES 區呈現較高的碳吸存量，並以北部的 EN、NW、NE 區較低，平均每年每公頃森林能吸存 6.0 公噸(NE 區)-9.0 公噸(SE 區)碳量，此分佈趨勢上大致與遙測成果相符，但就量級而言，遙測成果約為永久樣區資料的 1.07-1.27 倍，同樣呈現出遙測推演高於地面觀測值的現象。

由於近年日益嚴重的氣候變遷及空氣污染等環境問題，森林生態系所扮演的減碳功能及對外來壓力的容受能力等森林健康議題，亦逐漸受到各界重視，本計畫透過 MODIS 12 年期的植生指標資料分析，建立植生指數參考基準，並透過即期與基期影像的分析，建立植生異常指標 VAI，以時序資料探討森林健康與異常情形，並以案例

分析方式,探討中西部山區植生乾旱(2002 年)、八八風災後的西南部山區崩塌(2009 年)、阿里山火災(2009 年)、丹大火災(2004 年)、梨山火災(2009 年)等事件所造成的植生異常事件，評估擾動事件對森林健康、以及碳匯蓄積變化的影響；並藉由 MODIS 火點偵測產品，綜合探討近十年的火災事件，針對較大型的林火事件進行定量分析，評估 MODIS 植生指標及火點偵測產品在森林健康的應用效能。

森林生長之估算與預測，為森林經營最重要的資訊，本研究藉由 2009 年 10 月至 2012 年 9 月各月份 MODIS 葉面積指數產品的處理分析，瞭解各植群型態及特定人工林的森林樹冠生長及葉面積變化情形；經由三年期的研究成果顯示，森林生長呈現明顯的季節性變化，在夏季的 6-8 月份，葉面積指數達到最高，並在冬季的 1-2 月份為最低。在各植群型態中，以榕楠林及楠櫧林較高，並大致呈現隨著海拔上升，由櫟林帶下層、櫟林帶上層、鐵杉雲杉帶、冷杉林、高山植群帶逐次遞減的趨勢。為驗證遙測葉面積指數的推演成果，評估 MODIS 資料在台灣地區的應用效能，本計畫在嘉義蘭潭及台中大雪山山區建立葉面積指數地面測區，藉由颱風洪水研究中心的植冠分析儀，進行闊葉林、針闊葉混合林、針葉林、及初植造林地的每月實測，取得地面葉面積指數的時序資料，並藉由多重地貌林型的系統性取樣(包含天然林地、人造林地、防風林、竹林、果園、農作區等)，完成遙測與地面觀測資料的分析驗證；藉由 20 個 1×1 公里測區(每一測區平均約 31 筆觀測資料)的比對成果顯示，在空間趨勢上，地面觀測與遙測推演的葉面積指數大致相符($R=0.87$)($p<0.05$)，但相較於地面資料，遙測推演在低植生區(稻田、箭竹林、果園等低葉面積指數區域) 呈現些微低估，高植生區(竹林、闊葉林等)又呈現些微高估的趨勢，但整體而言，遙測值能有效掌握葉面積指數在空間分佈上的變異，作為台灣地區森林生長監測的分析依據。

Abstract

Photosynthesis is a process that converts carbon dioxide (CO_2) into organic compounds by absorbing the energy from sunlight. It has played an important role for the reduction of greenhouse gases in the atmosphere. Since the Industrial Revolution in 18th century, emission of anthropogenic CO_2 has dramatically increased among the greenhouse gases, mostly as a result of combustion of fossil fuels and landuse changes. This dramatic increase raises a global concern about the effect of global warming on the biosphere. Therefore, significant effort, at national and international scales, has been ever since devoted to quantifying the ability of forest ecosystem as the potential terrestrial source for mitigation of atmospheric CO_2.

Moderate Resolution Image Spectroradiometer (MODIS) is the principal observation sensor on-board NASA's Terra and Aqua satellites. With its unprecedented coverage and observation frequency, the space-based terrestrial state measurements provide new opportunities for scientific advances in global and regional mapping of primary productivity, vegetation index, and leaf area index (LAI) at the land-atmosphere boundary. The routine observation also provides a consistent and standardized data source for the forest-related research, such as carbon sequestration, forest health monitoring, and evaluation of forest growth, which is also essential for the administration to consolidate its forest policy on afforestation/reforestation and sustainable management.

This study has acquired MODIS level-4 GPP/PSNnet/NPP (MOD17) as the standard data product for estimation of carbon sequestration among forest ecosystems. The results were further quantified with various ecological features, such as vegetation types, climatological districts, and plantation areas, so as to identify the spatial and temporal trends for different ecological niche. Based on 10-year NPP observation, a total of 22.2-29.9 million tons of carbon has been assimilated annually through photosynthesis process, which corresponds to 81.4-109.6 million tons of CO_2, with woody species as the major sink for atmospheric CO_2 (76%). Among 7 climatological regions, the South-East district presents higher uptake capability (9.5-12.8 t-C/ha/yr) due to its stronger radiation intensity and primary forest type,

which is mainly covered by Fucus-Machilus and Machulus-Castanopsis zones. Conversely, with lower radiation intensity and frequent cloud cover, a lower sequestration rate (6.3-8.8 t-C/ha/yr) is demonstrated for the North-East district.

Among different biomes, the study indicated that broadleaf forests present the highest GPP/PSNnet, followed by mixed forest and needleleaf forest, and croplands have the lowest primary productivity. Meanwhile, temporal analysis indicates that GPP peaks around summer solstice, marked by the highest photosynthetic active radiation (IPAR). However, this is about a 3-month lag behind the highest PSNnet in mid-March (early growing season). The main reason for this temporal mismatch is the respiration cost induced by primary producers. When in the mid-growing season, higher IPAR is intercepted by flushed leaf areas, but higher biomass and the corresponding respiration cost would also restrain the plant growth, especially for the perennial species.

To validate MODIS primary productivity results, the study were further compared with CO_2 flux measurements conducted by Taiwan Typhoon and Flood Research Institute. The comparison indicated that MODIS GPP was closely related in the temporal trend with tower-based measurements, with correlation coefficient as 0.79 (p<0.05) for Shiayun station. However, MODIS products tend to present a higher GPP value during the mid-growing seasons when compared to eddy-covariance derived result. This may result from inadequate estimate of FPAR or assumption of constant maximum radiation use efficiency in its GPP algorithm. Meanwhile, a biometric-based method was also used to estimate annual carbon flux and storage in different ecoregions of Taiwan, with biomass data derived from intensive field surveys of permanent plots conducted by local Forest District during 1997-2012. The results were further compared to MODIS-derived NPP, and indicated a similar distribution pattern across the landscape (R=0.92)(p<0.05).

Forest health is a critical issue for plantation planning and disease control. MODIS-based normalized difference vegetation index (NDVI) has been used to evaluate the spectral properties of upper forest canopy in response to natural or anthropogenic disturbances, so as

to provide routine observations of forest health. Based on the 12-year dataset, vegetation anomaly index (VAI) has been established and was used to assess the variation of forest vigor and provide a consistent data source for monitoring of forest health. With time-series analysis of VAI, we identified regions with abnormal spectral response, including land use changes and several major vegetation anomaly cases in Taiwan, with identified events such as severe drought in 2002 and 2003, widespread landslides following typhoon Morakot in 2009, and burn scars devastated by Alishan wildfire in 2009, Danda wildfire in 2004, and Lishan fire in 2009.

Leaf Area Index is the projected, one-sided leaf area per unit ground surface. It is an important biophysical parameter to quantify the photosynthesis, radiation and water interception, and transpiration process within the upper canopy. This study has used time-series LAI products (MOD15) as the primary indicator for evaluation of forest growth and its seasonal and annual cycle. For the national forest, we found that a higher LAI was presented for the broadleaf forest. As elevation goes up, and coniferous forest and alpine pasture have dominated the landscape, LAI drops down accordingly. Meanwhile, to validate MODIS LAI product, this project has conducted monthly LAI field surveys, with study sites covering several major land cover types of Taiwan. The study indicated that MODIS tends to present a lower LAI value for low biomass areas, and higher value for high biomass areas in comparison with the field results. However, LAI results from both approaches were closely related ($R=0.87$) ($p<0.05$), which also validate the applicability of MODIS LAI product for forest growth study in Taiwan.

目錄

摘要 i
Abstract iv
目錄 vii
圖目錄 xii
表目錄 xviii
一、計畫目標 1
二、計畫工作項目 2
三、期末成果概述 2
四、執行進度成果 4
1 森林碳吸存估算 4
1.1 森林碳吸存研究的重要性與研究方法 4
1.1.1 二氧化碳增量與森林碳匯 4
1.1.2 森林碳匯研究方法 6
1.1.3 國家層級的森林碳匯研究及遙測應用 8
1.2 MODIS 初級生產力演算 12
1.2.1 MOD17 產品介紹及資料分析流程 12
1.2.2 遙測植生初級生產力資料分析成果 13
1.2.2.1 2000/10-2012/9 台灣全島、氣候分區、植群帶逐月 GPP 及 PSNnet 時序變化 13
1.2.2.2 全台逐年 NPP 變化 21
1.2.2.3 各地理氣候區逐年 NPP 變化 22
1.2.2.4 各地理氣候區季節性 PSNnet 23
1.2.2.5 各地理氣候區與地理氣候子區 NPP 比較 24
1.2.2.6 各植群帶逐年 NPP 26
1.2.2.7 地理氣候區內各植群帶 NPP 27
1.2.2.8 各地貌 NPP 與 GPP 佔全台比例 30

1.2.2.9 各地貌 NPP 與 GPP 比值 31
1.2.2.10 全林區與各林區逐年 NPP 32
1.2.2.11 均質樣區 GPP 分析-氣候分區與植群帶 33
1.2.2.12 人工林樣區 GPP 分析 35
1.2.2.13 長期生態研究地 GPP、PSNnet、NPP、及 LAI 分析 37
1.3 通量塔台觀測與遙測資料比對 40
1.3.1 通量塔台觀測與資料收集 40
1.3.2 渦流協變系統二氧化碳觀測成果 42
1.3.3 淨生態系統生產力分析 46
1.3.4 遙測與通量資料成果比較 47
1.4 永久樣區蓄積量資料分析 50
1.4.1 以蓄積量推估碳儲存量 50
1.4.2 永久樣區蓄積量及蓄積量變化 51
1.4.3 永久樣區碳吸存量 53
1.5 森林碳匯影響機制探討 56
1.5.1 初級生產力與葉面積指數分析 56
1.5.2 光合作用有效輻射與日間初級生產力分析 58
1.5.3 日射量與總初級生產力 61
1.5.4 日夜間初級生產力與蒸發散、溫度的關係 62
1.5.5 東北部山區及恆春半島森林生長及碳吸存分析 64
1.6 MODIS 資料森林碳吸存應用考量 68
2 森林生長分析 70
2.1 森林生長估測與葉面積指數 70
2.1.1 森林生長估測 70
2.1.2 葉面積指數與估算方式 71
2.2MODIS 葉面積指數演算 71
2.2.1 MOD15 產品介紹及資料分析流程 71

2.2.2 遙測葉面積指數資料成果 73
2.2.2.1 2009/10-2012/9 各植群帶逐月葉面積指數時序變化 73
2.2.2.2 均質樣區葉面積指數分析- 植群帶與氣候分區 74
2.2.2.3 人工林樣區葉面積指數分析 76
2.2.2.4 大農大富農場平地造林森林生長 77
2.3 葉面積指數實地量測 80
2.3.1 植冠分析儀量測方式 80
2.3.2 實地葉面積指數量測規劃 81
2.3.3 葉面積指數實測成果 82
2.3.3.1 嘉義蘭潭及大雪山葉面積指數實測成果 82
2.3.3.2 不同植群葉面積指數差異 85
2.3.3.3 光照環境對 LAI 實測的影響 86
2.3.4 遙測與實測葉面積指數比對 87
2.3.5 MODIS LAI 的應用考量-地形陰影影響 89
3 森林健康研究 92
3.1 森林健康監測及遙測應用 92
3.1.1 森林健康監測 92
3.1.2 以遙測技術應用於森林健康研究 93
3.2 MODIS 植生指標與植生異常指標演算 94
3.2.1 以光學遙測進行森林健康監測的研究考量 94
3.2.2 MOD13 植生指標及植生異常指標分析流程 95
3.2.3 植生異常指標分析成果 97
3.2.3.1 植生異常指標分析 97
3.2.3.2 歷年植生指標差異 98
3.3 植生異常案例探討-2009 年八八風災後南部山區崩塌 98
3.4 植生異常案例探討-2002 年中西部山區植生乾旱 103
3.5 植生異常案例探討-2000-2011 年火災事件 106

3.5.1 林火偵測分析流程 106
3.5.2 歷年林火事件與統計分析 107
3.5.3 遙測應用與林火案例探討 110
3.5.3.1 阿里山火燒事件 110
3.5.3.2 丹大火燒事件 116
3.5.3.3 梨山火燒事件 118
3.6 MODIS 資料森林健康監測應用評估 119
3.6.1 Terra MODIS 與 SPOT HRV NDVI 資料比對 119
3.6.2 MODIS 資料森林健康監測應用評估 121
五、結論與建議 123
5.1 執行成果與結論 123
5.2 建議 127
六、參考文獻 130
附錄 A、Terra/Aqua MODIS MOD13、MOD15、MOD17 衛星產品套色影像 136
附錄 B、分析理論 147
B.1 遙測碳吸存研究方法 147
B.1.1 研究理論基礎-以植生吸收輻射推估植生生產力 147
B.1.2 MODIS 總初級生產力演算式 149
B.1.3 MODIS 淨光合作用演算式 152
B.1.4 MODIS 淨初級生產力演算式 153
B.2 渦流協變性系統觀測原理及森林碳收支 155
B.3 植冠分析儀 LAI-2000 觀測原理 159
B.4 常態化差異植生指標及植生異常指標分析流程 162
B.5 增進植生指標演算 165
附錄 C、葉面積指數現地量測資料 166
附錄 D、審查會議及工作會議辦理情形 173
D.1 期初審查會議辦理情形 173
D.2 期中審查會議辦理情形 177

D.3 十月份工作會議辦理情形.....181
D.4 期末審查會議辦理情形.....184
附錄 E、教育訓練辦理.....189

圖目錄

圖 1 台灣二氧化碳通量塔站分佈 7
圖 2 加拿大國家森林碳監測、測計、及報告系統架構 9
圖 3 澳洲國家碳計量系統架構 10
圖 4 日本森林碳監測系統(FCMS)架構 11
圖 5 Terra/Aqua-MODIS sinusoidal 網格分布圖 12
圖 6 MODIS 初級生產力產品處理標準作業流程 13
圖 7 2000/10-2012/9 台灣全島 GPP 及 PSNnet 逐月平均值之時序變化 14
圖 8 台灣全島各氣候區、植群帶(與國有林區交集)、及林區分布圖 15
圖 9 2000/10-2012/9 逐月 GPP 及 PSNnet 時序變化(氣候分區與國有林區交集) 17
圖 10 2000/10-2012/9 逐月 GPP 及 PSNnet 時序變化(植群帶與國有林區交集) 20
圖 11 2000 年至 2010 年全台 NPP 總量 21
圖 12 2000 年至 2010 年各地理氣候區 NPP 單位面積量趨勢圖 23
圖 13 各氣候分區季節性淨光合作用 24
圖 14 地理氣候區及生態小區分佈與各區淨初級生產力 25
圖 15 2000 年至 2010 年各植群帶 NPP 單位面積量趨勢圖 26
圖 16 2000-2005 年平均淨初級生產力及國有林區內各地理氣候區植群帶分佈 28
圖 17 國有林區內各地理氣候區年度平均碳吸存量(遙測估算成果) 28
圖 18 各植群帶地理氣候區碳吸存量(遙測估算成果) 29
圖 19 各地理氣候區內不同植群帶碳吸存量(遙測估算成果) 30
圖 20 各地貌類別面積比例及 GPP、NPP 比例 31
圖 21 各植生種類(作物、草生地、闊葉林、混淆林、針葉林) NPP 與 GPP 比值的灰階分佈圖 31
圖 22 2000 年至 2010 年全林區 NPP 總量 32
圖 23 2000-2010 年各林區逐年碳吸存總量及單位面積量趨勢圖 32
圖 24 均質樣區(龍崎、三地門、福山、南澳、尖石、棲蘭測區)與氣候分區 34
圖 25 樣區衛星影像、植群類別、以及 2010 年 GPP 時序性變化 35

圖 26 柳杉、扁柏紅檜、二葉松人工林樣區分佈 36
圖 27 柳杉、紅檜及扁柏、二葉松人工林 2010 年 GPP 時序變化 36
圖 28 長期生態研究地分佈圖 37
圖 29 長期生態研究地葉面積指數及淨光合作用季節性變遷 39
圖 30 長期生態研究地總初級生產力及淨初級生產力年度性變遷 40
圖 31 通量觀測塔架構 41
圖 32 霞雲水文站及巴陵雨量站 2009 年 8 月份二氧化碳濃度日變化 43
圖 33 二氧化碳季節性變化-霞雲、巴陵、東石 44
圖 34 二氧化碳季節性變化-北東眼山、棲蘭鴛鴦湖 44
圖 35 二氧化碳日夜變化 -霞雲、巴陵、東石 44
圖 36 二氧化碳日夜變化 -北東眼山、棲蘭鴛鴦湖 44
圖 37 二氧化碳垂直通量 45
圖 38 霞雲、巴陵、嘉義氣象站、東石農場日間淨生態系統生產力 47
圖 39 塔台測點總初級生產力分析流程 48
圖 40 2009 年 5 月至 12 月 MODIS 與塔台 GPP 時間變化趨勢-霞雲 49
圖 41 2009 年 5 月至 12 月 MODIS 與塔台 GPP 資料比對-霞雲 49
圖 42 2009 年 5 月至 12 月 MODIS PSNnet 與塔台 NEP 時間變化趨勢-巴陵 50
圖 43 2009 年 5 月至 12 月 MODIS PSNnet 與塔台 NEP 資料比對-巴陵 50
圖 44 永久樣區蓄積量及分佈點位 52
圖 45 各地理氣候區永久樣區蓄積量(第一及第二次共同量測樣區) 52
圖 46 各地理氣候區永久樣區蓄積量(第二及第三次共同量測樣區) 52
圖 47 各地理氣候區永久樣區碳儲存變化量(第一及第二次共同量測樣區) 53
圖 48 各地理氣候區永久樣區碳儲存變化量(第二及第三次共同量測樣區) 53
圖 49 蓄積量變化與碳吸存量 54
圖 50 各地理氣候區永久樣區碳吸存量(第一及第二次共同量測樣區) 55
圖 51 各地理氣候區永久樣區碳吸存量(第二及第三次共同量測樣區) 55
圖 52 遙測與永久樣區碳吸存量比較 56

圖 53 2010 年常綠闊葉林、針闊混合林、常綠針葉林、農作區 GPP 及 PSNnet 時序性變化 57
圖 54 LAI 與 FPAR、GPP、Ra 關係 57
圖 55 2011/8/13-2011/8/20 光合作用有效吸收輻射分量 58
圖 56 東石農場二氧化碳垂直通量與光合作用有效累積輻射時序變化 59
圖 57 二氧化碳垂直通量與光合作用有效累積輻射相關性-東石農場與霞雲測站 59
圖 58 日間 NEP 與 IPAR 時序變化 60
圖 59 日累積光合作用有效輻射與淨生態系統生產力關係 61
圖 60 年均全天空日照量(氣象站)與總初級生產力(MODIS)比較 62
圖 61 霞雲測站日間淨生態系統生產力與蒸發散關係圖 62
圖 62 霞雲測站日間與夜間淨生態系統生產力季節性趨勢 63
圖 63 霞雲測站日間與夜間淨生態系統生產力關係圖 63
圖 64 霞雲測站夜間淨生態系統生產力與夜間均溫關係圖 64
圖 65 霞雲測站夜間淨生態系統生產力與夜間蒸發散關係圖 64
圖 66 全台淨初級生產力 65
圖 67 2010 年福山、南澳、南仁山樣區 GPP、LAI 季節性變化 66
圖 68 中央氣象局氣象站分佈及全天空日射量(月平均)季節性變化 67
圖 69 永久樣區第一次及第二次調查期距間的蓄積量及碳吸存量 68
圖 70 Terra/Aqua-MODIS MOD15 A2 產品月平均 LAI 值標準作業流程 73
圖 71 2009/10-2012/9 逐月 LAI 時序變化(植群帶與國有林區交集) 74
圖 72 2010 年福山、南澳、尖石、棲蘭樣區葉面積指數時序性變化 75
圖 73 潮州、林內、玉山、南仁山樣區衛星影像、植群類別、以及 2010 年葉面積指數時序性變化 76
圖 74 2010 年柳杉、扁柏及紅檜、二葉松人工林葉面積指數時序性變化 77
圖 75 大農大富農場區位示意圖及參考林地土地利用圖 78
圖 76 2001 年至 2011 年大農大富農場及參考闊葉林地 LAI, Ra 79
圖 77 2001 年至 2011 年大農大富農場及參考闊葉林地 PSNnet 79

圖 78 大農大富農場及參考闊葉林地的 NPP 趨勢圖 80
圖 79 LAI-2000 植冠分析儀 80
圖 80 嘉義蘭潭及大雪山測區位置 81
圖 81 嘉義蘭潭及大雪山測區位置及測點分佈 82
圖 82 樣區規劃及植冠分析儀觀測範圍示意圖 82
圖 83 冠層空照圖-嘉義蘭潭樣區樣點 2 及大雪山樣區樣點 4 83
圖 84 嘉義蘭潭測區 SPOT 衛星影像及 NDVI 影像 83
圖 85 大雪山測區 SPOT 衛星影像及 NDVI 影像 84
圖 86 實測 LAI 趨勢比較(a)闊葉林與針葉林；(b)南向與西北坡向；(c)人為與未受人為干擾影響；(d)新生林地與 25 年林齡造林地 85
圖 87 竹林、防風林、針葉林、闊葉林、果園(柑橘、荔枝)、檳榔園葉面積指數實測點位及觀測成果 86
圖 88 影響植冠分析儀實測數據的測試 87
圖 89 葉面積指數現地量測點位 88
圖 90 葉面積指數實測與 MODIS 遙測值比對 89
圖 91 MODIS LAI 影像與同區域的高解析福衛二號影像 90
圖 92 數值地形模型與模擬陰影 90
圖 93 福衛二號影像 91
圖 94 (a)MOD13 原始像元值；(b)Pixel Reliability；(c)經篩選及像元值轉換後 NDVI 96
圖 95 植生指標及植生異常指標資料處理流程 97
圖 96 2012 年逐期植生指標資料中植生異常區域 97
圖 97 2001-2011 年逐年植生指標差異 98
圖 98 2007 年及 2011 年年度植生指標與 10 年期平均差異值 99
圖 99 2003、2007、2011 年 SPOT NDVI 100
圖 100 2003、2007、2011 年 MODIS 植生覆蓋比率 100
圖 101 2007、2009、2011 年各事業區綠蔽率 101
圖 102 2001-2008 年年度累積雨量 103

圖 103 2002 年乾旱事件所引發的植生異常 104
圖 104 單一像元基期 NDVI 及 2002 年 NDVI 的時序性變化.....104
圖 105 NDVI 差異值、植生異常指標、以及 NDWI 差異值.....105
圖 106 植生異常指標、累積降雨、2001 年時序 NDVI 資料標準差.....106
圖 107 林火分佈區域與事業區 108
圖 108 2012 年 7 月大埔事業區實地勘查.....109
圖 109 火災焚燒區域統計分析-海拔高度、坡向、坡度.....110
圖 110 火災焚燒區域統計分析-地貌類別.....110
圖 111 MODIS 火點偵測(2009/1/9-1/17)-阿里山林火.....111
圖 112 阿里山火災災前、災時 NDVI 影像及災時、災後假色影像 111
圖 113 阿里山林火災後植生異常指標影像.....112
圖 114 2009 年 MODIS NDVI 及基期 NDVI.....112
圖 115 阿里山火災事件點位 2001-2010 年 MODIS NDVI 時序資料.....113
圖 116 阿里山火災事件 SPOT 影像及 SPOT NDVI 114
圖 117 2011 年 8 月份阿里山火災實地勘查 114
圖 118 阿里山火災前後地表反射率變化 115
圖 119 阿里山火災前後日間及夜間地表溫度差異 116
圖 120 丹大山區火災事件 MODIS NDVI 及 VAI 時序資料.....116
圖 121 丹大山區火災事件 2004-2005 年 MODIS NDVI 及基期 NDVI 時序資料.....117
圖 122 丹大山區火災事件 SPOT 影像及 SPOT NDVI.....117
圖 123 丹大火災前後總初級生產力及葉面積指數變化.....118
圖 124 梨山火災 2009 年 MODIS NDVI 及基期 NDVI 時序資料 118
圖 125 梨山火災前後 SPOT 假色影像及植生指標影像 119
圖 126 (a)測試區域分佈；(b)森林資源調查(山區)及 SPOT 分類(平地)影像.....120
圖 127 (a)2007/1/29、1/30 HRV NDVI 影像(兩航帶影像)；(b)2007/1/29 MODIS NDVI 影像；(c)2007/1/30 MODIS NDVI 影像.....120
圖 128 MODIS 與 HRV NDVI 關係圖 121

圖 B-1 MOD17 每日總初級生產力及淨光合作用資料處理流程.....149
圖 B-2 低溫及蒸氣壓力差對最大光能利用效率產生之線性衰減.....150
圖 B-3 MODIS 總初級生產力(GPP)及淨光合作用(PSNnet)產品鏈結.....152
圖 B-4 MOD17 年度淨初級生產力資料處理流程.....154
圖 B-5 方位角及天頂角示意圖.....160
圖 B-6 LAI-2000 魚眼鏡頭天頂角方向觀測示意圖.....161
圖 B-7 MODIS NDVI-時間維度的二維矩陣.....162
圖 B-8 MODIS NDVI 雲區移除.....163
圖 E-1 教育訓練現場照片.....189

表目錄

表 1 碳吸存推估方法比較 22
表 2 2000 至 2010 年全台氣候分區 NPP 23
表 3 2000 至 2010 年全台各植群帶 NPP 單位面積量 27
表 4 2000-2010 年各林區逐年碳吸存總量及單位面積量 33
表 5 長期生態研究地 38
表 6 通量塔站架設點位及分布 42
表 7 地貌型態類別 69
表 8 嘉義樣區葉面積指數觀測成果 83
表 9 大雪山樣區葉面積指數觀測成果 84
表 10 大雪山測區在不同光照環境下的葉面積指數觀測值 86
表 11 葉面積指數現地量測與遙測資料比對 89
表 12 MOD13Q1 植生指標屬性資料 96
表 13 南部各事業區第二次永久樣區調查在各林型地貌的蓄積量統計資料 102
表 14 2009 與 2011 年南部各事業區裸露變遷區域在變遷前各土地利用型所佔面積 .102
表 15 2009 與 2011 年間南部各事業區裸露崩塌所產生的蓄積損失量 102
表 16 2000 to 2011 年偵測林火事件 108
表 17 NDVI 測試區域 120
表 A-1 2011 年 10 月至 2012 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 GPP 套色影像表 136
表 A-2 2011 年 10 月至 2012 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 PSN 套色影像表 137
表 A-3 2000 年 10 月至 2001 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 GPP 套色影像表 138
表 A-4 2001 年 10 月至 2002 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 GPP 套色影像表 139
表 A-5 2002 年 10 月至 2003 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 GPP

套色影像表 140
表 A-6 2000 年 10 月至 2001 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 PSN 套色影像表 141
表 A-7 2001 年 10 月至 2002 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 PSN 套色影像表 142
表 A-8 2002 年 10 月至 2003 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 PSN 套色影像表 143
表 A-9 2011 年 10 月至 2012 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD15 衛星產品各月份 LAI 套色影像表 144
表 A-10 2011 年 10 月至 2012 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD13 衛星產品各月份 NDVI 套色影像表 145
表 A-11 2011 年 10 月至 2012 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD13 衛星產品各月份 EVI 套色影像表 146
表 B-1 植生碳吸存估算相關名詞表.....148
表 B-2 生態群系參數對照表 150
表 E-1 教育訓練課程安排.....189

一、計畫目標

生態系統碳循環中,植物行光合作用,將水和二氧化碳轉化成氧氣與碳水化合物，減少大氣中二氧化碳的含量，並以碳水化合物的方式儲存於生物圈；自工業革命以來人類大量燃燒石化燃料，造成排放至大氣中二氧化碳快速增加；此外，全球人口增加亦改變了土地利用型態，森林面積急速減少，造成溫室效應日趨嚴重，全球氣溫逐漸升高，藉由不穩定同位素 ^{14}C 及 $^{13}C/^{12}C$ 測量資料，可觀察到人為因素造成的碳排放在大氣碳組成成分中比例逐漸增加的現象。依據 2001 年政府間氣候變遷特別委員會（IPCC）的預估，若無法有效減緩全球溫室效應氣體的排放，極端氣候發生的頻率會更趨頻繁，若不採取任何防治措施，2100 年時地表溫度將增加 1℃至 3.5℃，海平面將上升 15 至 95 公分。京都議定書中明定在 2008-2012 年工業化國家的溫室氣體排放總量，需控制到 1990 年的排放量再減少 5%的水準，以期減緩溫室效應惡化的速度。為履行京都議定書之承諾，各國除應積極發展再生能源，取代石化燃料外，林業方面應積極落實森林管理、造林與再造林等經營政策，提升森林碳匯之效能，並提出 1990 年以來造林、再造林、砍伐森林等林業活動所產生之溫室氣體排放及碳匯之數據報告供查核。因此，有關台灣地區森林碳吸存量資料之建立，是刻不容緩之任務。

森林健康是指森林生態系統對於乾旱、病蟲害、火災等外界壓力，具有一定抵抗能力之功能，以滿足人類對於森林生產木材、提供野生動物棲息環境、涵養水源、保固土石等功能之需求，簡言之健康森林可保持良好的生態特性和更新的狀態，發揮森林公益功能。而森林生長則觀測植生總生產量與總呼吸量間的關係，藉由兩者之間的消長，以指示系統處於生長發育階段、穩定階段或老化階段。藉由森林的生長與健康趨勢的監測與分析，可瞭解森林的發育情形，作為林業經營管理之依據與參考。

本計畫透過遙感探測之大面積、即時性與多光譜等特性，進行全台森林碳吸存量的推估與瞭解森林生長健康相關指數的變化趨勢，以建立長期的碳匯及森林生長健康監測資料；並進一步利用相關實地量測、現場調查資料與其他碳吸存研究成果，與遙測資料進行比較、驗證，作為台灣全島碳匯重要輔助資訊，提供林業及碳吸存相關議題政策研擬之參考，並作為林務局宣導造林、撫育及永續林業經營的重要依據。

二、計畫工作項目

全程工作項目：

1. 利用 Terra/Aqua-MODIS 衛星影像資料，建立 2000 至 2012 年間台灣全島、各地理氣候區及不同植群區之碳吸存變動趨勢資料。
2. 藉由二氧化碳通量相關研究資料、實地觀測資料或其他碳吸存相關研究資料，與 Terra/Aqua-MODIS 衛星推估之碳吸存量加以比較、驗證。
3. 利用 Terra/Aqua-MODIS 衛星產品，推估與森林生長、健康相關之常態化差異植生指標、葉面積指數及初級生產量等參數，分析台灣森林生長健康情況；並藉由現場調查資料，與衛星資料推估各指數之成果相比較、驗證。

本年度(2012 年)工作項目:

1. 蒐集 2000 年 10 月至 2003 年 09 月，共三年 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品，估算與分析台灣全島、各氣候區與植群區碳匯意義。
2. 蒐集 2011 年 10 月至 2012 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS 衛星產品，估算植生指數（Max NDVI & EVI）、葉面積指數（LAI）、初級生產量（GPP & PSNnet）等成果，並分析台灣全島森林生長及健康趨勢。
3. 利用二氧化碳通量相關研究成果、實地觀測資料或其他碳吸存相關研究資料，比對以衛星資料估算台灣本島上各氣候區及各植群類別之碳匯。
4. 利用現場調查收集之資料與遙測估算植生指數（Max NDVI & EVI）、葉面積指數（LAI）、初級生產量（GPP & PSNnet）等成果進行分析比較。並應用三年期各指數、兩年期現地調查與碳吸存相關研究資料的分析比較，提供較完整之碳匯、森林生長與森林健康成果。

三、期末成果概述

依循工作項目規劃，以下簡述森林碳吸存、生長分析及健康評估的執行內容:

1. 植生碳吸存估算：蒐集處理 2000 年 10 月至 2012 年 9 月 Terra/Aqua -MODIS MOD17 產品資料，完成台灣本島、各氣候區、植群帶、林區、地貌、以及特定人工林的森林碳匯評估，並藉由時序性的資料分析，瞭解總初級生產力、

淨初級生產力的季節性及年度間變化；並藉由整合通量塔台、氣象站、及遙測觀測數據，探討影響森林碳匯功能的可能因素。在地面驗證資料上，分析霞雲水文站、巴陵氣象站、東石農場、嘉義氣象站、北東眼山、棲蘭鴛鴦湖二氧化碳的時序性變遷，並進行通量資料律定及淨生態系統生產力、總初級生產力的推演，完成遙測成果的驗證；永久樣區蓄積量則作為遙測資料空間比對的基礎，本計畫蒐集彙整歷次調查成果，分析各地理氣候區及植群帶的碳儲存變化量及碳吸存量，評估遙測技術在森林碳吸存推估的應用效能及侷限之處。

2. 森林生長估算：藉由 2009 年 10 月至 2012 年 9 月各月份 Terra/Aqua-MODIS MOD15 葉面積指數產品的處理分析，瞭解各植群型態及特定人工林、平地造林的森林生長及葉面積變化情形。在葉面積指數實測上，本計畫分別於嘉義蘭潭及台中大雪山山區建立地面測區，透過可攜式植冠分析儀的應用，進行闊葉林、針闊混合林、針葉林、及初植造林地的每月實測，取得時序性的地面觀測資料。為驗證遙測推演的成果，本計畫建立遙測與地面資料的分析比對程序，透過多重地貌林型測區(包含天然林地、人造林地、防風林、竹林、果園、農作區等)的系統性取樣，完成遙測葉面積指數的比對驗證，並提出 MODIS 遙測產品在台灣地區森林生長分析應用的考量。

3. 森林健康評估：透過 Terra/Aqua-MODIS MOD13 產品 12 年期的植生指標分析，建立植生指數參考基準，藉此與歷年植生資料比較，探討森林健康與異常的擾動事件；計畫中並透過案例分析，探討林火、植生乾旱、山區崩塌等事件所造成的植生異常現象，以及擾動事件對森林碳吸存的影響；為驗證判釋出的擾動現象，研究中也透過氣象觀測、地面勘查、及高解析衛星影像的應用，輔助辨識擾動事件的類別，並藉此評估 MODIS 植生指標在森林健康監測的應用效能。

四、執行進度成果

在全球暖化的衝擊下，國際間已逐漸重視人類活動所造成的二氧化碳排放，以及氣候變遷對於生態環境的影響，由於森林資源特有的固碳能力，植林碳匯及森林碳管理為當前林業經營的重要課題;透過例行性森林生長、森林健康以及森林碳匯的監測，不僅能量化分析台灣現有的綠色資源，評估氣候變遷及環境污染對森林環境的衝擊，亦能提供國家溫室氣體排放清冊中有關林業碳匯移除量的參考資訊，以有效落實政府碳保存、碳吸存、以及碳替代的二氧化碳減量策略。

本計畫以美國地球觀測系統(EOS)系列衛星 Terra 及 Aqua 酬載的中級解析度成像分光輻射度計(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)資料產品作為森林碳吸存、森林生長及森林健康評估的所需資料來源。MODIS 感測器具有 36 個波段頻道，涵蓋可見光、近紅外、中紅光及熱紅外光，其多光譜、寬拍攝像幅及高再訪率的感測能力，使其相較於其他資源衛星能獲取更多地表植生的動態資訊，並透過美國地球科學事業(Earth Science Enterprise, ESE)的資料校正及系統運算，提供地表覆蓋、植生指標、地表溫度及熱異常、葉面積指數、光合作用有效輻射分量及植生初級生產力等陸域參數產品，作為學界後續應用及常態性森林生態觀測的資料來源。本計畫主要透過 MODIS 陸域產品(MOD17 GPP/PSNnet、MOD15 LAI/FPAR、MOD13 NDVI/EVI)時序性的資料分析，瞭解當前或歷年的植生綠度及其變遷情形，以作為林業碳管理及植林碳匯的評估依據。以下分別針對 MODIS 遙測產品在森林碳吸存、森林生長及森林健康評估的研究應用進行說明。

1 森林碳吸存估算

1.1 森林碳吸存研究的重要性與研究方法

1.1.1 二氧化碳增量與森林碳匯

全球氣候變遷與溫室效應之間存在著緊密關係，二氧化碳(CO_2)、水蒸氣(H_2O)、甲烷(CH_4)、氧化亞氮(N_2O)、臭氧(O_3)、氫氟氯碳化物(CFCs,HFCs,HCFCs)等溫室效應氣體將地表散發的熱能吸收，使大氣溫度保持於適合生物生長，但近年溫室氣體的急速增加，使全球氣溫也隨之升高，加速冰河消退以及海平面的上升；根據政府間氣候

變遷特別委員會(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)第三次評估報告(IPCC, 2003)，認定過去 50 年來全球暖化現象由人類活動所引起，若無法有效減緩全球溫室效應氣體的排放，預估 2100 年二氧化碳濃度將增加至 540-970ppm，全球地表溫度相較 1990 年將上升 1.4 -5.8 ºC，且北半球高緯度地區溫度上升幅度較大，陸域區域的暖化速率較海洋快；伴隨著全球暖化的結果，全球水文收支亦將受到影響，造成極端氣候發生的頻率增加。

在人為產生之溫室效應氣體當中，二氧化碳增量占最重要部份(Gurevitch *et al.*, 2002)，自 1970-2004 年間，二氧化碳排放增加了 80%；南極冰蕊(Etheridge *et al.*,1998)及 Mauna Loa 的氣體取樣(Keeling and Whorf, 2004)顯示，十八世紀工業革命前，二氧化碳含量保持穩定狀態，直到石化工業興起與土地利用型態變遷，大氣中二氧化碳含量開始顯著增加(Walker *et al.*, 2001)，由工業革命前二氧化碳混合比 275-284ppm(parts per million by volume)至現今約 390ppm，不穩定同位素 ^{14}C 及 $^{13}C/^{12}C$ 量測資料亦顯示人為導致之碳排放在大氣碳成分中的比例也逐漸增加(Butcher and Charlson, 1992)，故京都議定書明定各國的二氧化碳排放總量，需控制在 1990 年的排放水準，針對此全球性溫室氣體上升的趨勢，國際間對碳循環及碳儲存量的監測，亦投入了相當多的研究。

Schimel（2000）應用 BIOME-BGC、Century 及 Terrestrial Ecosystem Model（TEM）三種陸地生態系統模型進行模擬，研究氣候與二氧化碳濃度變化對生態系統之影響，研究顯示，1980 至 1993 年間，美國本土每年增加 0.08Gt (gigaton)的碳吸存，且多來自二氧化碳增量。Valentini *et al.*(2000)分析 EuroFlux 1996-1998 年 15 種森林類型的二氧化碳通量，其中 14 種類型呈現淨碳吸收，且淨吸收量與緯度變化呈現線性關係，主要由於北方的暖化速度高於南方，且蘊藏著龐大的土壤有機碳庫，此土壤呼吸作用的上升造成碳排放的增加及碳吸存的減少。在台灣，環保署委託工業技術研究院辦理台灣地區溫室氣體排放量統計，依據 1996 年 IPCC 國家溫室氣體清冊規範，估算各部門(能源、工業製程、農業、土地利用改變與林業、廢棄物) 1990-2008 年度溫室氣體排放，其中 2008 年總溫室氣體排放量為 306,283.74 千公噸 CO_2 當量，扣除林業碳匯與土地利用改變的 19807.33 千公噸 CO_2 當量(6.47%)，淨溫室氣體排放量為 286,476.41 千公噸 CO_2 當量，為 1990 年(132,988.19 千公噸 CO2 當量)的 2.15 倍，顯示台灣地區的溫室氣體排

放雖已趨緩，但仍逐年上升中，與京都議定書預期的溫室氣體減量成效仍有落差。由於森林具有將二氧化碳轉換成本身生物量的功能，可減少大氣中二氧化碳的含量，為陸域生態系統中最大的碳庫，故森林的碳吸存及減碳功能逐漸受到各界重視。聯合國氣候變化綱要公約(UNFCCC)正式將造林與再造林活動(Afforestation and Reforestation)納入京都議定書中的清潔發展機制(Clean Development Mechanism)項目中，明定各公約締約國的碳排放交易權，以及森林對二氧化碳的吸存與排放淨值(邱祈榮等，2010)。在台灣地區，二氧化碳佔總溫室氣體排放量的 91.49%(2008 年)，藉由林業活動參與溫室氣體減量，妥善利用台灣地區 58.53%的森林覆蓋資源，強化造林政策以降低大氣中的二氧化碳濃度，已成為未來永續發展的重要課題，期能藉此達到持續經濟發展與溫室氣體減量的雙贏目標。

1.1.2 森林碳匯研究方法

在植生碳吸存的估測上，可藉由實地生物量的取樣、通量塔台觀測、模型推估、及遙測技術等多種方法進行估測，在研究尺度及應用層面上皆有差異。實地取樣係依據生態植群的不同，藉由光學量測、樹徑測量、相對生長分析(allometry)，落葉收集、及農作物收割等方式以量測或估算地上(aboveground)及地下(belowground)部的淨初級生產力(ANPP、BNPP)，此方式提供生態系統最直接之碳吸存量測量，但相對人力及時間成本較高，地下根莖主要藉由相對生長式，透過迴歸分析的方式進行生物量推估，較缺乏實測數據(Reich *et al.*, 1999)，且由於缺乏生態系統自營性及異營性呼吸量測，所量測主要為淨初級生產力。

台灣地區有相當豐富的森林資源，依據林務局第三次森林資源及土地利用調查(林務局，1995)，台灣森林覆蓋面積高達 2,102,400 公頃，蓄積量達 358.7 百萬立方公尺，不少專家學者針對台灣森林的碳匯功能進行估測，透過森林資源調查所建立的林木蓄積資料庫，或藉由衛星影像分析森林覆蓋面積，推估台灣森林每年可吸存約 4.08-6.90 百萬公噸碳量，約相當於 14.96-25.30 百萬公噸的二氧化碳(王立志，1996；楊榮啟等，1998；林裕仁等，2002；王義仲，2003；邱祈榮等，2006；林俊成，2007)；由於各研究所估算的碳吸存年代不同，引用的生長率資料不一(第二次、第三次森林資源調查或林務局[台灣地區林木資源之生長及枯死]調查資料)，估算模式也有差異，造成生物量

推估成果的落差，但皆證明了森林資源對二氧化碳減量的貢獻。

通量監測塔站應用氣旋共變異法(eddy-covariance method)，計算二氧化碳、水氣及微量氣體之流通量為風速之共變異數，透過森林生態系統的微氣象觀測，淨生態系統碳交換(NEE)、自營及異營性呼吸(Ra+Rh)、總初級生產力(GPP)可據以估計，提供場地尺度近連續性之觀測(Curtis *et al.*, 2002)。理論上，為避免過多對流產生造成通量之不連續性，塔站週遭需為大範圍的平坦地形，並由均質的植被層所覆蓋。其觀測範圍則受風速、大氣穩定性以及塔台高度等影響，一般約介於 100-1000m 之間(Baldocchi *et al.*, 1996)，故氣旋共變異法較適合於平坦地形應用，在具有地形起伏及豐沛對流之山區地形，其應用則較不適當；在國際間，通量塔站(flux tower)組成一全球性之通量監測網 Fluxnet，例行觀測大氣及陸域生態系間二氧化碳、水氣及微量氣體之動態情形，其主要任務為對全球主要的陸域生態系統，進行長期之通量監測，並建構一標準資料平台以利觀測資料的流通，及相互間的比對分析，目前全球已有多個區域性的通量監測網路，如 AmeriFlux、AsiaFlux、CarboEurope、OzFlux (Australia、New Zealand)(Fluxnet, 2003)。在台灣地區，目前亦有數個塔站進行森林環境二氧化碳的通量觀測，包含位於長期生態研究試驗地的棲蘭鴛鴦湖(2005 年 4 月開始觀測，具有雙塔站)、惠蓀林場北東眼山(2007 年 10 月開始觀測)、南投蓮花池(2009 年開始 CO_2 觀測)、屏東潮州平地造林地(2008 年開始觀測)(王亞男，2009)、溪頭台大實驗林(2009 年設站)，以及藉由移動式塔站對不同生態環境所進行的短期通量研究，提供林分尺度近連續性的二氧化碳觀測(圖 1)。

圖 1 台灣二氧化碳通量塔站分佈

相較於實地取樣及通量塔台觀測，遙測技術能以較經濟的方式，在短時間內提供大範圍尺度的地表觀測資訊，彌補單點量測在空間上的不連續性。在碳吸存及碳儲存量的研究上，大致可區分為林分的蓄積量推估，以及藉由植生對光譜能量的吸收情形，反演碳吸存及排放等兩種推估方式。光達(LIDAR)由於具有穿透林分與多重回波的特性，透過準確的三維空間定位能力，能獲取地形、樹高、孔隙等森林測計因子，可應用於森林材積及蓄積量的推估，提供林業單位經營管理的評估依據；碳吸存的另一研究方法則藉由探討綠色植生的光合作用，評估吸收輻射量(APAR)及總初級生產力(GPP)的相互關係，進而推估碳吸存速率，由於各植生種類的吸存、排放比率及生長約制因素皆有所不同，在實際應用上，常需結合廣泛的生態研究，以進行適時適地的推估。

模型估測提供另一途徑估算初級生產力及碳儲存量，生態系統模型乃模擬生態系統中能量、養分及微量元素的循環過程，透過生態系空間區位、生化、及氣象因子等數據條件，以推估生態系統產出。由於生態過程複雜且交互影響，模型推估的準確性取決於模型設計是否針對不同尺度，考量其生態機制及約制因素(Churkina *et al.*, 2003)，故一完整模型需要廣泛基礎實驗研究以作為參考依據。而模型推估之優勢在於能彌補實地量測在時間及空間尺度上的不連續性(Turner *et al.*, 2005)，通量塔台觀測及現地調查雖提供場地尺度二氧化碳通量數據，與遙測推估值進行驗證，但侷限於小區域內單點或多點之測量，而實地取樣在時間尺度上常呈現不連續性；相對而言，衛星遙測能在瞬間提供廣泛空間尺度的觀測，與實測資料在時間及空間的尺度皆存有落差，實證模型則能提供連續性的推估資料，彌補實測與遙測推估在資料尺度上的不對稱性，作為遙測資料有效的驗證途徑，且可對生態系統未來的生態過程及狀態進行預估。

1.1.3 國家層級的森林碳匯研究及遙測應用-以加拿大、澳洲、及日本為例

為有效減緩全球暖化，回應聯合國氣候變化綱要公約(UNFCCC)中各公約締約國對溫室氣體排放削減的承諾，加拿大政府設立國家森林碳監測、測計及報告系統(National Forest Carbon Monitoring, Accounting and Reporting System, NFCMARS)(圖 2)，整合來自森林資源調查(forest inventories)、臨時性及永久樣區、森林火災與病蟲害及森林生長計量系統等相關資訊，以估測及監測森林碳匯、碳匯變遷及非二氧化碳的溫室氣體排放，並藉由對未來森林擾動及管理措施方案的評估，預測碳匯在未來 20 至 30

年的改變。系統主要架構包含碳收支模型(Carbon Budget Model-Canadian Forest Sector, CBM-CFS)、土地利用改變監測(Tracking Land-Use Change)、森林管理與干擾監測(Forest Management and Disturbance Monitoring)、森林資源、生態資源空間資訊管理架構(Spatial Framework)、以及其他非常態性計畫(NFCMARS, 2009)。

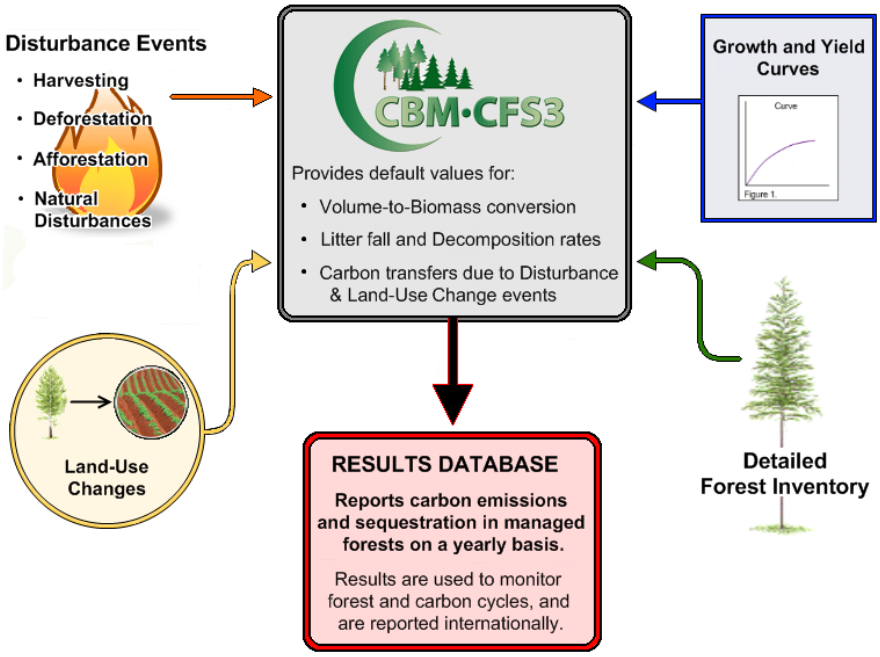


圖 2 加拿大國家森林碳監測、測計、及報告系統架構(資料來源 : NFCMARS)

遙測在此系統的應用仍屬先導型研究(pilot study)階段，主要為提供碳收支模型(CBM-CFS)所需的資訊，透過當前及歷史遙測影像的分析，提供包含地表覆蓋、火災及病蟲害等自然性擾動、土地管理及混農林業經營措施、土地利用改變(植林、再造林、毀林)的空間資訊。此先導型計畫目前在 Prince George (BritishColumbia)執行，主要目的為整合遙測研究及碳收支模型，將 CBM-CFS 由單點式的模擬推估擴展為分散式空間碳匯資訊的提供，以有效提升 CBM-CFS 在多樣環境及不同空間尺度下的應用效能。

澳洲政府於 1998 年設立國家碳計量系統(National Carbon Accounting System, NCAS)(圖 3)，主要對人為土地利用引發的溫室氣體(二氧化碳、甲烷、氧化亞氮)排放移除進行估測。由於森林與農作的生長週期、氣象、土壤、土地覆蓋變遷，以及土地經營方式皆為準確測計的重要因素，此系統彙整分析氣象(每月降雨、溫度、濕度)、土壤(土壤類型及土壤碳匯)、植生物種分布、土地經營模式等空間資訊，蒐集自 1972

年以來數千幅的衛星影像，分析長期土地利用型態及土地利用改變，並結合生態系統模型 Full Carbon Accounting Model(FullCAM)的運用，建立聯合國氣候變化綱要公約(UNFCCC)及京都協定下所需的國家溫室氣體排放清冊，並對未來的排放趨勢進行預測。為有效推廣此計量系統，NCAS 發展提供 National Carbon Accounting Toolbox (NCAT)，以方便使用者對特定地區的溫室氣體排放及移除進行分析追蹤(NCAS, 2010)。

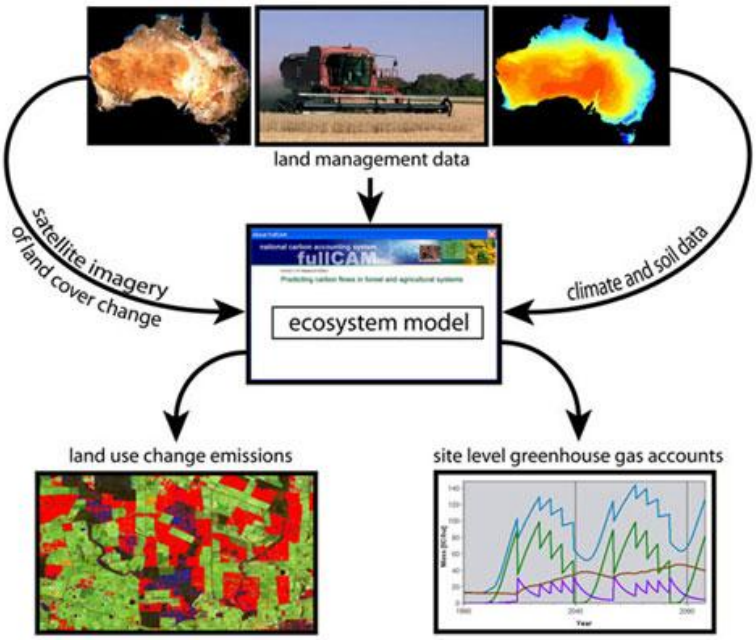


圖 3 澳洲國家碳計量系統架構(資料來源 : NCAS)

在澳洲 NCAS 的模型概念下，FullCAM 為其架構核心，透過國家資源，整合多重觀測平台的空間資訊，提供生態系統模型所需的輸入參數，並作為後續科學驗證的基礎。遙測在此系統所扮演的角色，為透過長期 Landsat 衛星影像的時序分析，提供全國尺度 25m 空間解析力的地表覆蓋資訊，並對土地利用變遷進行長期監測。

日本於 2002 及 2005 年分別制定「地球暖化對策推進大綱」及「京都議定書目標達成計畫」，明確設定森林碳吸存對溫室氣體減量所需達成的目標，並由國立環境研究所(National Institute for Environmental Studies, NIES)推行森林碳監測系統(The Forest Carbon Monitoring System, FCMS)(圖 4)，藉由 ALOS 衛星影像及 Plot Network database 的森林資源清查數據，配合生態系統模型 Vegetation Integrative SImulator for Trace

gases(VISIT)的應用，提供國際碳監測系統所需的碳匯資訊。VISIT 為一生物地球化學碳循環模型，以 Sim-CYCLE (Ito and Oikawa, 2002) 為主要模型基礎，整合了地球系統中水文循環、碳循環(CO_2)，以及微量氣體 (CH_4 、N_2O)的推估，從生物化學的角度，模擬由單一點位擴展至區域尺度的淨二氧化碳交換。

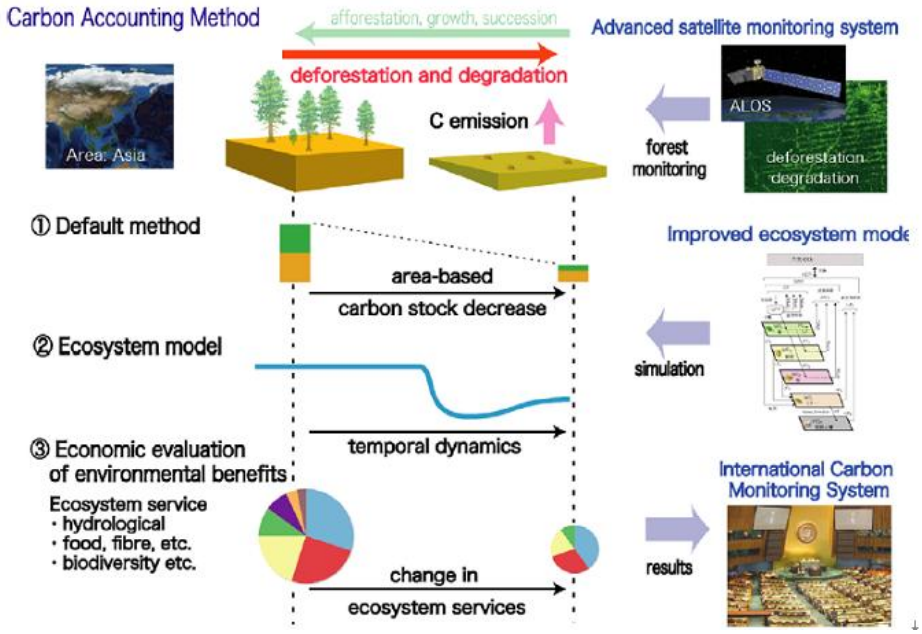


圖 4 日本森林碳監測系統(FCMS)架構(資料來源 :NIES)

以國家資源發展的溫室氣體或碳測計系統，多以聯合國 IPCC 國家溫室氣體清冊指南，及 LULUCF 良好作法指南(Good Practice Guideline for Land Use, Land Use Change and Forestry)為主要依據，UNFCCC 要求各締約國採用 LULUCF 的估算方法，進行各國土地利用及林業碳排放及碳移除的估算，在清潔發展機制(CDM)中，亦明確界定植林碳匯的基線方法學及適用範圍，故各國的測計系統多以此為出發，以傳統森林資源及土地利用調查為基礎，結合不同的生態系統模型，以對廣大國土範圍及未來的變化趨勢進行估測及預測。遙測在此架構所扮演的角色，則主要定位為提供模型估測所需的空間參考資訊；事實上，針對國家層級廣大領土的森林環境，遙測為空間尺度連續資料的唯一來源，除了提供長期土地利用的資訊，遙測能進一步整合生態模型或地面生態實測，提供森林生物量(biomass)、森林生產力(productivity)與碳吸存、森林覆蓋度等資訊，作為國家溫室氣體清冊中有關森林碳匯分布及二氧化碳移除的科學數據，並可與生態模型的測計成果進行比較，以提供多元及不同時空尺度的觀測平台。雖然目

前相關理論在台灣森林的應用仍在基礎研究階段，但透過後續不同觀測平台碳匯資料的整合分析，相信能對遙測技術在碳吸存研究領域的應用效能，提供更好的詮釋；以下對遙測碳吸存資料(MOD17)的分析流程進行說明，相關理論基礎則於附錄 B.1 中詳述。

1.2 MODIS 初級生產力演算

1.2.1 MOD17 產品介紹及資料分析流程

MOD17 A2 為 Terra MODIS 全球性初級生產力產品，包含 GPP、PSNnet 及 QA 等資料，具有 1000 公尺空間解析力及 8 日的資料週期，資料命名以各週期的首日來表示，例如 001(1/1-1/8)、009 (1/9-1/16)、...等；在座標格式上，採用 Sinusoidal 投影(圖 5)，及 HDF-EOS 的儲存格式。為常態監測台灣地區的森林碳匯，本計畫建立 MODIS 資料標準作業流程，在資料處理上，依序進行投影座標轉換、資料格式轉換，以及台灣本島區域的資料萃取，並將原始像元資訊轉換為 GPP/PSNnet 數值，透過 Science Data Sets 中的 Quality Assurance(QA)資訊，進行資料像元的篩選，剔除受到雲層干擾，以及屬於都市建物、溼地、水體、裸露區、冰雪層覆蓋的區域，以作為後續初級生產力分析的所需資料；此外，為降低雲層遮蔽的影響，提供全島的碳匯資訊，GPP/PSNnet 以月累積值演算輸出(圖 6)，在雲層覆蓋無演算數值的區域，則以前期資料替補。

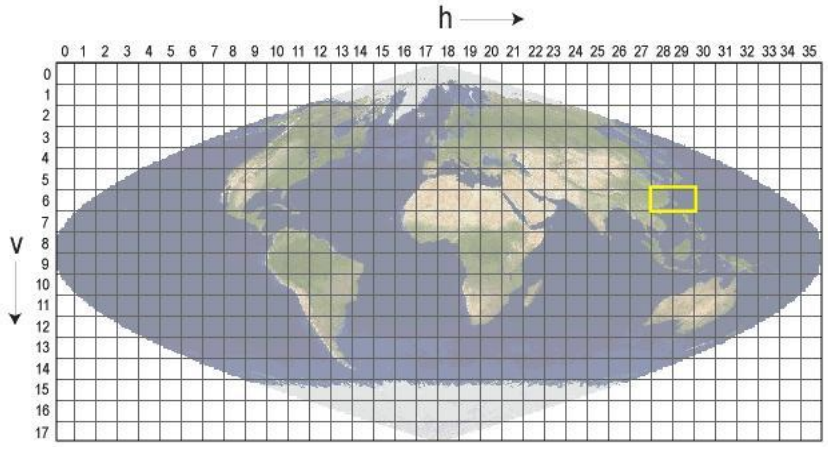


圖 5 Terra/Aqua-MODIS sinusoidal 網格分布圖

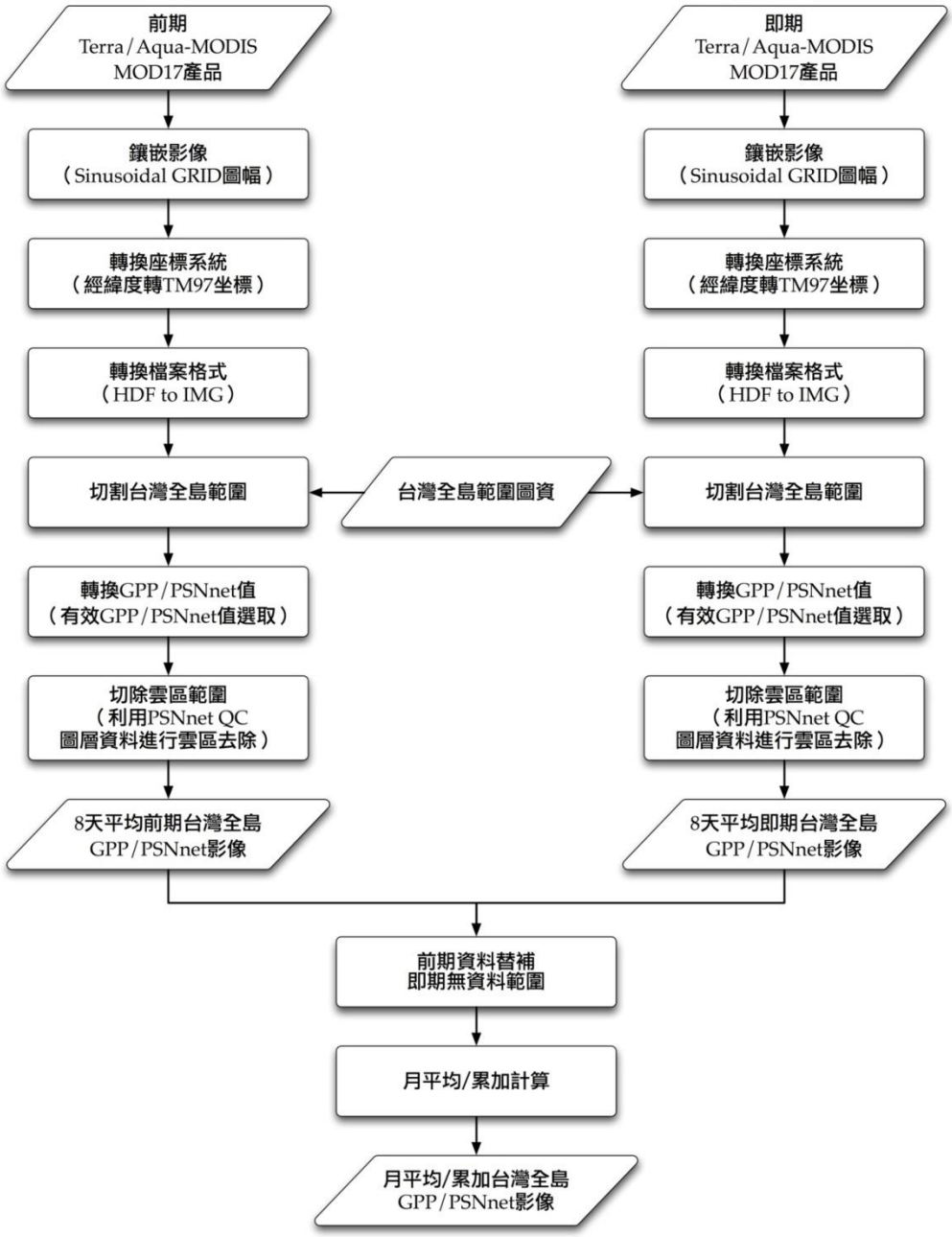


圖 6 MODIS 初級生產力產品處理標準作業流程

1.2.2 遙測植生初級生產力資料分析成果

1.2.2.1 2000/10-2012/9 台灣全島、氣候分區、植群帶逐月 GPP 及 PSNnet 時序變化

衛載遙測由於具有穩定的軌道週期，能提供常態規律的地表觀測資訊，透過多時期的資料分析，不僅能瞭解地表參數的空間性差異，亦能掌握時序性的變遷。圖 7 顯示 2000-2012 年台灣全島總初級生產力及淨光合作用的逐月變化，包含天然植群帶及人為作物區的綜合影響；整體而言，每年 12 月至隔年 1 月間的生產力最低，主要受

到低日照及生長條件約制的影響；生長季大致於 2 月中旬開始，農作區的耕作期也大致於此時展開，造成 GPP 及 PSNnet 明顯的上升，但由於生物量仍低，植物維持生理機能所需的呼吸排放較低，故 GPP 及 PSNnet 的差異不大；隨著日照時數提高，以及植物葉面積的增長，植生所能利用的光合作用吸收輻射(APAR)也逐漸上升，在 6-7 月底時 GPP 達到高峰，但由於自營性呼吸成本已較先前高出許多，故 GPP 及 PSNnet 產生較明顯的差異，相對而言，淨光合作用約在春季的 3-5 月份即達到最高，植生葉面積及生物量也在生長季初期迅速增長。

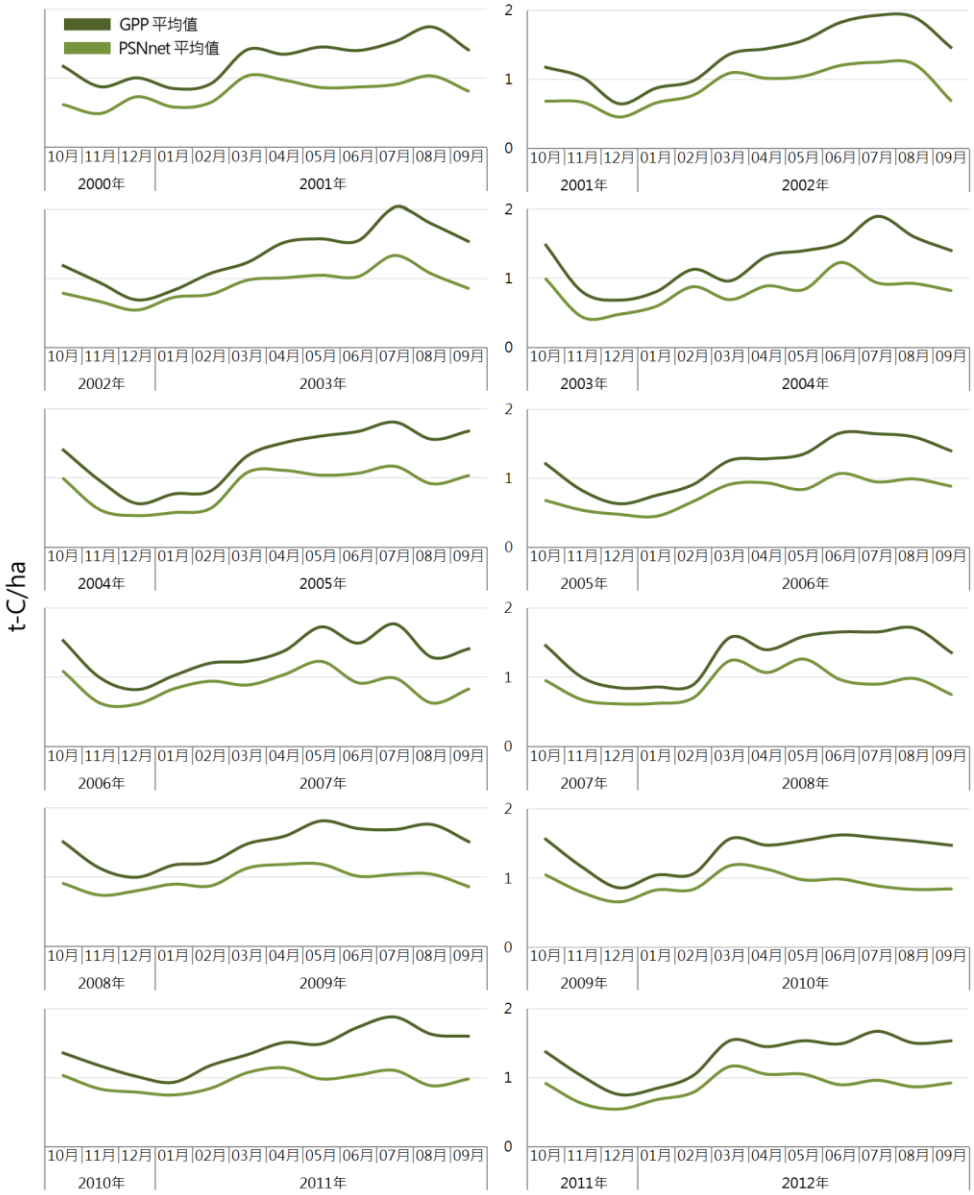


圖 7 2000/10-2012/9 台灣全島 GPP 及 PSNnet 逐月平均值之時序變化

蘇鴻傑(1992)以降雨量的季節性變異，將台灣本島區分為 7 個地理氣候區(圖 8)，在不同的氣候條件及生長環境下，森林生態系的碳匯能力及動態變化為一值得探討的課題；圖 9 呈現國有林區內各地理氣候區 2000-2012 年 GPP、PSNnet 逐月的變化(為降低人為因素，反應植群自然的生長狀況，故排除非國有林區域的演算)，在 7 個地理氣候區中，SE 區由於充足的日照、適當的雨量，且以低海拔闊葉林為主要林相，呈現出較高的 GPP，但也由於葉面及細根生物量較高，需要較多的自營性呼吸以維持生理機能，二氧化碳的排放也較高，故相較於 GPP，PSNnet 與其他地理氣候區的差異較小。以逐年資料來看，各地理氣候區最大的固碳差異發生在冬季，此時北部 NE 及 NW 區受東北季風的影響，天候較不穩定，冷濕的天氣型態造成入射輻射及吸收輻射量偏低，而南部 SE、SW 區暖溫的天候狀況使森林生長的約制因素較不明顯，造成南部及北部碳匯能力的落差；在夏季生長高峰時，太陽鄰近北迴歸線，負責光合作用的植株葉面積亦達到最高，各區間除了 SE 區以外，GPP 及 PSNnet 沒有明顯的差異，而 SE 區的高生產則與組成林相及高日照量有關。

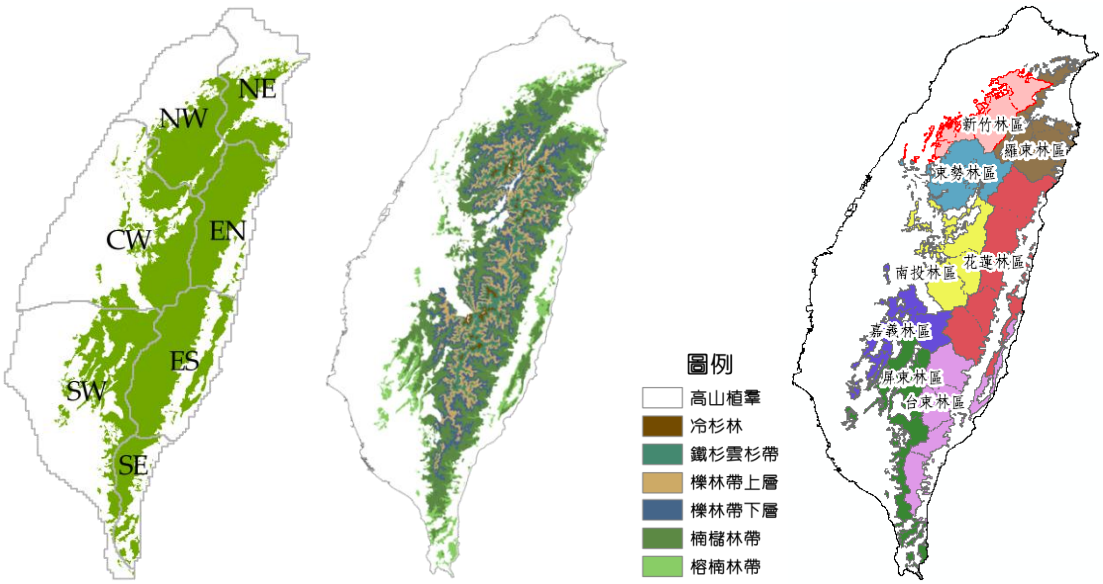
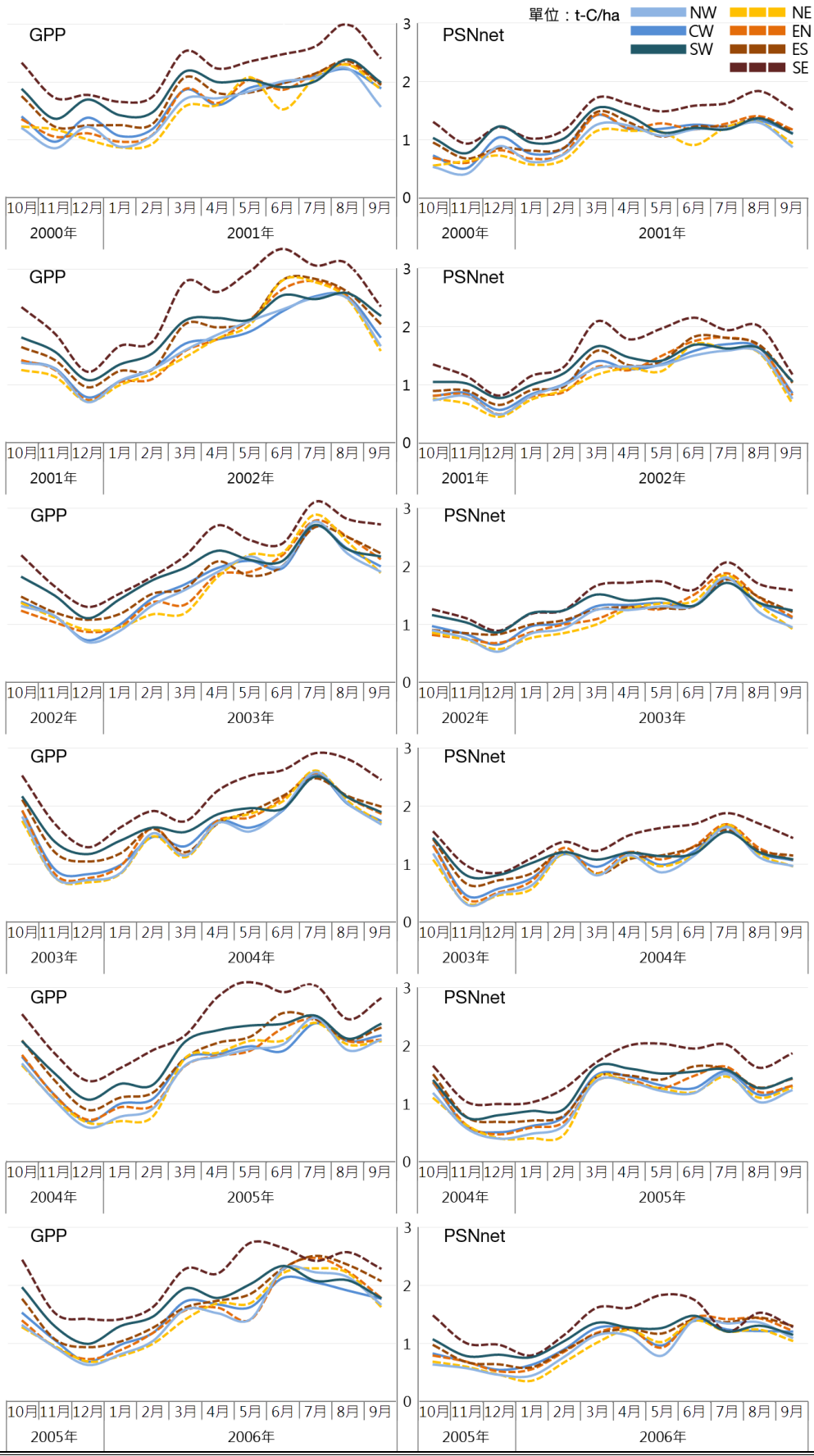


圖 8 台灣全島各氣候區、植群帶(與國有林區交集)、及林區分布圖


單位：t-C/ha
NW
CW
SW
NE
EN
ES
SE
GPP
PSNnet
3
2
1
0
10月 11月 12月 1月 2月 3月 4月 5月 6月 7月 8月 9月
2000年
2001年
2002年
2003年
2004年
2005年
2006年

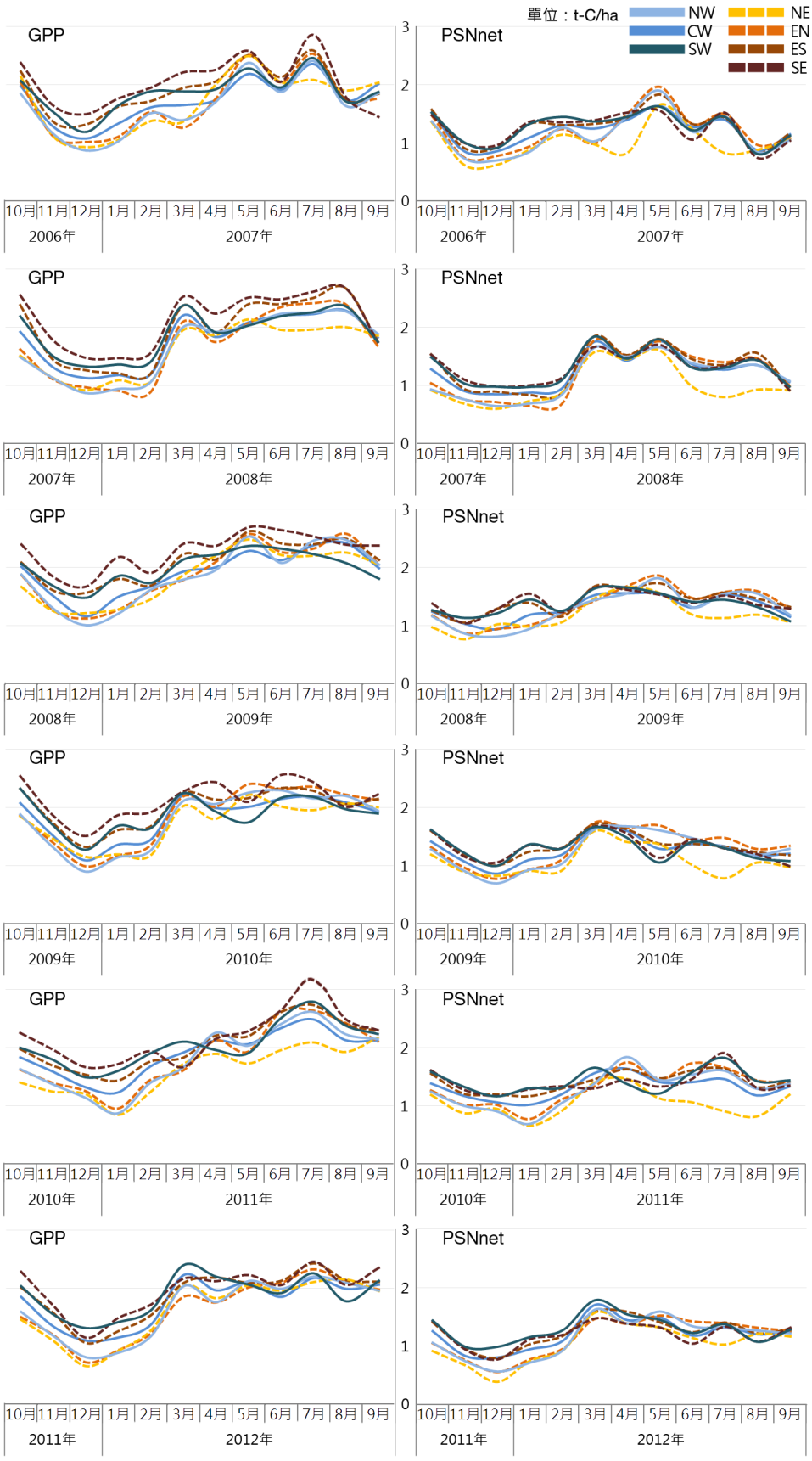
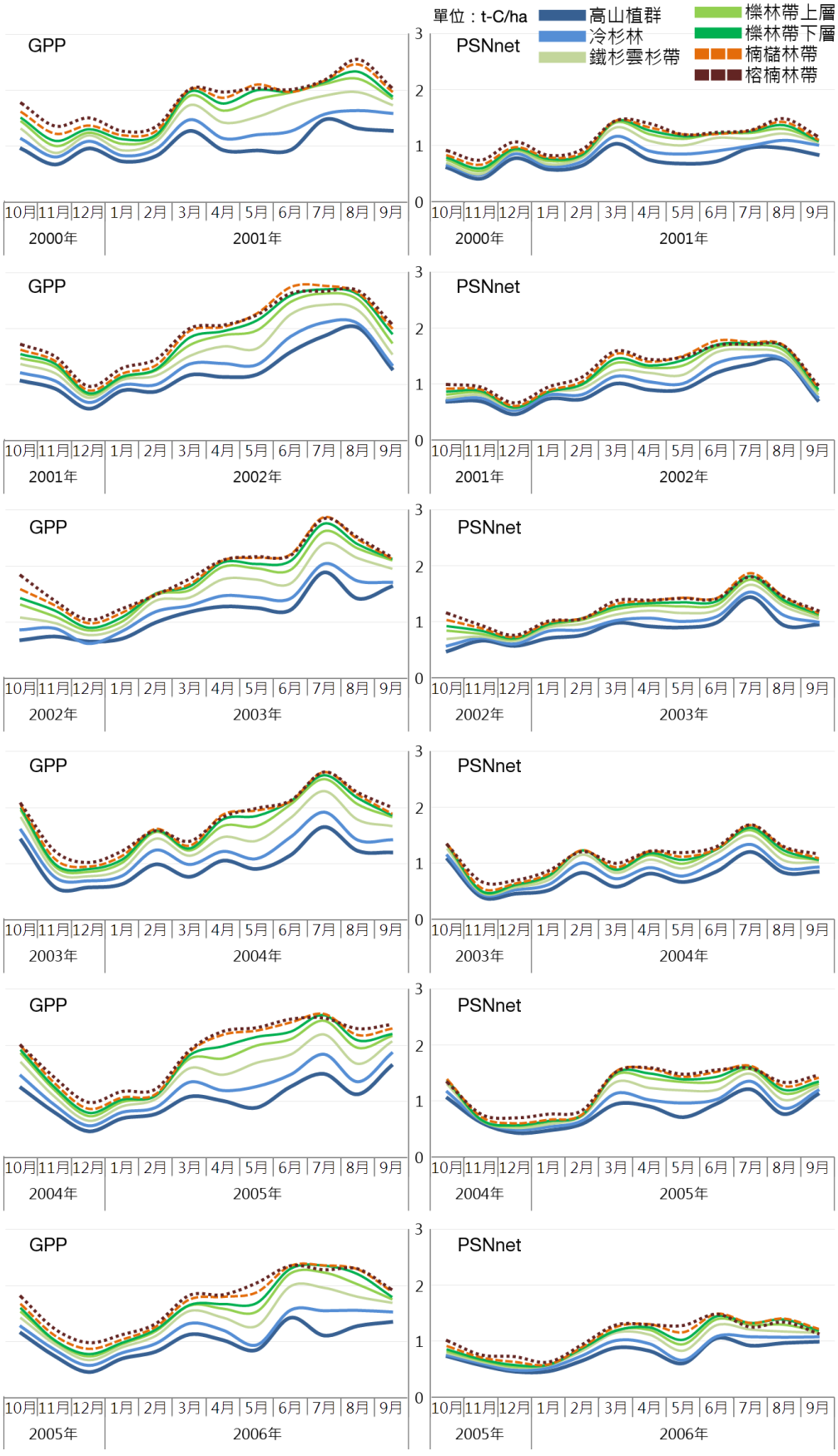


圖 9 2000/10-2012/9 逐月 GPP 及 PSNnet 時序變化(氣候分區與國有林區交集)

亞熱帶氣候的台灣地區，原本控制植物生長的降雨、溫度等控制因子並不明顯，但由於高度的急遽落差，造成最低溫及有效累積溫度的明顯差異，以及垂直林相的歧異度。以植群帶分析森林的碳匯功能，不僅能均化地理氣候差異對植群的影響，也能檢視 MODIS GPP/PSNnet 的演算方法；圖 10 為 2000-2012 年各植群帶(榕楠林、楠儲林、櫟林帶下層、櫟林帶上層、鐵山雲杉林、冷杉林、高杉植群帶)GPP、PSNnet 的逐月變化，在 7 種植群帶中，高山植群及冷杉林帶(Abies zone)、鐵杉雲杉林帶(Tsuga-Picea zone)等針葉林相呈現較低的初級生產力，榕楠林、楠儲林、櫟林帶下層則維持較高數值，會有此落差，與不同林型植株冠層的葉面積及光能利用效率差異有關。由於 MOD17 以植群帶作為生態群系對照表中的參考依據，依此推求各植群的最大光能利用效率，以及蒸氣壓差、低溫等約制因子對光合作用效能產生的影響，故各植群帶 GPP 及 PSNnet 呈現近似等比例的變化趨勢，；在此對照表中，最大光能利用效率為一常數，不隨時間地域而改變，僅受日低溫及水勢壓力的約制，故在亞熱帶氣候的台灣，光能利用效率的變化較不明顯，造成各植群 GPP 及 PSNnet 呈現等比例的變化；而在植群帶的劃分中，MODIS MOD17 著重於全球運用，採用 University of Maryland 的全球地貌分類，包含針葉林、闊葉林、混合林、草生地、作物區等台灣山區主要的植生類別，與台灣生態研究常引用的植群劃分稍有不同，難免忽略了地區性的歧異度。


單位：t-C/ha
高山植群
冷杉林
鐵杉雲杉帶
檫林帶上層
檫林帶下層
楠櫧林帶
榕楠林帶
GPP
PSNnet
0
1
2
3
10月 11月 12月 1月 2月 3月 4月 5月 6月 7月 8月 9月
2000年
2001年
2002年
2003年
2004年
2005年
2006年

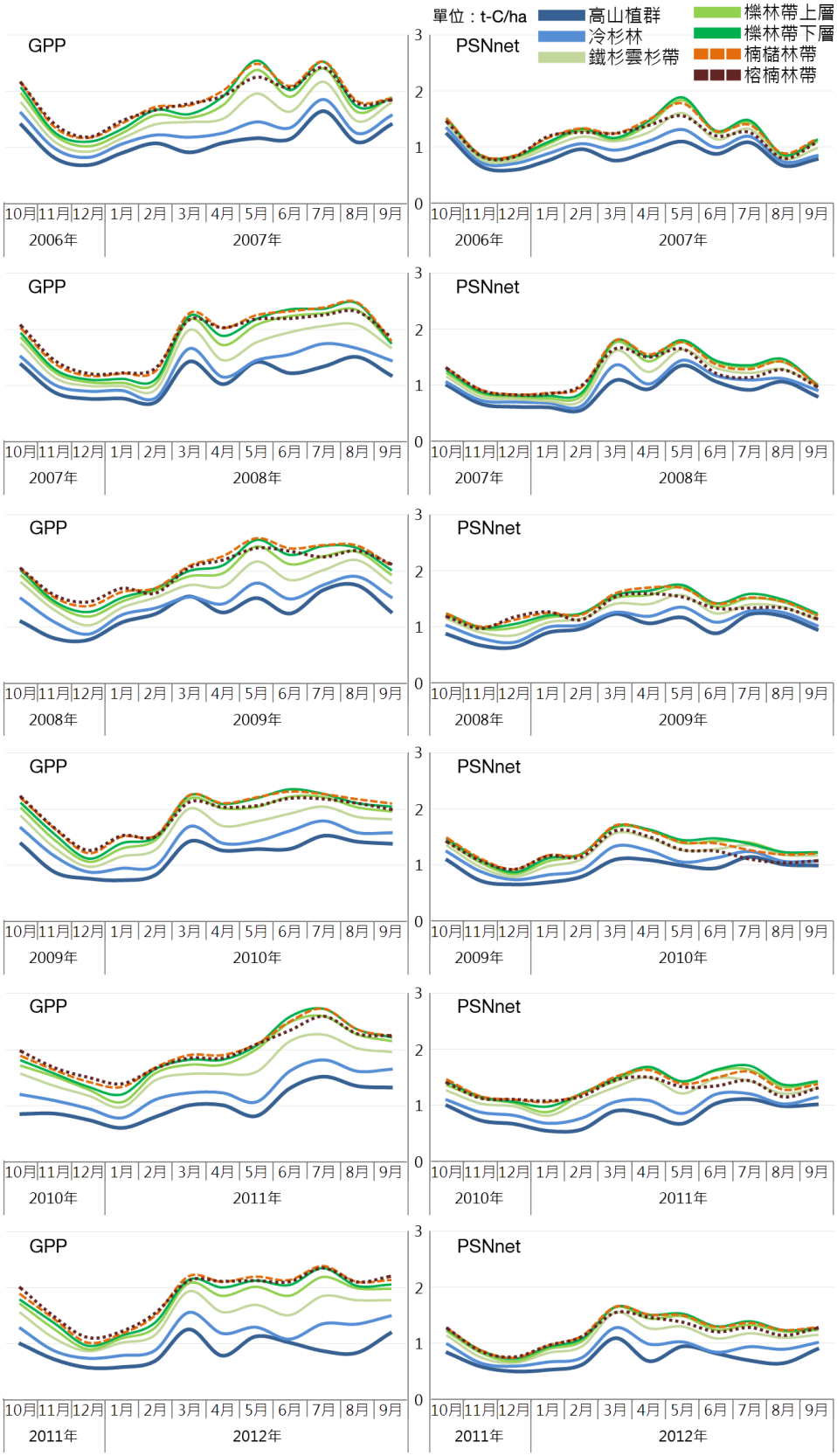


圖 10 2000/10-2012/9 逐月 GPP 及 PSNnet 時序變化(植群帶與國有林區交集)

1.2.2.2 全台逐年 NPP 變化

透過遙測資料長年例行的淨初級生產力估測，分析不同林型及地貌的碳匯效能，能提供國家溫室氣體排放清冊中有關林業碳匯移除量的統計資訊，作為林業政策或碳管理的參考依據。圖 11 顯示台灣歷年全區的 NPP 總量，包含林地、草生地、農地作物、以及濕地上所有草本、木本植物的貢獻，可視為植生光合作用及呼吸作用後所產生的碳吸存量；在 11 年的觀測期中，2009、2010 年的碳吸存量最高，介於 29.6-29.9 百萬公噸，約相當於 108.5-109.6 百萬公噸的二氧化碳吸存量，其次則為 2002-2004 年的 26.2-26.5 百萬公噸碳量(相當於 96.1-97.2 百萬公噸的二氧化碳)，比較高碳吸存(2010 年)及低碳吸存(2000 年)的年份，落差可達到 7.7 百萬公噸碳量。

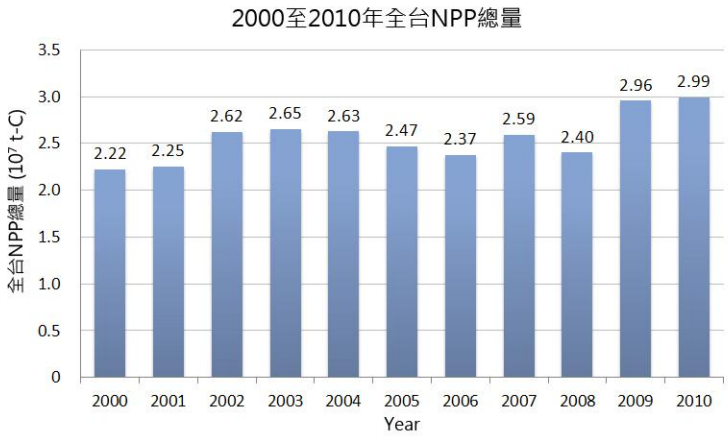


圖 11 2000 年至 2010 年全台 NPP 總量

以遙測方式估測植生碳吸存，不僅能進行短期距的分析，也能提供全台範圍內任一點位的碳匯資訊，本研究以 MODIS NPP 資料進行全台碳吸存量演算，2000-2010 全台每年可吸存約 22.2-29.9 百萬噸碳量，其中國有林地的碳吸存比例約佔 53.54%。國內目前已有諸多研究進行森林碳吸存的估算，但相較而言，多透過林木蓄積量的實地量測成果進行推估，其估算主要透過兩種方式，其一如永久樣區的調查方法，進行同測區的複查，另一則透過生長曲線式的配置，配合單次系統取樣的量測成果，進行大範圍區域的逐年碳匯估測；雖然各研究所估算的碳吸存年代不同，引用的生長率資料不一，估算模式也有些許差異，造成生物量推估成果的落差，但綜合而言，年度碳吸存量約介於 4.08-6.90 百萬噸之間；由此可知，遙測與林木蓄積量的估測成果在量級上具有相當的差異，遙測資料約為蓄積量推估資料的 3.2-7.3 倍，會有此顯著的差異，則與

兩方式的涵蓋區域範圍、涵蓋植生種類、以及推估方式的差異有關(表 1)；以遙測進行推估，主要藉由植生對太陽光源的光譜反應，不論植生為木本、草本、或灌木，由於皆有相同的光合作用效能，例如反射近紅外光，吸收紅光及藍光的特性，遙測即藉由反射光譜的接收，配合其地貌類別，推估植生光合作用生產力；相對而言，以林木蓄積的方式推估，則主要針對立木進行，未針對草本、作物、灌木、甚至較小胸徑的立木進行量測，故遙測與地面實測所針對的植被種類即有落差；此外，傳統碳吸存量估測多以立木蓄積的淨增長量來表示，但木質部的淨增長量其實僅為植生碳吸存後其中的一種呈現方式，其他如植株葉面的增長，以及生長過程中枯死的部分幹材與枝葉，雖同為森林碳庫的一分子，且為碳吸存的實際產出，卻不在淨增長量的論及範疇；以估算範圍而言，林木蓄積的推估主要仰賴國有林地的取樣成果，國有林之外的森林碳匯較難於森林資源調查中進行全面性的普查，故以林木蓄積方式估算，其實是以較為保守的方式，來評估植生碳吸存的效能，實際植生所產生的碳庫，遠大於材積的淨增長。

表 1 碳吸存推估方法比較

碳吸存推估方法	遙測	地面量測
推估範圍	全台	以國有林地為主
植生種類	所有綠色植生	木本植物為主
推估方法	光合作用淨初級生產力	淨蓄積增長量

1.2.2.3 各地理氣候區逐年 NPP 變化

透過長年遙測資料的彙整，除了能探討全台碳匯，也能對各地理氣候區的逐年變化進行瞭解。圖 12、表 2 顯示各地理氣候區每單位區域面積逐年的 NPP，除了呈現各氣候區相互間的差異，也呈現各氣候區逐年間的變化；在長達 11 年的觀測資料中，碳吸存量大致由南向北逐漸遞減，南部的 SE、SW、ES 區由於充足的日照，在單位區域上產生較高的初級生產力，亦即較高的碳匯效能，其值約介於 8.01-12.71 (t-C/ha/ year)之間，北部的 NE、NW 區則由於雲雨天數較多，光合作用明顯偏低，持續維持較低的淨生產力，其值約介於 6.26-8.82 (t-C/ha/ year)之間。

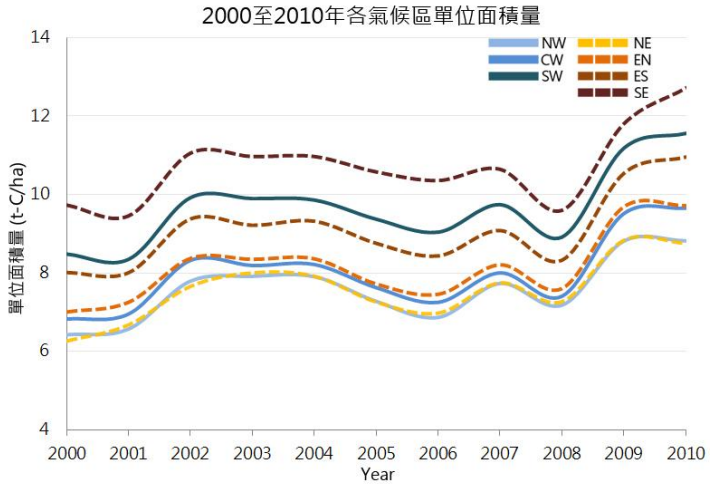


圖 12 2000 年至 2010 年各地理氣候區 NPP 單位面積量趨勢圖

表 2 2000 至 2010 年全台氣候分區 NPP

區域	CW	EN	ES	NE	NW	SE	SW
年份	單位面積量 (t-C/ha)	單位面積量 (t-C/ha)	單位面積量 (t-C/ha)	單位面積量 (t-C/ha)	單位面積量 (t-C/ha)	單位面積量 (t-C/ha)	單位面積量 (t-C/ha)
2000	6.83	7.01	8.01	6.26	6.42	9.73	8.48
2001	6.95	7.25	8.01	6.68	6.57	9.46	8.35
2002	8.32	8.37	9.38	7.66	7.79	11.05	9.92
2003	8.19	8.35	9.22	8.00	7.91	10.97	9.90
2004	8.22	8.36	9.32	7.92	7.91	10.97	9.86
2005	7.63	7.72	8.76	7.26	7.28	10.58	9.37
2006	7.25	7.46	8.44	6.98	6.87	10.36	9.04
2007	8.00	8.21	9.08	7.75	7.73	10.64	9.74
2008	7.40	7.60	8.33	7.27	7.18	9.60	8.91
2009	9.51	9.69	10.54	8.83	8.81	11.80	11.18
2010	9.65	9.71	10.96	8.76	8.82	12.71	11.56

1.2.2.4 各地理氣候區季節性 PSNnet

植物初級生產力的時間趨勢，也可簡要區分為春、夏、秋、冬四季加以描述，圖 13 以地理氣候區劃分，呈現各季節的淨光合作用總量(t-C/season)、單位面積量

(t-C/season/ha)、以及各地理氣候區的面積比例，其中 PSNnet 為 2001-2011 年 11 年期的分析成果。由圖中可知，多數氣候區在春季擁有較高的淨光合作用，反應在生長季初期植物葉面、細根等生物量的迅速增加，夏季雖然光合作用有效輻射較強，但植物維持生理所需的自營性呼吸也較高，故淨光合作用略低於春季，秋、冬季的降低則由於入射吸收的輻射量逐漸減低，但植物仍需維持基本生理作用所需的呼吸成本，進而造成淨光合作用的降低。若比較各氣候區，則以擁有充足日照以及較大區域面積的南部 ES、SW 區、以及西部 CW 區，呈現出較高的淨光合作用總量。

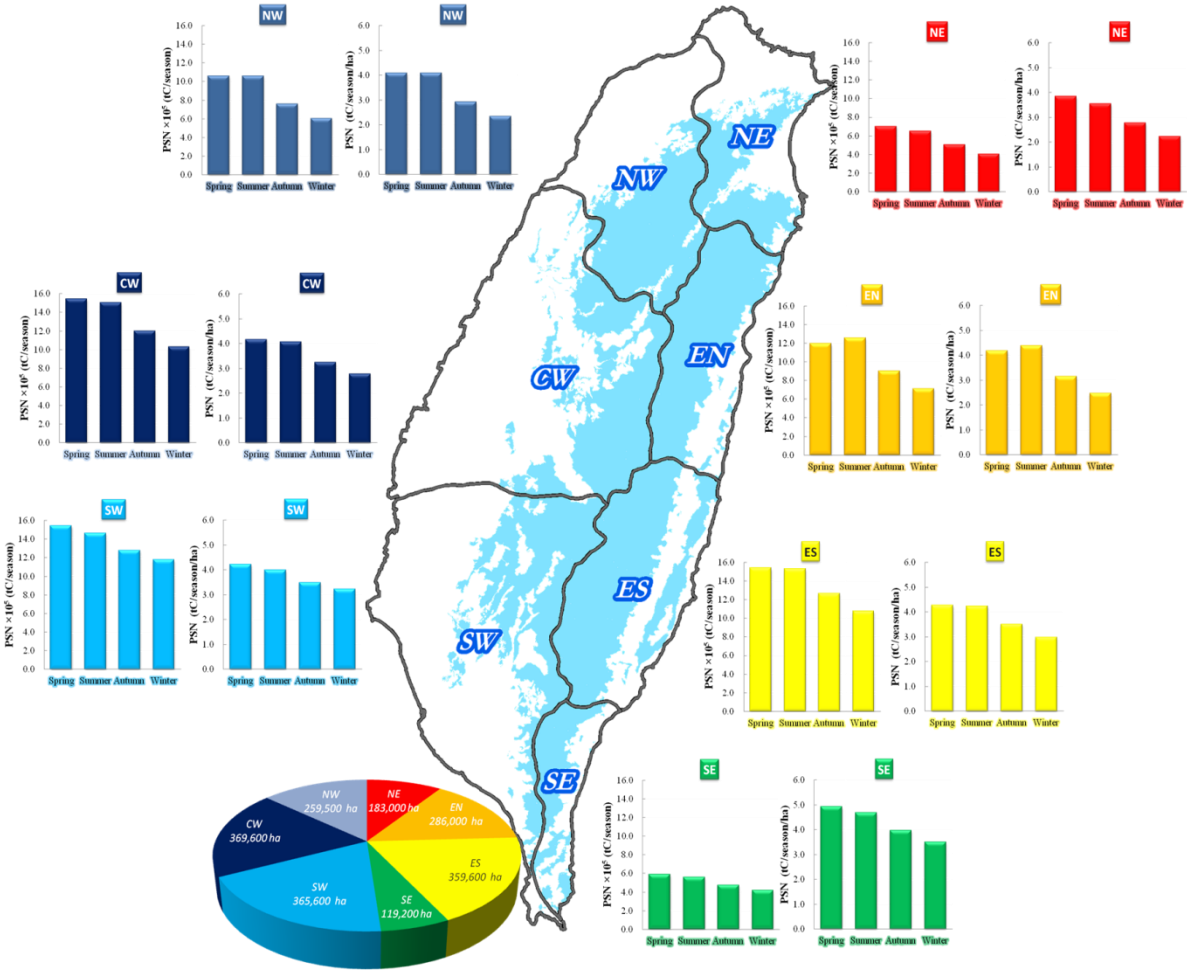


圖 13 各氣候分區季節性淨光合作用

1.2.2.5 各地理氣候區與地理氣候子區 NPP 比較

蘇鴻傑(1985)以多重尺度為分層概念，將台灣山地的植群帶進行劃分，其中最上層以溫度、雨量之季節性分佈為主軸，將全島區分為 2 種主要氣候型及 7 個地理氣候

區，氣候區內再按地形或集水區予以細分，區分為 41 個生態小區。本計畫除對 7 個地理氣候區進行常態的 GPP、PSNnet、NPP、LAI 時序分析，也對生態小區進行初級生產力的探討，圖 14 分別顯示 7 個地理氣候區及個別所屬生態小區 2001-2006 年的 NPP 平均值，顯示出 SE 區相對較高、及 NE、NW 區相對較低的 NPP，但如再進一步區分為 41 個生態小區，除了沿岸及都會地區(3、4、5、9、27、34)偏低，其餘小區的差異則不甚明顯，顯示在 MODIS 的觀測尺度上，較適宜針對主要氣候型及地理氣候區的層級，進行森林生長及碳吸存的探討。

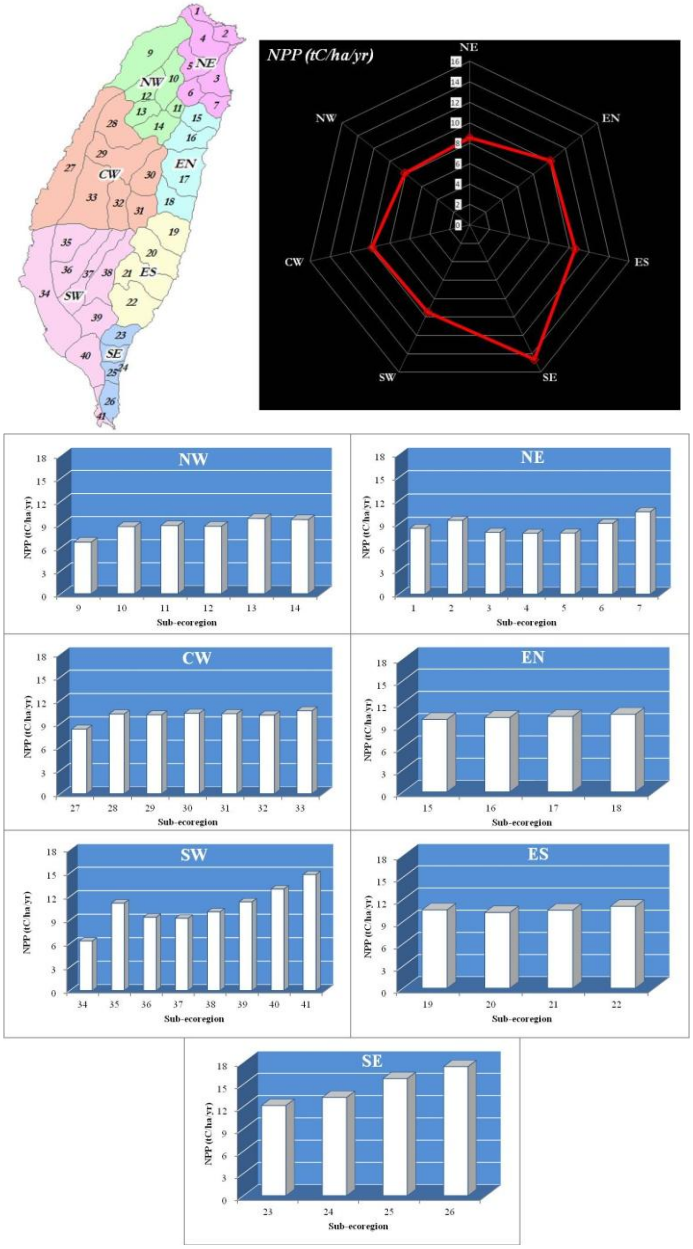


圖 14 地理氣候區及生態小區分佈與各區淨初級生產力

1.2.2.6 各植群帶逐年 NPP

森林碳匯除了在不同地理氣候區呈現差異,也在各植群帶間呈現出歧異度,圖 15、表 3 為國有林區內各植群帶 11 年期的淨初級生產力，顯示榕楠林帶及楠櫧林帶相對較高的碳匯能力，在 2000-2010 年的觀測期中，每單位區域植生約可吸存 7.99-11.08 t-C/ha/year 碳量，約相當於 29.30-40.63 t-C/ha/year 的二氧化碳，此高吸存量與其較高的葉面積指數(光合作用有效輻射分量)、日照量、以及光能利用效率有關；相較而言，高海拔的鐵杉雲杉、冷杉林、以及高山植群帶，以針葉林、低矮灌木、箭竹草原為主要植群，其葉面積指數較低，且由於較低的日射量，固碳能力相對較低，每單位區域約固存 4.99-8.09 t-C/ha/year 碳量。由此推論，從植林碳匯的角度出發，低海拔區域的平地造林或農地轉植林地，配合適當的造林樹種與營林措施，應能相較於中高海拔山區的造林，產生較佳的碳匯效益。

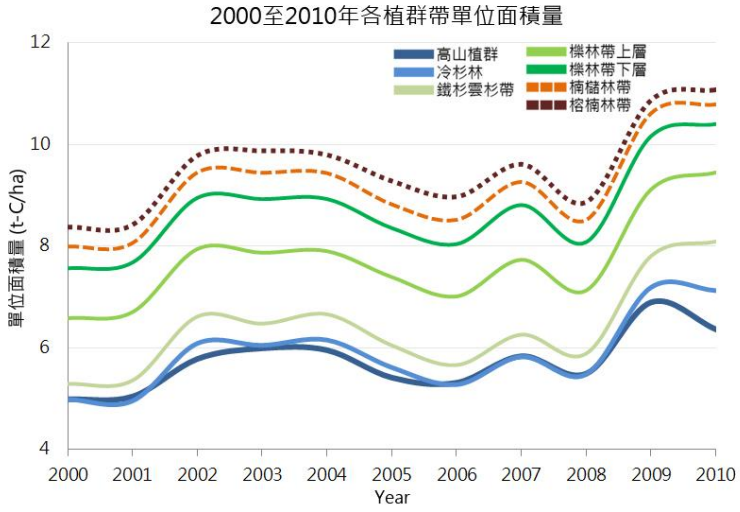


圖 15 2000 年至 2010 年各植群帶 NPP 單位面積量趨勢圖

表 3 2000 至 2010 年全台各植群帶 NPP 單位面積量

區域	高山植群	冷杉林	鐵杉雲杉帶	檜林帶上層	檜林帶下層	楠櫧林帶	榕楠林帶
年份	單位面積量 (t-C/ha)	單位面積量 (t-C/ha)	單位面積量 (t-C/ha)	單位面積量 (t-C/ha)	單位面積量 (t-C/ha)	單位面積量 (t-C/ha)	單位面積量 (t-C/ha)
2000	4.99	4.99	5.29	6.58	7.56	7.99	8.37
2001	5.04	4.95	5.36	6.70	7.68	8.06	8.42
2002	5.78	6.09	6.61	7.94	8.95	9.45	9.78
2003	5.99	6.05	6.47	7.87	8.92	9.44	9.87
2004	5.95	6.15	6.66	7.90	8.93	9.44	9.79
2005	5.41	5.61	6.05	7.39	8.35	8.82	9.28
2006	5.31	5.27	5.66	7.01	8.04	8.52	8.97
2007	5.83	5.83	6.26	7.73	8.81	9.26	9.61
2008	5.49	5.48	5.88	7.13	8.08	8.51	8.86
2009	6.89	7.19	7.80	9.11	10.16	10.61	10.87
2010	6.36	7.12	8.09	9.45	10.40	10.79	11.08

1.2.2.7 地理氣候區內各植群帶 NPP

森林生態系的碳匯能力，可分別由森林結構(structure)及植物光合作用的功能或過程(function/process)來分析，森林結構主要透過蓄積量的量測，結合轉換係數的應用，估測林分中木質部分的碳儲存量(carbon stock)；而光學遙測則透過光合作用效能的推估，以淨生產力反應出植物的碳吸存能力，屬於碳流通量(carbon flux)的作法；為比較兩方式估測成果的差異，配合永久樣區第一次(1997-2002 年)及第二次(2002-2007 年)量測的調查期程，本計畫分析 2000-2005 年 MODIS 推估的國有林區淨初級生產力(圖 16)，透過階層的概念，分析國有林區內各地理氣候區，以及地理氣候區內各植群帶的單位面積碳吸存量，以作為兩估測成果的比較基礎，並藉此反應碳匯碳源的分佈情形，提供國家溫室氣體排放清冊中有關林業碳匯及溫室氣體減量的參考資訊。

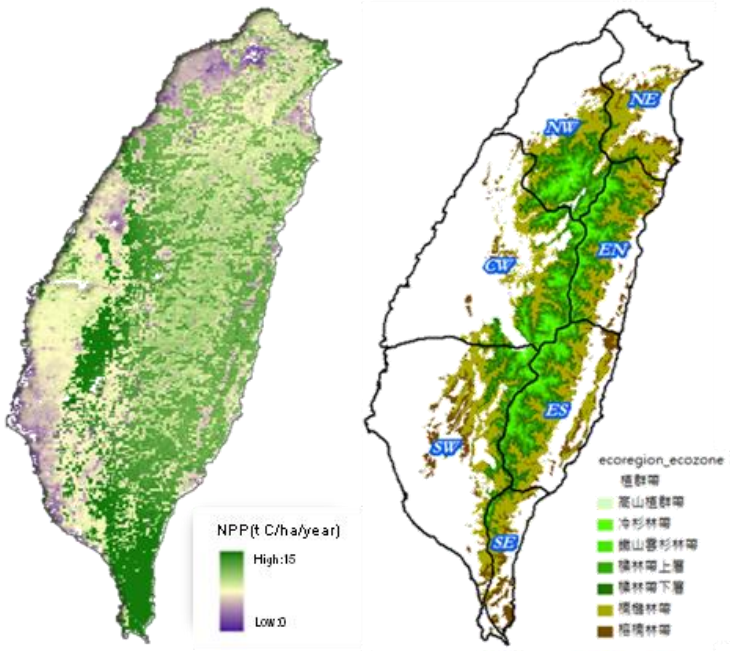
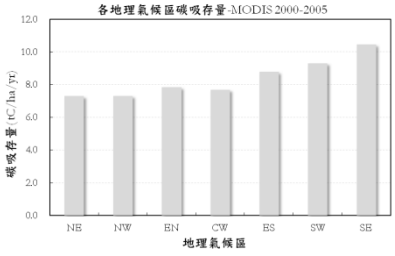


圖 16 2000-2005 年平均淨初級生產力及國有林區內各地理氣候區植群帶分佈

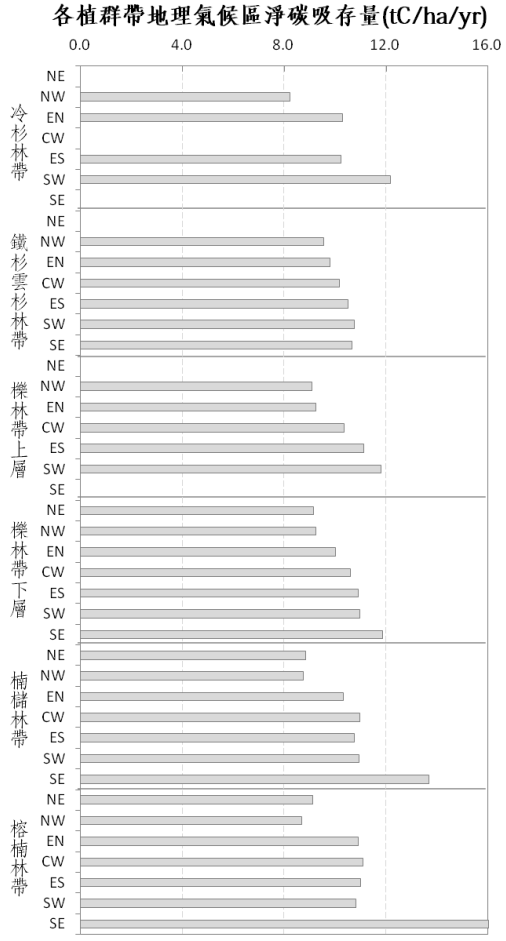
透過 2000-2005 年 MODIS 淨初級生產力的估算，台灣全島平均每年每公頃區域能吸存約 9.71 公噸的碳量，如以國有林區範圍進行分析，著重於森林生態系的碳吸存，則每公頃能吸存 10.51 公噸碳量。在在台灣本島所屬的七個地理氣候區中，國有林區內的森林碳吸存大抵呈現由南向北逐漸遞減的趨勢(圖 17)，最南側的 SE 區由於充足的日照，以及相較於西部區域較不明顯的乾季，且以中低海拔的榕楠林(Fucus-Machulus zone)及楠櫧林帶(Machilus-Castanopsis zone)為主要林相，呈現出最高的淨初級生產力，平均每年每公頃區域能吸存 10.46 公噸的碳量，而位處最北側的 NE 區，恆濕型的氣候型態及雲層雲霧覆蓋，造成較低的光合作用有效輻射及植生生產力，平均吸存約 7.30 公噸的碳量；此外，如比較中央山脈東側及西側的地理氣候區，其碳吸存量並未呈現顯著的差異，顯示以熱帶及亞熱帶季風氣候區域為主的台灣，就大範圍區域而言，累計日照強度為森林生態系固碳能力差異的主要控制因素。



每公頃年均淨碳吸存量 (2000-2005)			
ecoregion	mean(t-C/ha/yr)	stdev(t-C/ha/yr)	samples
NE	7.30	0.70	1421
NW	7.31	0.68	2240
EN	7.84	0.61	2583
CW	7.69	0.67	2850
ES	8.78	0.64	3177
SW	9.31	0.73	2736
SE	10.46	0.70	901

圖 17 國有林區內各地理氣候區年度平均碳吸存量(遙測估算成果)

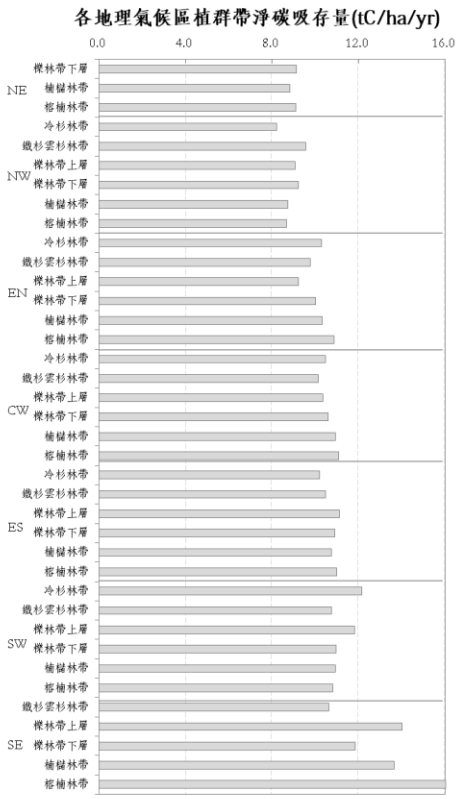
以國有林區內地理氣候區劃分為基準，進一步探討各植群帶的固碳能力差異，能呈現相同植群帶在不同地理氣候區，或單一地理氣區中不同植群帶的差異。透過MODIS 的估算，各植群帶碳吸存仍呈現由南向北逐漸遞減的地理氣候趨勢(圖 18) (高山植群帶由於樣點數過少而未列入計算)，但在各別地理氣候區中，不同植群帶的固碳能力則未呈現出一致的趨勢，顯示地理氣候區相互間的歧異性(圖 19)。



每公頃年均淨碳吸存量 (2001-2006)

ecozone	ecoregion	mean(tC/ha/yr)	stdev(tC/ha/yr)	samples
冷杉林帶	NW	8.22	2.98	58
冷杉林帶	EN	10.29	0.23	44
冷杉林帶	ES	10.21	2.17	56
冷杉林帶	SW	12.17	1.57	32
鐵杉雲杉林帶	NW	9.55	1.82	301
鐵杉雲杉林帶	EN	9.78	1.81	325
鐵杉雲杉林帶	CW	10.15	1.81	366
鐵杉雲杉林帶	ES	10.49	1.94	414
鐵杉雲杉林帶	SW	10.76	1.99	136
鐵杉雲杉林帶	SE	10.64	2.98	7
檜林帶上層	NW	9.08	1.65	491
檜林帶上層	EN	9.23	2.26	453
檜林帶上層	CW	10.36	2.39	574
檜林帶上層	ES	11.12	2.22	547
檜林帶上層	SW	11.81	1.61	268
檜林帶下層	NE	9.15	1.8	103
檜林帶下層	NW	9.24	1.77	583
檜林帶下層	EN	10.02	1.97	582
檜林帶下層	CW	10.59	1.75	650
檜林帶下層	ES	10.9	2.03	603
檜林帶下層	SW	10.97	2.72	471
檜林帶下層	SE	11.86	3.3	103
楠櫧林帶	NE	8.84	1.98	986
楠櫧林帶	NW	8.75	2.05	734
楠櫧林帶	EN	10.32	2.25	985
楠櫧林帶	CW	10.95	2.38	1061
楠櫧林帶	ES	10.75	2.21	1220
楠櫧林帶	SW	10.93	3.78	1270
楠櫧林帶	SE	13.67	2.96	298
榕楠林帶	NE	9.11	2.24	320
榕楠林帶	NW	8.68	2.55	72
榕楠林帶	EN	10.89	2.05	194
榕楠林帶	CW	11.09	3.25	141
榕楠林帶	ES	10.99	2.03	335
榕楠林帶	SW	10.82	4.25	556
榕楠林帶	SE	16.03	2.45	298

圖 18 各植群帶地理氣候區碳吸存量(遙測估算成果)



每公頃年均淨碳吸存量 (2001-2006)				
ecoregion	ecozone	mean(tC/ha/yr)	stdev(tC/ha/yr)	samples
NE	櫟林帶下層	9.15	1.80	103
NE	楠櫧林帶	8.84	1.98	986
NE	楊楠林帶	9.11	2.24	320
NW	冷杉林帶	8.22	2.98	58
NW	鐵杉雲杉林帶	9.55	1.82	301
NW	櫟林帶上層	9.08	1.65	491
NW	櫟林帶下層	9.24	1.77	583
NW	楠櫧林帶	8.75	2.05	734
NW	楊楠林帶	8.68	2.55	72
EN	冷杉林帶	10.29	0.23	44
EN	鐵杉雲杉林帶	9.78	1.81	325
EN	櫟林帶上層	9.23	2.26	453
EN	櫟林帶下層	10.02	1.97	582
EN	楠櫧林帶	10.32	2.25	985
EN	楊楠林帶	10.89	2.05	194
CW	冷杉林帶	10.47	0.00	57
CW	鐵杉雲杉林帶	10.15	1.81	366
CW	櫟林帶上層	10.36	2.39	574
CW	櫟林帶下層	10.59	1.75	650
CW	楠櫧林帶	10.95	2.38	1061
CW	楊楠林帶	11.09	3.25	141
ES	冷杉林帶	10.21	2.17	56
ES	鐵杉雲杉林帶	10.49	1.94	414
ES	櫟林帶上層	11.12	2.22	547
ES	櫟林帶下層	10.90	2.03	603
ES	楠櫧林帶	10.75	2.21	1220
ES	楊楠林帶	10.99	2.03	335
SW	冷杉林帶	12.17	1.57	32
SW	鐵杉雲杉林帶	10.76	1.99	136
SW	櫟林帶上層	11.81	1.61	268
SW	櫟林帶下層	10.97	2.72	471
SW	楠櫧林帶	10.93	3.78	1270
SW	楊楠林帶	10.82	4.25	556
SE	鐵杉雲杉林帶	10.64	2.98	7
SE	櫟林帶上層	14.02	0.00	30
SE	櫟林帶下層	11.86	3.30	103
SE	楠櫧林帶	13.67	2.96	463
SE	楊楠林帶	16.03	2.45	298

圖 19 各地理氣候區內不同植群帶碳吸存量(遙測估算成果)

1.2.2.8 各地貌 NPP 與 GPP 佔全台比例

在植生生產力的推演上，呼吸成本包含維持性呼吸及成長性呼吸，而維持性呼吸由植物葉面、細根、生立木所產生，淨初級生產力則為總初級生產力與此呼吸成本的差值，可視為植生光合作用及呼吸作用後的碳吸存量。以多年生木本植物而言，總初級生產力及葉面積指數雖較草本植物為高，但由於生物量較大，維持性呼吸成本亦較高，故各植群間淨初級生產力的差異不如總初級生產力來得明顯；圖 20 呈現台灣本島各植群地貌的面積比例，以及各類別 NPP 及 GPP 所佔的比重，其中淨初級生產力為 2001-2006 年的統計成果，地貌類別則為 MODIS MOD12 UMD 地表分類成果。在台灣 6 種主要的地貌類別中，常綠闊葉林(EBF)所佔區域最大(36%)，由於較高的光能利用效率，其淨初級生產力亦最高(52%)，常綠針葉林(ENF)及混合林(MF)則分別各佔 4%及 20%，合計森林區域約佔台灣面積的 61%，碳吸存確佔年度總量的 76%，從植林碳匯的角度出發，林業政策除了需酌重森林的更新撫育，平地區域的綠化或轉植造林能有效提升碳吸存速率。

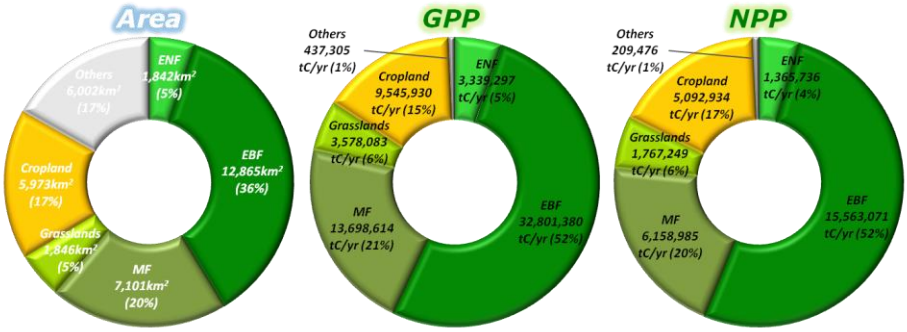


圖 20 各地貌類別面積比例及 GPP、NPP 比例

1.2.2.9 各地貌 NPP 與 GPP 比值

總初級生產力與淨初級生產力的差值,即為植物的呼吸成本,此呼吸成本的多寡，不僅與植物類型有關,也與植物的年齡有關,關係到植物最終的碳吸存能力,圖 21 為各地貌類別(區分為草本及木本兩大類別)NPP 與 GPP 比值的灰階分佈圖,比值高則代表有較高比例的總初級生產力，最後將成為植物新增的生質量；在五種植生種類中，作物、草生地等草本植物由於缺乏木質部，生質量較木本植物為低，所需的呼吸成本較少,故維持較高且穩定的比值,舉例而言,每吸存一克的碳,扣除掉自營性呼吸後，生質量約可增加 0.35-0.55 克；與草本植物相比，木本植物有較高的呼吸成本，且由於為多年生，NPP/GPP 的變化也與林齡有關，生長系統的生產量遠大於維持呼吸消耗量，具有較高比值，穩定系統的總生產量與維持呼吸消耗量則較趨近平衡，其比值較低，故木本植物的 NPP/GPP 變化空間較大；圖 21 顯示混合林及針葉林的 NPP/GPP 呈現出兩極化的分佈，包含生長系統及穩定系統，闊葉林則多仍在生長系統的階段，維持穩定且較高的 NPP 與 GPP 比值。

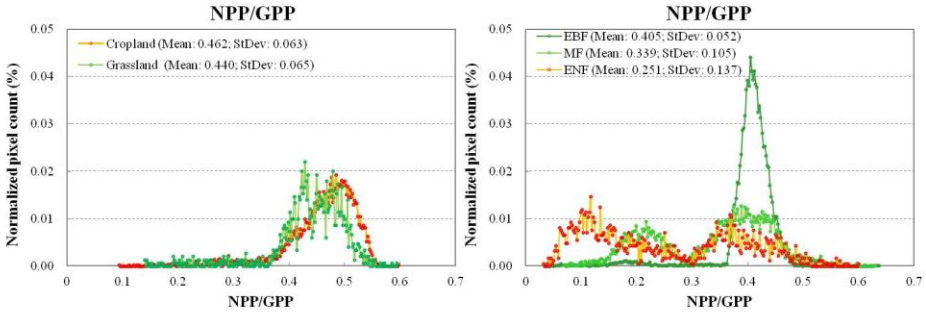


圖 21 各植生種類(作物、草生地、闊葉林、混淆林、針葉林) NPP 與 GPP 比值的灰階分佈圖

1.2.2.10 全林區與各林區逐年 NPP

以行政界區為劃分，探討綠色植生的碳匯行為差異，較無法與實際的生態區位因子產生連結，但由於實際的行政管理及林業經營仍以此為分劃，為有效輔助林業政策的管理，提供植林碳匯的輔助資訊，仍有必要對此進行分析。圖 22、23、表 4 顯示全林區、各林區 2000-2010 年逐年碳吸存總量及單位面積量，花蓮、台東、屏東林區由於面積較廣，總碳吸存量較其他林區為高，2001-2003 年碳匯量約達到 2.05-2.73 百萬公噸，但若考量單位區域的固碳能力，則以位於南部地理氣候區(SE、ES、SW)的台東、屏東林區較高，平均每年每公頃達到 9.0-10.5 噸的固碳效能。值得注意的是，此為綜合所有植群、不同林齡的估算成果，為一概觀的總體現況，實際植林政策仍需考量到實地的立地品位及植株種類、以及不同樹苗生長速度差異的綜合影響。

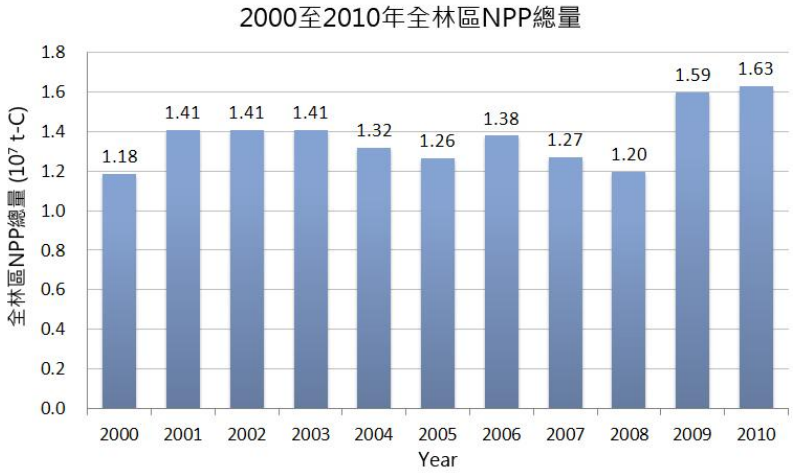


圖 22 2000 年至 2010 年全林區 NPP 總量

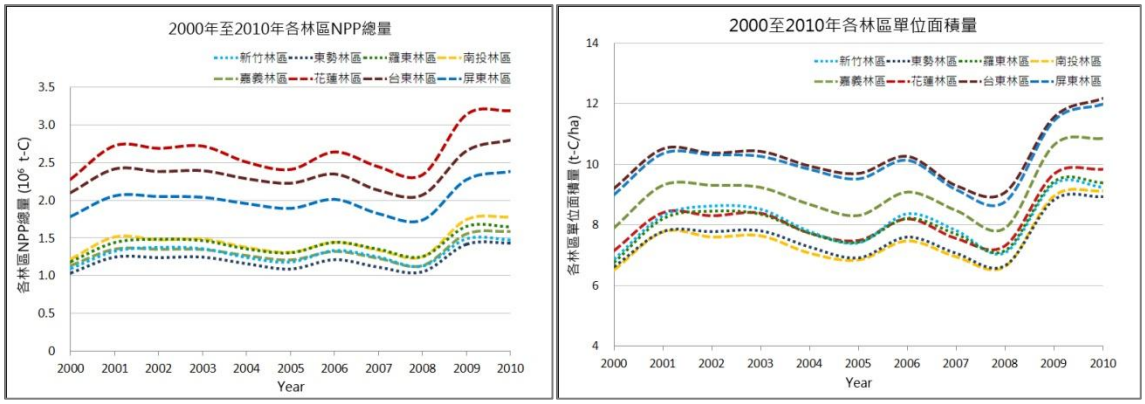


圖 23 2000-2010 年各林區逐年碳吸存總量及單位面積量趨勢圖

表 4 2000-2010 年各林區逐年碳吸存總量及單位面積量

區域	新竹林區		東勢林區		南投林區		羅東林區	
年份	總量 (t-C)	單位面積量 (t-C/ha)	總量 (t-C)	單位面積量 (t-C/ha)	總量 (t-C)	單位面積量 (t-C/ha)	總量 (t-C)	單位面積量 (t-C/ha)
2000	1,095,563	6.86	1,036,121	6.62	1,221,104	6.51	1,187,218	6.76
2001	1,325,824	8.31	1,247,351	7.78	1,515,942	7.77	1,440,815	8.21
2002	1,376,543	8.62	1,240,735	7.78	1,476,615	7.60	1,484,234	8.45
2003	1,359,251	8.52	1,247,313	7.81	1,487,846	7.64	1,466,886	8.35
2004	1,242,729	7.79	1,159,991	7.27	1,377,266	7.07	1,356,764	7.73
2005	1,181,455	7.41	1,089,334	6.91	1,310,251	6.84	1,304,887	7.43
2006	1,335,180	8.37	1,213,727	7.60	1,445,204	7.47	1,443,527	8.22
2007	1,247,259	7.81	1,113,776	7.06	1,338,668	6.95	1,350,937	7.69
2008	1,128,387	7.08	1,052,391	6.66	1,251,973	6.63	1,255,462	7.15
2009	1,492,007	9.35	1,418,924	8.83	1,746,721	8.95	1,655,630	9.43
2010	1,475,444	9.24	1,435,086	8.93	1,780,606	9.13	1,648,706	9.39
區域	嘉義林區		屏東林區		花蓮林區		台東林區	
年份	總量 (t-C)	單位面積量 (t-C/ha)	總量 (t-C)	單位面積量 (t-C/ha)	總量 (t-C)	單位面積量 (t-C/ha)	總量 (t-C)	單位面積量 (t-C/ha)
2000	1,135,040	7.90	1,787,841	9.00	2,283,470	7.15	2,104,755	9.21
2001	1,353,530	9.31	2,060,541	10.35	2,726,961	8.41	2,418,583	10.51
2002	1,350,816	9.31	2,051,774	10.32	2,691,520	8.30	2,383,582	10.37
2003	1,349,575	9.24	2,042,188	10.26	2,721,158	8.39	2,394,986	10.43
2004	1,267,964	8.68	1,957,285	9.84	2,508,187	7.73	2,288,151	9.94
2005	1,210,138	8.31	1,894,440	9.52	2,411,229	7.49	2,228,613	9.70
2006	1,322,466	9.08	2,014,753	10.13	2,644,256	8.20	2,351,158	10.26
2007	1,230,464	8.47	1,823,374	9.16	2,445,618	7.55	2,133,445	9.3
2008	1,135,276	7.89	1,740,398	8.76	2,340,811	7.31	2,073,152	9.07
2009	1,556,322	10.64	2,276,496	11.44	3,141,202	9.68	2,658,488	11.55
2010	1,588,195	10.86	2,384,490	11.98	3,192,213	9.84	2,801,243	12.17

1.2.2.11 均質樣區 GPP 分析-氣候分區與植群帶

以全台地理氣候區、植群帶進行 GPP、PSNnet 分析，能看出植生概觀的生產行為，並對遙測推估進行初步的檢驗，但由於影響植生生長的因素相當多元，區域性生態區位或生理反應的差異，容易在概觀的資料分析中遭到均化，而無法現出獨特性，

故本計劃透過均質樣區的分析，針對特定的變量進行分析，同時限定其他的生態或地理區位因子，以突顯此變量對植生碳匯的影響；在實際執行上，透過第三次森林資源調查的植群圖資，以及近期福衛影像，本計畫篩選出 15 個 5*5km 均質林相測區(美一測區含 25 個 MODIS 資料樣本)(圖 24)，透過 8 天週期時序性資料的分析，以突顯個別因子對植生碳匯的影響。圖 25 案例包含台南龍崎(Orchard/SW)、三地門(EBF/SW)、福山(EBF/NE)、南澳(EBF/NE)、尖石(ENF/NE)、棲蘭(ENF/NE)，其中福山屬於長期生態實驗研究地及森林動態樣區，棲蘭鴛鴦湖除了通量塔台的二氧化碳觀測，也屬於長期生態研究地的一員。圖中 GPP 數值為 25 個樣本的平均值及±1 標準差，紅點表示受到雲霧影響，無當期 GPP 演算，以前後期內差而得的數值，ratio of data available 則顯示全年中可用統計資料的比例，代表測區受大氣雲層干擾的狀況以及統計數值的代表性，趨勢線則以二次多項式進行表示。在地理氣候區的比較上，以闊葉林為例，SW 區三地門的生產力則明顯較 NE 區的福山及南澳高出許多，但在生長趨勢上，生長季及非生長季的 GPP 差異則不如 NE 區來得明顯，龍崎由於以果園及茶園為主要地貌，其生產力較其他天然闊葉混合林為低；若以林相差異為分析對象，在同屬 NE 區的福山、南澳、尖石、棲蘭中，闊葉林和針葉林的碳匯能力沒有明顯的差異，此應與 NE 區多屬低中海拔恆濕的霧林帶，入射輻射較低有關，造成 NE 區闊葉林的碳匯能力較其他地理氣候區更為偏低，而此也反應到光學遙測可用資料量的降低(ratio of data available)，以及劇烈波動的 GPP 推估值。

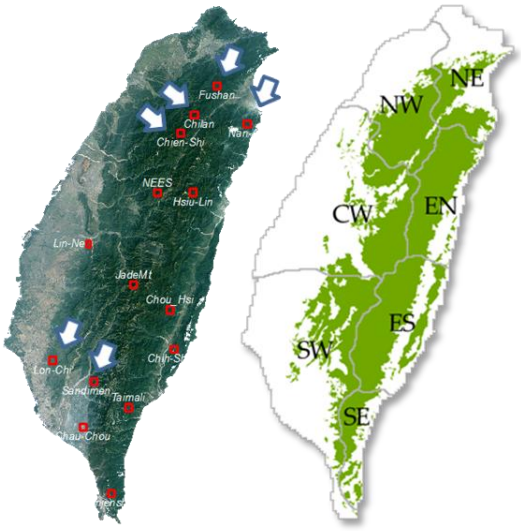


圖 24 均質樣區(龍崎、三地門、福山、南澳、尖石、棲蘭測區)與氣候分區

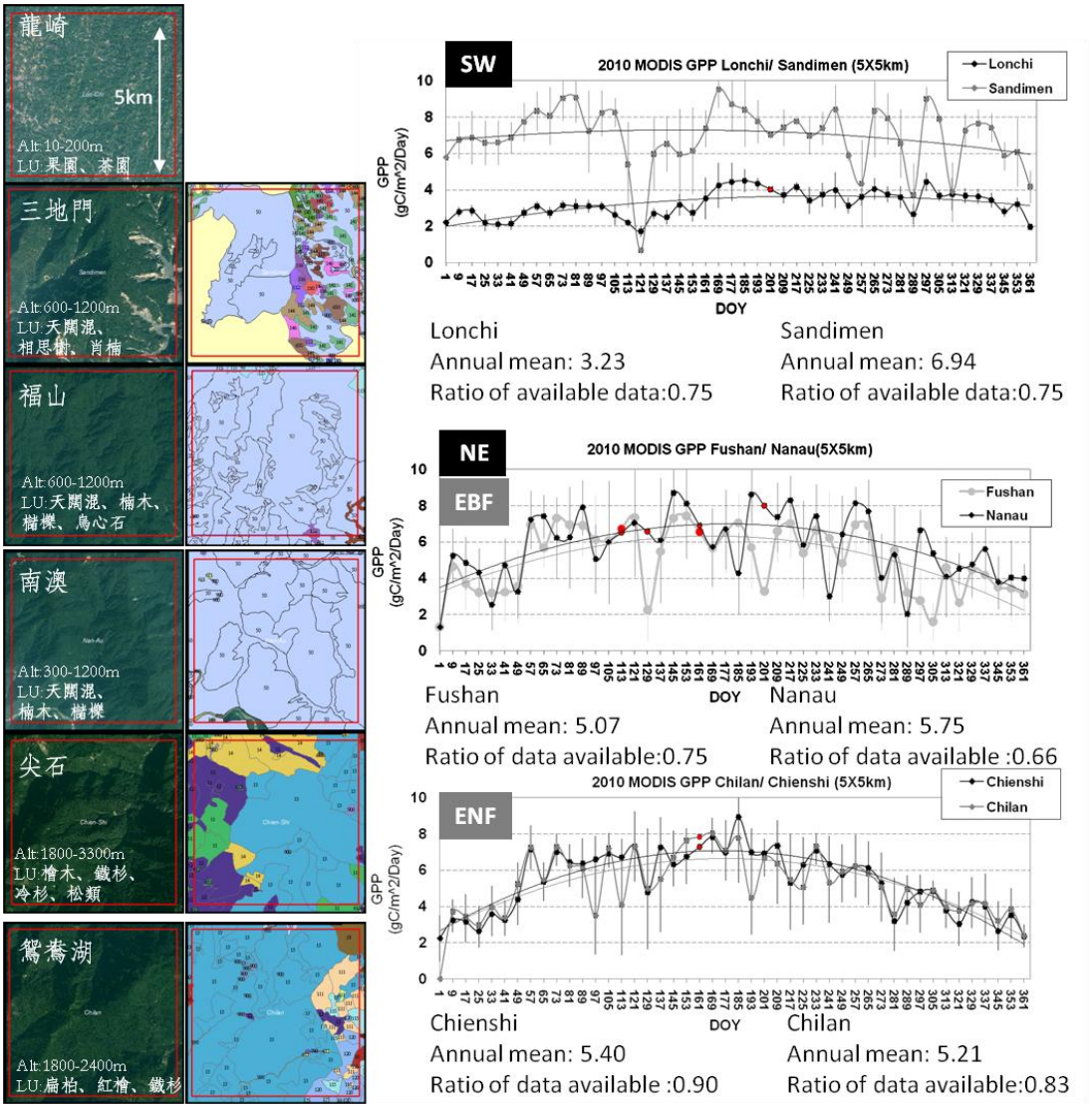


圖 25 樣區衛星影像、植群類別、以及 2010 年 GPP 時序性變化

1.2.2.12 人工林樣區 GPP 分析

植林碳匯為當前林業管理的重要課題，也反應森林由多目標經營、森林整體綜合資源調查、到森林環境監測的林業經營歷程；透過遙測資料的分析，不僅能作為各林區概觀的碳匯調查資料，更能作為植林碳匯管理的參考依據。在植林效益的評估上，所關切者為各林型、各樹種的固碳能力及其生長速度，本計畫選擇同屬 NE 區的柳杉(*Cryptomeria japonica* D. Don)、扁柏(*Chamaecyparis obtusa* var. *formosana* (Hay.) Rehd.)、紅檜(*Chamaecyparis formosensis* Matsum)、二葉松(*Pinus taiwanensis* Hay.)等針葉造林樹種，挑選均質林相(以 1*1km MODIS 像元為分析單元)的人工林區域進行分析(圖 26)；其中柳杉造林位於太平山事業區，包含柳杉及其他闊葉樹種，柳杉分佈比例為 5-100%，林齡 20-40

年，扁柏、紅檜樣區位於和平事業區，包含其他針葉混植樹種，扁柏約佔 1-14%，紅檜佔 9-23%，林齡為 20-60 年，二葉松樣區則位於大甲溪事業區，屬於純林造林地，林齡約 20-40 年；在資料分析上，為顧及林型覆蓋的均質性，且以充足樣本數為統計考量,故各造林樹種的有效樣本互不一致;圖 27 顯示各樹種 2010 年 GPP 的時序變遷，在近似的地理氣候環境及針葉林相下，各類別的碳匯趨勢及固碳效果相當近似，年度平均則以扁柏、紅檜林稍高，但也可能與其較高的林齡及樹冠鬱閉度有關。

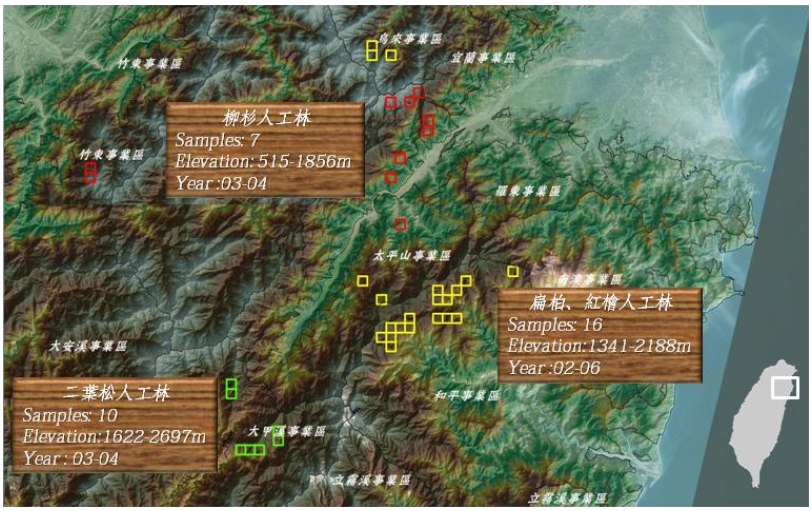


圖 26 柳杉、扁柏紅檜、二葉松人工林樣區分佈

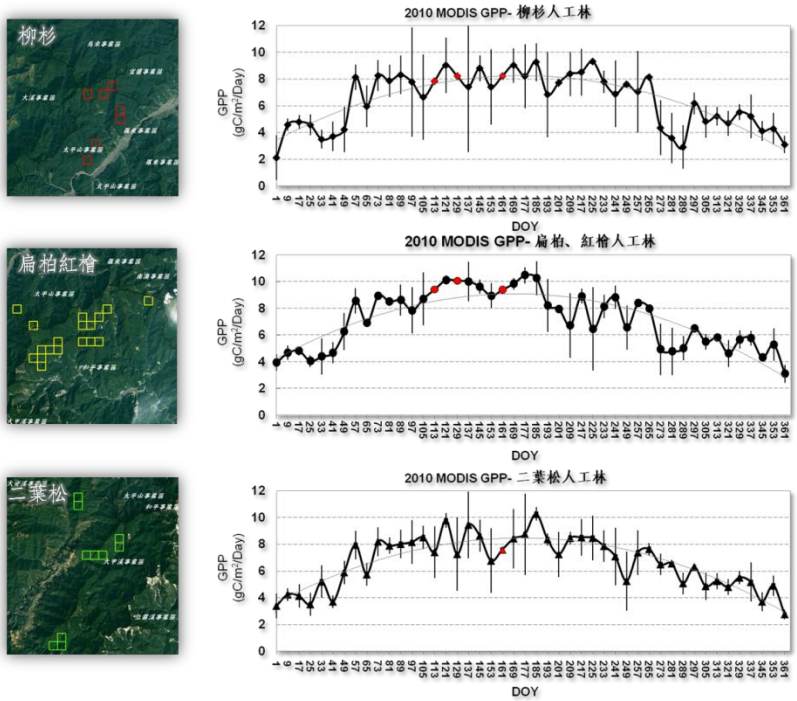


圖 27 柳杉、紅檜及扁柏、二葉松人工林 2010 年 GPP 時序變化

1.2.2.13 長期生態研究地 GPP、PSNnet、NPP、及 LAI 分析

由於自然生態體系本身的複雜性，及受到氣候、水文、土壤、與天然擾動等環境因子的影響，生態研究常需仰賴長期性的監測與調查，才能對生態系中的組成份子與生態過程有較宏觀的認識。台灣自 1992 年起，陸續成立福山、鴛鴦湖、關刀溪、塔塔加、南仁山、以及墾丁南灣等包含森林、湖泊、海域的長期生態研究地(圖 28)(表 5)，藉由長時期且集中資源的投入調查，以對台灣地區主要的生態群落進行系統性的分析。以遙測技術應用於生態研究，雖無法如傳統調查取得實地的取樣資料，卻提供了生態空間上最客觀的資訊，透過衛載遙測系統持續、長時、及系統性的觀測，能弭補現地調查在空間及時間尺度上的不連續性，並提供長期生態研究所需的基礎資訊。本計畫於三年度執行期間，陸續蒐集處理 MODIS 2000-2011 年初級生產力及葉面積指數資料，透過時序資料的分析，能瞭解長期生態研究地近年的季節性及年度性變遷。

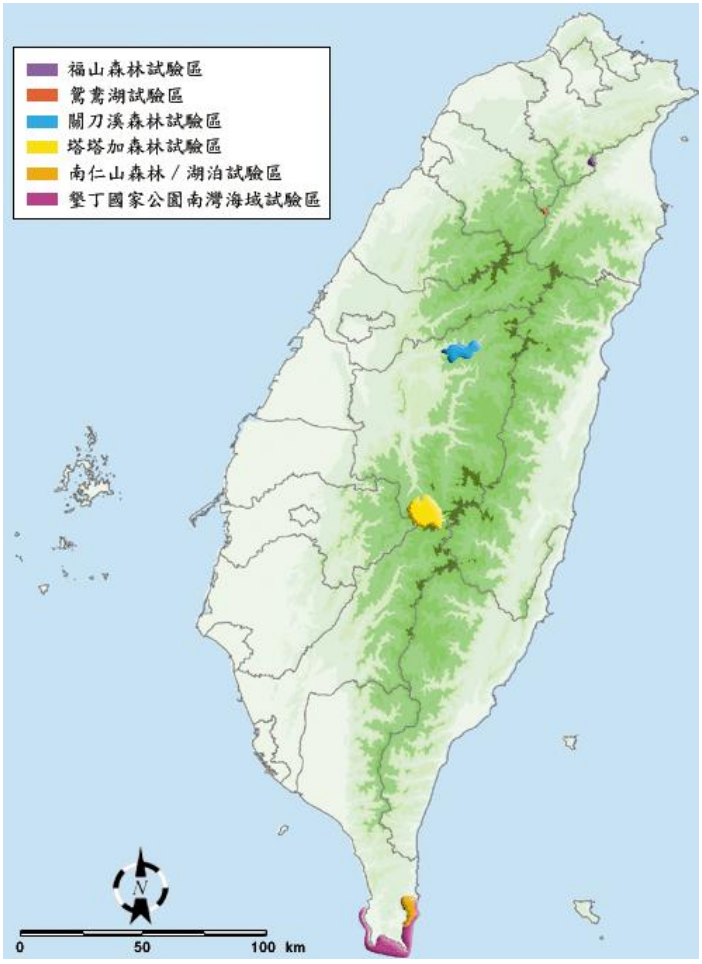


圖 28 長期生態研究地分佈圖(資料來源:長期生態研究網)

表 5 長期生態研究地

研究地	福山森林試驗區	鴛鴦湖試驗地	關刀溪森林試驗區	塔塔加森林試驗區	墾丁國家公園南灣海域試驗地	南仁山森林試驗區
成立年份	1992	1992	1994	1996	2001	1995
面積(公頃)	1100	陸域 374 湖泊 3.3	210	400	14,900	陸域 430 湖泊 30
主要生物相/主要群落	亞熱帶混生常綠落葉林/樟楮林	溫帶檜木林、沼澤區	亞熱帶混生常綠落葉林/樟楮林	山地常綠針葉林/鐵杉及雲杉林、混生針闊葉林、玉山箭竹草原	珊瑚礁/珊瑚礁生物	亞熱帶季風林/樟樹林
位置	林業試驗所福山分所	鴛鴦湖自然保留區	中興大學惠蓀林場關刀溪試驗林	臺灣大學實驗林和社營林區	墾丁國家公園海域	墾丁國家公園南仁山生態保護區
位置(行政區)	臺北縣烏來鄉與宜蘭縣員山鄉交界	宜蘭縣大同鄉與新竹縣尖石鄉交界	南投縣仁愛鄉	南投縣信義鄉	屏東縣恆春鎮	屏東縣滿州鄉

圖 29 分別呈現福山(Fushan)、鴛鴦湖(Yuanyanhou)、關刀溪(Kuandoushi)、塔塔加(Tatachia)、南仁山(Nanrenshan)長期生態研究地的分析成果(墾丁南灣屬於海域試驗區，無初級生產力及葉面積指數演算)，圖中每一單筆資料(ex:017)為 11 年中同期資料(2001017、2002017、 …、2011017)的平均值及±1 標準差；透過此初級生產力及葉面積指數的時序資料，能掌握森林生長及森林碳匯的季節性變遷。研究成果顯示，屬於熱帶性氣候的南仁山試驗區，葉面積指數為五個研究地中最高，且終年變化較不明顯，塔塔加試驗區則由於以常綠針葉林與玉山箭竹草原為主要分佈植群，呈現較低的葉面積指數，而以溫帶檜木林為主要群落的鴛鴦湖試驗區，葉面積則略低於亞熱帶混生常

綠落葉林(樟楠林)的關刀溪及福山試驗區；以變化幅度而言，淨光合作用相較於葉面積指數，呈現出較明顯的季節性差異，主要由於光合作用除了與植物葉面多寡(影響陽光擷取)有關，也受到入射輻射量的影響，隨著冬季太陽南移，單位面積區域所能接收到的輻射量逐漸降低，故光合作用及植生碳吸存的效能也隨之減低；整體而言，研究地所屬的植群帶與氣候條件能大致詮釋森林生長及碳匯效能的差異。

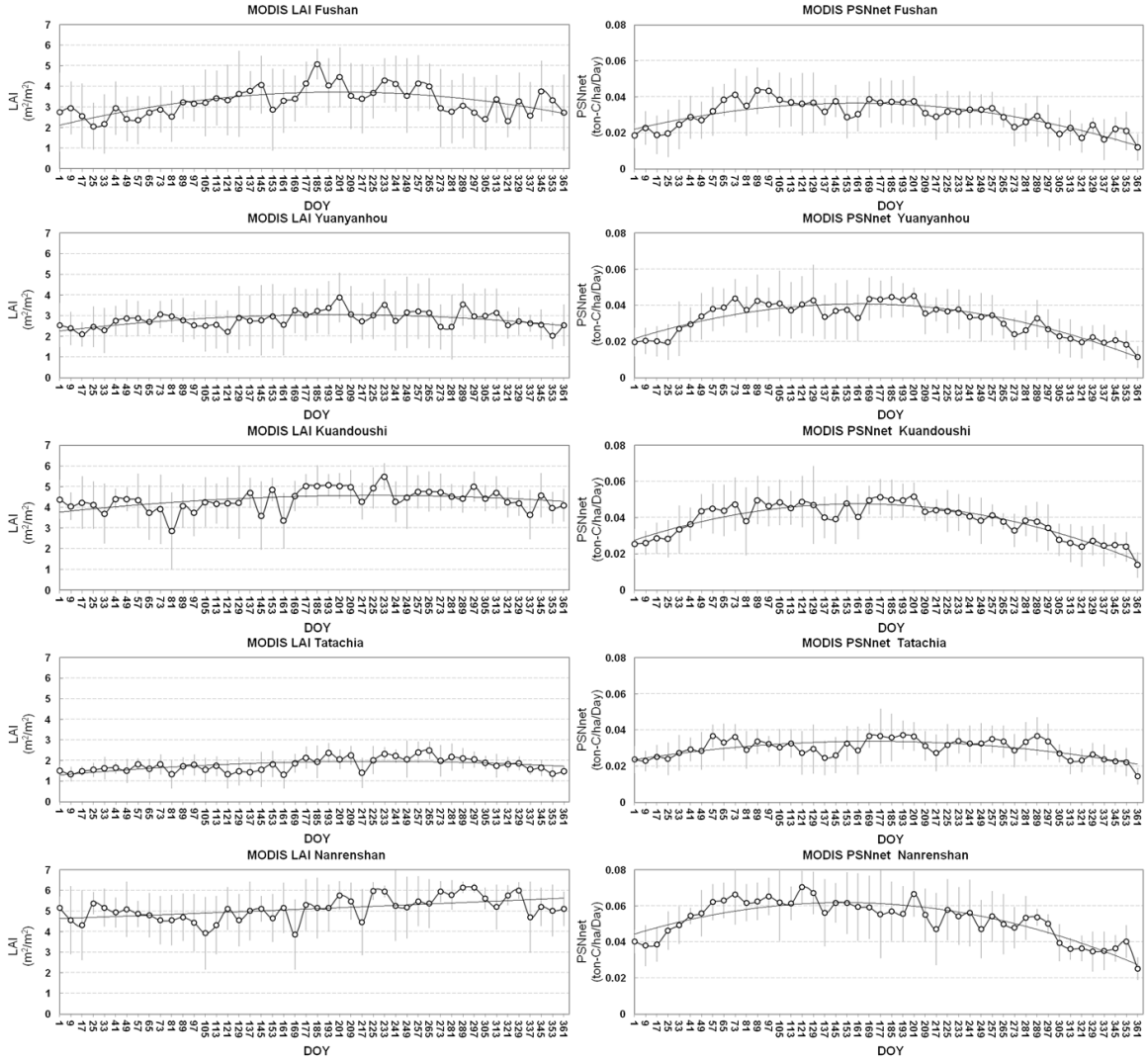


圖 29 長期生態研究地葉面積指數及淨光合作用季節性變遷

除了季節性的變遷，生態研究更著重於長年的變化趨勢，探討植群在外在壓力與內部競爭的環境條件下，其動態變化、演替與更新的機制。圖 30 呈現各研究地 2000-2010 年逐年的總初級生產力及淨初級生產力，各研究地大致呈現近似的變化趨勢，顯示近年間並沒有較大的擾動事件發生，林型(與海拔高度有關)與氣候條件(不同緯度

的日照量差異)仍為影響初級生產力的主要因素,儘管GPP在各研究地有較大的差異，但考量所屬植群帶的呼吸成本後(respiration cost)，NPP 呈現較小的落差，在五個研究地中，以南仁山為最高，塔塔加較低，福山、鴛鴦湖、關刀溪則沒有明顯的差異。

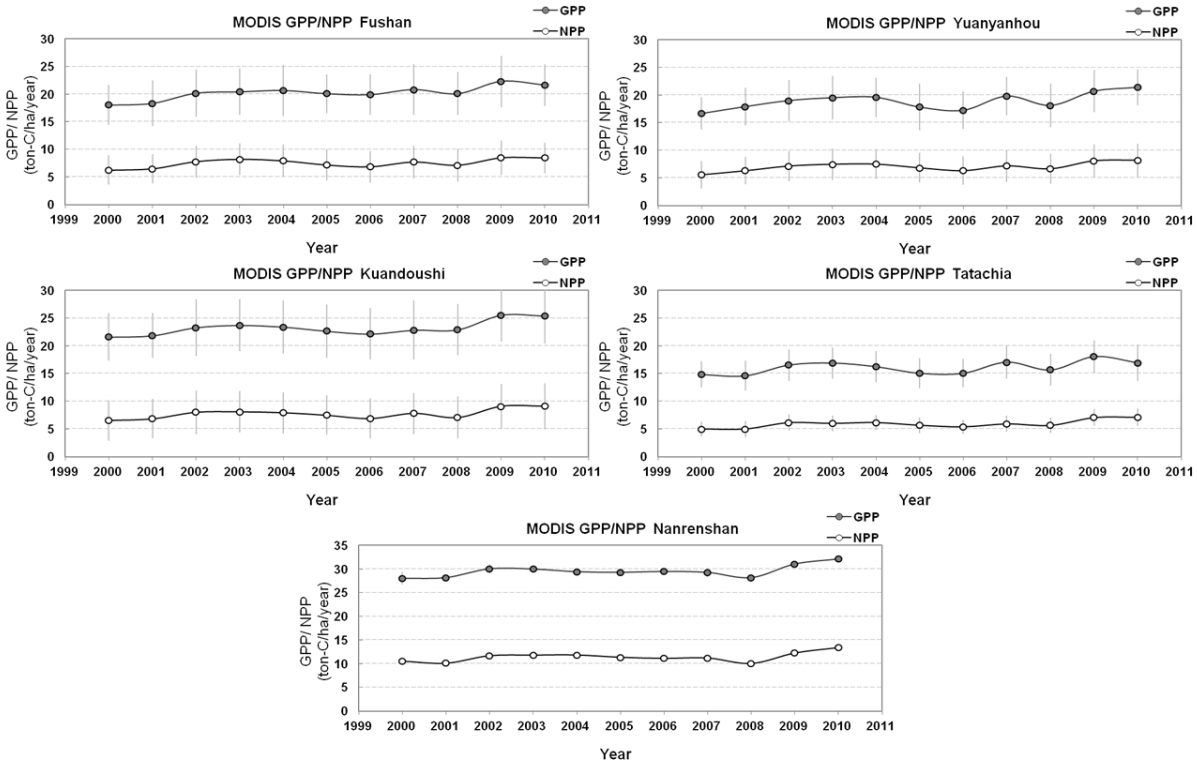


圖 30 長期生態研究地總初級生產力及淨初級生產力年度性變遷

1.3 通量塔台觀測與遙測資料比對

1.3.1 通量塔台觀測與資料收集

在空間尺度上，陸域生態系統的碳循環既受到全球及區域性環流所控制，又受到微氣象環境及生物生理機能的影響，在全球氣候變遷及生態演替的時間格局下，短時距的氣象變動又左右著生物生態反應，為了研究碳循環在不同尺度的時空變化，須整合多重、獨立而又互補的碳水循環研究，以了解各生態系統碳匯或碳源的分布及趨勢變化。衛星遙測及氣候循環模式提供了全球及區域性尺度的碳匯觀測或估測，渦流協變性系統則提供了個體生態量測(biometric approach)與遙測全球尺度間的橫向連結，並能作為數值模式的基礎研究資料。

渦流協變性系統由於能量測大氣邊界層二氧化碳、水氣潛熱、可感熱及其他微量

氣體的通量變化，已廣泛用於森林氣象、水文、環境監測等研究領域，提供場地尺度近連續性的微氣象觀測，國際間亦有數個通量觀測網路(AmeriFlux, EuroFlux, AsiaFlux, OzFlux)合作，針對不同生態系進行常態性的渦流協變性系統觀測。渦流協變系統主要透過三維風速計及二氧化碳/水氣分析儀進行生態系統的碳水循環觀測(詳細觀測理論如附錄 B.2)，為有效解讀通量資料及生態系統的能量收支，渦流協變系統通常伴隨其他能量傳輸、水文收支及基本氣象變數的觀測，例如下行及上行短波/長波輻射、光合作用有效輻射、地表溫度、土壤熱通量、土壤溫度、土壤含水量、氣壓、氣溫、相對濕度等參數的整合量測(圖 31)。

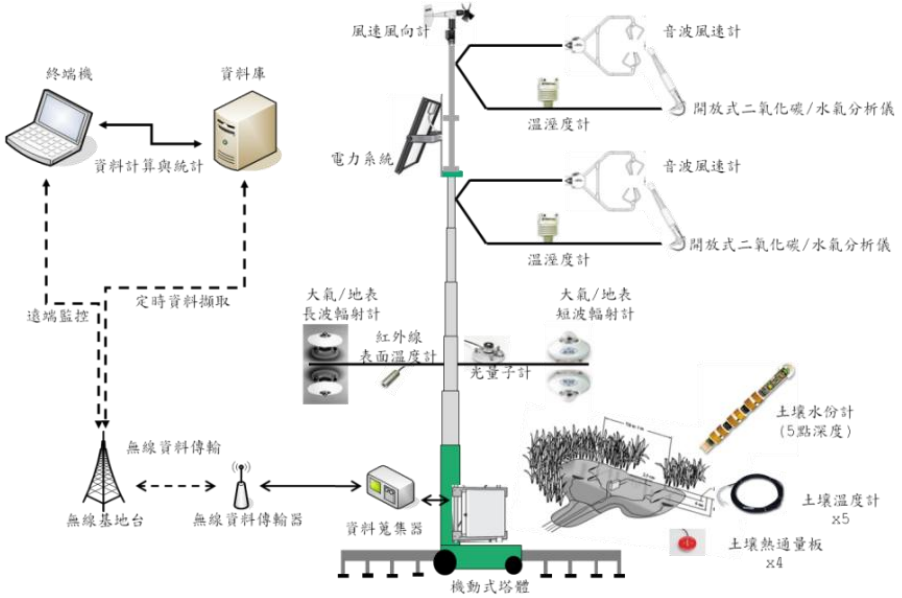


圖 31 通量觀測塔架構(圖片提供:國家實驗研究院颱風洪水研究中心)

本計畫透過渦流協變性系統的通量觀測，分析林分層級(100-1000m)的淨生態系統交換(Net Ecosystem Exchange)，並藉由通量與其他參數(例如光合作用有效輻射、溫度、蒸發散量)的交互比對，分析森林碳收支在不同時空尺度的變異情形，以對碳循環與水文收支的物理機制有更概觀的了解。研究的另一重點為遙測與通量資料的比較驗證，MODIS 資料雖提供大範圍區域的森林碳匯資訊，但遙感推演所需的生態參數、理論模型、及文獻中資料驗證的實驗基地皆以國外為主，為驗證 MODIS GPP/ PSNnet 在台灣的適用情形，需藉由不同平台的觀測數據，進行適時適地的比對驗證，以對 MODIS 資料進行較客觀的詮釋。本計畫透過國家實驗研究院颱風洪水研究中心(簡稱颱洪中心)與水利署、石門水庫管理中心的協助，利用移動式通量塔台，分別於石門水

庫霞雲水文站及巴陵氣象站進行碳水循環觀測，蒐集資料除了颱中心提供的霞雲水文站(2009/5/22-2010/1/8)、巴陵氣象站(2009/5/22-2009/12/26)、嘉義氣象站(2009/6/3-2009/6/26)、東石農場(2009/6/4-2010/5/14)通量資料，中興大學莊秉潔老師也提供了惠蓀林場北東眼山的塔台資料(2009/1/1-2010/12/31)，以及由台灣通量網所下載，東華大學夏禹九老師所主持的棲蘭鴛鴦湖(2005/4/8-2006/12/13)通量塔站資料(表 6)。

表 6 通量塔站架設點位及分布

測站名稱		坐標、高度(m)	測站位置示意圖	觀測期程	測站地貌	地形
桃園	霞雲水文站	X:286,899 Y:2,742,827 Z:323		2009/5-2010/1	常綠闊葉林定居地	山區
	巴陵雨量站	X:290,000 Y:2,730,971 Z:1210		2010/5/-2010/12	常綠闊葉林定居地	山區
嘉義	嘉義氣象站	X:192,929 Y:2,599,131 Z:5		2009/6-2009/6	定居地	平地建物
	東石農場	X:163,753 Y:2,600,190 Z:1		2009/6-2010/5	草生地水體定居地	平地
註：坐標系統為 TWD97						

1.3.2 渦流協變系統二氧化碳觀測成果

光合作用的必要條件為 CO_2、水分、及光照環境的存在，CO_2 就如同作物耕植所用的肥料，左右植物的外在生長條件，故大氣中 CO_2 濃度的急遽上升，對不同植群的影響，及其可能引發的植生演替與生物行為調適，皆為值得研究的課題；透過通量塔 CO_2 觀測資料的分析，能對植生生長及植林碳匯的外在環境有更充足的解釋。圖 32 顯示霞雲水文站及巴陵雨量站的二氧化碳濃度日變化，在 2009 年 8 月期間，其值約介於 550 -750mg/m^3 之間，除了明顯可見的日夜變化，在不同的高度海拔環境，受到重力的影響，二氧化碳濃度亦存有顯著的差異，主要由於二氧化碳分子量(~44g/mol)較一般空氣平均值為高(~29g/mol)，濃度隨高度攀升而逐漸遞減，造成巴陵測站的環境

背景值較霞雲為低；此外，劇烈天候事件影響紊流氣旋所產生的延散傳輸，且高濕環境亦影響二氧化碳/水氣分析儀的觀測準確性，造成八八風災期間二氧化碳濃度值的劇烈波動。

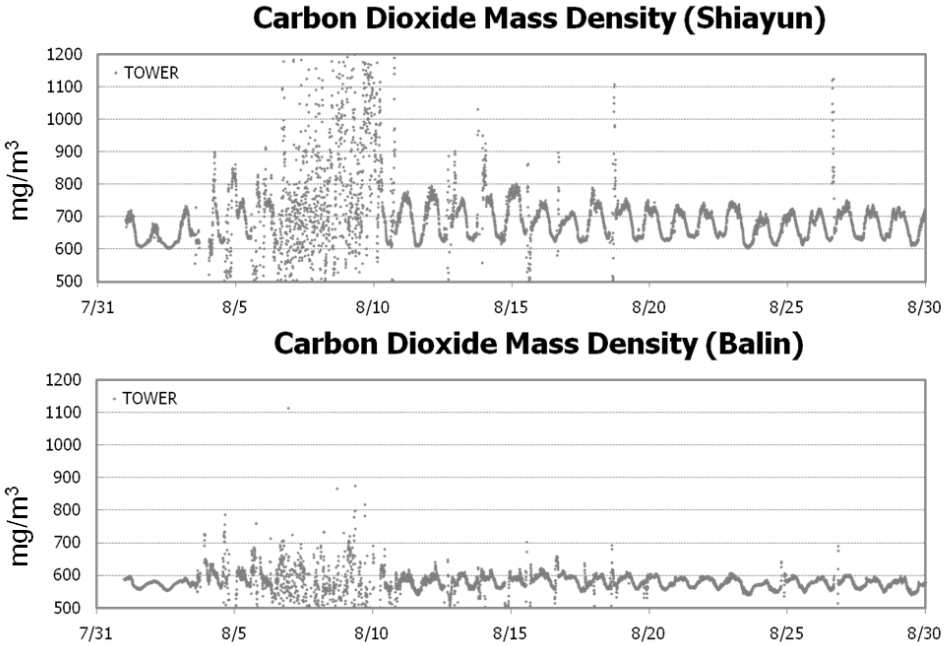


圖 32 霞雲水文站及巴陵雨量站 2009 年 8 月份二氧化碳濃度日變化

二氧化碳除了明顯的日夜變化，如將時間尺度延展，能觀測其季節性、大環境的變遷型態。圖 33、34 分別顯示東石、巴陵、霞雲，以及北東眼山、棲蘭鴛鴦湖每日的二氧化碳質量濃度平均值，霞雲、巴陵位處相似的地理氣候區，濃度值呈現近似的變化趨勢，在秋分時節達到低點，由於測點高度的落差，造成 CO_2 基線的差異，東石測站則由於臨海的關係，海風或陸風所產生的風場變化，造成 CO_2 觀測值在短期距內明顯的波動，波動的振幅甚至大於季節性的變化趨勢，棲蘭鴛鴦湖的 CO_2 濃度在 2004-2005 年間則有較大的變動幅度，此現象是否與其位處雲霧帶的氣候型態有關，仍有待進一步探討；由此可知，季節性的變遷不僅受到全球性太陽光照變化的影響，區域性的碳匯作用及天候型態亦左右 CO_2 變動的幅度及時程；就如同日夜濃度的變化隱含在季節性變遷中，區域性的影響亦依附在大尺度的全球氣候帶之內。

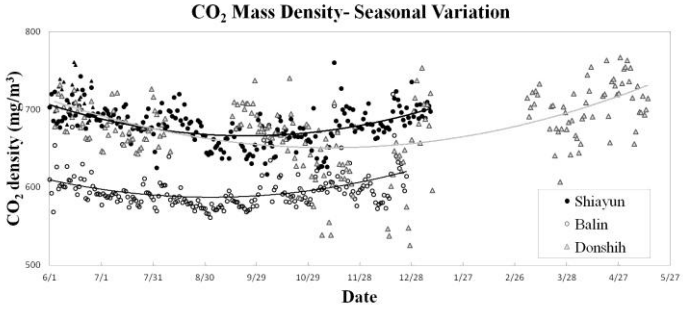


圖 33 二氧化碳季節性變化-霞雲、巴陵、東石

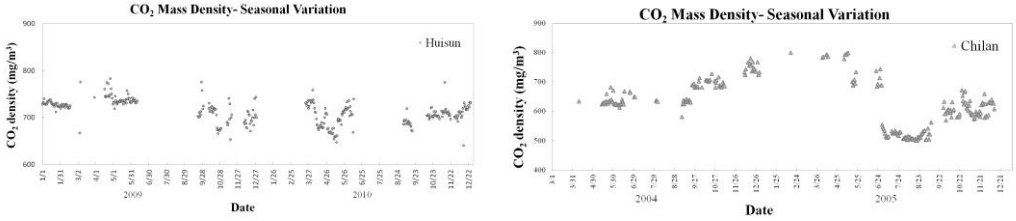


圖 34 二氧化碳季節性變化-北東眼山、棲蘭鴛鴦湖

由於通量測點位處不同的地貌類型，林相及土地利用對 CO_2 濃度變化的影響為一值得探討的焦點。圖 35、36 顯示各測站每小時整點的觀測值，呈現出明顯的日夜週期變化，約在清晨時達到濃度的最高值，白日的光合作用造成濃度逐漸減低，最低值約在 10am-2pm 之間，山區測點(霞雲、巴陵、北東眼山、棲蘭鴛鴦湖)由於地貌均一，濃度的日夜波動較小(30-70mg/m^3)，平地測點則由於周圍較為歧異的地貌、人為產生的排放源，以及風場變化的影響，濃度的波動常較為劇烈(50-200mg/m^3)。

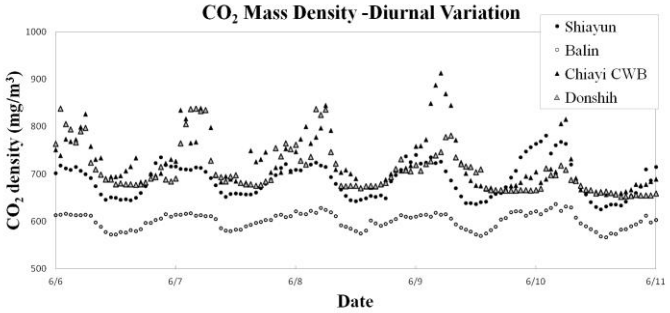


圖 35 二氧化碳日夜變化 -霞雲、巴陵、東石

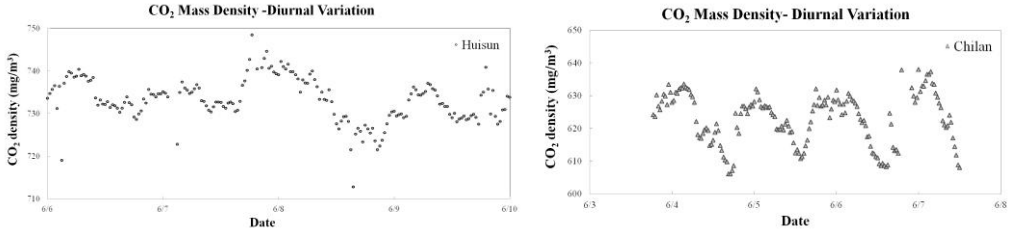


圖 36 二氧化碳日夜變化 -北東眼山、棲蘭鴛鴦湖

如同 CO_2 濃度，CO_2 垂直通量亦呈現明顯的日夜變化，但所代表的觀測尺度卻有明顯的差異，濃度觀測為區域環境的背景值，代表大範圍尺度的 CO_2 存量(stock)，而垂直通量則主要針對觀測儀器下墊面的碳匯或碳源進行偵測，代表單位區域及時間上的變化量(flux)，受到儀器架設高度的影響，所觀測到上風處的 CO_2 交換不必然反應到此背景存量的差異上，此退耦現象則與觀測值的代表區域(受儀器架設高度、地形風場影響)及其均質性有關。圖 37 顯示渦流協變系統於 2009/6/18 嘉義氣象站及東石農場每五分鐘的輸出成果(20Hz 觀測頻率)，通量負值表示二氧化碳沉積，主要受到日間植生固碳作用的影響，正值則代表二氧化碳排放，與人為排放源或呼吸作用造成的碳排放有關；由於東石農場的地貌型態以平坦均質的草生濕地及常綠闊葉林為主，6/18 二氧化碳通量呈現淨沈積(平均值:-0.191mg/m^2/sec)，亦即淨生態系統吸存，而嘉義氣象站位於都市建地，雖然下墊面為植草的觀測坪，但受到周遭工業及交通碳排放的影響，呈現淨二氧化碳排放(平均值:0.066 mg/m^2/sec)，且通量由正轉負(碳排放轉換為碳吸存)的轉置時間較晚，此外，建物區複雜的地形風場亦造成觀測通量值的明顯波動；相對而言，東石測站二氧化碳通量的波動起伏較小，則與其周遭較平緩的地形，及資料輸出頻率有關(觀測頻率皆為 20Hz，但輸出頻率相異，東石測站每 10mins 輸出(10mins 平均值)，嘉義氣象站為 5mins 輸出)。

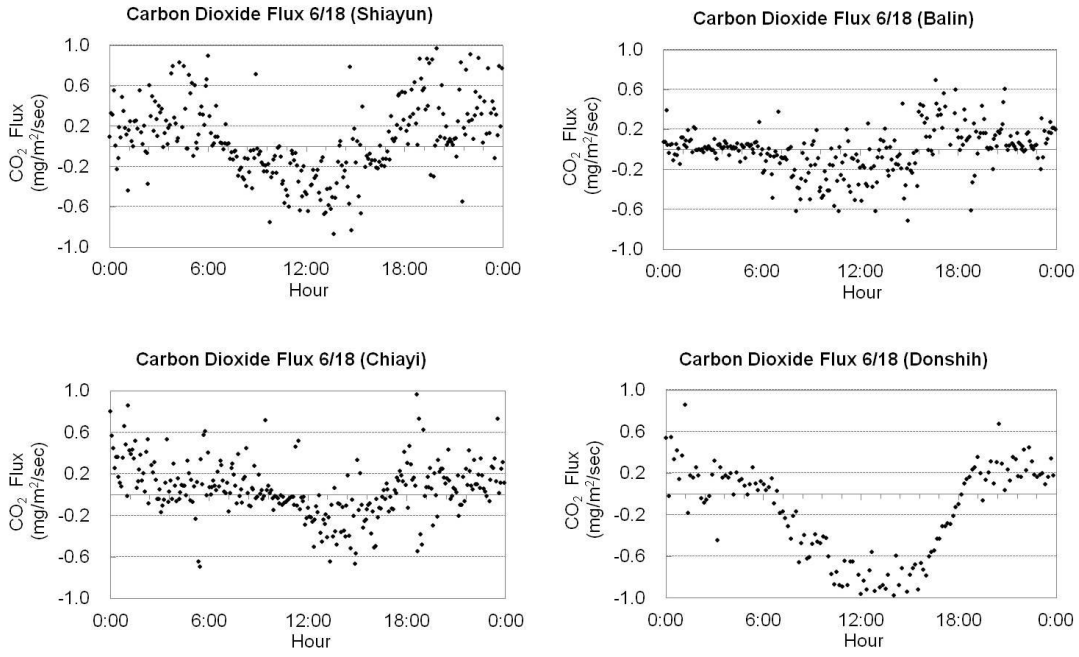


圖 37 二氧化碳垂直通量

1.3.3 淨生態系統生產力分析

渦流協變系統以微氣象觀點出發，量測大氣圈與生態圈交界近地層的二氧化碳瞬時通量(二氧化碳沉積或排放)，提供高時間頻度的二氧化碳觀測(Net Ecosystem Exchange, NEE)($gCO_2/m^2/sec$)，但由於生態系統的生態生理過程相當複雜，且受到不同時空尺度及背景環境的影響，生態研究除了著重此高頻的變化，亦關心在較長時間尺度下的淨生態系統生產力(Net Ecosystem Productivity, NEP) ($gC/m^2/day$)(式 1)，故本計畫透過高頻通量資料的篩選分析，演算日間光合作用及呼吸作用，以及夜間呼吸作用影響下的每日淨生態系統碳吸存(或碳排放)，以描述不同生態體系下的碳匯碳源分布，並提供通量觀測與遙測資料的比對平台。

$$NEP = (-1) * k * \sum NEE \qquad \text{……(式 1)}$$

k：碳與二氧化碳分子量比

以渦流協變系統觀測的 NEE 演算 NEP，主要假定在理想的地形環境(下墊面地形平坦且植被均質)及大氣條件，當渦流發展良好，二氧化碳被紊流運動所混合，且平流通量較小的背景環境下，NEE 可以紊流產生的垂直通量來表示，此外，在每日的時間尺度下，土壤淋洗作用所產生的橫向交換可予以忽略。在實際的地形及大氣條件下，此理想環境常難以充分滿足，且非理想的觀測環境亦呈現在通量資料的品質上，故事前謹慎的定位選址，以及後續的資料篩選及資料填補(gap filling)為通量資料分析必須面臨的課題；在 NEE 的資料律定中，以鏡面汙染程度(AGC)、摩擦風速(U_{star})，能量平衡(energy balance)為主要的篩選條件，以確保分析數據為符合渦流協變系統觀測條件下的觀測數值，此外，以$\pm 1 g/m^2/sec$ 為 NEE 篩選門檻值，主要考量在不穩定的天候條件下(降雨、颱風事件)，渦流協變系統觀測受到影響，造成通量值明顯的上下劇烈波動，且此非實際的通量背景值，故透過一絕對門檻值進行濾除；為進行遙測碳吸存資料的比對，著重於生態系統的碳吸存或排放，故藉由二氧化碳分子量的比例(12/44)求取碳質量。

透過前述的資料律定及 NEP 分析流程，圖 38 呈現霞雲、巴陵測站 2009 年 5 至 8 月，以及嘉義及東石測站 6 月份日間 NEP 的分析成果，圖中實線為各測站 NEP 趨勢線。在此四個觀測站中，東石農場 6 月份的 NEP 觀測值最高，或許與其較低的海拔

高度(較高二氧化碳濃度)、旺盛的闊葉林與草生地生長，以及較充份的日照有關；其鄰近的嘉義氣象站則受到周圍人為排放源的影響，NEP 呈現較低數值，此外，即使為同一測站，NEP 日變化亦呈現劇烈擾動，部分日期呈現碳排放(負值)，而非碳沉積，此應與天候條件(日照強度、雲層遮蔽、降雨)對植生光合作用的影響，或降雨風災對渦流觀測的影響有關。

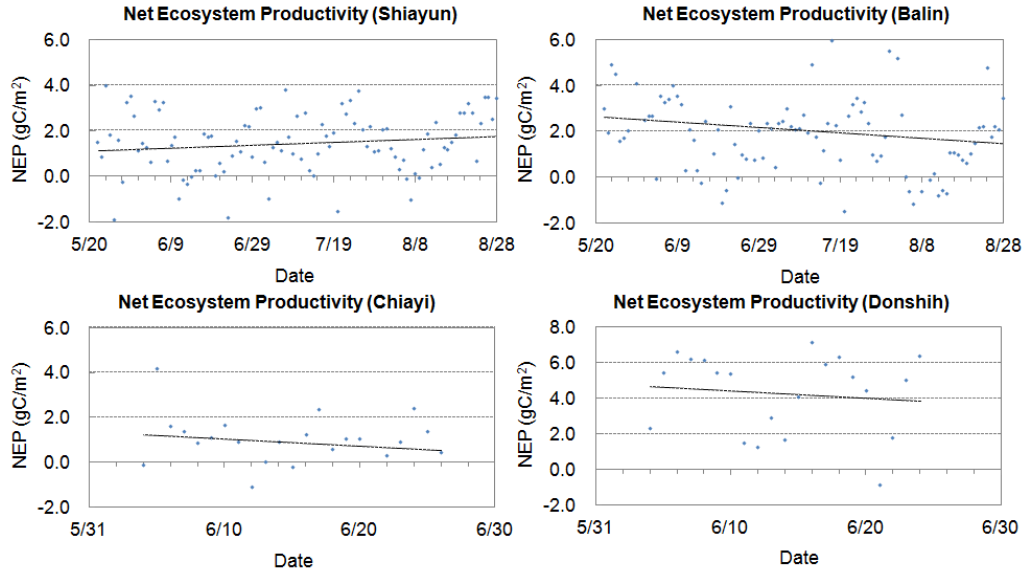


圖 38 霞雲、巴陵、嘉義氣象站、東石農場日間淨生態系統生產力

1.3.4 遙測與通量資料成果比較

遙測技術透過冠層植生的光譜反應，在假定的環境條件下(土壤、地貌植生類別、氣候條件)，反演光合作用引發的初級生產力，故實際而言，遙測並非實際量測生態系統的碳吸存，僅為感應此生理過程所引發的光譜強度差異；為提供大範圍區域碳匯碳源分布的定量資訊，遙測成果與在地資料的比對驗證，為遙測資料應用的前置條件，並能對其應用效能進行評估及改善，以作為政策應用參考。

相較於遙測推估，渦流協變系統從森林氣象的觀點，以統計方式量測觀測下植被的淨二氧化碳交換，但由於並非從複雜的生理機制出發，無從得知量測淨值為自營生物的光合作用(碳匯)，或自營及異營生物的呼吸作用(碳源)所引發，僅能得知淨生態系統生產力；相對而言，光學遙測則結合生態系統模型，透過冠層植被的光譜吸收反應，提供自營性生物總初級生產力(GPP)及淨初級生產力、淨光合作用(NPP、PSNnet)的估算，但由於感測不到冠層下土壤及異營生物的生態行為，故無 NEP 的估測；由此可

知，遙測及通量觀測由於立基不同，且有各自的假定條件，量測及推估的物理量也有所不同，但為進行兩者資料的比較，以對遙感估測資料進行驗證，需先建立合適比對的共同物理量；所幸在塔台通量觀測上，呼吸量推估較為普遍的方式，為藉由夜間溫度及呼吸量的關係式,配合日間溫度的量測,推演日間自營及異營生物的綜合呼吸量，並透過此推估值與日間淨生態系統生產力量測值的加總，求得總初級生產力；本研究以此法進行塔台測點總初級生產力的推估，並進行 MODIS 遙測資料的定量驗證(圖 39)。

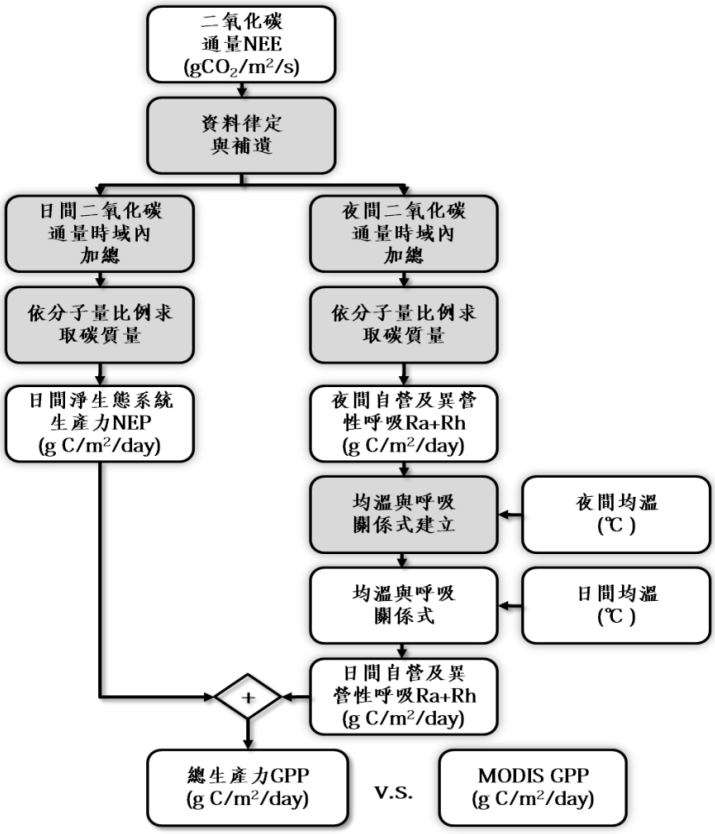


圖 39 塔台測點總初級生產力分析流程

以遙測與渦流協變技術觀測森林碳匯，不僅觀測的物理機制有所差異，觀測成果的時空尺度亦不相對稱，MODIS GPP 資料為 8 日週期，涵蓋全台範圍的 1km*1km 網格資料，而塔台觀測為每 5-30 分鐘的輸出週期，量測塔台上風處約 200-800m 區域(依塔台架設高度相對於冠層高度而定)，故進行資料比對，須先匹配兩者的時空範圍。圖 40 顯示 2009 年 5-12 月霞雲測站 MODIS 與塔台 GPP 的時間變化趨勢，MODIS 資料為塔台點位周圍 5*5km 區域內平均值(±1 標準差)，以 5*5km(25 像元區域)區域為分析

範圍,主要考量到遙測影像的空間幾何誤差及雲層覆蓋影響;塔台 GPP 則配合 MODIS 的資料週期，演算為 8 日平均值，圖 40 中空白圈號則表示無 MODIS 觀測，主要由於在 8 日觀測週期內皆受到雲層遮蔽的影響，無法取得光合作用有效輻射分量，故無 GPP 推演值。由圖 40 及 41 的資料比對可知，儘管兩觀測平台各有不同的假定條件，其 GPP 仍呈現相似的變化趨勢(R=0.7994)(p<0.05)，顯示遙測資料能大致反映實地森林碳匯的定性變遷。但在定量的比對上， MODIS GPP 則為較高，平均絕對差異(MAD)及均方根差異(RMSD)分別為 2.10 及 2.22 (gC/m^2/day)，且在生長季產生較大的差異現象，可能與光合作用有效輻射分量的錯估，或恆定的光能利用效率有關，整體而言，如塔台 GPP 觀測準確，則 MODIS GPP 高估約 30.2%，假若依年度 NPP 及 GPP 數值的比例換算，則 MODIS NPP 高估約 18.9%；當然，通量觀測也有不確定性的存在，例如日間溫度與呼吸量的關係，未必如夜間溫度與呼吸量間所呈現的線性關係，其他如渦流協變系統量測的假定條件，以及降雨或颱風事件對通量觀測的影響，皆會提高塔台觀測數據的不確定性。

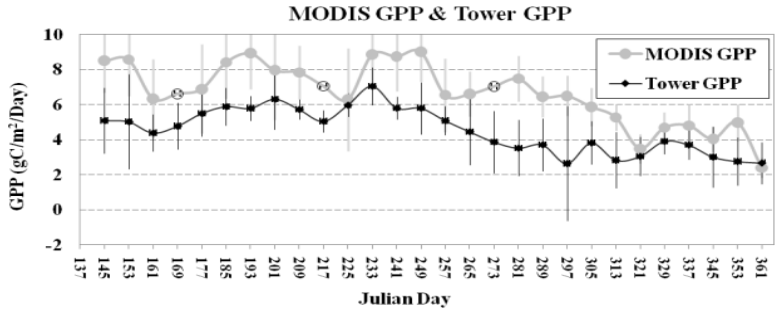


圖 40 2009 年 5 月至 12 月 MODIS 與塔台 GPP 時間變化趨勢-霞雲

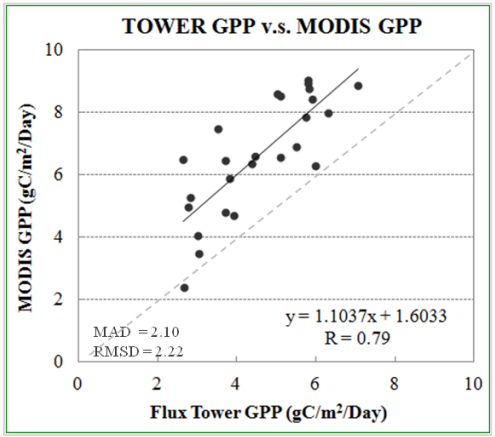


圖 41 2009 年 5 月至 12 月 MODIS 與塔台 GPP 資料比對-霞雲

巴陵測站由於夜間均溫與淨生態系統生產力的相關性較低，故無進一步推演日間的呼吸排放，但仍能從塔台日間 NEP 與 MODIS PSNnet 的時序資料(圖 42)，呈現出兩者在時間上的對應關係，藉由點對點的比較，兩者相關係數 R=0.63(圖 43)，但如同霞雲測站的成果，在生長季，MODIS 與塔台實測資料產生較大的落差，但由於 MODIS PSN 尚未扣除異營性呼吸的碳排放，此落差也可解釋為呼吸排放的貢獻。(北東眼山及棲蘭鴛鴦湖塔台由於資料遺漏較多，未再進一步分析每 8 日的累進成果，並與 MODIS 資料分析比對)。

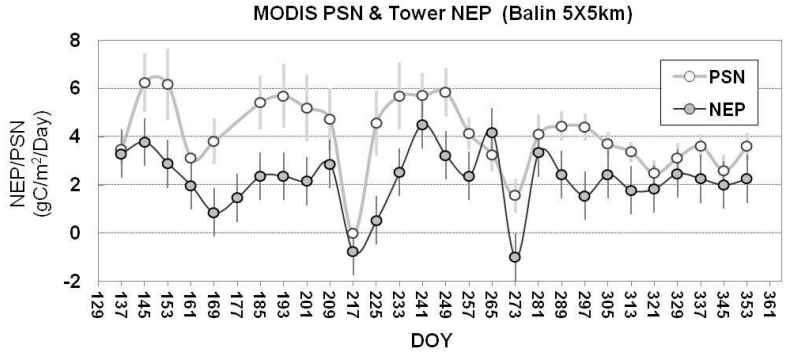


圖 42 2009 年 5 月至 12 月 MODIS PSNnet 與塔台 NEP 時間變化趨勢-巴陵

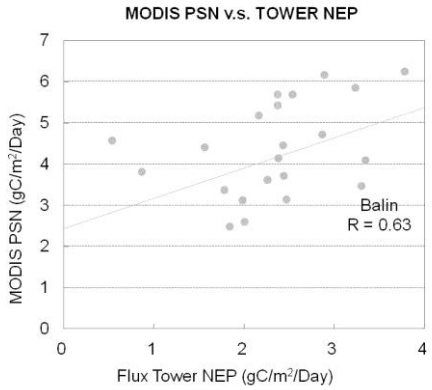


圖 43 2009 年 5 月至 12 月 MODIS PSNnet 與塔台 NEP 資料比對-巴陵

1.4 永久樣區蓄積量資料分析

1.4.1 以蓄積量推估碳儲存量

森林碳匯的功能，可有兩方面來詮釋，其一為以遙測及渦流協變技術所量測或估測的碳吸存量，以單位時間及區域內的變化量表示，另一為碳儲存量，透過生質量的型式，以單位區域的碳質量來表示；生質量可透過 LiDAR、RADAR 等遙測技術進行

蓄積的推估，或透過實地樹高、胸徑、及植株密度的系統性取樣以進行直接量測，而後者為聯合國 IPCC 清潔發展機制中明定的計量方法，也為各締約國進行林業碳移除及建立國家溫室氣體排放清冊的主要依據。本研究雖以遙測植生初級生產力為主要的分析方法，提供台灣全島植生碳匯的概觀評估，但為對森林固碳功能進行較全面的解析，亦蒐集蓄積量實測資料，整合多平台觀測方式，從碳儲存及碳吸存來共同解讀森林碳匯在空間及時間上的變異，並期望能藉由多時期生質量的觀測數據，評估儲存量變化及碳吸存量在定性趨勢的異同，以及在定量上的差異。以實地量測進行的碳儲存量推估，主要透過以下公式:

$$C_{plant} = V_{stem} \cdot V_{whole/stem} \cdot (W_0 / V_g) \cdot C_{con} \quad \text{……(式 2)}$$

C_{plant}: 單株碳儲存量

V_{stem}: 幹材材積

$V_{whole/stem}$: 擴展係數(Expansion Factor)

W_0/V_g: 基礎密度(Density)

C_{con} :碳含量轉換係數(Carbon Fraction)

上式中，$V_{whole/stem}$一般介於 1.3-2.0，但會隨林齡有所改變，W_0/V_g則介於 0.3-0.5 之間(IPCC 採用 0.5)，而 C_{con}則位於 0.46-0.49，一般以 0.5 進行計算(陳朝圳等，2011)。

1.4.2 永久樣區蓄積量及蓄積量變化

台灣地區自 1997 年起，各林管處即針對轄內林區進行永久樣區的每木調查，並每隔 5 進行複查，每樣區至今約有 2-3 筆的量測成果，可作為全台森林碳匯分佈及遙測資料比對的參考依據。本計畫透過委辦單位協助，藉由林務局森林資源碳吸存資料庫管理系統，取得蓄積量匯整資料，並透過宜蘭大學王兆桓老師，取得紅檜、扁柏、肖楠、台灣杉、香杉純林樣區共計 227 筆的資料；經由歷次調查資料的匯整、樣點座標的匹配、資料篩選律定，進行蓄積量、碳儲存變化量、以及碳吸存量的分析，探討不同地理氣候區及植群帶的碳匯能力，與遙測資料共同詮釋台灣地區森林碳匯的分佈情形。

歷次永久樣區分佈點位如圖 44 所示，蓄積量則透過樣區面積換算，以 m^3/ha 表示，其中第三次調查仍在進行，僅列舉已取得的資料成果。經由資料篩選，排除有疑

慮的資料(例如:蓄積量>2000m^3/ha)，在各地理氣候區中，以位處中央山脈西側的 CW、NW 蓄積量較高(所有樣區平均值)，並以東北部的 NE 區較低(圖 45、46)。

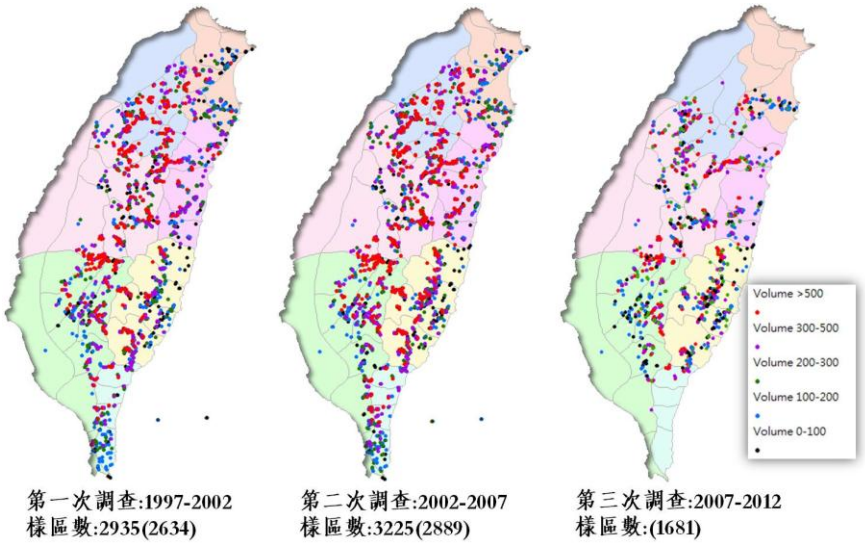
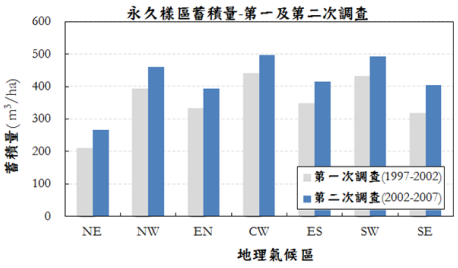
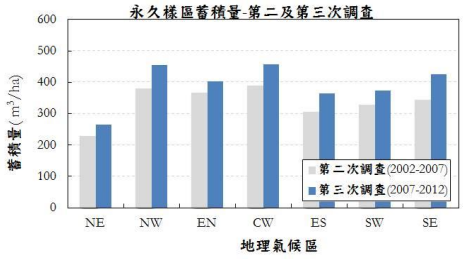


圖 44 永久樣區蓄積量及分佈點位(底圖為地理氣候分區)



永久樣區調查-每公頃蓄積量					
ecoregion	第一次調查(1997-2002)		第二次調查(2002-2007)		samples
	mean(m^3/ha)	stdev(m^3/ha)	mean(m^3/ha)	stdev(m^3/ha)	
NE	209.80	200.94	266.02	227.28	176
NW	392.76	303.66	459.84	327.59	225
EN	333.27	266.64	393.36	311.00	223
CW	439.78	359.80	497.72	392.25	432
ES	348.83	315.91	415.15	353.73	312
SW	431.08	365.76	494.01	409.71	393
SE	318.31	236.58	404.93	322.99	124

圖 45 各地理氣候區永久樣區蓄積量(第一及第二次共同量測樣區)

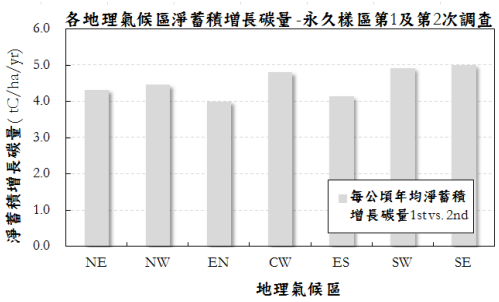


永久樣區調查-每公頃蓄積量					
ecoregion	第二次調查(2002-2007)		第三次調查(2007-2012)		samples
	mean(m^3/ha)	stdev(m^3/ha)	mean(m^3/ha)	stdev(m^3/ha)	
NE	229.29	135.95	264.64	176.26	88
NW	380.39	293.75	455.59	318.08	129
EN	366.77	339.35	401.98	339.52	207
CW	389.30	312.23	456.89	333.74	449
ES	306.62	257.51	364.74	297.77	353
SW	327.79	271.04	372.72	294.09	349
SE	344.87	218.90	426.78	259.02	36

圖 46 各地理氣候區永久樣區蓄積量(第二及第三次共同量測樣區)

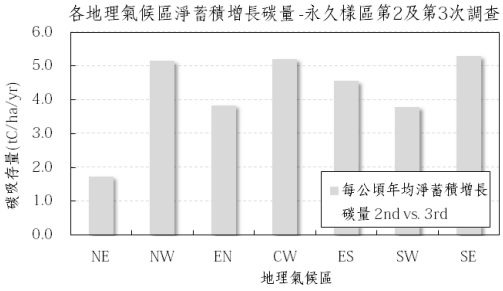
在森林碳儲存量(tC/ha)的分析上，可透過永久樣區調查的蓄積量，經由擴展係數、基礎密度、與碳含量轉換係數求得，而碳儲存變化量(tC/ha/yr)則為歷次調查森林碳儲存量的差異值，並藉由調查期距換算而得；以第一次(1997-2002 年)及第二次永久樣區調查(2002-2007 年)為例，各地理氣候區間的碳儲存變化量差異不大，以南部的 SE、SW

及中部的 CW 區較高，但在第二次及第三次調查之間，則以中央山脈西側的 CW、NW 及 SE 區較高(統計值為經由資料篩選，排除>20 tC/ha/yr 碳儲存變化量的統計成果)(圖 47、48)。



每公頃年均淨蓄積增長碳量1st vs. 2nd			
ecoregion	mean(tC/ha/yr)	stdev(tC/ha/yr)	samples
NE	4.33	5.69	176
NW	4.47	6.80	223
EN	4.01	6.34	218
CW	4.81	7.36	430
ES	4.14	8.35	303
SW	4.93	8.07	389
SE	5.01	8.42	119

圖 47 各地理氣候區永久樣區碳儲存變化量(第一及第二次共同量測樣區)



每公頃年均淨蓄積增長碳量 2nd vs. 3rd			
ecoregion	mean(tC/ha/yr)	stdev(tC/ha/yr)	samples
NE	1.72	5.46	88
NW	5.15	8.12	130
EN	3.83	6.45	211
CW	5.20	8.19	449
ES	4.55	9.05	355
SW	3.78	10.70	348
SE	5.30	6.75	38

圖 48 各地理氣候區永久樣區碳儲存變化量(第二及第三次共同量測樣區)

1.4.3 永久樣區碳吸存量

傳統森林碳吸存研究主要藉由蓄積量的淨消長，分析碳儲存變化量，而蓄積量則以生立木為調查對象，枯死木及土壤碳庫則未論及，但森林生長屬於動態過程，樣木枯死後，雖成為土壤碳庫的一分子，但仍為植生碳吸存的實際產出，雖一部分經由分解釋放至大氣中，但需耗費相當的時間，故僅透過生立木蓄積量的變化，排除枯死木的碳庫，其實是以較為保守的方式，來評估植生碳吸存的效能；以圖 49 為例，T_{j+1}(後期)生立木的蓄積量小於 T_j(前期)，如單純以蓄積量差異來判定碳吸存，則所呈現的是負值(碳排放)，但在實際的動態過程中，碳吸存一直持續進行，並反應在 T_{j+1} 時留存木的生長量(樣木 2)、新增木(樣木 4)、以及枯死木在 T_{j+1} 枯死前的增長量(樣木 3)(式 3)，故有必要區分出自營生物的碳吸存，以及異營生物的碳排放，分別探討吸存及排放的效能，才能對森林的碳匯動態有較好的詮釋。

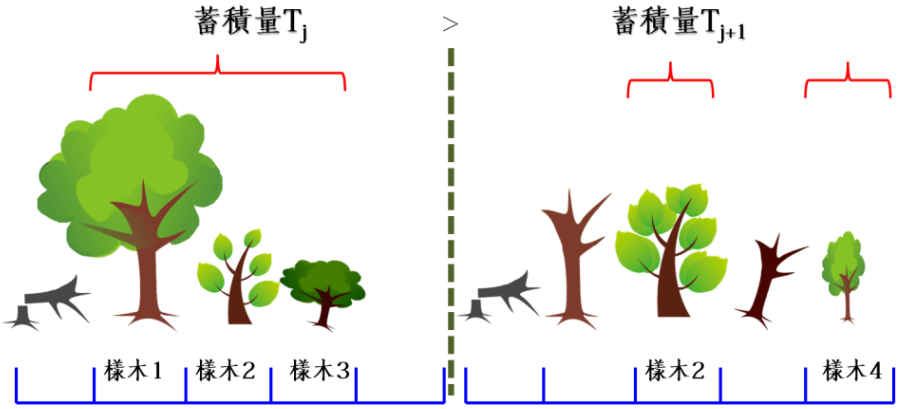
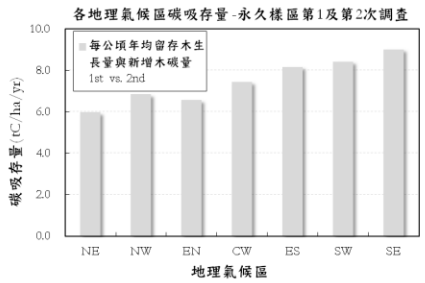


圖 49 蓄積量變化與碳吸存量

T_{j+1} 與 T_j 間碳吸存量=留存木生長碳量+新增木碳量+枯死木枯死前生長碳量……(式 3)

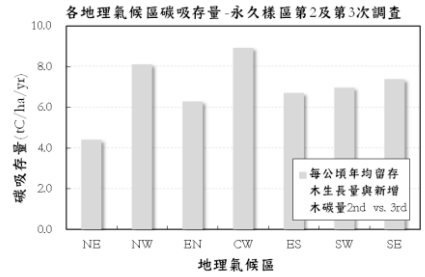
透過林務局森林資源碳吸存資料庫管理系統，能取得各事業區的永久樣區資料及樣木資料，以及歷次調查間的分析成果，包含前期樣區總材積、本期樣區總材積、本期存活木前期時材積、以及本期存活木材積等欄位資訊，本研究以本期存活木材積及本期存活木前期時材積之差，視為留存木生長量，而新增木材積則以本期樣區總材積及本期存活木材積之差進行演算，透過新增木與留存木生長量的加總，視為調查期距間植物光合作用所產生的材積增長量(永久樣區調查僅針對生立木進行調查，無從取得本期枯死木材積)，並透過基礎密度與碳含量轉換係數、調查期距、以及樣區面積的換算，分析出每公頃年均碳吸存量(tC/ha/yr)。

以第一次(1997-2002 年)及第二次永久樣區調查(2002-2007 年)為例，經由資料篩選，排除有疑慮的資料(碳吸存量>20 tC/ha/yr)，在台灣本島的七個地理氣候區中，以位處南側的 SW、ES、及 SE 區具有較高的碳吸存量，平均值介於 8.16-9.01 tC/ha/yr 之間，而北部的 EN 區及 NE 區較小，其值約為 5.97-6.56 tC/ha/yr，反應出光合作用量的南北差異，與地表淨輻射量的緯度分佈有關(圖 50)。第三次永久樣區調查目前仍在進行當中，資料檢核及蓄積量分析仍需相當時間，但透過現有資料的分析，顯示在第二次及第三次調查(2007-2012)期距間，東北部的 NE 區仍維持較低的固碳效能，南部的碳吸存速率則較為減緩，並以中央山脈西側的 CW 及 NW 區呈現較高的碳吸存量(圖 51)，顯示出持續變動的碳匯分佈。



每公頃年均留存木生長量與新增木碳量1st vs.2nd			
ecoregion	mean(tC/ha/yr)	stdev(tC/ha/yr)	samples
NE	5.97	5.35	176
NW	6.84	6.65	230
EN	6.56	7.14	224
CW	7.44	7.16	440
ES	8.16	8.19	311
SW	8.42	8.46	399
SE	9.01	9.70	125

圖 50 各地理氣候區永久樣區碳吸存量(第一及第二次共同量測樣區)



每公頃年均留存木生長量與新增木碳量2nd vs. 3rd			
ecoregion	mean(tC/ha/yr)	stdev(tC/ha/yr)	samples
NE	4.41	3.97	88
NW	8.12	6.54	130
EN	6.30	6.88	213
CW	8.94	7.15	448
ES	6.71	7.83	354
SW	6.97	8.01	352
SE	7.39	5.43	38

圖 51 各地理氣候區永久樣區碳吸存量(第二及第三次共同量測樣區)

經由前述永久樣區第一次及第二次調查期距間碳吸存量的分析(第三次調查成果仍在檢核處理中，故未納入比較)，顯示在不同地理氣候區的碳匯分佈上，永久樣區的調查成果與遙測推估數值呈現相似的分佈趨勢(以南部的 SE、SW、ES 區較高，北部的 NE 區較低，由南向北逐漸遞減的趨勢)。配合永久樣區的調查期程，本計畫擷取分析 MODIS 2000-2005 年的 NPP 資料，並進行各地理氣候區年均單位區域碳吸存量的比較，其結果如圖 52 所示，顯示兩資料雖然在觀測期程上存有落差，估測方式也決然不同，但在以木本為主的國有林地上，遙測與地面量測值呈現出近似的分佈狀況 (R=0.92) (p<0.05)，表示 MODIS NPP 能有效反應出碳匯碳源的空間分佈情形。假若比較兩資料的定量數值，遙測推估仍呈現出較高數值，平均絕對差異(MAD)及均方根差異(RMSD)分別為 0.90 及 1.18 (t-C/ha/year)，綜合而言，如永久樣區資料完全準確，則 MODIS 遙測值高估約 11.75%。

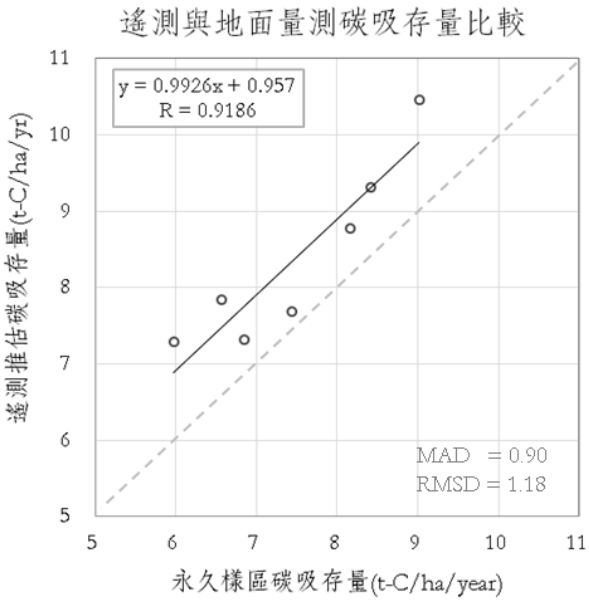


圖 52 遙測與永久樣區碳吸存量比較

1.5 森林碳匯影響機制探討

1.5.1 初級生產力與葉面積指數分析

在 MODIS 初級生產力的演算理論下，入射短波輻射(SWrad)、有效輻射吸收比例(FPAR)、光能利用效率(ε)、及植生生物量(以 LAI 為主要推估依據)為主要的演算變數，其中 FPAR、ε、LAI 皆與生態群系有明顯的相關；為瞭解各參數對初級生產演算的影響，故以 UMD 的植群劃分方式，分析 EBF、ENF、MF、Cropland 等主要台灣地貌的生產行為，透過時序性的資料分析，詮釋初級生產力的季節性變遷，及分析遙測演算的主要影響因子；圖 53 顯示 2010 年常綠闊葉林、針闊混合林、常綠針葉林、農作區 GPP 及 PSNnet 的時序性變化，以生長趨勢來看，各植群 GPP 皆在 6 月底至 7 月初，臨近夏至的時期達到生產力高峰，但實際的生長高峰，則反應在最高的 PSNnet，約在 3 月底即達到極大期，會有此 3 個月的生長季落差，則與葉面指數變化有明顯的關係；在 6 月底左右，太陽短波輻射達到極大期，而 LAI 亦於 7 月份呈現最高值，造成最高的總碳吸存量，但相對而言，較大的葉面質量亦造成較高的呼吸成本，故實際最高的生長期，早在生長季初期即已發生，雖然此時葉面尚未完全成長，但配合較低的維持呼吸成本，產生較高的碳匯能力，生物量在此時迅速累積；圖 54 呈現 LAI 及 FPAR、

LAI 及 GPP，以及 LAI 與自營性呼吸(Ra)的關係，LAI 增加一方面提升短波輻射的吸收(FPAR)，加速光合作用對 CO_2 的吸存，一方面又反應出生質量的增加及呼吸成本的提高，箝制植生無限制的增長；圖 54 中 LAI 與有效輻射吸收比例(FPAR)間呈現對數形式的正向關係，顯示當葉面積指數持續增加，FPAR 將趨近飽合，此關係亦反應在 LAI 與 GPP 間的關係，由於在 MOD17 的演算理論中，FPAR 與 GPP 呈現一線性關係；故在各植群類別中，木本植物的 LAI 及 GPP 較高，但在扣除呼吸成本後，淨光合作用的差異則沒有如此顯著。圖 55 為 2011/8/13-2011/8/20 的全台有效輻射吸收比例，顯示都會區、草本作物區、與林地間 FPAR 的明顯落差，木本植物間的 FPAR 則無顯著差異。

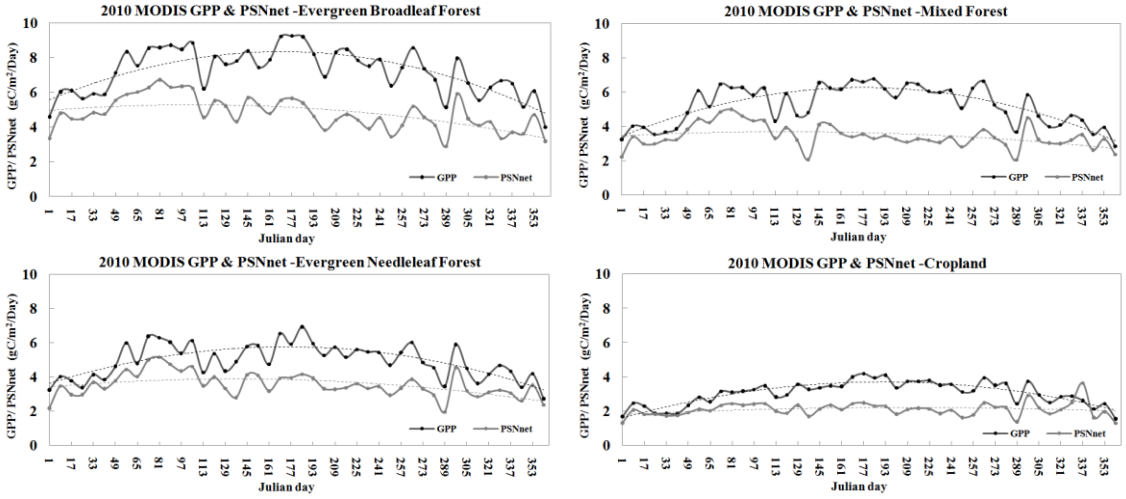


圖 53 2010 年常綠闊葉林、針闊混合林、常綠針葉林、農作區 GPP 及 PSNnet 時序性變化

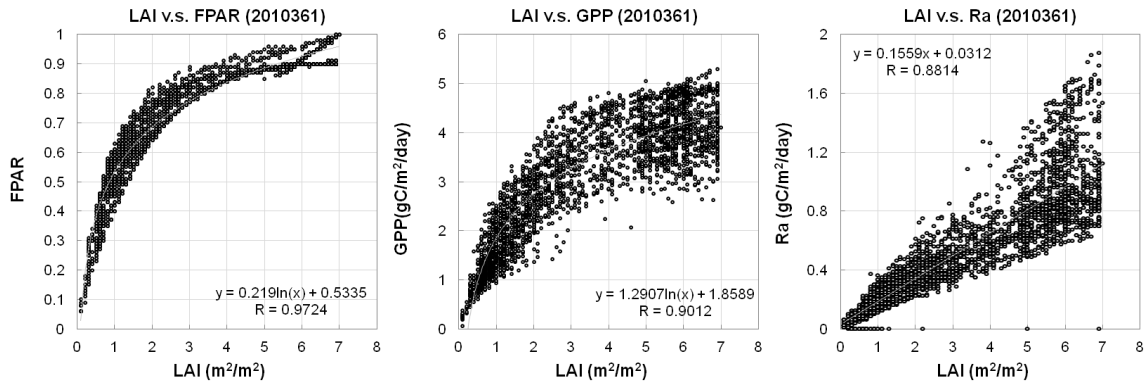


圖 54 LAI 與 FPAR、GPP、Ra 關係

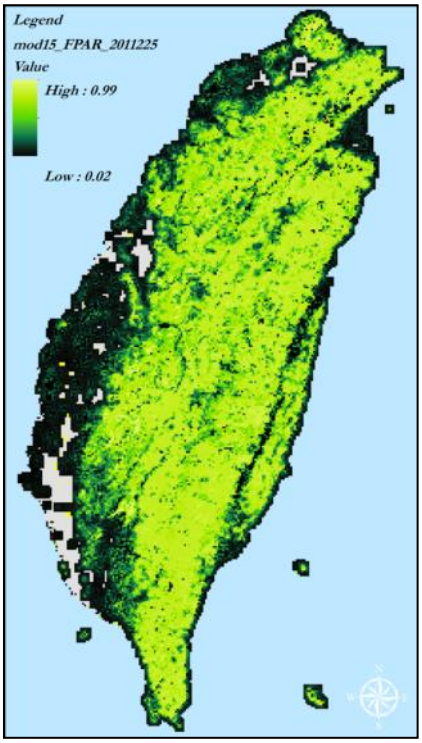


圖 55 2011/8/13-2011/8/20 光合作用有效吸收輻射分量

1.5.2 光合作用有效輻射與日間初級生產力分析

植物的碳吸存能力主要透過光合作用，在充分的二氧化碳供應及常態的生長條件下(水分供應及植生溫度)，光合作用的效能則與入射短波輻射強度有關，透過颱洪中心通量塔台 CO_2 通量與太陽輻射的同步觀測，能說明此相對關係；圖 56 顯示東石測站每半小時的光合作用有效輻射累積值(右軸)，以及每 10 分鐘 CO_2 垂直通量的平均值(左軸)，在時間軸上，短波輻射的變化量與白晝 CO_2 的通量變化呈現耦合現象，表示在同一測點及短期距的情況下，入射輻射強度決定了生態系統的固碳能力；此對應關係亦可透過散佈圖表示，圖 57 為東石及霞雲測站單日的觀測成果，顯示光合作用有效累積輻射與二氧化碳垂直通量基本上呈現一對數關係，當輻射強度逐漸增加，在光合作用機制的影響下，二氧化碳通量呈現淨沉積，亦即碳吸存，但當輻射強度持續增強，光合作用逐漸趨於飽和，此或許與植物的光合作用效能或水勢壓力有關，一可能解釋為當輻射強度持續增強，氣溫急遽升高，植物體內與外界的蒸氣壓差逐漸拉大，植物為避免體內水分過多的蒸散牽引，不得不關閉部分氣孔以保留體內水分，同時也減緩了光合作用及 CO_2 的吸存。

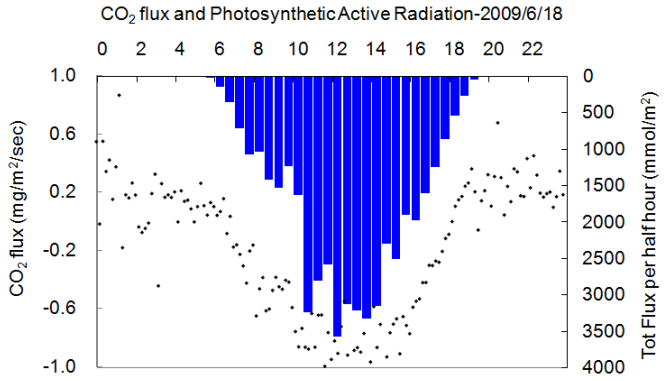


圖 56 東石農場二氧化碳垂直通量與光合作用有效累積輻射時序變化

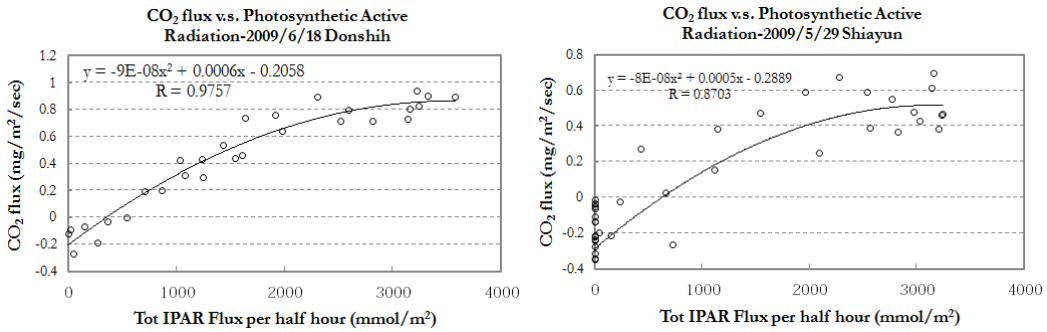


圖 57 二氧化碳垂直通量與光合作用有效累積輻射相關性-東石農場與霞雲測站

在單日的時間尺度上，入射輻射強度決定了生態系統的固碳能力，但如將時間尺度拉長，探討季節性的生產力，則光合作用有效吸收輻射分量、光能利用效率、植生生長等約制條件亦須納入考量，圖 58 分別為霞雲塔台 2009 年 5 至 12 月日間的累積入射光合作用輻射、淨生態系統生產力、以及淨生態系統生產力與累積入射光合作用輻射的比值，並呈現各別的二次式近似線，其中淨生態系統生產力為日間二氧化碳垂直通量加總，再轉換為碳量表示(正值表示碳吸存，負值則為碳排放)，包含自營及異營性呼吸的綜合影響，由圖中可知，累積入射輻射雖呈現明顯的逐日波動(主要為陽光照射有無遭受雲雨遮蔽所產生的差異)，但就整體而言，其季節性趨勢相當明顯，此與太陽入射的天頂角，亦即單位面積的入射輻射強度差異有關；相對而言，淨生態系統生產力雖也呈現季節性的波動，但與輻射強度間並無絕對的耦合關係，例如當秋、冬季輻射強度逐漸下降，淨生態系統生產力並未等比例的下跌，仍維持在一定的水平，此可能與冬季植生光能利用效率的提高，或異營性生物活動的減低有關。

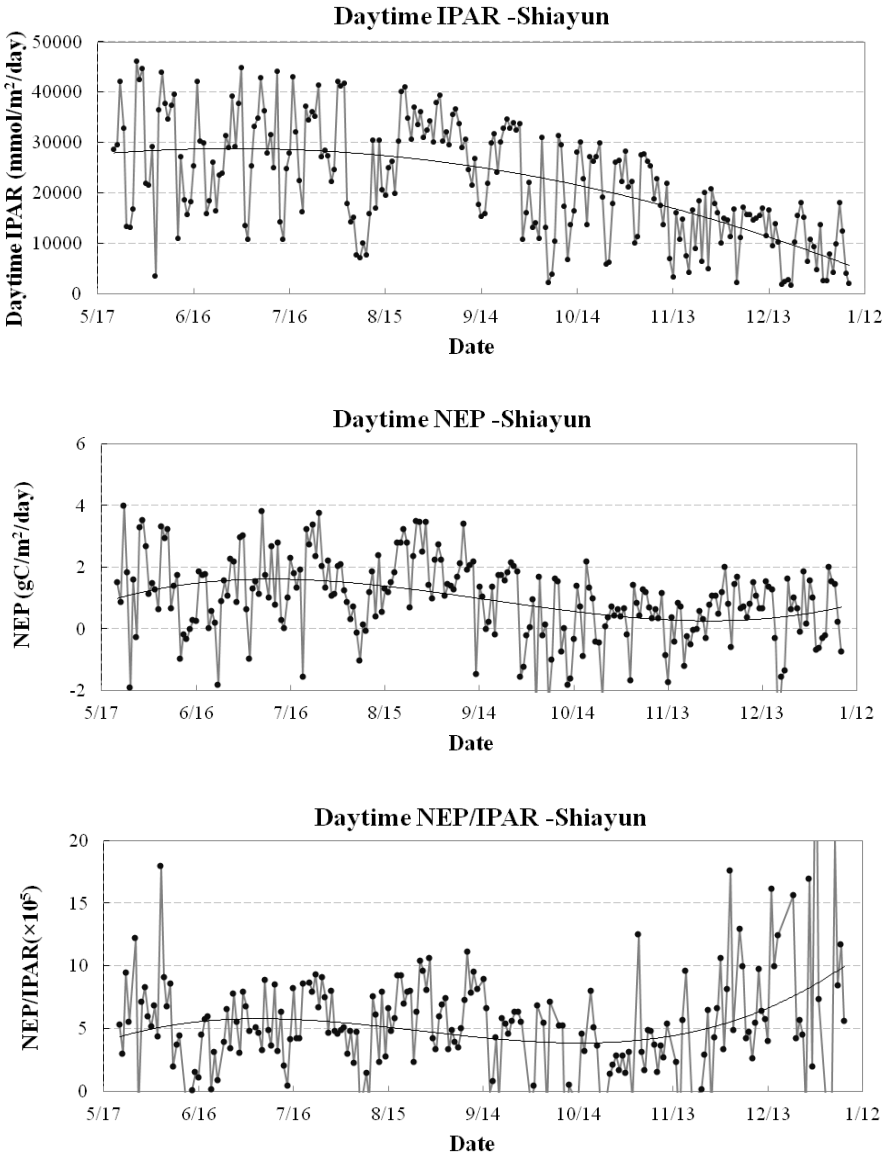


圖 58 日間 NEP 與 IPAR 時序變化

日累積有效輻射及淨生態系統生產力(NEP)的關係，除了透過時序性資料表示，也可透過分佈圖呈現，圖 59 分別顯示逐日及逐月的對應資料，其中逐月資料以月平均及±1 標準差表示;單從逐日資料來看,儘管不同月份間的影響因素不同,整體而言，日累積有效輻射與淨生態系統生產力仍呈現一線性關係($p<0.05$)，此線性相關間接佐證了 Monteith 的研究,以及 MODIS 初級生產力演算式中 APAR 與 GPP 的線性關係，此線性關係亦反應當日累積輻射低於 11mol/m^2/day 時,霞雲測站將由碳匯吸存轉變為碳源排放；如從月平均值來看，5 至 9 月間日累積有效輻射與淨生態系統生產力並無

太大的差異，且至 10 月份仍維持相近的比率，但至秋末冬初的 11、12 月份後，兩者的比值呈現較為明顯的差異。

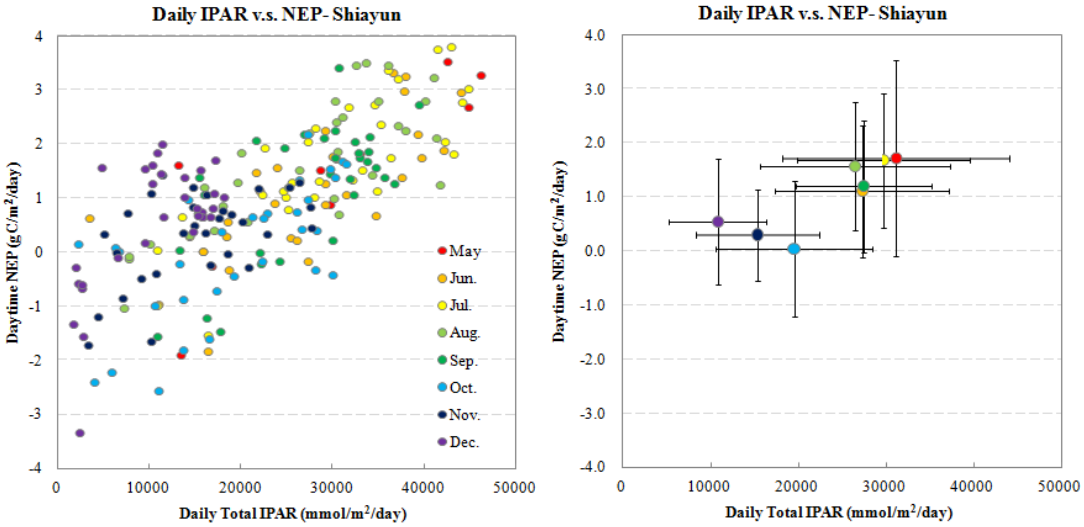


圖 59 日累積光合作用有效輻射與淨生態系統生產力關係

1.5.3 日射量與總初級生產力

通量塔台提供了高時間頻率的二氧化碳通量與光合作用有效輻射觀測，但由於侷限於少數觀測點位，主要僅能在時間尺度上進行比較，在不同的氣候條件、地貌林型下，日照量是否仍對植物初級生產力具有定性的影響，則需透過多點的實測資料加以佐證，故本計畫蒐集處理中央氣象局一級氣象站全天空日射量觀測資料，分析近 11 年(2000-2011 年)的年均日照輻射量，並與 MODIS 年度總初級生產力分析成果(2000-2011 年度平均值)進行比較，由於光合作用需在植生環境進行，故遙測 GPP 資料僅限於位在植生區域或鄰近植生區域的測站位置進行分析(共 13 測站)；儘管影響光合作用的因素相當多元(雨量、溫度、植群帶、生態區位、土壤)，但由圖 60 可知，在空間趨勢上，日射量與 GPP 仍呈現出相當程度的對應關係，顯示日照輻射的多寡，為植物碳吸存效能的重要決定因素。

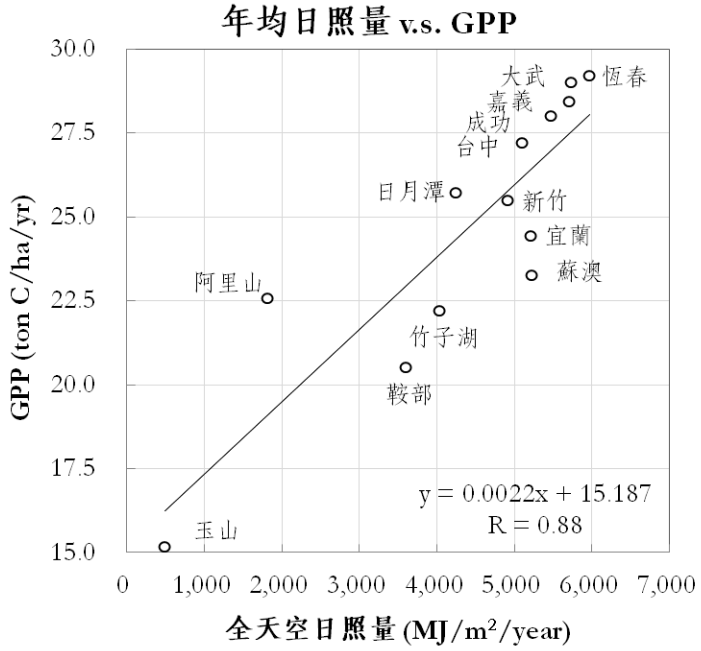


圖 60 年均全天空日照量(氣象站)與總初級生產力(MODIS)比較

1.5.4 日夜間初級生產力與蒸發散、溫度的關係

植物光合作用及固碳效率不僅受到入射光源強度的影響，在葉面氣孔打開的同時，植生水份亦受到蒸氣壓差的牽引，由植物內部蒸散出來，故植生蒸散及初級生產力的偶合效應也為森林碳吸存能力的探討焦點，可作為植物水勢狀況與碳匯能力的評估依據；圖 61 為渦流系統觀測的每日日間淨生態系統生產力及潛熱累計值關係圖(霞雲測站 2009 年 5-12 月觀測值)，顯示兩者呈現一正向關係(p<0.05)，但由於在夏季及雨季月份，水分蒸發主導了蒸發散(蒸發及蒸散)的潛熱貢獻，且此時有充足的水分，水勢壓力不構成光合作用的箝制因素，造成兩者間的的關係性不如在夜間來得顯著。

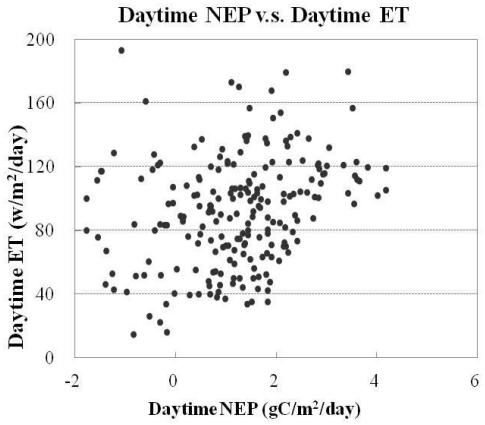


圖 61 霞雲測站日間淨生態系統生產力與蒸發散關係圖

在季節性的尺度上，日間與夜間的淨生態系統生產力趨勢線呈現一對應關係(圖62)，顯示日間較高的光合作用固碳能力，亦需要較強的呼吸作用來支持，造成夜間較高的二氧化碳排放；由於植物葉面積呈現明顯的季節性變化，與此相對應的生物量亦須透過呼吸作用取得代謝所需的能量，且仰賴初級生產者的異營性生物及其活動亦與季節性變化有關，故日間與夜間的淨生態系統生產力受到近似的季節性因素所約制(例如生物溫度、水勢壓力)。

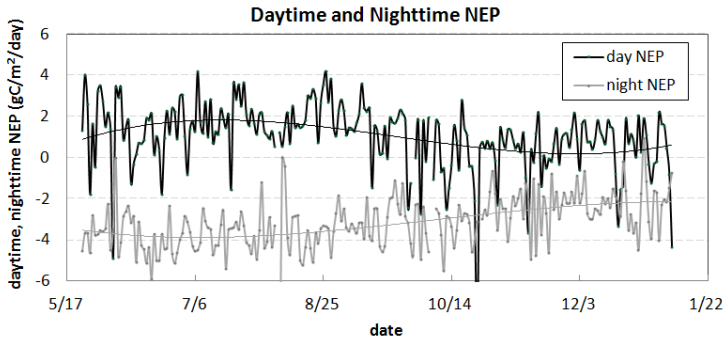


圖 62 霞雲測站日間與夜間淨生態系統生產力季節性趨勢

但如將時間尺度縮短，則日間與夜間淨生態系統生產力在季節性的對應關係，並未充分反應在逐日資料的比對上(圖 63)，主要由於光合作用與呼吸作用分屬不同的機制，日間及夜間受到不同的箝制因素所致，例如單日的雲層覆蓋造成白日的光合作用量降低(日間淨生態系統生產力降低)，但既有的生物本體仍需既定的呼吸作用來維持其生理機能(相對穩定的夜間淨生態系統生產力)，故兩者在微觀的時間尺度上，呈現出較不明顯的相對關係。

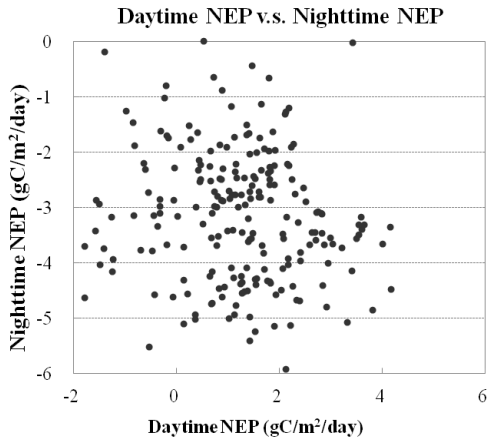


圖 63 霞雲測站日間與夜間淨生態系統生產力關係圖

日間逐時的淨生態系統交換與逐日的淨生態系統生產力，皆與光合作用有效輻射呈現明顯的正相關，相對而言，夜間的淨生態系統生產力則單純受到呼吸作用的影響，故嘗試透過夜間溫度與蒸發散進行分析；圖 64 及 65 分別為霞雲測站夜間淨生態系統生產力與夜間均溫及蒸發散的關係圖，其中夜均溫與呼吸作用(包含自營及異營生物)呈現出線性的相關性($p<0.05$)，而在蒸發散的比較上，夜間碳排放與蒸發散的相關性，則相較於日間碳吸存與蒸發散的相關性高出許多，顯示較高的日間溫度造成蒸發在蒸發散中佔有較大的潛熱貢獻比例，故在夜間較能呈現出呼吸作用與植物水分釋出的相關性。

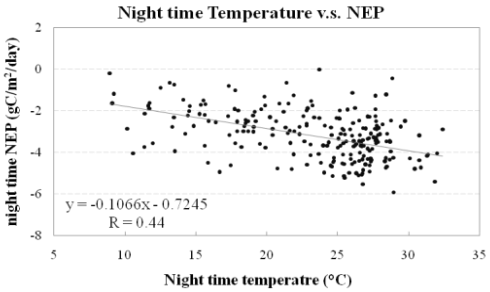


圖 64 霞雲測站夜間淨生態系統生產力與夜間均溫關係圖

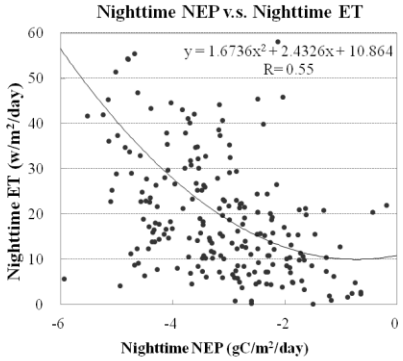


圖 65 霞雲測站夜間淨生態系統生產力與夜間蒸發散關係圖

1.5.5 東北部山區及恆春半島森林生長及碳吸存分析

森林生長及碳吸存效能與森林生長階段，以及所處的地理區位有關，透過遙測觀測，能在短時距內提供全台森林的初級生產力，並評估可能的影響機制；圖 66 為彙整了 6 年期分析成果的淨初級生產力，顯示出台灣地區主要的碳匯效能分佈，都市及平地區域由於植生覆蓋較少，或以草本作物為主，淨初級生產力較低，高山地區則由於日照輻射較低，且以針葉林或箭竹草原為主要的覆蓋林型，其淨初級生產力亦較中

低海拔的針闊葉混合林及闊葉林地為低，台灣的兩個生態熱點，一為南部的恆春半島(SE 區)，另一則為嘉義竹崎、梅山鄉一帶，此生態熱點的生長趨勢為一值得探討的課題，此外，NE 區雖有大片的原始林相，但在歷年生態分區的分析中，皆呈現較低的初級生產力，其原因亦為值得探討的焦點，研究中將彙整遙測、永久樣區等碳匯觀測資料，由碳儲存及碳吸存的觀點，比較恆春半島與 NE 區的差異，並藉由遙測與氣象資料的輔助分析，探討碳匯碳源分佈的影響機制。

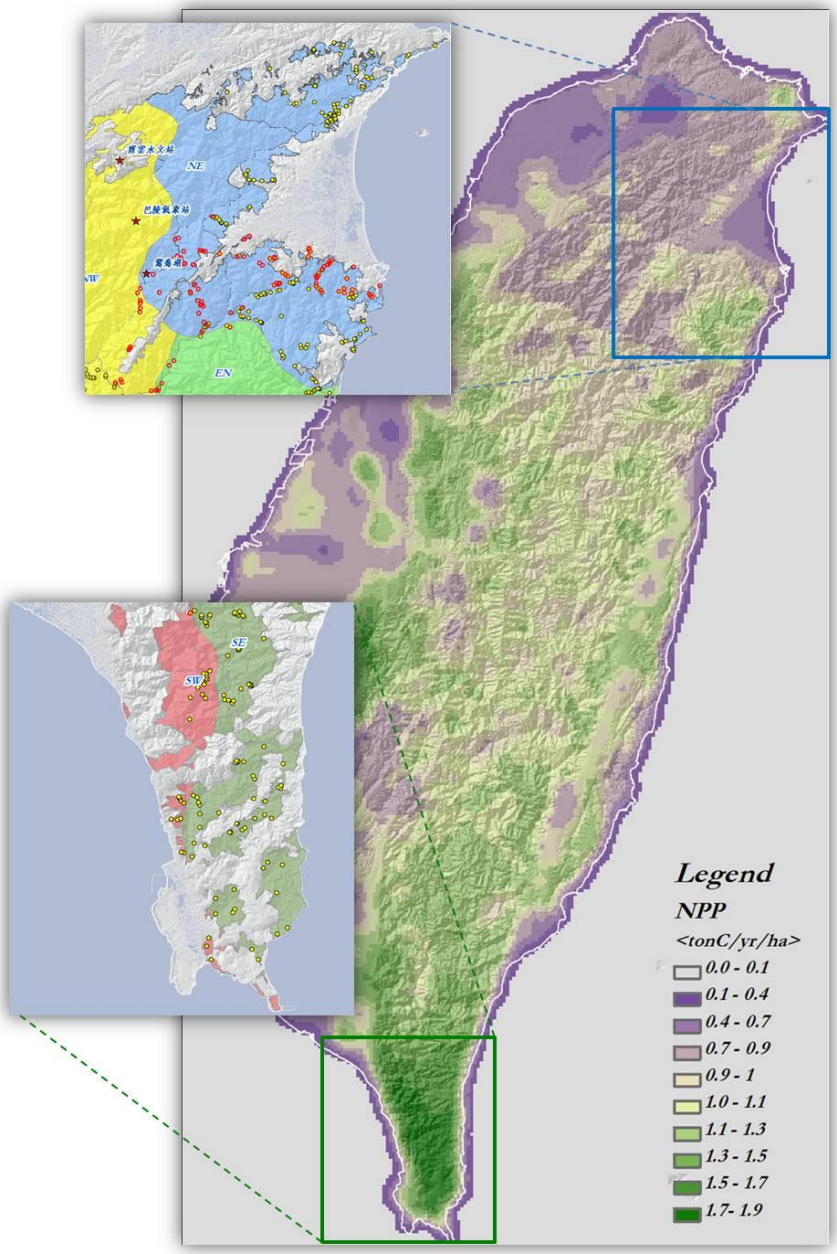


圖 66 全台淨初級生產力

NE 區及恆春半島皆以中低海拔的闊葉林為主要分佈林相(<1500m)，但淨初級生產力卻有顯著的差異，為突顯生態區位及氣候型態對此兩區域的影響，透過 5*5km 均質樣區的時序資料分析，探討森林碳匯及森林生長的季節性趨勢；圖 67 顯示 2010 年福山(NE，Alt.:600-1200m)、南澳(NE，Alt.: 300-1200m)、南仁山(SE，Alt.: 180-240m)樣區的 GPP 及 LAI 動態變化(樣區分佈位置如圖 24)，此三樣區皆以天然闊葉林為主要林相，但以初級生產力而言，南仁山明顯的較福山及南澳高出許多，且在冬季時，南仁山的闊葉林仍維持高生產力，造成落差更為明顯，而此生產力的差異既與森林生長有關，也與氣候型態有關，位處 NE 區的福山及南澳，LAI 的季節性動態變化較為明顯，冬季及夏季有明顯的差異，相較而言，位處北迴歸線以南的南仁山，其季節性的差異則不甚顯著，屬於熱帶區域的生長型態，也使南仁山在冬季時仍能維持較高的生產力。

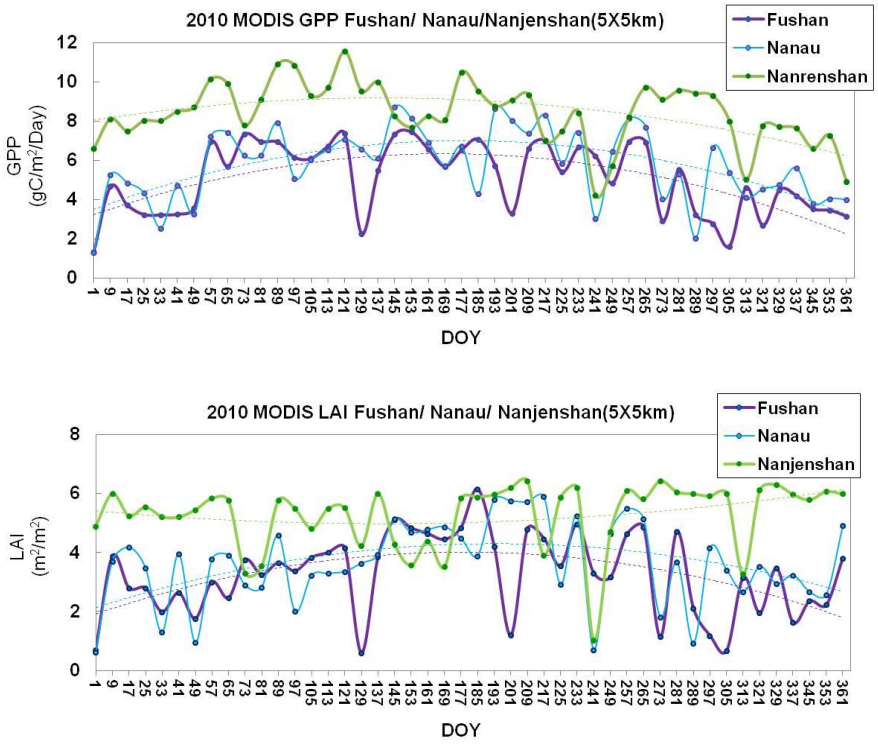


圖 67 2010 年福山、南澳、南仁山樣區 GPP、LAI 季節性變化

LAI 與日照輻射的吸收比率有關，南仁山具有較高的 LAI 及輻射吸收效能，此為 NE 區與恆春半島碳匯差異的其一影響因素，另一因素則為南部區域較強的日照輻射，藉由中央氣象局的全天空日照輻射觀測資料，圖 68 呈現 2000-2012 年的日輻射強度平

均值，以及大武、恆春、蘭嶼、竹子湖、鞍部、基隆、宜蘭、蘇澳氣象站逐月平均的日輻射強度，由逐月資料可知，夏季時除了竹子湖及鞍部氣象站受到山區雲霧的影響，造成偏低的日照輻射，其餘各測站間沒有明顯的差異，但在冬季及春季時時，SE 區(大武、恆春、蘭嶼)由於穩定的天候型態，造成恆春半島較強的輻射強度，與 NE 區產生較大落差，此輻射強度差異也反應在冬季時初級生產力的明顯差異。

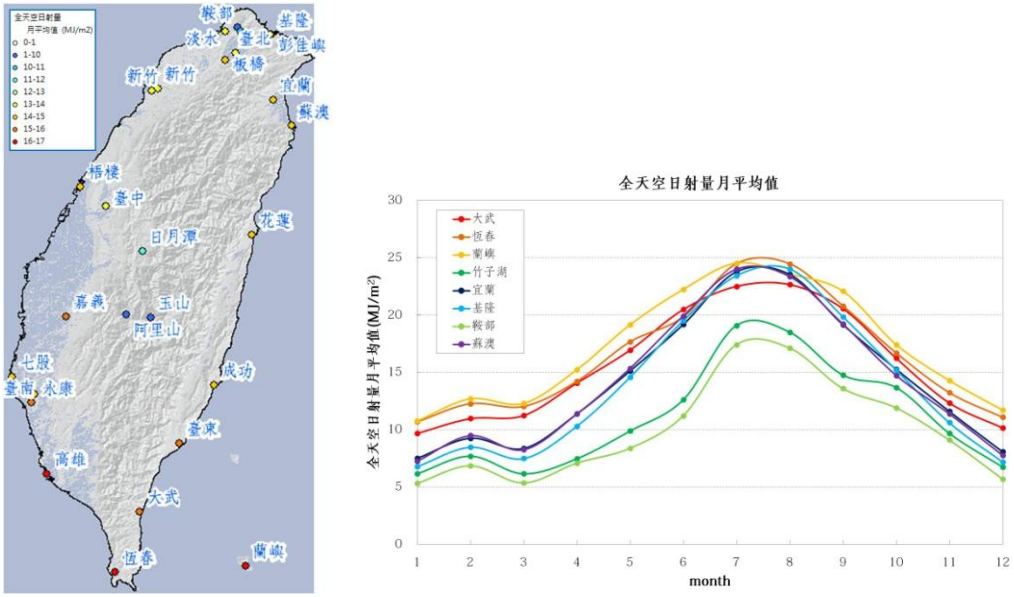


圖 68 中央氣象局氣象站分佈及全天空日射量(月平均)季節性變化

在森林碳匯的議題上，可分別由碳儲存量及碳吸存量來說明，碳吸存量與光合作用的效能有關，反應在植生的初級生產力，碳儲存量則與森林的蓄積量有關，包含林木的地上部、地下部，以及土壤碳庫等部分；碳儲存量及碳吸存量間沒有明顯的對應關係，高存量不必然代表高通量或低通量；在本研究中，MODIS 遙測主要探討綠色植生的初級生產力，碳儲存量則需藉由蓄積量實測資料來說明；圖 69 顯示永久樣區第一次及第二次調查的蓄積量(永久樣區第一次及第二次調查分佈如圖 66 中黃色點位)以及碳吸存量，包含 NE 區、SE 區、以及全區平均的成果(碳吸存量演算方式如 1.4.3 說明)；由蓄積量來看，以中低海拔闊葉林地為主的 NE 區及 SE 區，在第一次及第二次調查中，其積量皆低於全區的平均值，且 NE 區擁有 7 個氣候分區中最低的蓄積量(圖 46)；以吸存量而言，NE 區仍低於全區平均，且為所有分區中的最低，但 SE 區則高於全區平均，且在第一次及第二次調查期距中，呈現出所有分區中最高的碳吸存量。

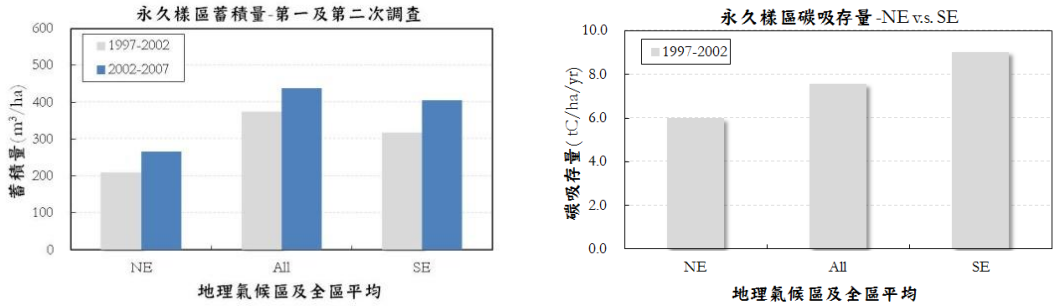


圖 69 永久樣區第一次及第二次調查期距間的蓄積量及碳吸存量 (NE 區、SE 區、全區平均值)

1.6 MODIS 資料森林碳吸存應用考量

MOD17 初級生產量演算主要參酌 Monteith(1972)光能利用效率研究，並應用推廣為全球各生態群系的碳吸存量估算，提供民間及學界參考，但在此全球性尺度、高頻率再訪且自動化運算的任務需求下，建構一般化演算式，且忽略部分地區性變異乃在所難免(Heinsch *et al.*, 2003)，故以 MODIS 資料詮釋台灣地區森林環境的碳匯碳源分布，有必要將此假定條件納入考量，並有待多重觀測技術的比對驗證；以下針對其主要的簡化假設進行說明。

恆定的生態群系參數：在 MOD17 產品運算邏輯中，最主要的簡化假設即為依生態群系劃分的各生物參數，並不隨時間及地域變動而有所改變，亦即假定台灣地區及北美地區的常綠針葉林具有相同的生物特性，且不因子生態群系中各別控制因子的影響而有所差異，此簡化假設主要考量在全球且及時的應用需求下，要因地制宜取得所有相關參數有其困難性，且將衍生出更多的輸入變數，造成輸出演算的不確定性，故在演算式中僅依據主要生態群系進行劃分，忽略地域及時域上的變異，以及區域性的控制因子。

全球性應用下的 MODIS 地貌分類：在全球性尺度的運算需求下，MODIS 生態群系分類主要依據 Boston University UMD 地物類別，將全球區分為 16 種生態群系(表 7)，生態性質參數對照表(BPLUT)依此分類進行劃分，且上層演算輸入產品如葉面積指數(LAI)、光合作用有效輻射分量(FPAR)亦依此分類為主要依據。故針對生態系統的各別子生態群系，由於其差異特徵受到不同控制因子所主導，較難於此 16 項類別中具體呈現。

表 7 地貌型態類別 (資料來源: MOD17 ATBD)

UMD Land Cover Types	
Class Value	**Class Description**
0	Water
1	Evergreen Needleleaf Forest
2	Evergreen Broadleaf Forest
3	Deciduous Needleleaf Forest
4	Deciduous Broadleaf Forest
5	Mixed Forest
6	Closed Shrubland
7	Open Shrubland
8	Woody Savanna
9	Savanna
10	Grassland
12	Cropland
13	Urban or Built-Up
16	Barren or Sparsely Vegetated
254	Unclassified
255	Missing Data

氣象與遙測資料的尺度差異：MOD17 仰賴全球性氣象資料，包含短波輻射、平均及最低溫度、比溼度(specific humidity)，據以計算光合作用有效輻射(IPAR)及最大光能利用效率的衰減乘數(最低溫及蒸氣壓力差)。此氣象資料由 NASA 資料融合中心(DAO)所提供，主要藉由地面及衛星觀測資料，配合全球循環模型(global circulation model)的模擬演算，提供 6 小時頻率及 1°*1.25°空間解析度的資料，此空間解析與 MOD17 產品 1km 網格解析度有明顯落差，區域性的氣候特徵較難於此大規模尺度中加以分辨，僅能呈現出大空間範圍的一般化氣象資訊。

2 森林生長分析

2.1 森林生長估測與葉面積指數

2.1.1 森林生長估測

台灣地區擁有豐富的森林資源，在早期林木產業興盛的年代，森林生長之估算與預測，為森林經營最重要的資訊；林木生長潛力雖可由立地品位決定，但實際生長仍依現存樹種、林木密度與經營輔育方式而定；在森林生長的估測上，主要分為單木生長與林分生長兩大項目，單木為構成林分之主要基本單位，保留過去的生長路徑，為估測及預測林分生長之基本資料來源，可藉由量測單木樹高、胸徑、樹幹形狀，以及材積生長曲線式及立木材積式的推定，估測單木的生長，如再配合林分結構、樹種、分佈密度等資訊,可再進行林分生長的測計,以提供林木產業所需的蓄積量、收穫量、輪伐期等重要資訊；隨著保育觀念的提升，近年來森林經營整合永續、水源涵養、土石保固及生物多樣性等原則，更注重森林碳吸存之功能及林木的生長蓄積過程。

以森林生長的過程而言，主要在於植生的總生產量（Gross production）與維持呼吸消耗量（Total community respiration）的關係，在森林建立之初，生產量大於維持呼吸消耗量，故消費者可以逐漸獲取能量，此現象稱為生長系統（Growth system）或發育系統（Developmental system）。待森林成長至穩定狀態，總生產量與維持呼吸消耗量呈現平衡後，稱為穩定系統（Steady system），此時森林雖無法釋放多餘能量，但可保持土地肥力、防止水土流失，及維持穩定的森林生態系。當森林總生產量小於維持呼吸消耗量時，則森林生態系隨即發生退化，稱為老化系統（Aging system）。

森林資源調查涵蓋的範圍因調查的目的與內容而有所不同，目前已有三次全國性的調查，而第四次的森林資源調查仍在進行中，其他森林調查多著重於局部生產林地或事業區，如每隔五至十年一次的檢訂調查。傳統上推估大面積林分生長，為先設置樣區並進行每木調查，針對胸徑、樹高等參數進行量測，再利用各樹種單株立木材積轉換公式求得樣區材積，進而推估全林分之生長。近年來應用遙測資訊進行林分調查逐漸增多，例如以空載光達技術(LiDAR)推估林木樹高及樹冠孔隙等林木結構，或藉由彩色正射影像配合地面樣區調查以估算林分材積。

衛載光學遙測由於具有資料獲取週期短、涵蓋範圍廣、具重複觀測性及降低人事成本等特點，已廣泛應用於森林生態研究等領域，但被動式光學遙測並非實際量測林木樹高或森林結構，僅為藉由冠層葉面對光譜吸收反射的特性，感應光合作用的物理化學過程，進而反演植生生產力或葉面積指數，因此利用光學遙測技術推估森林生長，需配合地面實測或整合多平台的觀測資料以進行佐證。

2.1.2 葉面積指數與估算方式

植物葉面為陽光光譜吸收與反射最主要的反應介面，也為植生生產最重要的營養器官，葉量多寡會影響生態系的初級生產力、呼吸作用、蒸散作用等生理反應，以及森林底層的透光度及泥砂沖蝕，為生態過程中控制碳、水、養份、及光環境的重要因子，植物葉量常以葉面積指數(Leaf Area Index, LAI)來表示，即單位土地面積上的單面葉面積(單位 m^2/m^2)(Norman and Campbell,1989)，葉面積指數可作為評估林木初級生產力與森林生長狀態的指標，為森林結構和功能的基礎參數（Gholz, 1982），植物在不同季節的抽芽、展葉、落葉等現象也會使得葉面積指數在一年內不同月份間有可觀的變動（Maass *et al*,1995），通常在生長季達到最高，休眠季最低，而自然環境改變與人為經營方式亦會造成葉面積的變動，例如當出現不利於林木生長的狀態，葉面積指數會降低。

針對不同空間尺度，葉面積估算所採用的方式亦不相同，空間尺度較小者主要為地面估算法，包含破壞性取樣、落葉收集、光學儀器法等，區域較大乃至於全球尺度者，可透過結合遙測技術及統計模型或冠層反射模型進行推估。

2.2MODIS 葉面積指數演算

2.2.1 MOD15 產品介紹及資料分析流程

本計畫利用 Terra-MODIS 葉面積指數及初級生產力產品作為森林生長觀測的評估指標，透過每 8 日週期 LAI 及 GPP 資料的時序分析，探討森林的冠層結構及光合作用的固碳效能。葉面積指數演算主要以植被冠層的輻射傳輸模型反演為基礎(Myneni *et al*., 2003)，此模型描述在既定的冠層結構(包含樹冠葉面積)、土壤類型以及特定陽光、視角的觀測幾何條件下，能決定各光譜波段的雙向反射分配函數(Bidirectional

Reflectance Distribution Function, BRDF)，此模型藉由 Green's Function 描述植生冠層中複雜的光譜散射吸收特性；在此模型架構下，遙測的葉面積指數演算其實為解決此反演問題 (Inverse Problem)，透過給定 BRDF 及觀測幾何等相關參數，推演其相對應的冠層結構或冠層葉面積；由於不同的冠層葉面、冠層型態、及植生背景皆可能導致相同的冠層反射，且遙測所測得的反射率亦存有誤差，故反演問題實際可能導致相當多解，而最終葉面積指數即由此多解的平均值所決定，其精度則與多解的離散程度有關。

MOD15 產品主要針對植生環境(森林及草生地)進行 LAI 反演，在地貌類別屬於定居地、裸露地、水體濕地、冰雪覆蓋的區域，則無 LAI 演算值；MOD15 推演需要 MOD09 七個波段的地表反射值(648、858、470、555、1240、1640、2130nm)、MOD12 地貌分類及相關屬性資料作為輸入參數，透過每 1-2 日的觀測，匯整為 8 日週期的資料產品，以降低大氣影響及不同觀測幾何所產生的成果差異，而此葉面積指數後續也為全株生物量及呼吸成本(MOD17)推估的參考基準。

MOD15 A2 為 MODIS Level 4 葉面積指數/光合作用有效輻射分量產品,具有 1000 公尺空間解析度以及 8 日的資料週期，在座標格式上，採用 Sinusoidal 投影，及 HDF-EOS 的儲存格式；為利於台灣地區森林生長的分析，在資料處理流程上，如同 MOD17 處理，依序進行影像鑲嵌、投影座標轉換、資料格式轉換，以及台灣本島區域的資料萃取，並將像元值轉換為 LAI 數值，此外，為降低雲層遮蔽的影響，並提供森林生長季節性的資訊，本計畫將 MOD15 A2 產品以月平均值輸出，其標準作業流程如圖 70 所示。

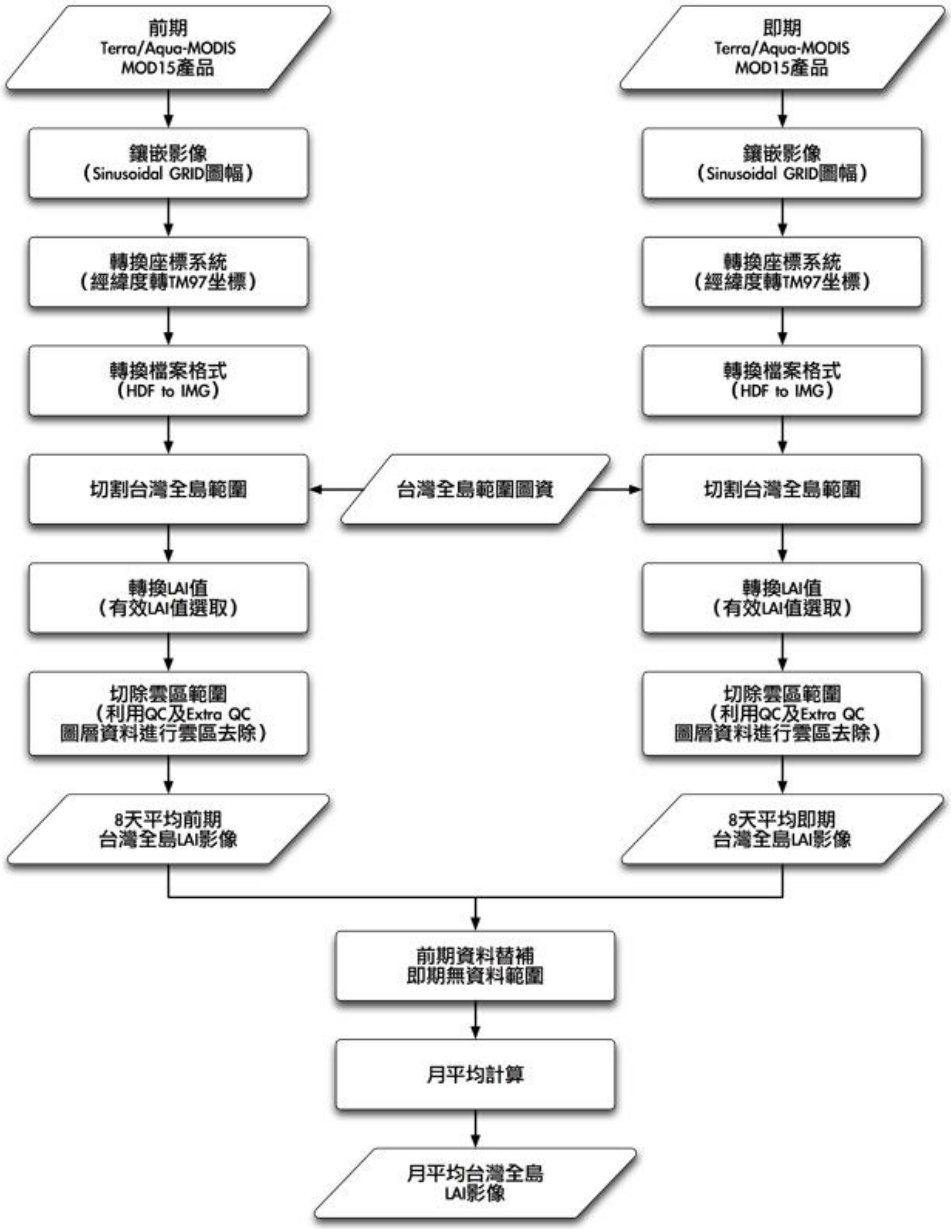


圖 70 Terra/Aqua-MODIS MOD15 A2 產品月平均 LAI 值標準作業流程

2.2.2 遙測葉面積指數資料成果

2.2.2.1 2009/10-2012/9 各植群帶逐月葉面積指數時序變化

植物葉面為光合作用最重要的營養器官，由於影響光能截取的效能，葉面積指數與季節性的森林生長與碳匯能力息息相關；圖 71 為 2009 年 10 月至 2012 年 09 月國有林區各植群帶逐月 LAI 成果，將台灣區分為高山植群、冷杉林、鐵杉雲杉帶、櫟林帶上下層、楠櫧林帶、及榕楠林帶，且排除非國有林區進行分析，以減低人為的影響；圖中可看出各植群帶呈現近似等比例的季節性變遷，當海拔上升時，各植群帶葉面積

指數逐漸下降，而中低海拔的闊葉林帶如榕楠林帶、楠櫧林帶與櫟林帶下層，呈現的葉面積指數較為相似；櫟林帶上層為針闊葉混合林型，因此葉面積略低於闊葉林的樹冠狀態；其他如鐵杉、雲杉、及冷杉林帶均為針葉林及高山植群，其葉面積較低。以生長趨勢來看，各林帶的季節性生長反應均呈現相似的情況，冬季 12 月至 2 月葉面積指數較低，並於夏季 6 至 8 月達到最高，此變化趨勢也反應在總初級生產力及自營性呼吸成本的季節性變異上。

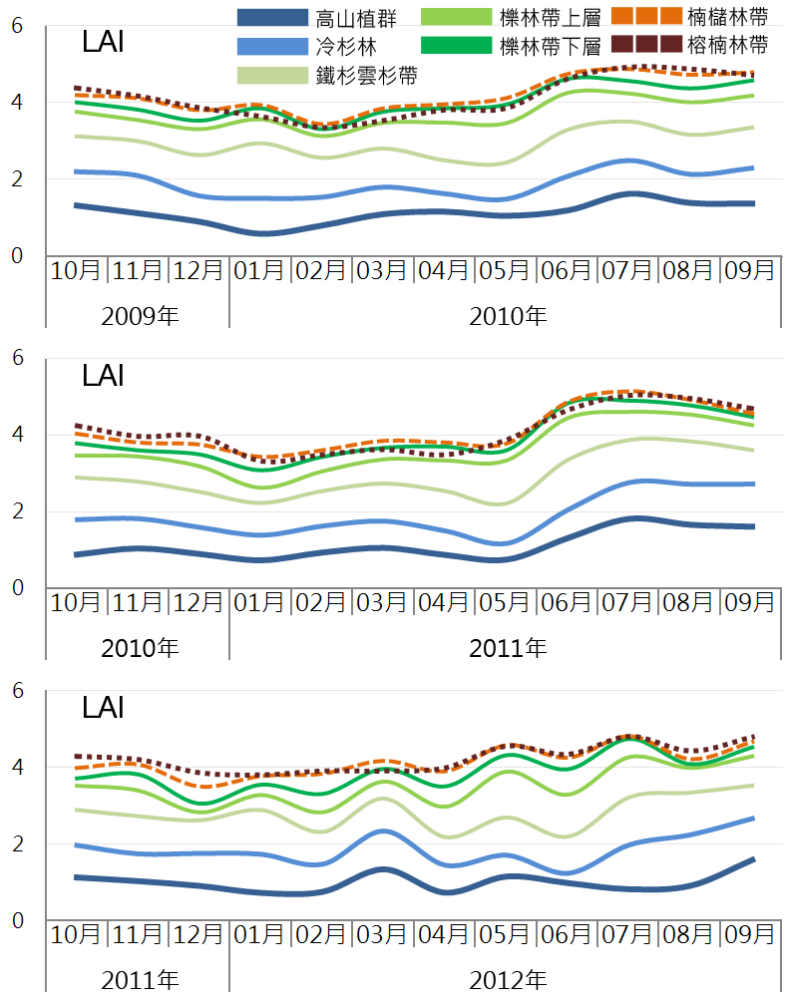


圖 71 2009/10-2012/9 逐月 LAI 時序變化(植群帶與國有林區交集)

2.2.2.2 均質樣區葉面積指數分析- 植群帶與氣候分區

透過均質樣區的葉面積指數分析，以及樣區間葉面積指數的比較，能區隔地理氣候區、生態植群等影響森林生長的因子，以對季節性的森林生長進行更詳細的解釋；圖 72 為 2010 年福山、南澳、尖石、棲蘭樣區每 8 日週期的葉面積指數成果，為 25

個樣本數的統計值(樣區分佈如圖 24)；在同為 NE 區的福山、南澳、尖石、棲蘭 4 樣區之中，屬於闊葉林相的福山、南澳呈現較高的葉面積指數，針葉林相的尖石、棲蘭樣區則維持較為穩定的葉面積指數，生長季與非生長季的指數差異較不明顯；圖中 LAI 的上下波動，應為受到雲霧干擾的影響，實際的葉面積不應在 8 日的資料期距間產生過大的變化，主要應關注葉面積在季節性的變動趨勢。

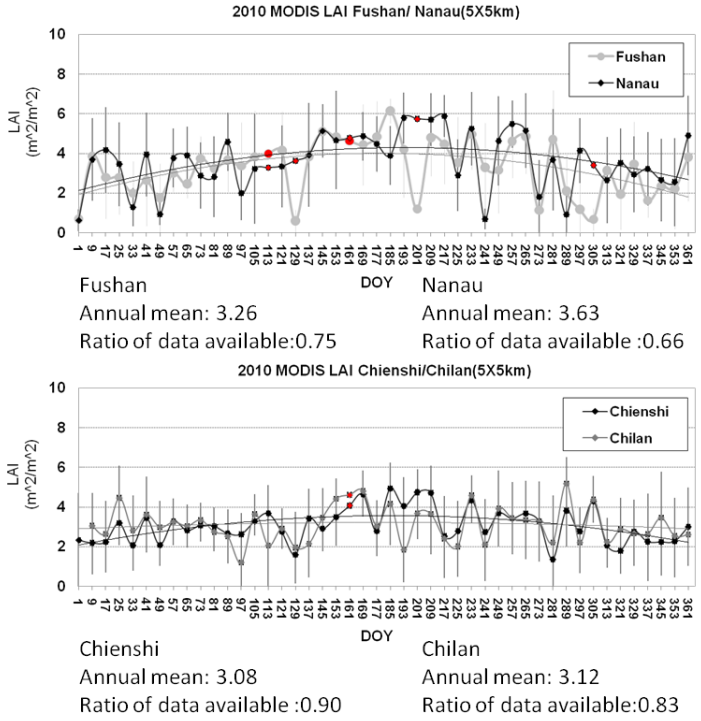


圖 72 2010 年福山、南澳、尖石、棲蘭樣區葉面積指數時序性變化

除了針葉林及闊葉林相的比較，竹林、高山植群、或南部的熱帶林相在生態區位上皆具有其獨特性，但在全台的分析中受到均化的影響，較難呈現其歧異度，本計畫藉由近期福衛影像及植群調查圖，挑選同屬或鄰近 SW 區(暖溫型氣候區)的屏東潮州、林內、玉山、南仁山樣區(圖 24)，分別為代表造林地、竹林、高山植群、熱帶林林相的 5*5km 或 3*5km 均質測區，分析其季節性的葉面積指數變化；其中玉山測區鄰近塔塔加長期生態實驗研究地，以及楠梓仙溪、沙里仙溪動態樣區，南仁山樣區亦為長期生態研究網的一部分，具有長期的生態觀測資料，潮州造林地則為通量塔台的觀測點位；經由資料分析(圖 73)，林內(竹林)的葉面積指數較闊葉林為低，而玉山(高山植群)的葉面指數亦較針葉林相為低，潮州植林地則屬於平地造林初期，故呈現較低的葉面

積指數，以闊葉林相為主的南仁山樣區，則呈現出較高的葉面積指數，且其森林生長的季節性趨勢呈現如熱帶的植群型態，全年無明顯的生長季差異，冬季及夏季的葉面積指數無明顯落差，此在台灣地區的生態環境具有特殊的意義。

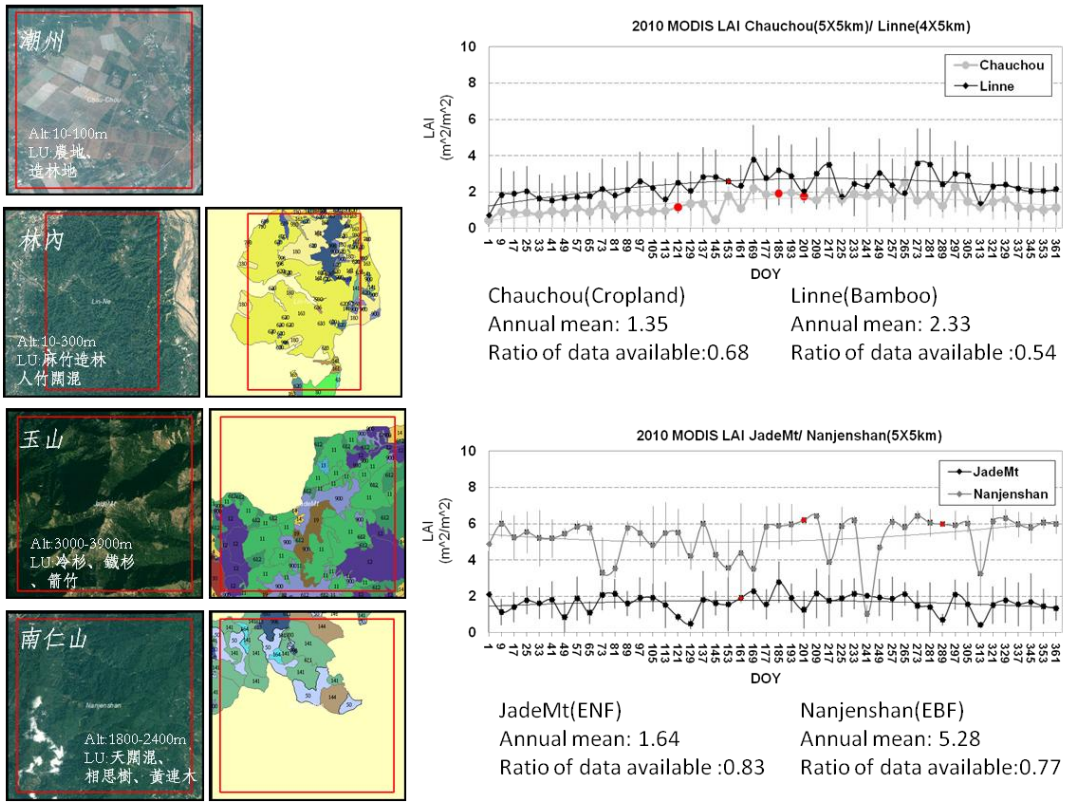


圖 73 潮州、林內、玉山、南仁山樣區衛星影像、植群類別、以及 2010 年葉面積指數時序性變化

2.2.2.3 人工林樣區葉面積指數分析

人工林的森林生長為林業經營的觀察重點，粗放或集約的輔育方式會影響林木的生長狀況；本計畫針對位於太平山、和平、大甲溪事業區的柳杉、扁柏及紅檜、二葉松人工林進行葉面積指數的時序性分析(樣區描述詳見 1.2.2.12)，以瞭解林木生長的季節性變化；由圖 74 顯示，不同造林樹種在 2010 年的葉面積指數並沒有太大差異，以年度平均來看，以扁柏、紅檜為主的和平事業區樣區，其葉面積指數較高，此或許與其較早的造林年份有關，而此高葉面積指數，也反應在其年度較高的碳匯能力。

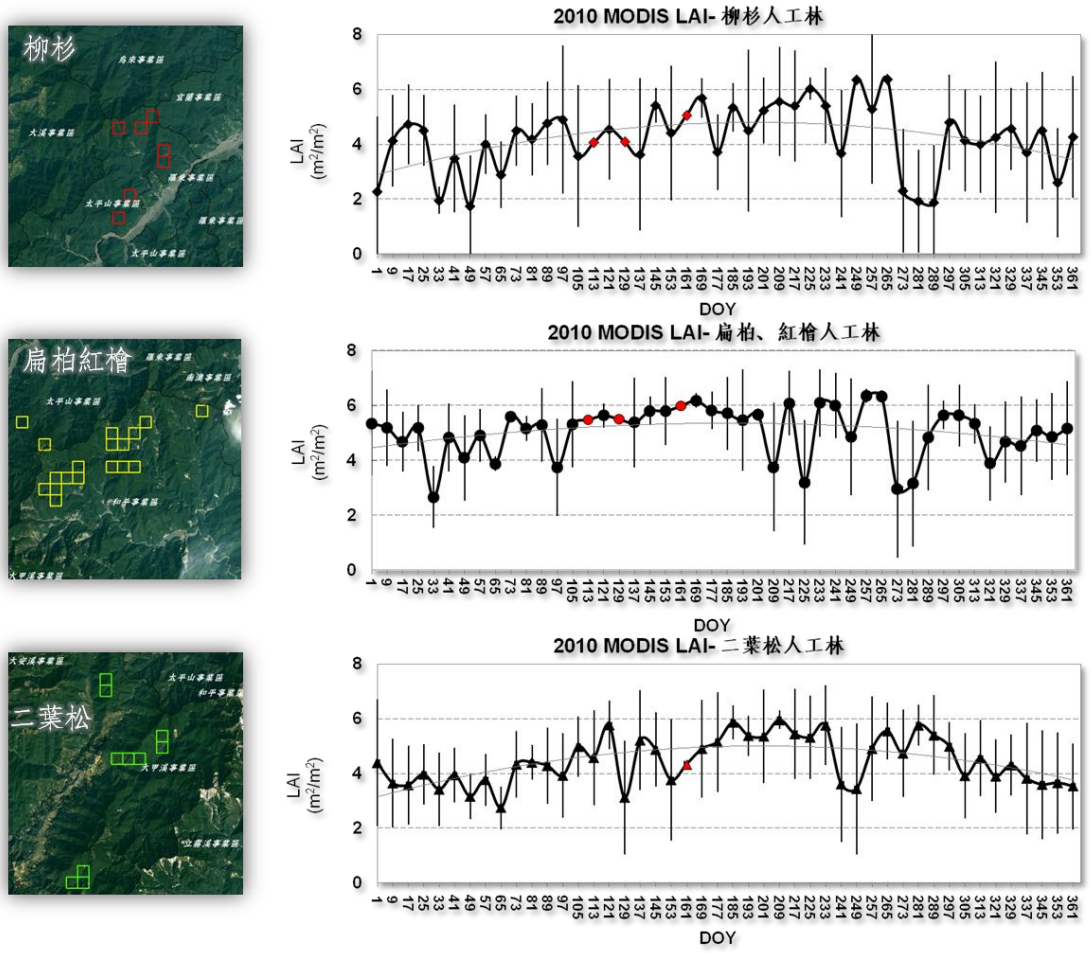


圖 74 2010 年柳杉、扁柏及紅檜、二葉松人工林葉面積指數時序性變化

2.2.2.4 大農大富農場平地造林森林生長

大農大富農場位於花蓮縣光復鄉，佔地 1,250 公頃，屬於台糖花蓮糖廠所管轄。為配合林務局所倡導「保育為主」之林業政策，自 2002 年起積極推動 6 年平地景觀造林計畫，發展環保林業，增加平地綠化面積；以 MODIS 的觀測尺度而言，由於此區域屬於大範圍且均質的初植造林地，適合透過 MODIS 常態且長期的觀測資料，檢視平地造林的林木生長情形；研究中另選擇一鄰近的闊葉林地做為參考點位，以輔助說明此新生林地的生長狀況(圖 75)。

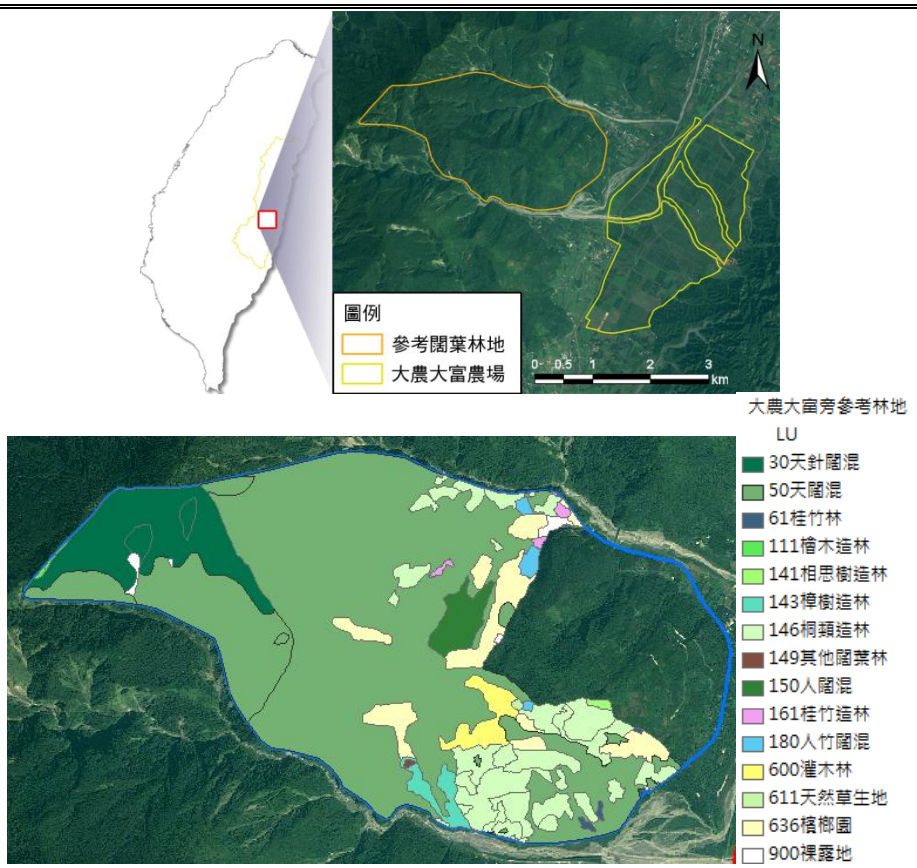
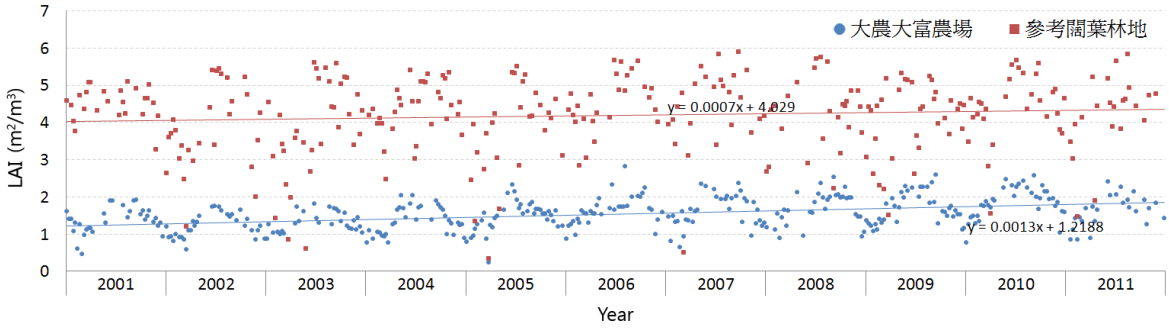


圖 75 大農大富農場區位示意圖及參考林地土地利用圖(第三次森林資源調查)

在 MODIS 的觀測參數中，葉面積指數最能反應出森林生長的概況，圖 76 為 MODIS LAI、Ra、PSNnet 11 年期的觀測成果，顯示出參考闊葉林地較高的 LAI 值(平均值約為大農大富的 2.72 倍)，與較高的植生密度與冠層複雜度，但以葉面積生長速率而言，大農大富農場高於參考林地約 94%，兩區域的 LAI 差異持續在縮減中。

LAI 值的大小也直接反應在自營性呼吸(Ra)的增減，儘管初植林地較小的生質量及 LAI，Ra 也較參考林地為低，但隨著大農大富農場 LAI 的逐年提升，呼吸排放也有逐漸上升的趨勢，且上升幅度較參考林地為高。



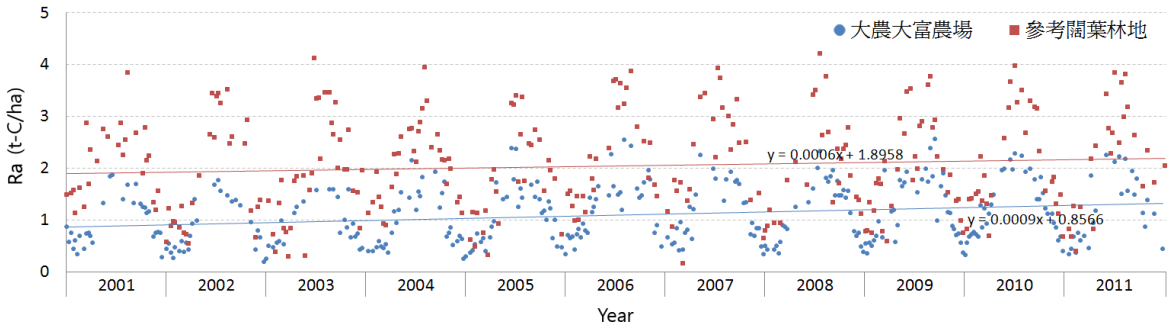


圖 76 2001 年至 2011 年大農大富農場及參考闊葉林地 LAI, Ra

LAI 關係著植物冠層光能截取及光合作用的能力，與 GPP 呈現正向的相關性，但同時也左右了植物的呼吸排放，箝制住森林生長的速率；參考闊葉林地由於 LAI 較高，具有較高的 GPP，但也產生較高的呼吸成本，相對而言，大農大富則有較低的 LAI，以及較小的 GPP 及 Ra，在一消一長的情況下，參考闊葉林地與大農大富農場的 PSNnet 差異沒有 LAI 差異來得顯著，且 PSNnet 的上升幅度也沒有明顯落差(圖 77)。

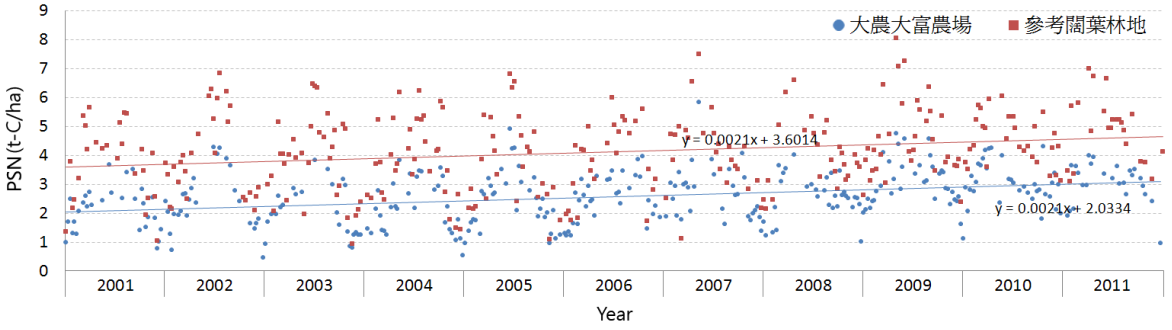


圖 77 2001 年至 2011 年大農大富農場及參考闊葉林地 PSNnet

PSNnet 與 NPP 的差異，主要在於生立木的維持性及成長性呼吸，參考闊葉林地由於較高的生物量，造成較高的維持性與成長性呼吸成本；圖 78 為 11 年期 NPP 的年度變化，顯示兩區域由於鄰近的地緣關係，呈現相似的 NPP 起伏，同樣受到逐年日照強度差異的影響，從整體趨勢來看，兩區域雖都屬於成長的狀態，但大農大富農場的增長速度是闊葉林增長速度的 1.32 倍，顯示造林地的碳吸存量雖較參考林地為低，但碳吸存增加速率卻高於參考林地。為評估平地造林與參考林地生長的顯著性，本計畫分析兩區域逐年夏季(6-8 月份)的 LAI 平均值，並透過 Mann-Kendall 趨勢檢定進行檢核，研究顯示，大農大富農場在 11 年期的森林生長資料中呈現出顯著性($Z=3.11$) ($p<0.05$)，而參考林地則不具顯著性($Z=0.93$)，由此可檢視出兩區域森林生長的差異性。

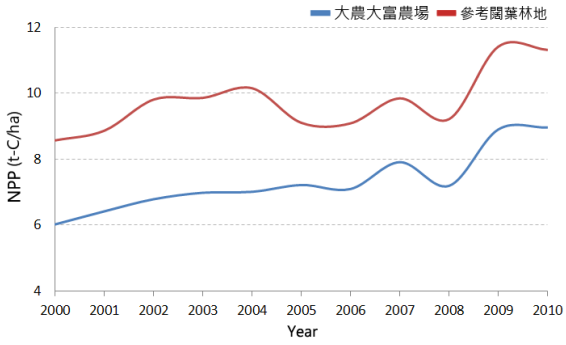


圖 78 大農大富農場及參考闊葉林地的 NPP 趨勢圖

2.3 葉面積指數實地量測

2.3.1 植冠分析儀量測方式

為驗證 MODIS 葉面積指數資料，評估在台灣地區森林生長研究的應用效能，本計畫與颱洪中心合作，利用植冠分析儀(plant canopy analyzer) LI-COR LAI-2000 進行葉面積指數的實地量測 (圖 79)；其觀測原理為假定冠層葉片呈現隨機的空間分布，在既定單一葉片的消光程度下，即能透過測定太陽輻射通過林木冠層後的透光比例，估算有效葉面積指數；LI-COR LAI-2000 由控制紀錄器及魚眼光感應鏡頭所組成，鏡頭上的感應器可同時監測 7°、23°、38°、53°及 68°五個角度的散射光，依此區分為五個環形，並使用濾光鏡限定入射的光譜波長介於 320 至 490nm 間，減少綠色葉片的反射光波，透過冠層上方及下方所測得的光照環境相比，可分別求得樹冠孔隙率(gap fraction)及葉面積指數（LI-COR，1992)；為降低儀器觀測誤差，避免太陽直射影響，該儀器量測的首要條件為均質的光照環境，故較適宜在陰天或太陽仰角低於 30°的清晨或黃昏時量測，以減緩背景光照環境差異所產生的影響。

圖 79 LAI-2000 植冠分析儀(資料來源：Campbell Scientific)

2.3.2 實地葉面積指數量測規劃

為驗證 MODIS 葉面積指數資料在台灣地區的適用性，並分析其誤差範圍及評估資料應用上的考量與限制條件，本計畫於 2011 年分別在嘉義蘭潭(經度:120.4939˚,緯度: 23.4758˚)及台中大雪山區(經度:120.9698˚,緯度: 24.2256˚)建立葉面積指數實測測區(圖 80)，進行每月到每兩月的葉面積指數觀測；嘉義樣區屬於蘭潭水庫集水區保安林地，以相思樹、血桐、麻竹、桃花心木、台灣欒為主要的闊葉林相，並以壤土為主要的土層結構，海拔高度介於 84-125m；大雪山樣區則位於東勢林管處八仙山事業區第 38 林班地，海拔高度介於 1680-1886m，包含以香杉、台灣杉為主要林相組成的人工針葉混淆林(1985 年造林)，以及以肖楠、台灣杉、台灣櫸為主的人工針闊混淆林(2003 年造林)，依據鞍馬山工作站台帳資料，此區的植株密度分別為 680 株/ha 及 1280 株/ha，並定期進行幼齡人工林的刈草、補植等撫育作業。

圖 80 嘉義蘭潭及大雪山測區位置

在量測樣區的規劃上，嘉義測區由於地形上的歧異度較大，著重於不同坡向的光照環境因子，以及人為干擾對植株生長的影響，配合數值地形模型分析的坡度、坡向，以及衛星影像分析的植生指標，挑選歧異度較大且步行可及的 6 個樣區(圖 81)；大雪山測區則著重於針葉及針闊葉混淆林的比較，以及不同林齡造林地的生長變化，同樣配合衛星影像植生指標的分析，共規劃 4 個樣區；在樣區設計上，每一樣區為 10m×10m 樣方， 每一樣方以中心點位劃分為 A、B、C、D 4 象限(圖 82)，分別進行地上部材積量測、葉面積指數量測以及現地拍攝；葉面積指數量測分別於 4 象限中心點，以背對中心點，LAI-2000 儀器高度離地約 1m 進行量測(腰際處)，並以 4 筆資料平均值及標

準差作為該樣區的量測數值；生物量量測則包含樹種辨識、植株分佈記錄、以及 B、C 象限每木植株的樹高、胸徑量測，藉此推算單株及全株生物量；樣區拍攝則分別針對 4 象限的樹冠鬱閉、樹種以及中心點的環景進行拍攝；而植冠分析儀所需的冠層上光照背景值，則以鄰近的開闊地進行量測。在圖 81 中，各樣點周圍區域(以黃圈標示)則為植冠分析儀的觀測範圍，由各樣區平均樹高與量測儀器高度的高差，配合植冠分析儀鏡頭的73˚觀測視角推算而得，主要由於實地觀測資料須配合衛星影像進行分析，故須明確界定實地量測數據在影像空間上所代表的範圍，以準確建立不同觀測平台量測參數間的關係。

圖 81 嘉義蘭潭及大雪山測區位置及測點分佈

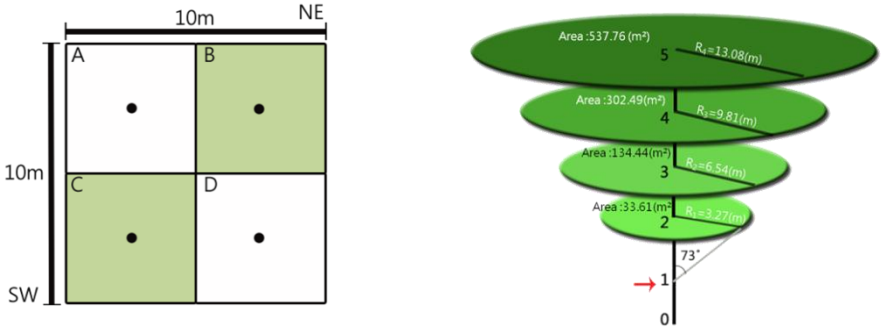


圖 82 樣區規劃及植冠分析儀觀測範圍示意圖

2.3.3 葉面積指數實測成果

2.3.3.1 嘉義蘭潭及大雪山葉面積指數實測成果

本計畫自 2011 年 3 月及 4 月份起，進行每月嘉義蘭潭及大雪山樣區的葉面積指數實測，記錄資料包含葉面積指數(LAI) (表 8、9)、冠層透光比例(DIFN)、平均葉面傾角(mean tilt angle)，及冠層狀況(圖 83)與光照環境的照片拍攝(完整觀測成果彙整於「遙測技術在森林健康、生長量與碳吸存之研究(2/3)」附錄 C 中)，並透過鄰近實測日期

SPOT 衛星影像的蒐集，分析測區的植生狀況(圖 84、85)。

圖 83 冠層空照圖-嘉義蘭潭樣區樣點 2(左)及大雪山樣區樣點 4(右)

表 8 嘉義樣區葉面積指數觀測成果

嘉義蘭潭試驗區實測LAI													
樣區		No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		No.6	
統計值		平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
LAI量測成果	2011/3/23	2.31	o.15	3.43	0.07	2.76	0.03	1.55	0.12	3.12	---	3.47	---
	2011/4/20	2.88	0.14	3.30	0.18	2.92	0.13	0.68	0.13	2.29	0.19	2.99	0.15
	2011/5/18	3.07	0.12	3.68	0.26	2.61	0.16	1.78	0.06	3.77	0.19	3.19	0.18
	2011/6/22	3.61	0.13	4.15	0.07	3.49	0.39	2.36	0.14	2.09	0.24	3.55	0.17
	2011/7/28	4.19	0.14	4.14	0.05	4.43	0.63	2.96	0.13	3.05	0.30	4.05	0.25
	2011/9/21	5.43	0.40	4.54	0.09	4.40	0.37	2.11	0.18	2.62	0.49	3.15	0.21
	2011/10/19	5.15	0.29	4.56	0.27	4.77	0.16	2.37	0.14	2.72	0.29	3.21	0.13
林相		闊葉林		闊葉林		闊葉林		闊葉林		闊葉林		竹闊混合林	
坡向		西北		南		東北		---		---		---	
經營型態		自然生長		自然生長		自然生長		人為干擾		自然生長		自然生長	

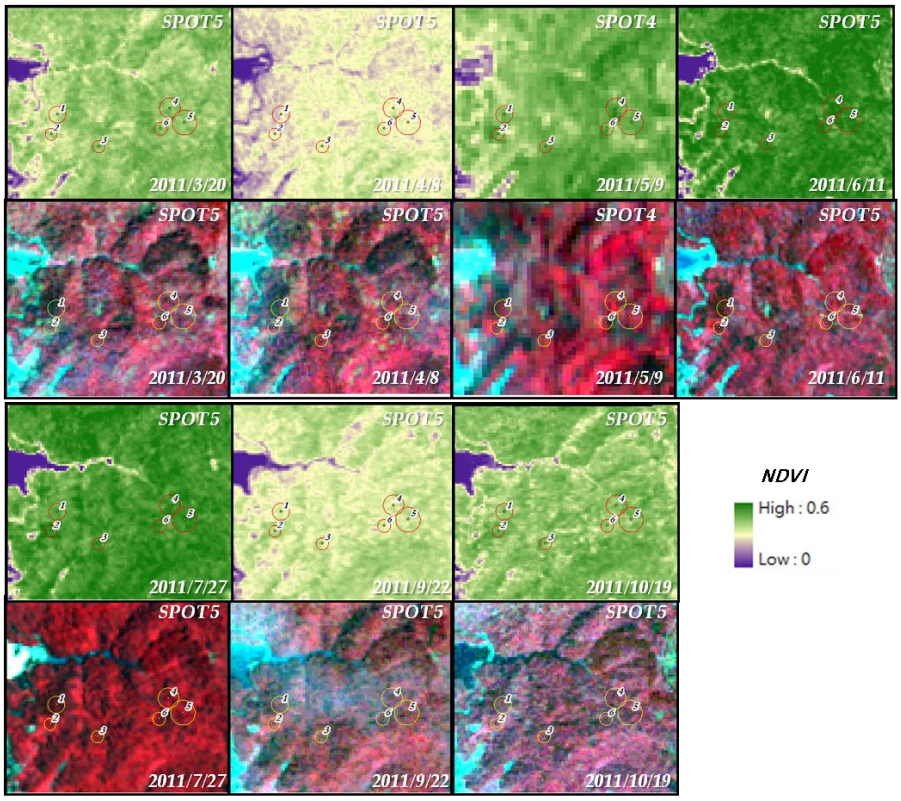


圖 84 嘉義蘭潭測區 SPOT 衛星影像及 NDVI 影像

表 9 大雪山樣區葉面積指數觀測成果

台中大雪山試驗區實測LAI									
樣區		No.1		No.2		No.3		No.4	
統計值		平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
LAI量測成果	2011/4/19	0.90	0.13	0.36	0.11	1.28	0.07	2.67	0.09
	2011/5/18	0.70	0.04	0.64	0.10	1.23	0.19	2.47	0.04
	2011/6/22	1.16	0.14	0.36	0.11	1.34	0.25	3.01	0.13
	2011/7/28	1.03	0.08	1.19	0.12	1.32	0.22	2.62	0.20
	2011/9/21	1.04	0.12	1.00	0.09	1.40	0.20	2.99	0.17
	2011/10/19	0.81	0.07	0.85	0.09	1.33	0.13	3.11	0.19
林相		人工針闊混合林		人工針闊混合林		人工針闊混合林		人工針葉混合林	
坡向		南		南		南		東	
造林年份		2003		2003		2003		1985	

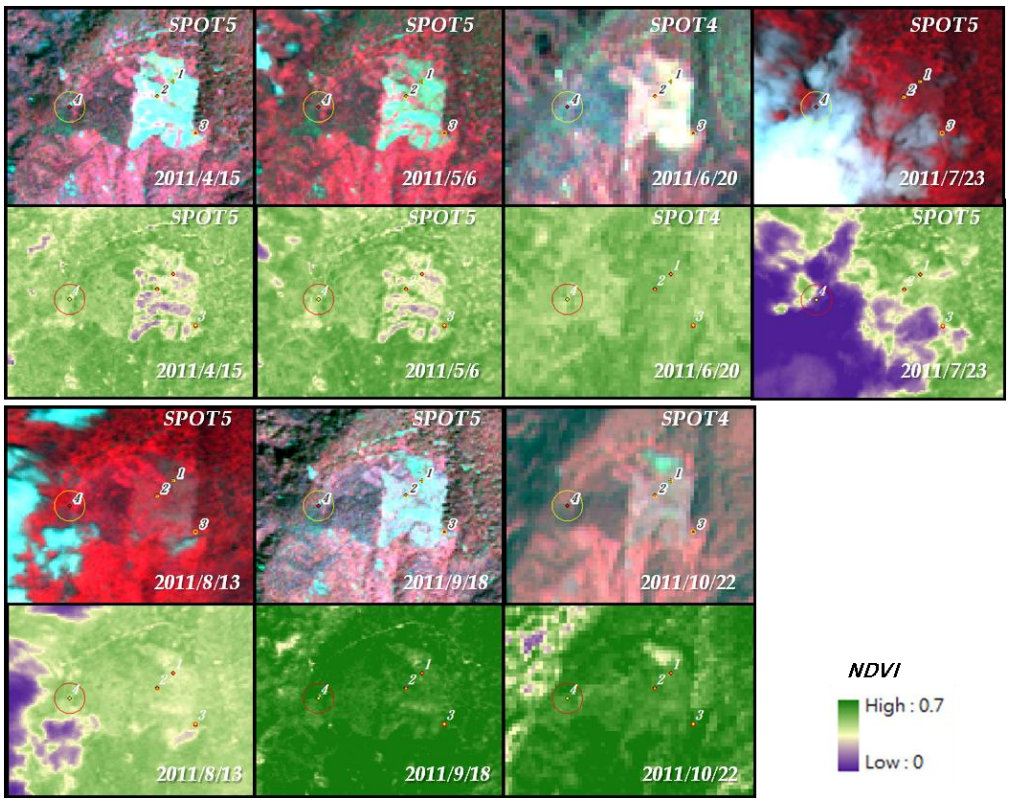


圖 85 大雪山測區 SPOT 衛星影像及 NDVI 影像

由實測成果所示，嘉義及大雪山樣區的觀測數值同樣在 4 月及 5 月底呈現微幅降低，隨後並逐漸升高的趨勢，但各測點的生長特性卻不相同；在針葉及闊葉林的比較中(圖 86a)，嘉義闊葉林相的觀測數值均高於針葉林相(大雪山樣區 4)；在嘉義測區不同坡向的測點中(圖 86b)，南向測點 2 的觀測值在生長季初期高於西北向的測點 1，但此差異值逐漸縮小，到了夏末秋初後，反以西北向測點的 LAI 數值較高，顯示光照環境差異以及植物水勢壓力對森林生長的影響；在嘉義測區點位 4 及點位 6 的比較中(圖

86c)，呈現出人為干擾對光照環境的影響，點位 4 由於冠層下低矮樹枝遭到人為清除，透光度明顯提高，進而降低LAI 量測值；大雪山樣點 1 及點位 3 屬於新植林地(圖 86d)，冠層仍相當稀疏，故相較於具有 25 年林齡的樣點 4，其葉面積指數較低。

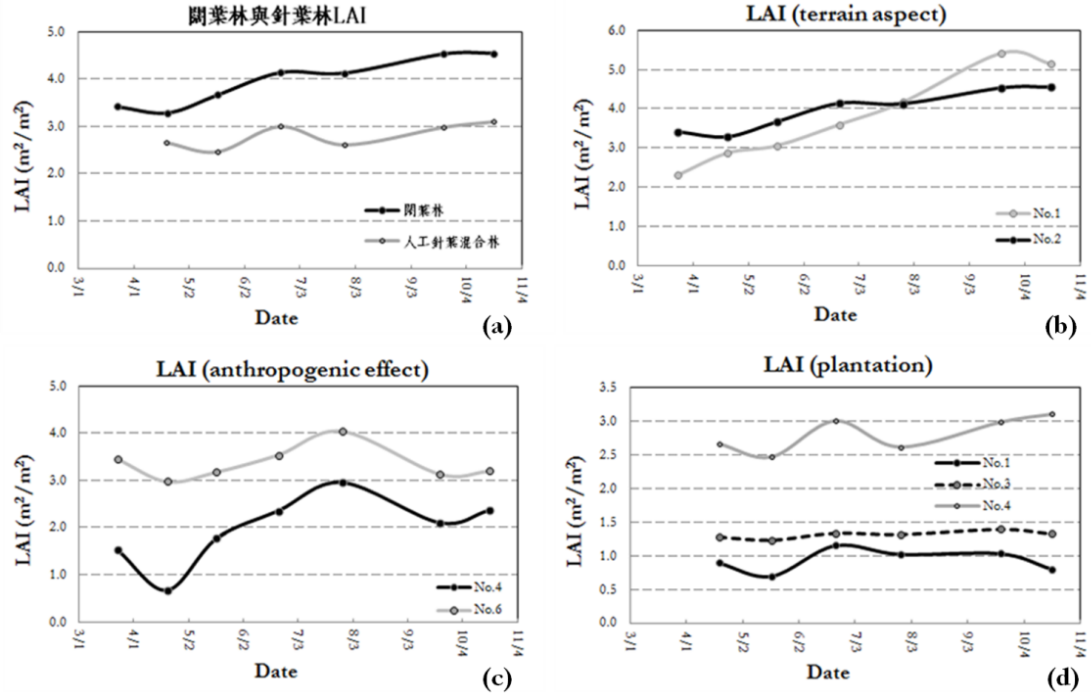


圖 86 實測 LAI 趨勢比較(a)闊葉林與針葉林；(b)南向與西北坡向；(c)人為與未受人為干擾影響；(d)新生林地與 25 年林齡造林地

2.3.3.2 不同植群葉面積指數差異

本計畫除了在嘉義蘭潭及大雪山測區，進行每月至每兩月時序性的葉面積指數觀測，也針對竹林、防風林、果園、檳榔園等台灣常見的植生型態，進行同時期多點多地貌的觀測；圖 87 顯示各地貌型態在 5-6 月份的量測成果，整體而言，以大葉桃花心木、血桐、相思樹為主的闊葉林相，其葉面積指數高於木麻黃防風林及綠竹林，而針葉林又低於前述的林相；在果園及檳榔園中，荔枝樹的單株葉面積大於柑橘類果樹，而檳榔園則介於兩者之間，不過檳榔園的觀測數值可能受到冠層下灌木及地形遮蔽的影響，造成觀測值的高估。

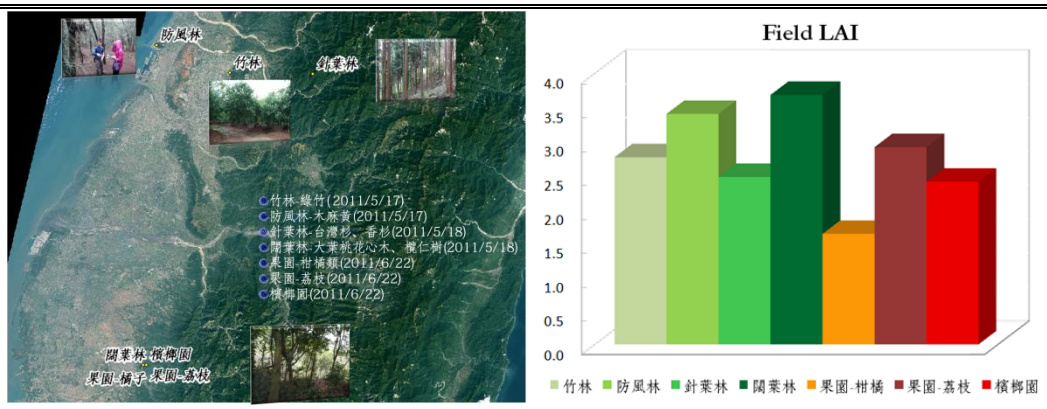


圖 87 竹林、防風林、針葉林、闊葉林、果園(柑橘、荔枝)、檳榔園葉面積指數實測點位及觀測成果

2.3.3.3 光照環境對 LAI 實測的影響

以植冠分析儀(LAI-2000)進行葉面積指數實測，主要透過量測冠層上下方光照環境的對比，在假定的冠層結構及葉片消光情形下，求得葉面積指數，故在理論上，不同時點及光照環境的差異，將影響量測到的數值；為確認此影響的程度，說明觀測成果可能產生的誤差，本研究針對同一測點，在不同的光照環境下進行多次觀測；表 10 為大雪山測區 4/19、4/20 共三次的量測成果，4/19 下午 3:00-5:00 屬於太陽直射光的光照環境，下午 5:00-6:00 及隔日早晨 6:30-7:40 則為散射光的環境，在直射光時的量測，以背對太陽光源，避免光源直射進入鏡頭的方式進行觀測，由觀測成果顯示，若以早晨及傍晚的兩組數據為對照組，直射光時的量測數據(配合前述避免陽光直射入鏡頭的量測方式)並無明顯的高估或低估的現象。

表 10 大雪山測區在不同光照環境下的葉面積指數觀測值

樣區	LAI Mean1	LAI SD1	LAI Mean2	LAI SD2	LAI Mean3	LAI SD3
觀測時間	15:00-17:00		17:05-18:00		06:30-07:40	
樣區1	0.88	0.19	1.05	0.13	0.9	0.13
樣區2	0.42	0.03	0.43	0.02	0.36	0.11
樣區3	1.03	0.11	1.18	0.13	1.28	0.07
樣區4	--	--	--	--	2.67	0.09

為確認儀器的觀測高度是否會影響觀測數值的差異，並確定量測時所需的手持儀器高度，本研究也針對不同的量測高度進行測試，並以單一葉片完全覆蓋鏡頭的方式進行量測(圖 88)；經由觀測顯示，若地被層無叢雜的灌木或植生覆蓋，則在腰際 1m 處及地面 0m 的量測成果無明顯差異，但如有植生覆蓋(如姑婆芋)，則兩者數值即有顯著的差異；為確認此一影響，本研究以單一黃槿葉面覆蓋在鏡頭上，葉片上則為透空

環境，量測數值顯示其葉面積遠高於 1，由此兩項成果顯示，影響量測數據的因素不在量測高度，而是在所欲儀器量測的範圍，亦即儀器感應的不只是葉片的消光情形，還包含樹冠的結構，所以當鏡頭完全為單一葉面覆蓋，在儀器上所代表的是冠層已完全鬱閉，透光比例(DIFN)為 0，唯有高葉面積的冠層結構才能達成，故推算葉面積指數遠高於 1。

在儀器實測時，除了前述的使用考量，在某些特定環境下，也會影響觀測數據的代表性；理想的觀測環境為光照衰減主要受到葉面吸收所影響，但如在觀測環境內有過多非葉片的遮蔽因素(例如在密竹林內的觀測，或受到植株立木遮蔽的影響)，則會明顯提高量測到的數值；此外，人為干擾也會影響光照環境的變化，例如冠層下的修枝、整地，造成冠層下的高透光度，進而降低量測到的葉面積數值。

圖 88 影響植冠分析儀實測數據的測試

2.3.4 遙測與實測葉面積指數比對

MODIS 葉面積指數演算主要透過植被冠層的輻射傳輸模型，藉由接收冠層反射可見光及近紅外光波段的輻射，反演光合作用有效吸收輻射分量及葉面積指數，由於 MODIS 著重於全球性的應用，其模型假定忽略地區性的變異乃在所難免，故實際應用仍需藉由實測資料的比對，以評估其在台灣地區的適用性。

在 MODIS LAI 與實測資料的比較上，面臨的最大問題為空間尺度的落差，在地貌歧異度較大的台灣山區，要尋求均質的 LAI 測區具有相當的困難性，此均質性包含

林型、林齡、地形坡向、海拔高度等環境梯度，且實地取樣亦需顧及交通上的便利性及取樣所需的透空光照環境；本計畫以高解析衛星影像、DTM、植群圖等輔助圖資進行均質樣區的篩選，並透過系統性取樣方式，量測 MODIS 單一像元內多筆的實地 LAI 數值，並以量測平均值視為代表像元的觀測數值，與 MODIS 反演數值進行比較。

本計畫 2012 年 2 月、4 月、7 月、8 月、9 月份分別於大雪山林道及台中豐原、台中港、嘉義蘭潭、東石、桃園石門水庫、合歡山區進行 LAI 實地量測(圖 89)，將 MODIS 單一均質像元區分為 9 個網格區域進行取樣，並盡可能在網格的中心點位取得 2-4 筆觀測數值，透過系統性的取樣設計，降低取樣過程中的人為影響，並以此實測統計值與 MODIS LAI 觀測數值進行比較，評估 MOD15 觀測值在台灣地區估算的準確度；表 11 為歷次觀測的樣區測點、植被狀況、LAI 統計值、以及 MODIS 相對應的觀測值，包含天然闊葉林、針葉林、針闊葉混合林、竹林、果園、防風林、人工林、農地作物等多元林型地貌，共計 20 個 1x1 公里測區，藉由資料比對顯示(圖 90)，MODIS LAI 在高植生區(竹林、闊葉林等高 LAI 區域)呈現出些微偏高，在低植生區(果園、農地)又呈現出些微偏低的趨勢，平均絕對差異(MAD)及均方根差異(RMSD)分別為 1.05 及 1.38 (m^2/ m^2)，但整體而言，MODIS 與實測 LAI 仍呈現近似的分佈趨勢，相關係數 R=0.87 (p<0.05)，顯示 MODIS 觀測值能大致反應出實地的葉面積狀況，並作為台灣地區森林生長監測的有效數據。

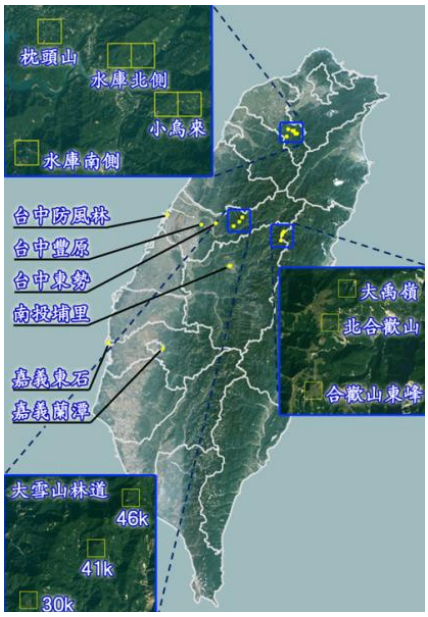


圖 89 葉面積指數現地量測點位

表 11 葉面積指數現地量測與遙測資料比對

Sites		Field LAI				MODIS LAI		
Location	Land Cover	Date	LAI mean	LAI stdev	Samples	Data Period	LAI	Sample
大雪山林道30.3K	針闊葉混和林	2011/5/18	3.02	0.36	48	2011/5/17-2011/5/24	3.0	1
大雪山林道46K	針闊葉混和林	2011/7/27	3.62	0.48	60	2011/7/20-2011/7/27	3.8	1
大雪山林道30.5K	針闊葉混合林	2012/2/20	4.58	0.92	40	2012/2/10-2012/2/17	6.4	1
大雪山林道41K	針闊葉混合林	2012/2/21	4.35	0.85	24	2012/2/10-2012/2/17	5.7	1
台中豐原	闊葉林	2012/4/24	5.07	1.26	28	2012/4/15-2012/4/22	6.6	1
台中港防風林	木麻黃防風林	2012/4/25	3.21	0.41	20	2012/4/15-2012/4/22	1.7	1
嘉義蘭潭	闊葉林	2012/4/25	4.03	1.04	36	2012/4/23-2012/4/30	4.7	1
台中東勢	果園	2012/7/9	2.21	0.68	36	2012/7/3-2012/7/10	2.2	1
嘉義東石	人造林	2012/7/11	2.54	1.42	32	2012/7/11-2012/7/18	2.5	1
桃園枕頭山	竹林	2012/7/12	3.87	0.91	35	2012/7/11-2012/7/18	3.2	1
桃園石門水庫北側	竹林	2012/8/6	5.16	0.37	16	2012/7/27-2012/8/3	6.6	1
桃園石門水庫北側	竹林	2012/8/6	4.72	0.87	36	2012/7/27-2012/8/3	6.6	1
桃園小烏來	竹林	2012/8/7	4.54	0.33	16	2012/8/20-2012/8/27	4.6	1
桃園小烏來	竹林	2012/8/7	4.58	0.84	28	2012/8/20-2012/8/27	6.5	1
桃園石門水庫南側	竹林	2012/8/7	4.20	0.69	32	2012/7/27-2012/8/3	5.8	1
南投埔里	稻田	2012/9/3	1.81	0.31	27	2012/8/28-2012/9/4	1.4	1
南投埔里	稻田	2012/9/3	1.96	0.80	31	2012/9/5-2012/9/12	1.4	1
合歡山東峰	高山箭竹	2012/9/4	2.92	0.58	23	2012/8/28-2012/9/4	5.6	1
合歡山大禹嶺	針葉林	2012/9/4	4.02	0.64	32	2012/9/5-2012/9/12	5.8	1
北合歡山	針葉林	2012/9/4	3.40	0.64	28	2012/8/28-2012/9/4	4.2	1

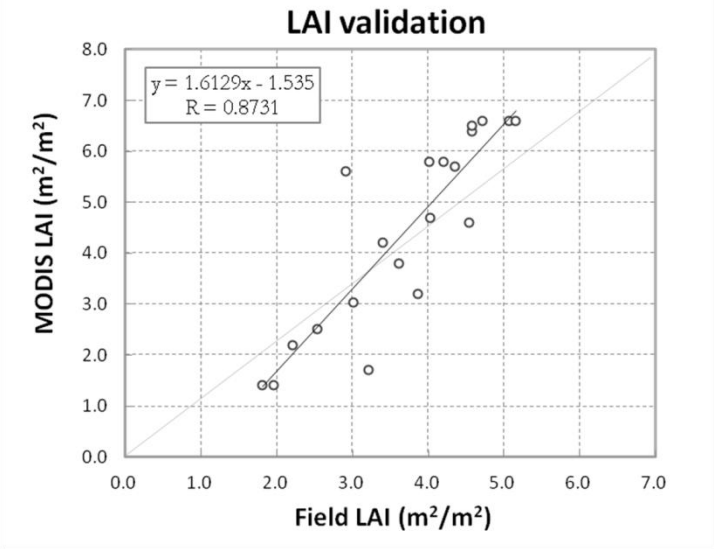


圖 90 葉面積指數實測與 MODIS 遙測值比對

2.3.5 MODIS LAI 的應用考量-地形陰影影響

MODIS LAI 推演主要以植被冠層的輻射傳輸模型為基礎，藉由地表反射輻射的測定，求得相對應的 LAI 數值，故當測得的反射率存有誤差，LAI 的精確度也會受到影響；在崎嶇的山地地形，地形遮蔽往往造成向陽面及背陽面明顯的反射輻射反差，且此反差會隨著陽光在不同的仰角、方位角，以及相對應的坡向、坡度等地形條件而有所不同。由於搭載 MODIS 的 Terra 為繞極衛星，所測得的地表反射值僅反應出衛星通

過時(約 10:30am)的瞬時地表狀況，而非全天白日的綜合情形，倘若某區域的光源受到地形遮蔽，也僅為陽光在特定時點產生的背陽面，在不同的光源方向下，此區域可能又轉換為向陽面，故以此瞬時觀測反演的 LAI 數值，其準確性也將受到影響。

在此以宜蘭山區為例，呈現地形陰影與 LAI 估測的關係；圖 91 分別為 MODIS LAI 與同區域的福衛影像，可見 LAI 與福衛影像反差處(可見光波段)呈現出空間上的對應，為確認此輻射差異為地形陰影所致，故以數值地形模型(DTM)，配合衛星拍攝時的陽光仰角與方位角，模擬相對應的地形陰影(圖 92)(由於衛星約為上午 10:30am 通過，背陽面主要位於西北側的山坡)；透過模擬陰影與福衛影像的比對，可見低反射值區域主要位於背陽面的陰影處，但觀察其植被狀況，將福衛影像中紅框區域放大，可見不論為向陽或背陽坡面，皆以木本植物為主要的覆蓋林型(圖 93)，不應有如此大 LAI 的對比，更何況位處西側的背陽面，在下午時反而將成為向陽面，故推論此 LAI 落差主要應受到地形陰影的影響；由此可知，在崎嶇的台灣山區，MODIS LAI 資料的應用尚需顧及地形陰影所造成的誤差。

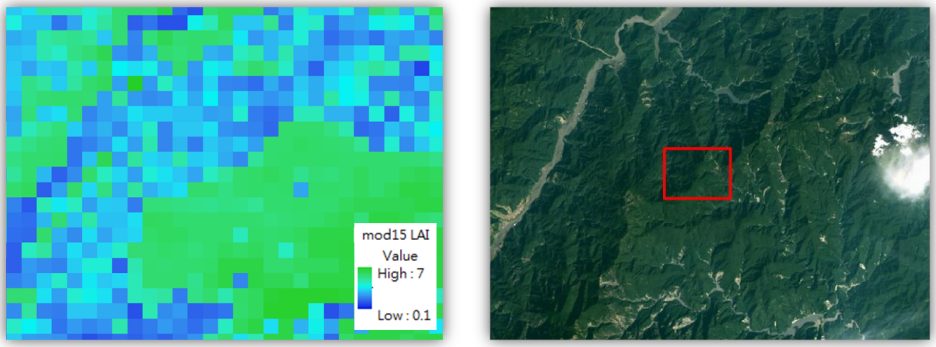


圖 91 MODIS LAI 影像與同區域的高解析福衛二號影像

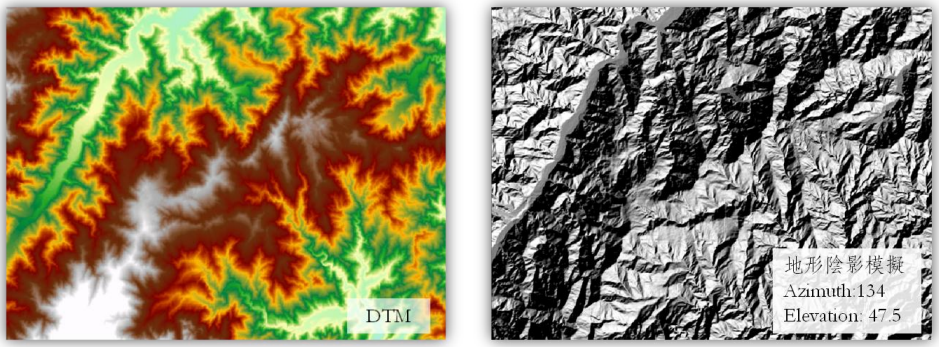


圖 92 數值地形模型與模擬陰影(太陽方位角 134°，仰角 47.5°)

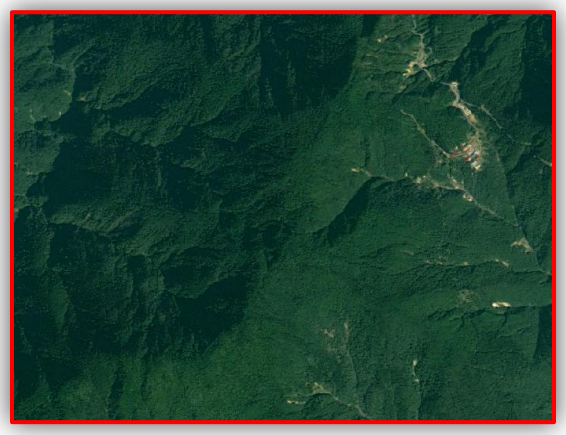


圖 93 福衛二號影像(圖 91 紅框處)

3 森林健康研究

3.1 森林健康監測及遙測應用

3.1.1 森林健康監測

森林健康是指森林生態系統對於乾旱、病蟲害、火災等外界壓力，具有一定抵抗能力，可保持良好的生態特性和更新狀態，以提供野生動物棲息環境、涵養水源、保固土石、並滿足人類對於森林木材生產等需求，發揮森林公益功能。傳統的森林健康監測以地面調查為主,配合因素分析法及判別分析法,萃取對森林健康最有利的指標，以判定林木的健康程度(王兆桓、陳子英，2002；羅時凡等，2008)。

由於近年日益嚴重的氣候變遷及空氣污染等環境問題，森林生態系所扮演的減碳功能及對外來壓力的容受能力等森林健康議題，亦逐漸受到各界重視(Smith, 2002；Moore and Allard, 2008)。美國農業部林務署(Forest Services)及環境保護局(Environmental Protection Agency)自 1990 年起即進行合作，執行常態性的森林健康監測計畫(Forest Health Monitoring),透過廣泛林分尺度的取樣調查,針對各樹種的冠層情形(樹冠密度、樹冠透視度、樹冠梢枯(Crown dieback)、活冠層比例)、根部狀態、植株生長及劣化(tree damage, growth, mortality, regeneration)、臭氧危害、苔蘚地衣層生物指標(bioindicator)、土壤養分及土壤侵蝕、植生多樣性、倒木及燃料負載(fuel loading)、動物棲地等多項指標進行現場調查，以提供例行性的森林健康及生長趨勢評估，並配合儀器或觀測站監測森林危害，作為林業管理及立法單位的法源依據（USDA Forest Service, 2005；肖文發等，2001；肖興威等，2005）；歐盟則以國際合作機構(International Cooperative Programme Forests, ICP Forests)執行森林保育計畫，探討大氣污染對森林健康所造成的影響,執行上則主要區分為兩個層面,包含 defoliation 及 discolouration 的視覺評估(visual assessments)，以及針對森林生態系對空氣污染的容受能力及環境因子的調查分析，包含土壤及土壤水分、空氣與降水品質、植株生長及葉面理化(foliar chemistry)、地被層植物組成及氣象資料等森林測計因子，以進行歐洲地區完整詳細的森林健康監測。

透過國家資源的森林管理及國土資源調查，雖可精確的針對森林健康或相關危害做詳細的監測，但相對的要花費較多的人力、物力成本，在有限的資源條件下，配合

航測或衛載遙測技術，快速取得可重複性的大範圍空間資訊，為現今森林資源管理的重要課題，並可藉由地理資訊系統的空間分析及系統整合功能，匯整多重觀測平台與類型的資料，以提升森林健康監測的效能(陳朝圳，2005；羅時凡等，2009)。

3.1.2 以遙測技術應用於森林健康研究

以遙測技術進行森林健康監測，能在相較於單株及林分尺度的詳細縱向調查下，於短時間內提供大範圍空間區域的橫向資訊，降低時域變化對植生生長所產生的影響，以有效輔助外業調查進行更完整的森林健康監測。

光達 LIDAR 由於具有準確的三維空間定位能力，透過多重回波特性，能獲取樹高、鬱閉度、林分密度等森林結構資訊，以評估冠層閉合狀態及生物量等森林健康測計因子(Solberg *et al*, 2004)。被動式光學遙測(0.4-2.5μm)則主要透過葉片中柵狀葉肉(palisade mesophyll)的葉綠素 a、b 及 β 胡蘿蔔素對可見光波段的吸收作用、海綿葉肉組織(spongy mesophyll)對近紅外光的散射作用，以及葉面水含量的分子震動過程(vibrational molecular process)，對樹冠葉面的光譜反應進行感測；Stone(2001)指出受到病蟲害的植生在光譜特性上與健康的植生會呈現明顯的差異，健康的植生吸收紅光(0.6-0.7μm)及藍光(0.4-0.5μm)，反射近紅外光(0.7-0.9μm)及綠光(0.5-0.6μm)，而非健康的植生受到葉綠素及含水量的變化，葉面顏色變黃甚至掉落，而造成光譜反射上的差異(Green *et al*., 1997; Price and Bausch, 1995；謝漢欽，1998；陳朝圳等，2007)；因此，藉由不同波段的資訊組合，能對冠層葉片的枯損、落葉、褪色及枯死進行健康監測，常用的植生指標包含常態化差異水含量指標(NDWI)、土壤大氣修正植被指標(EVI)、植生亮度指標(PRI)、常態化差異植生指標(NDVI)，或藉由多波段輻射通量密度及反射輻射，評估光合作用吸收輻射比率(FPAR)及葉面積指數(LAI)；Zarco-Tejada *et al*.(2002)利用空載光學影像找出光譜反射與葉綠素含量間的相關性，並利用葉綠素含量瞭解植生劣化的情形;Pontius *et al*.(2005)利用空載高光譜影像偵測鐵杉受到干擾時之波譜反應，藉由遙測植生指標，鑑定其劣化狀況。相對於光學波段主要針對冠層葉片特性的遙感探測，微波遙測則能藉由多角度、多波段、多偏極的遙感資訊，進行喬木冠層、灌木層、地被層、甚至土壤層，有關樹冠結構、介電性、土壤含水量、生物量等資訊，作為森林健康多項參數的評估依據。

3.2 MODIS 植生指標與植生異常指標演算

3.2.1 以光學遙測進行森林健康監測的研究考量

植物生長會隨季節及環境而有不同的生長特徵，藉由遙測影像可瞭解植生在光譜特徵上的空間差異及動態變化，並可依據植生綠度反應植生量的高低(焦國模，1997)。以 MODIS 影像進行森林健康評估應用，能提供規律常態性且大範圍區域的地表資訊，藉由植生參數提供一相對性的樹冠健康資訊，輔助林分尺度針對樹冠層的植生鬱閉度、林分密度、落葉以及及葉面褪色的視覺評估；遙測植生參數如常態化差異植生指標、植生初級生產力及葉面積指數，由於能反映地表植生覆蓋及植生生長狀況，可藉以評估植物受到外力影響(乾旱、病蟲害、林火、風暴、污染、人類干擾)所產生的植生劣化情形，作為冠層葉面植生健康的分析依據；NDVI 藉由紅光及紅外光反射率演算求得，為地表植生光譜反應最直接的呈現；相對而言，GPP 及 LAI 雖亦為森林生長及植生綠度的參考指標，但其準確性除了受到大氣因素及觀測幾何差異對散射光譜的影響，另一考量因素則為參數推演的準確性，在 MODIS 全球性觀測的前提下，推演模型忽略地區性變異乃在所難免，故針對特定地區的應用，仍有賴地面實測或多平台觀測資料或以進行驗證，此為森林生長及碳吸存研究的重要課題，故在森林健康的評定上，仍以植生指標較能直接反應植生光譜反射的異常情形。

以遙測影像判定植生健康，前提條件為非與健康相關的雜訊需能有效濾除，故植生參數的準確性及穩定性為首要條件，以偵測出綠度變遷的真實區域；在光學遙測的應用上，大氣中雲層、氣膠的影響及觀測幾何(sun-earth-sensor geometry)的差異，為影像間比對分析的考量因素，其一解決方法為藉由準確的絕對輻射校正，以減緩大氣因素對散射光譜的影響，而在多時影像的分析上，可藉由選取晴空時期及最接近近地點(nadir view)觀測的影像，以減緩大氣及觀測幾何差異所造成的貢獻，當然，其前提條件為在資料週期內植生狀態無太大變化(故週期中某一日的準確觀測即能有效代表該週期的平均值)；MODIS 航帶跨幅 2330km，以台灣地區所處緯度，近乎每日皆能全台觀測，而 MODIS NDVI 以 16 日為資料週期，在各週期 NDVI 觀測值的篩選上，採用 Maximum Value Compositing(MVC)，亦即各 NDVI 像元值代表 16 日週期中的最大值，主要由於雲層及氣膠皆降低 NDVI 數值，而光學路徑(optical path length)愈長，受到的

大氣影響亦較嚴重，故採用 MVC 方法，能篩選出觀測洲期內最不受大氣雲層影響，且最接近近地點觀測的 NDVI 觀測值，在某種程度上達到常態化觀測幾何的效能。

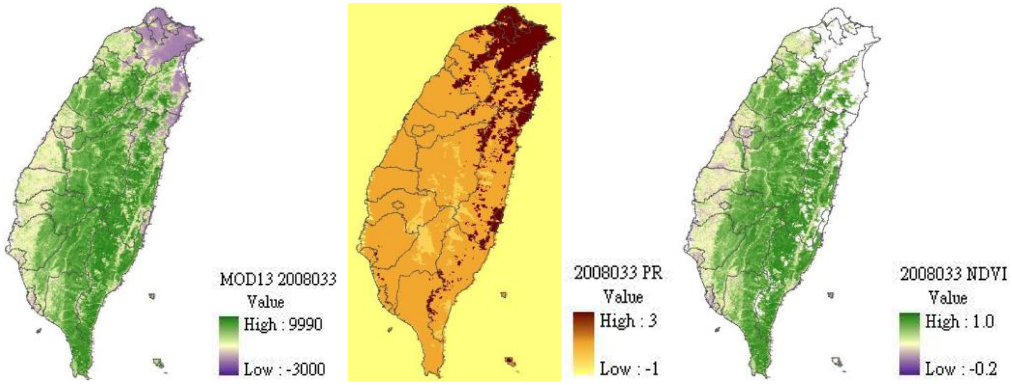
健康植生由於較高的葉綠素含量，以及較高的植生覆蓋，對陽光輻射中的紅外光波段產生較高的反射率，並吸收紅光輻射值，故在光學遙測影像中呈現較高 NDVI，相對而言，當植生受到外力干擾及植生弱化，則呈現較低的植生指標數值；但由於不同植株的光譜反應特性不同，且在 MODIS 遙測資料的空間解析度下，常包含多重植生種類的混合像元資訊，以單幅衛星影像所代表的植生資訊，往往僅呈現出不同像元區域的植生組成差異，而非實際森林健康差異所造成，且植生亦隨季節而呈現不同的生長特徵，夏季的植生反應較冬季為高，僅為生長週期的差異，不適合依此即判定夏季的植生較冬季健康；森林健康的評定，應有一參考基準，且考量到植生生長在時間及空間性的變量，才能探討森林受到病蟲害、火災、乾旱等非常態性干擾後的森林生理反應，並可藉由綠度改變評定其健康情形；Terrra MODIS 自 2000 年發射升空，至間已有超過 10 年的地表觀測資訊，雖與全球氣候變遷及生態研究的時間尺度仍有落差，但能提供近年森林生態的動態概觀資訊，透過歷年(2001-2011)同期(每 16 日為一資料週期)植生參數的資料律定，能建立森林健康評定的參考基準，並藉此與特定年份且同期的植生參數比較，能辨別植生綠度的差異程度及變異區域，降低季節性因素時間變量的影響，且由於此差值影像由相互獨立的分析像元所組成，每一像元維持其原有的植生分布比例，差異分析為時間縱向，而非空間橫向的分析，故能排除空間變量造成光譜反應差異的影響。

3.2.2 MOD13 植生指標及植生異常指標分析流程

MOD13Q1 為 Terra MODIS 全球性植生指標資料，具有 250 公尺的空間解析(表 12)，及 16 日的資料週期，在資料時序上，以每 16 日週期首日在一年中的日期天數(Day of Year, DOY) 來表示，例如 001(1/1-1/16)、017(1/17-2/3)、...、353(12/18-12/31)，NDVI 為 16 日週期中某一日的觀測值；在植生指標的資料處理流程上，須先進行投影座標、資料格式的轉換，以及台灣本島區域的萃取，後續將像元值轉換為 NDVI 數值，並藉由 Science Data Sets 中的 Pixel Reliability，篩選資料像元，剔除受到雲層、冰雪覆蓋影響的區域，以作為後續植生異常指標演算的所需資料(圖 94)。

表 12 MOD13Q1 植生指標屬性資料(資料來源：MOD13 ATBD)

Temporal Coverage	2000/2~
Area	~10 X 10 lat/long
Projection	Sinusoidal
Data Format	HDF-EOS
Dimensions	4800 X 4800 rows/ columns
Resolution	250 meters
Science Data Sets	12



(a) (b) (c)

圖 94 (a)MOD13 原始像元值；(b)Pixel Reliability；(c)經篩選及像元值轉換後 NDVI

植生異常指標主要藉由影像相減法，比較即期及基期的 NDVI 觀測值，並將此差異數值進行常態化，使其具有統計上的意義，以建立一簡易標準數值供森林健康評估(圖 95)；實際而言，指標雖可判釋出異常，但無法判定此異常的主要來源為何，可能為乾旱、火災、崩塌、或僅為大氣雲層干擾所引發，故除了指標必須進行律定，實際是否為森林健康受到影響，尚需藉由時續性的資料分析或高解析遙測影像、氣象資料、實地觀測等輔助資訊以進行確認。

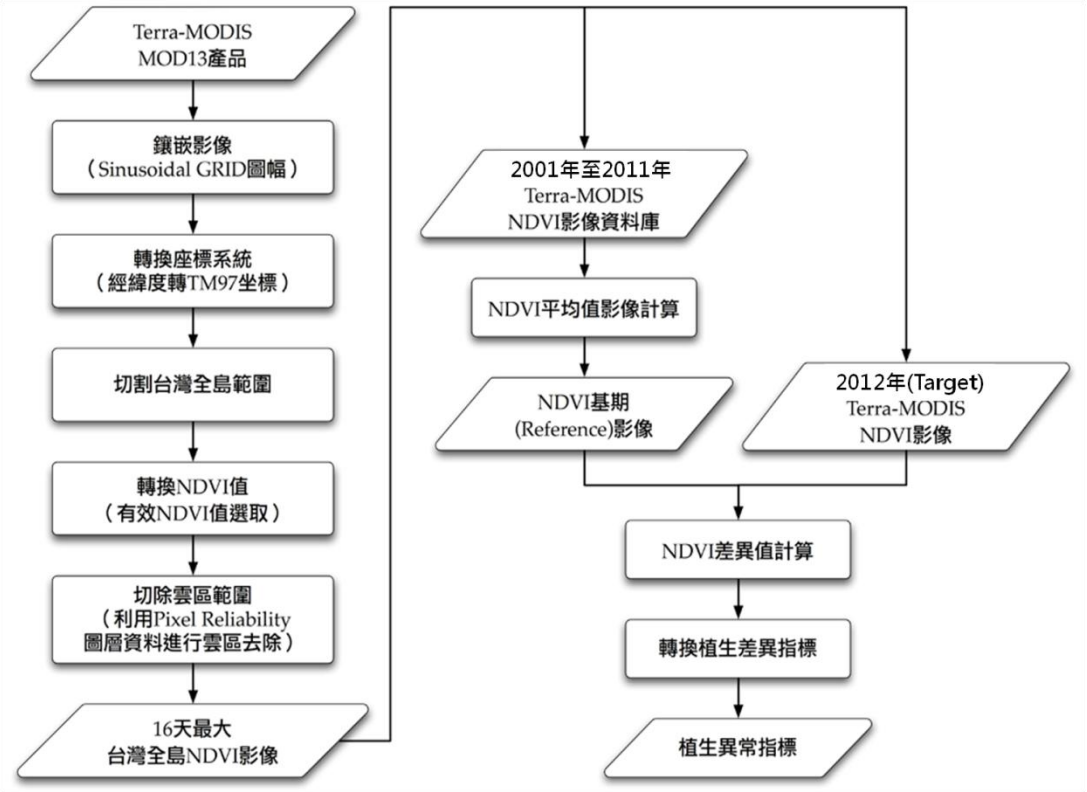


圖 95 植生指標及植生異常指標資料處理流程

3.2.3 植生異常指標分析成果

3.2.3.1 植生異常指標分析

透過植生異常指標分析及門檻值的界定，能分析出逐期資料中植生異常的區域；圖 96 為 2012 年 1-8 月的分析成果，圖中每一紅色像元代表在連續 7 期資料中(本期及前後 3 期資料)，有 5 期以上資料 VAI 低於-0.85 的區域，由圖中可知，除了少部分零星分布的異常點位，植生異常分佈主要與南部山區在 88 風災後的大規模崩塌有關，顯示在歷經約三年過後，崩塌區大致仍維持裸露的狀態，植生仍未明顯的完全復育。

圖 96 2012 年逐期植生指標資料中植生異常區域

3.2.3.2 歷年植生指標差異

藉由 MODIS 常態且長期的植生指標觀測，可對歷年間較大規模的植生異常事件進行初步檢視，圖 97 為植生指標年度平均值與 10 年期平均值的差異值影像，包含 2001-2011 年的觀測成果，可見 2002 年中西部山區、2003 年西北部沿海區域的植生乾旱，以及 2009-2011 年後南部山區的大規模崩塌；基本上植生異常分析能反應出植生指標異於常態的分佈區域及統計顯著性，但仍無法藉此斷定此異常情形與何種因素有關，實際的驅動原因需藉由遙測、氣象、或其他實測資料來輔助說明，以下分別以案例方式，探討植生乾旱、坡地崩塌、及林火等擾動事件對森林健康所造成的影響。

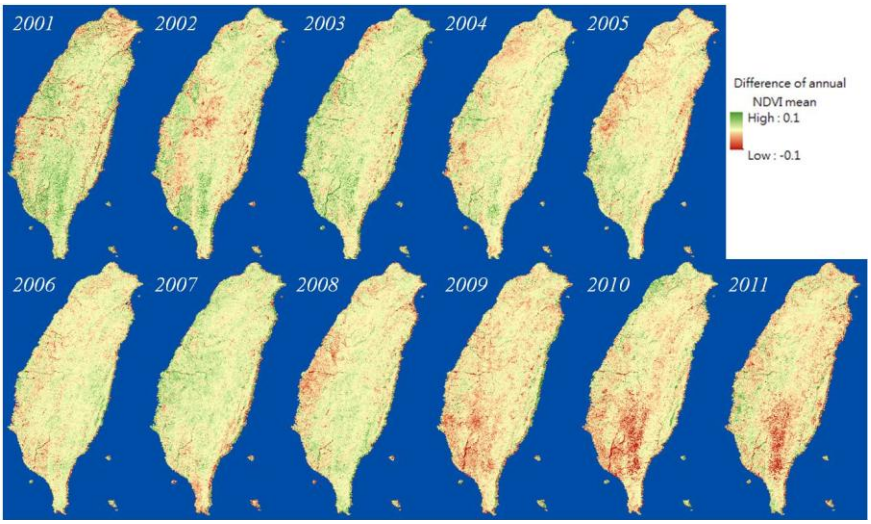


圖 97 2001-2011 年逐年植生指標差異

3.3 植生異常案例探討-2009 年八八風災後南部山區崩塌

2009 年 88 風災在全台各地引發了不少災情，包含小林村的土石掩埋，以及南部山區多處大規模的崩塌，圖 98 分別為 2007 年及 2009 年 NDVI 年度平均與基期影像的差值影像，基期影像則為 2001-2011 年的 10 年 NDVI 平均值(基期影像分別排除 2007 及 2009 年)；透過植生異常分析，可明顯看到 88 風災後南部山區的受災情形，且在歷經兩年後，植生仍未完全的復育。

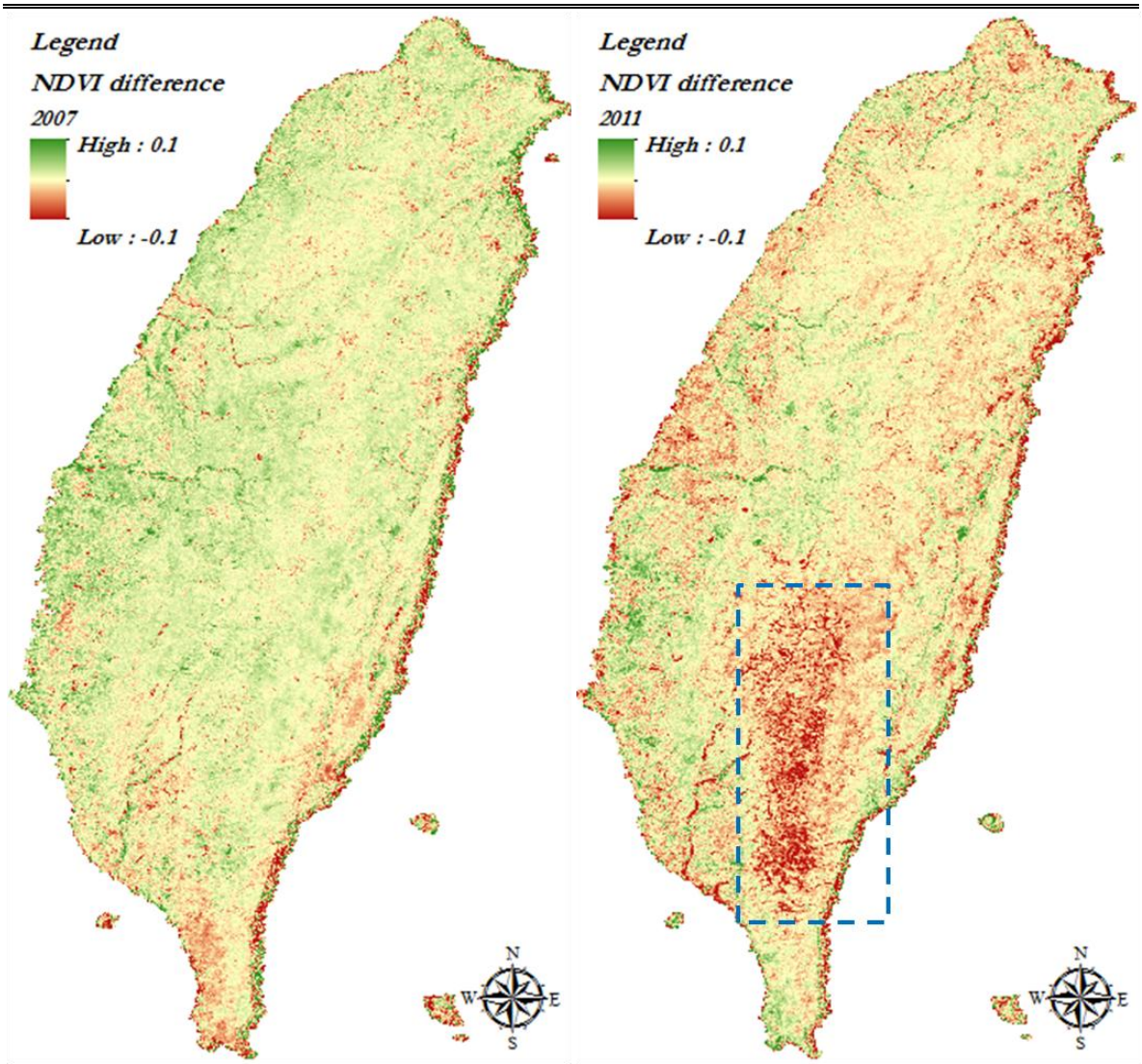


圖 98 2007 年及 2011 年年度植生指標與 10 年期平均差異值

南部山區崩塌的受災範圍能從高解析 SPOT 影像進行判釋，藉由 2003、2007、2011 年的時序 NDVI 資料(圖 99)，能明顯分辨崩塌地對南部事業區的影響，同樣由 MODIS 植生覆蓋比率（單一像元中植生覆蓋比例）VFC 影像也呈出現類似的成果(圖 100)。

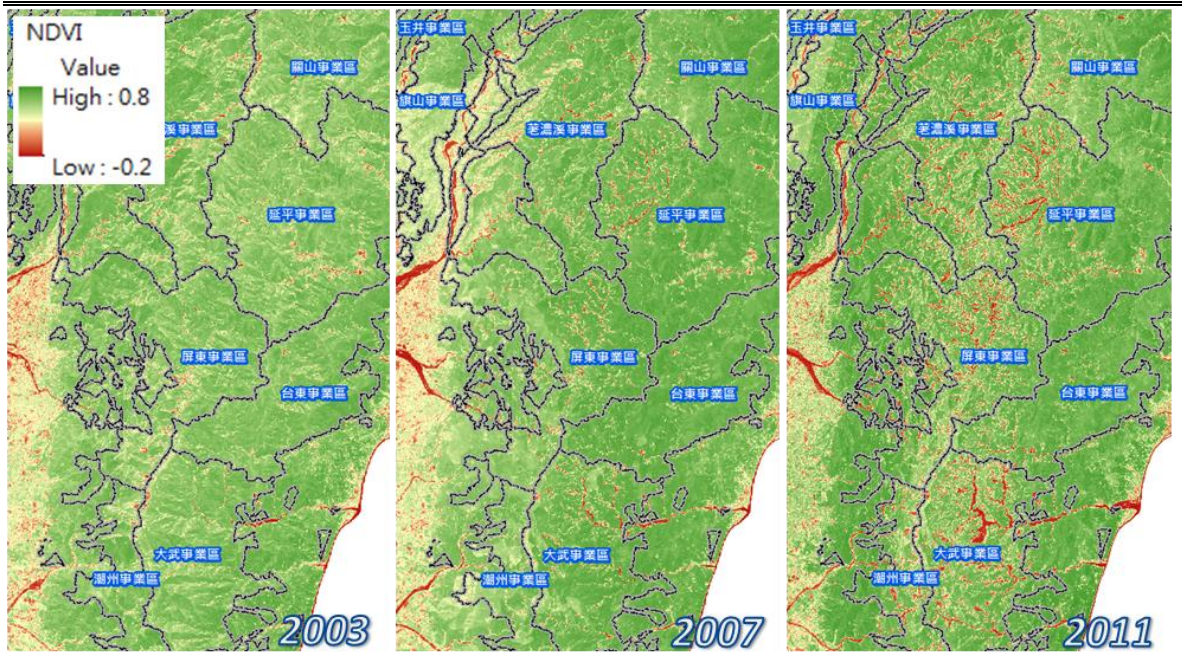


圖 99 2003、2007、2011 年 SPOT NDVI

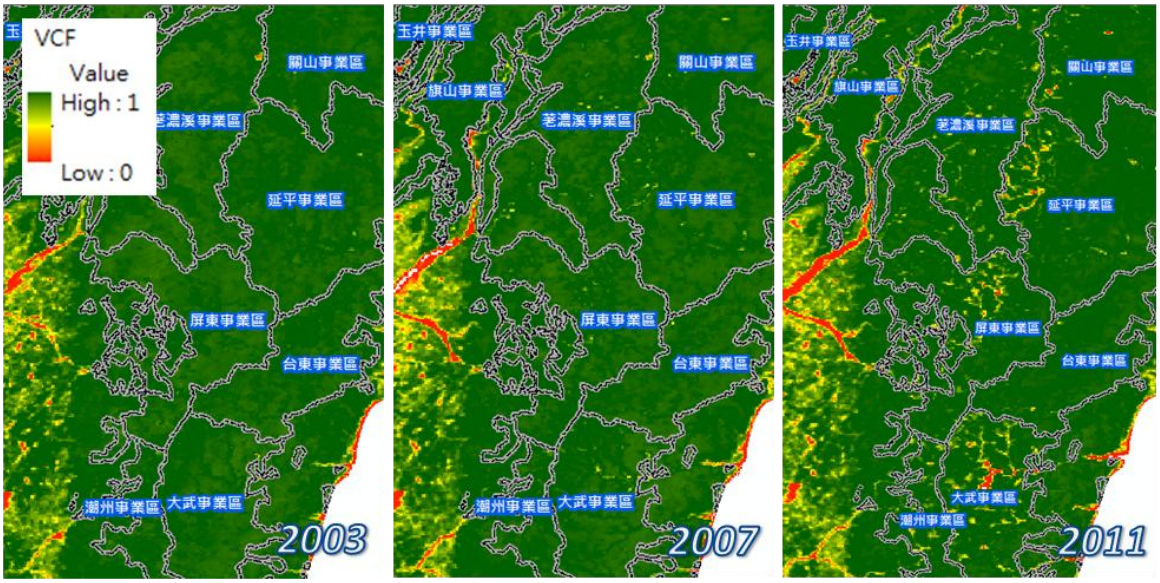


圖 100 2003、2007、2011 年 MODIS 植生覆蓋比率

單以事業區而言，透過 2007、2009、2011 年 SPOT 及福衛影像的分析比較(2009 年主要為災前影像)，顯示屏東、台東多處事業區植生覆蓋比率(綠蔽率)明顯下降，並以大武、屏東、荖濃溪事業區下降的最多，以 2009 年(福衛二號 5/8、5/9、5/10 鑲嵌影像)及 2011 年(福衛二號 8/17、8/18、8/25 鑲嵌影像)相較，分別下降 7.04%、3.99%、3.49%(圖 101)，若以面積計算，植生變非植生區域分別為 3,131、1,514、1,677ha

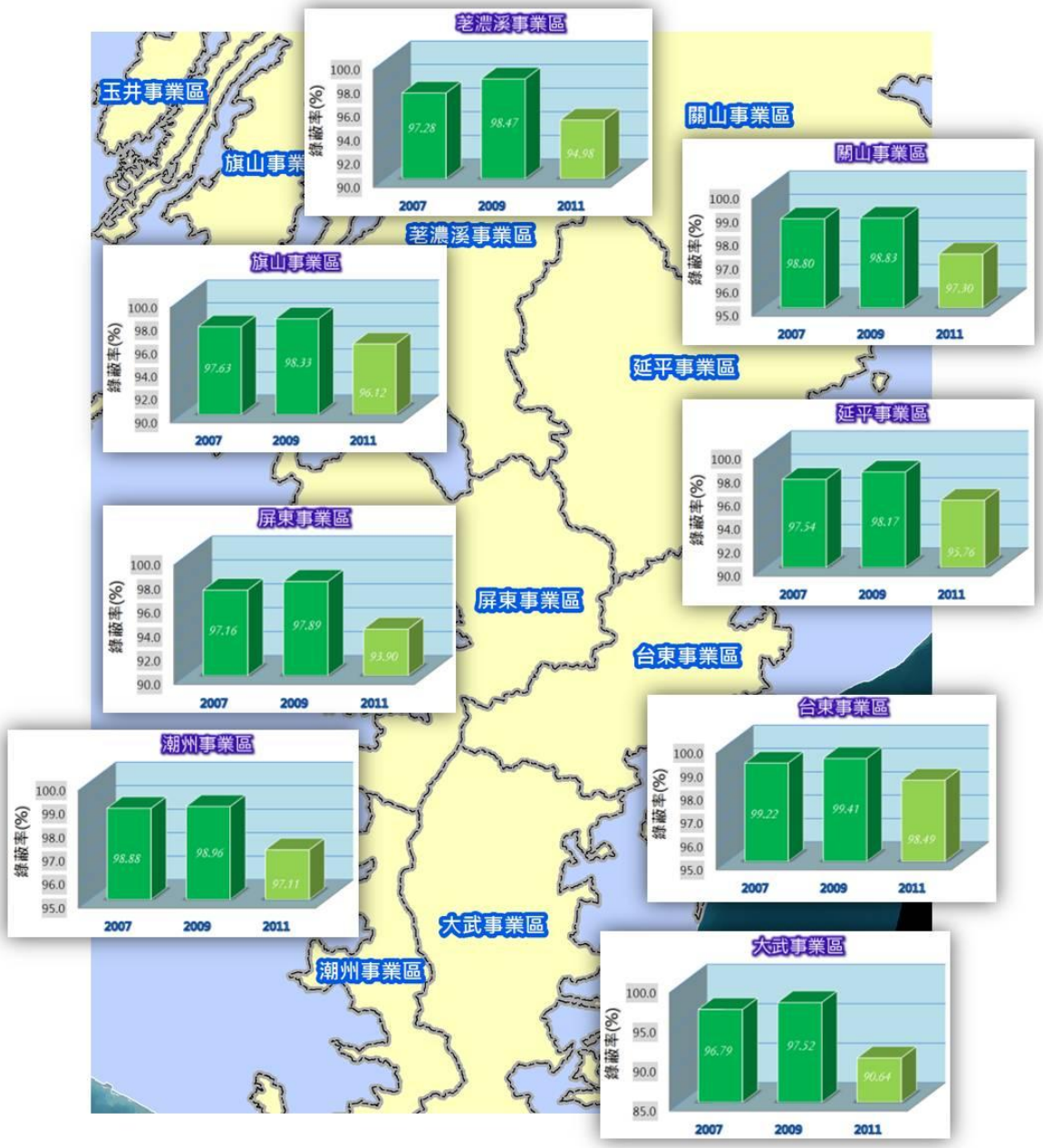


圖 101 2007、2009、2011 年各事業區綠蔽率

以森林碳匯的觀點，所關注的是風災崩塌後森林蓄積量的變化，本研究以第二次永久樣區調查(2002-2007 年)資料，分析南部事業區各別林型的單位面積蓄積量(表 13)，並藉由前後期福衛影像(2009 年 5/8、5/9、5/10 影像(88 風災災前影像)及 2011 年 8/17、8/18、8/25 影像)及植生判釋門檻值的界定，辨釋出影像中的植生與非植生區域，再配合數值地形模型演算的地形坡度資料，篩選出裸露變遷區域，並以此套疊至第三次森林資源調查的土地利用型資料，界定變遷區域在災前所屬的林型地貌(表 14)，最後

綜合此單位面積蓄積量及變遷面積的分析成果，演算出各林型及各事業區的蓄積損失量；由表 15 可知，在南部幾個主要受災的事業區中，以大武、荖濃溪事業區所損失的蓄積量最大，分別達到 893,970 及 750,234 m^3，綜合 9 個事業區，共造成 4,199,904 m^3 的蓄積量損失，而在此損失量當中，以闊葉林及混合林的蓄積量減少最多，分別佔總損失量的 46.92%及 35.07%。

表 13 南部各事業區第二次永久樣區調查在各林型地貌的蓄積量統計資料

事業區 / 林型	大武		台東		玉山		延平		屏東	
	平均蓄積量	樣本數	平均蓄積量	樣本數	平均蓄積量	樣本數	平均蓄積量	樣本數	平均蓄積量	樣本數
常綠闊葉林	312.27	53	305.15	54	561.19	4	270.90	34	106.35	46
混合林	640.37	4	370.42	2	597.41	19	720.70	13	131.57	6
常綠針葉林	342.03	3	456.96	4	613.69	51	567.34	57	520.13	24
平均蓄積/樣本總數	335.63	60	317.44	60	606.67	74	489.60	104	239.01	76

事業區 / 林型	荖濃溪		旗山		潮州		關山		平均蓄積量	樣本數總計
	平均蓄積量	樣本數	平均蓄積量	樣本數	平均蓄積量	樣本數	平均蓄積量	樣本數		
常綠闊葉林	281.08	31	263.38	57	264.35	74	260.40	26	262.36	379
混合林	556.79	14	237.67	9	277.26	2	575.99	20	526.07	89
常綠針葉林	349.33	60	308.75	24	345.43	10	469.30	46	474.50	279
平均蓄積/樣本總數	356.84	105	272.91	90	274.08	86	433.46	92	373.01	747

表 14 2009 與 2011 年南部各事業區裸露變遷區域在變遷前各土地利用型所佔面積(ha)

事業區 / 林型	大武	台東	玉山	延平	屏東	荖濃溪	旗山	潮州	關山	總計
常綠闊葉林	2,727.68	222.73	258.24	221.12	1,273.97	1,153.27	820.34	692.52	141.72	7,511.59
混合林	231.93	0.74	325.37	815.78	307.33	450.72	314.92	61.23	292.57	2,800.58
常綠針葉林	117.10	0.00	341.56	158.89	33.06	437.10	117.87	11.76	307.13	1,524.47
其他	136.24	29.12	189.29	89.22	125.97	153.78	214.68	71.60	112.62	1,122.52
總計	3,212.95	252.58	1,114.46	1,285.00	1,740.34	2,194.88	1,467.82	837.10	854.03	12,959.16

表 15 2009 與 2011 年間南部各事業區裸露崩塌所產生的蓄積損失量(m^3)

事業區 / 林型	大武	台東	玉山	延平	屏東	荖濃溪	旗山	潮州	關山	總計
常綠闊葉林	715,632	58,435	67,751	58,013	334,239	302,571	215,223	181,690	37,181	1,970,735
混合林	122,012	388	171,167	429,153	161,675	237,109	165,670	32,210	153,909	1,473,293
常綠針葉林	55,564	0	162,070	75,391	15,688	207,406	55,932	5,579	145,734	723,363
其他	762	0	7,542	173	934	3,148	15,767	1,945	2,242	32,512
總計	893,970	58,823	408,530	562,730	512,535	750,234	452,592	221,424	339,066	4,199,904

3.4 植生異常案例探討-2002 年中西部山區植生乾旱

由於光學影像會受到雲層的干擾，且雲層在空間上也常呈現聚集的現象，如以單期的植生異常指標進行異常現象判釋，很可能產生錯誤的解讀，但如在逐期時序資料上皆呈現相同的異常趨勢，且呈現近似空間上的聚集，則此異常事件的可信度將大為提升；台灣地區在 2002-2004 年，多數地區呈現不同程度的乾旱災情(圖 102)，在此以 2002 年植生乾旱為例，透過時序性異常指標的分析，評估乾旱事件對植生健康的影響；圖 103 分別顯示植生異常指標、pixel reliability、歷年同期觀測次數、以及每 16 日的累積降雨，其中 pixel reliability 影響到即期影像的可信度(主要為受到雲層干擾)，歷年觀測次數則關係到基期資料的樣本數；透過長達半年的時序資料，顯示於 2002 年初開始，中西部山區即逐漸呈現植生旱象，並於四月至五月初時植生異常最為明顯，直到五月下旬的降雨(129 期-145 期)(無資料區域主要受到雲層或降雨的影響)，植生旱象才逐漸解除 (161 期)；相對而言，西部作物區由於仰賴灌溉水源，且 2001 年的降雨蓄水仍屬穩定，故在中西部山區植生乾旱初期(033 期-049 期)，作物區仍維持正常耕作，無呈現農業乾旱災情，兩區域間產生迥異的植生現象。

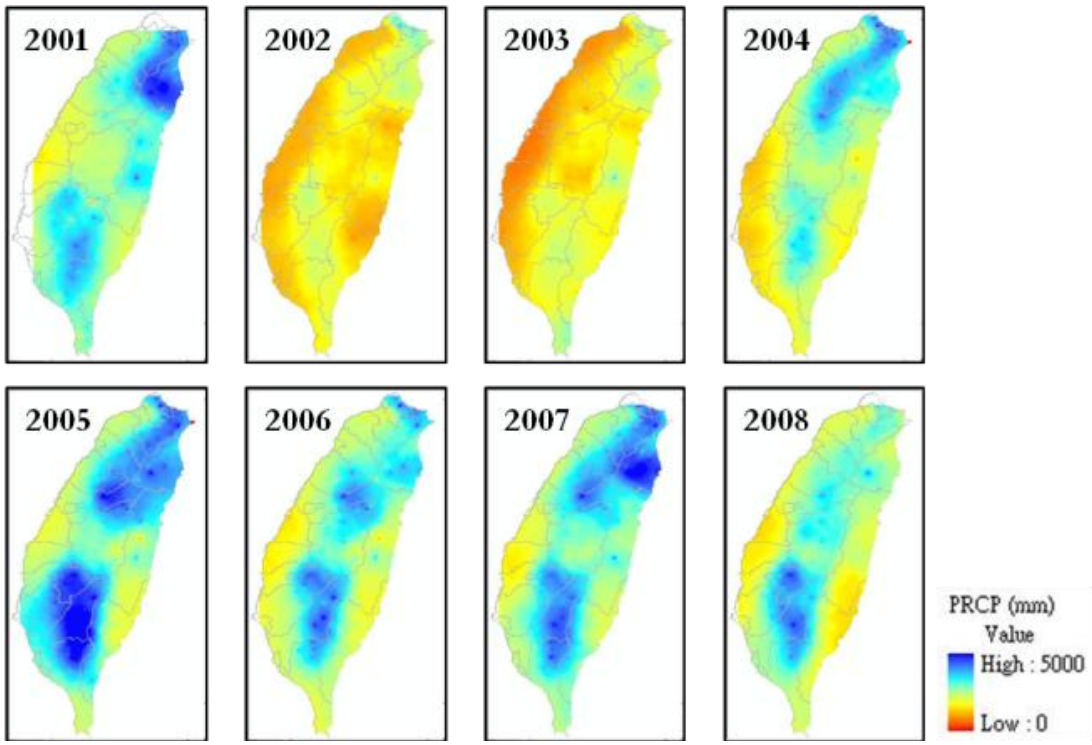


圖 102 2001-2008 年年度累積雨量

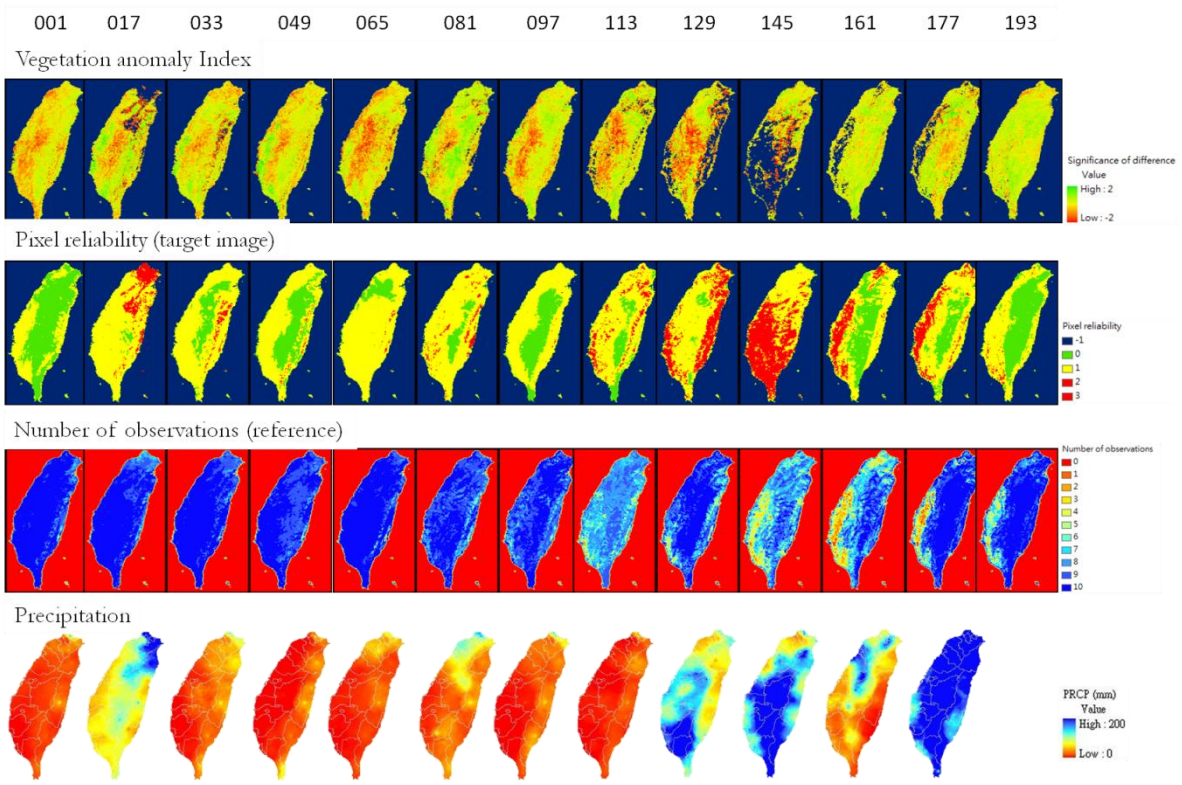


圖 103 2002 年乾旱事件所引發的植生異常

2002 年乾旱對植生的影響，也可透過單一像元中 NDVI 的時序性資料來表示，圖 104 中淺色線為基期平均值及歷年同期的 NDVI 標準差，2002 年乾旱造成 NDVI 較此基準值低得許多，直到 5 月底、6 月初後，隨著旱象的解除，植生指標才逐漸回升，並上升到原先的基準值。

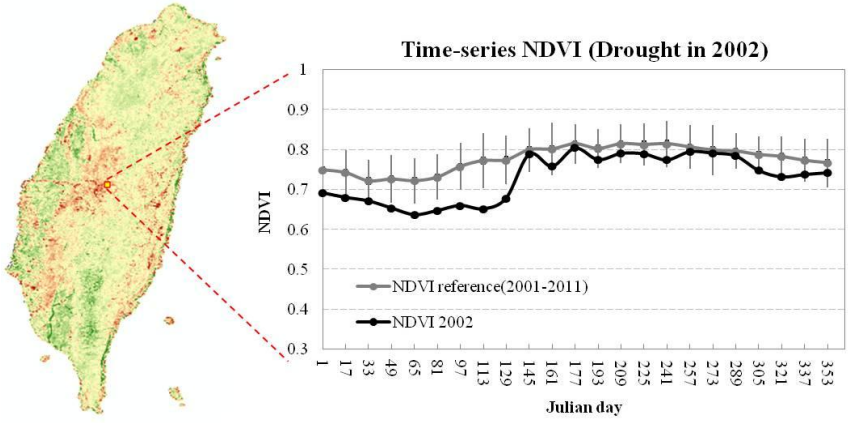


圖 104 單一像元基期 NDVI 及 2002 年 NDVI 的時序性變化

除了植生異常反應，乾旱災情對植生所造成的水勢壓力，也能在常態化差異水指標中呈現(式 4)，並佐證此異常的發生原因；圖 105 中 Difference of NDWI 為 2002 年

NDWI (DOY0 65)與 2001 年同期資料的差異值影像，顯示與 NDVI 差異值及植生異常指標近似的空間分佈。

$$NDWI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}} \quad \text{.....(式 4)}$$

ϱ_{NIR}:近紅外光反射率

ϱ_{SWIR}:短波紅外光反射率

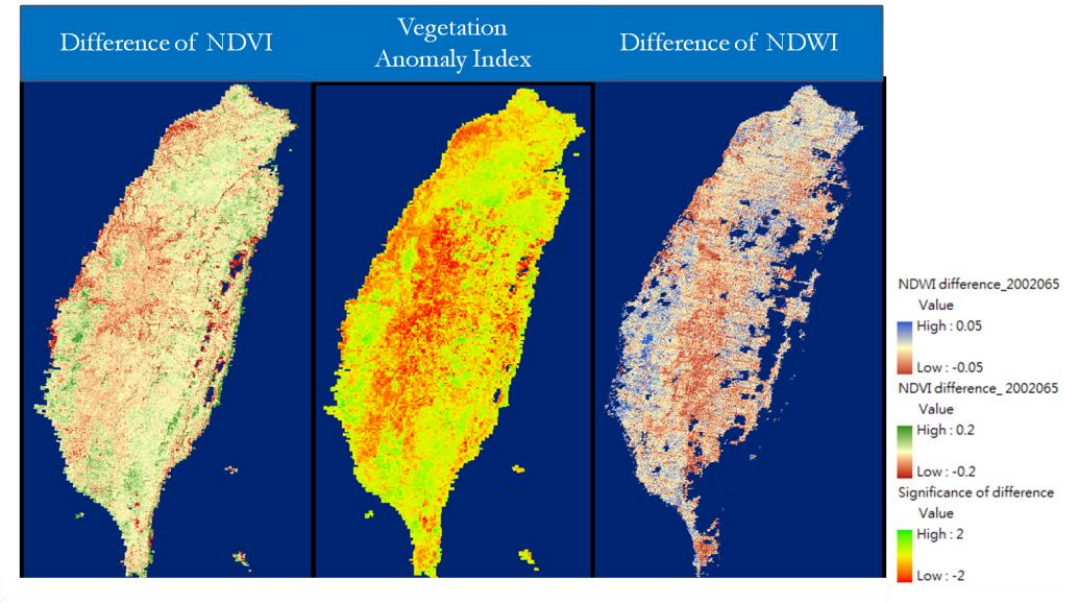


圖 105 NDVI 差異值、植生異常指標、以及 NDWI 差異值

要驗證乾旱事件具有相當的困難性，在一般的報載或研究文獻上頂多為定性的描述，遙測資料或許為空間範圍分佈上的唯一資料來源，故僅能透過不同平台的觀測資料加以佐證，圖 106 分別為 2002097 期植生異常指標、2002097 前六月的累積降雨，以及 2001 年時序 NDVI 資料標準差，乾旱異常在空間分佈上與 250mm 等雨量線呈現吻合，而西部作物區域由於仰賴灌溉水源，未受到當地降雨短缺的立即影響而休耕，故未呈現異常情形，此作物區由於在 NDVI 季節性的時序資料上呈現明顯的耕植期及非耕植期變化，故在年度 NDVI 資料上(一年 23 筆資料)呈現較高的變異情形。

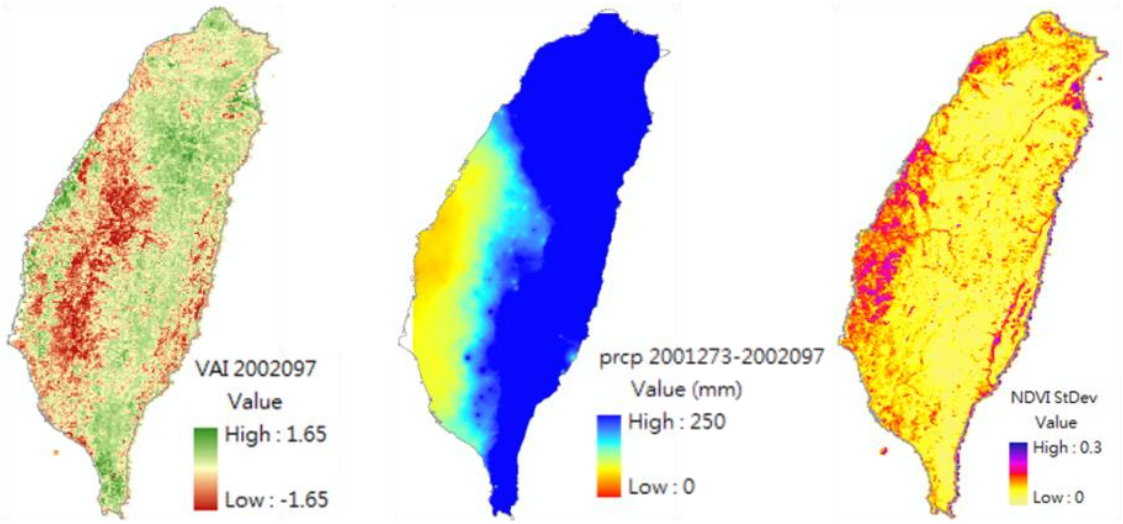


圖 106 植生異常指標、累積降雨、2001 年時序 NDVI 資料標準差

3.5 植生異常案例探討-2000-2011 年火災事件

傳統林火偵測主要仰賴人為發現與通報，在偏遠地區及幅員廣大的山區地形，常可能無法在第一時間發現，致使林火延燒無法在火燒初期即有效控制，衛載遙測技術則提供了林火監測一有效的輔助工具，透過例行常態的觀測，能對廣大國土及偏遠山區進行林火的辨識，並藉由影像中的煙霧方向，輔助判釋林火延燒的可能方向，而災後的受災面積估算、植生復育、以及對森林健康的影響，也能藉由遙測影像進行分析評估。

MODIS 由於具有熱紅外光波段，能偵測地表發射的熱輻射，而火燒釋放出的異常熱源，則提供了林火辨識的機會，透過 Terra/Aqua MODIS 的整合觀測，每日能進行 4 次(01:30、10:30、13:30、22:30)的地表監測，也大幅提升了 MODIS 在及時火災監測的效能。本計畫整合 MODIS MOD14 火源偵測與植生異常分析，辨識 2000-2011 年發生的大型林火事件(發生時間與地點)，並透過時序性的植生指標、初級生產力、葉面積指數、地表溫度等遙測資料，評估林火等擾動事件對當地生態的影響，以及火災前後在植生生長、水文平衡、能量平衡間的擾動現象，提供森林健康研究輔助參考。

3.5.1 林火偵測分析流程

MODIS 火點偵測主要透過 3.96 及 11 μm(第 22 及 31 波段)的熱紅外光波段，接收地表發射的熱紅外輻射，透過偵測火點區域所發射的異常亮溫(相較於未發生火災區域

的輻射背景值)，以進行熱異常的界定，並能提供火燒發射能量及火燒溫度等相關資訊，此方法已在國際間廣泛應用於森林火災及火山活動的偵測，提供消防及林業單位在救災、減災、林火統計上的應用；理論而言，MODIS 像元解析度雖為 1km(相當於 100ha)，但只要火燒溫度夠高，MOD14 能偵測出約 1/10 像元範圍的火源區域，經由 2000-2011 年台灣地區偵測火點的統計分析，發現所偵測出的火點多位於農作區或居定地，應為農地整地或市民火災所造成，並非研究所關注的森林火災，為了分析林火對森林健康所造成的影響，本計畫整合 MOD14 火點偵測與植生異常分析，透過林火所引發的異常熱源，以及災前災後的植生綠度變遷的特性，辨識出屬於森林火災的火點，再進一步藉由鄰近災害時期的前後期高解析衛星影像，確認林火發生並界定焚燒的區域範圍，在所有焚燒事件確認後，藉由數值地形模型及土地利用資料的套疊分析，判斷林火主要發生的區域屬性(海拔高度、坡度、坡向、災前地貌與林型)，以提供林業管理單位參考；此外，由於 MODIS 植生指標的像元解析度為 250x250 m(單一像元相當於 6.25ha 區域)，此方法主要針對受災區域較大的火燒事件(>10ha)進行辨識分析。

3.5.2 歷年林火事件與統計分析

經由 MODIS 偵測火點與植生異常的整合分析，在 2000-2011 年的觀測期中，共偵測出 18 筆林火事件，表 16 中詳列林火發生的日期、座標、所屬事業區(Working Circle)與林班地(Comp.)、以及藉由高解析衛星影像所辨識出的焚燒面積；火災主要分佈於大甲、丹大、大埔事業區三個區域(圖 107)，其中丹大、大埔有多次火災發生於鄰近地點，顯示出二次火災的跡象，以林火發生的日期而言，在此 18 起火災中，共有 15 起發生於乾季(11 月至翌年 4 月)，若就火災次數及焚燒面積來看，2001、2005、及 2009 年為火災較為嚴重的年份。針對所判釋出的火災區域，本計畫也分別於 2011 年 8 月及 2012 年 7 月進行了實地勘查，確認火災發生及災後的植生復育情形(圖 108)。

表 16 2000 to 2011 年偵測林火事件

Date	Lon.	Lat.	Working Circle	Comp.	Area(ha)
2001/1/19	121°5'20.55"	23°45'45.21"	Danda	16,17	193.7
2001/2/11	121°17'8.30"	24°20'22.87"	Dacha	22,23,24	174.2
2001/2/18	121°16'18.44"	24°23'16.70"	Dacha	26,27	29.5
2001/2/23	120°43'35.11"	23°19'28.55"	Chishan	9,10	24.5
2001/3/18	121°7'39.53"	23°44'24.82"	Danda	17	66.6
2002/1/15	121°2'16.48"	24°0'26.83"	Puli	113	11.7
2002/5/11	121°19'20.43"	24°21'51.73"	Dacha	37,38	160.1
2004/11/13	121°16'0.62"	24°13'38.08"	Dacha	76	36.2
2004/11/20	121°5'20.55"	23°45'45.21"	Danda	16,17	168.0
2005/1/31	120°43'34.42"	23°27'39.77"	Dapu	227,228	94.0
2005/2/16	120°41'0.11"	23°24'40.13"	Dapu	113,114,125	37.1
2005/2/17	120°39'47.94"	23°20'30.70"	Dapu	100,101	60.5
2007/2/6	121°14'27.64"	23°44'47.08"	Lintianshan	98,99,100	127.0
2009/1/12	120°43'34.42"	23°27'39.77"	Dapu	227,228	139.8
2009/3/18	121°5'20.55"	23°45'45.21"	Danda	16,17	157.0
2009/9/12	121°16'33.92"	24°16'29.87"	Dacha	66,67	27.2
2010/8/10	121°36'29.02"	25°10'48.93"	—	—	31.9
2009/1/14	120°42'43.80"	23°24'30.55"	Dapu	116,117,255	133.4

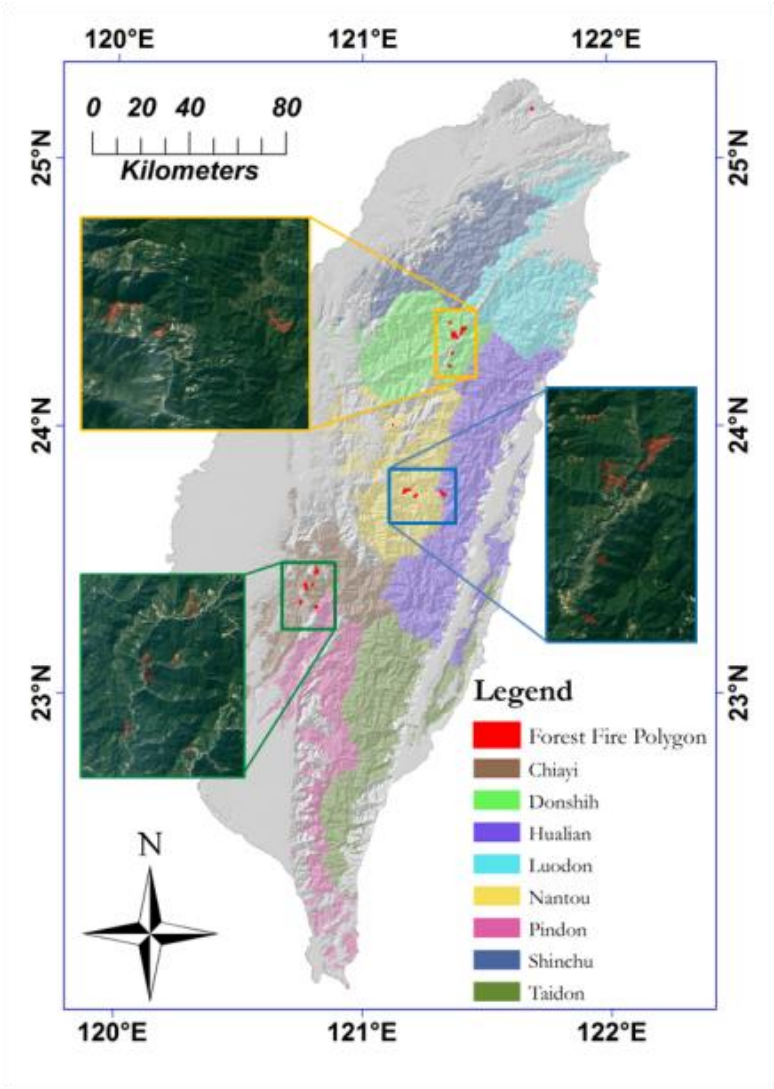


圖 107 林火分佈區域與事業區

圖 108 2012 年 7 月大埔事業區實地勘查

針對歷年火災的焚燒區域，本計畫透過數值地形模型及土地利用圖的套疊分析，進行焚燒區(>10ha)在海拔高度、坡向、坡度、焚燒前地貌林型的統計分析，經由研究顯示，火燒區主要位處於中、高海拔區域，並以南向(東南向、南向、西南向)的高坡區域為主(圖 109)，南向的向陽面山坡由於相對較低的濕度環境，較易助長火燒的點燃，高坡區域(配合火災時的風向)則有加速火災延燒速度的效應，而中高海拔山區一般救援較為困難，林火撲滅可能需要較長時間，也可能間接造成較大的受災範圍；在焚燒區地貌類別的統計成果上，位處中高海拔的針葉林相為主要的受災對象，但若以各類別的分佈比例而言，則以箭竹草原所佔比例(受災的箭竹草原佔所有箭竹草原的面積比例)最高(圖 110)。

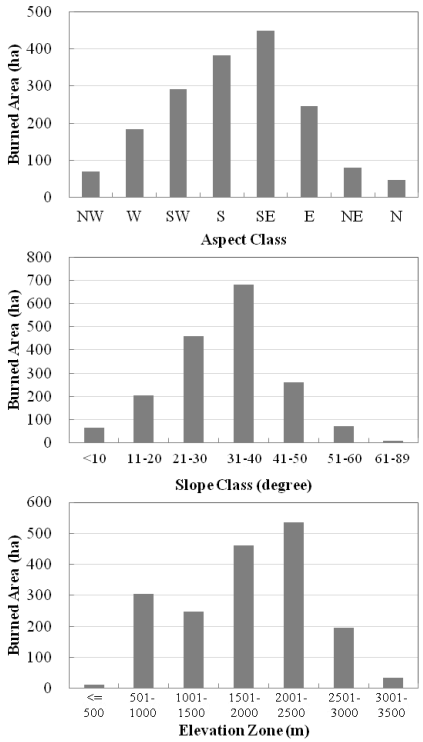


圖 109 火災焚燒區域統計分析-海拔高度、坡向、坡度

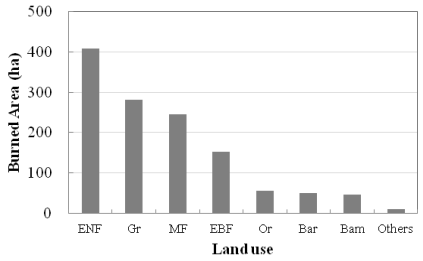


圖 110 火災焚燒區域統計分析-地貌類別 (ENF:常綠針葉林、Gr:草生地、MF:混合林、EBF:常綠闊葉林、Cr:作物區、Bar:裸露地或稀疏植被區域、Bam:竹林)

3.5.3 遙測應用與林火案例探討

遙測在森林火災事件的應用，包含火點的偵測、火災遺跡的界定、植生復育的追蹤，並可作為評估林火對受災區生態環境影響的分析工具，在此以案例探討方式，說明遙測在火災災時及災後的分析應用，提供森林健康的輔助資訊。

3.5.3.1 阿里山火燒事件

2009/1/12 大埔事業區(阿里山山區) 228、229 林班發生火災，透過 MODIS 適時的觀測，能將此異常熱源偵測出來(圖 111)；圖 112 分別為災前及災時的植生指標影像，以及災時及災後的假色影像，假色影像由短波紅外光、藍光、NDVI 套色而成，由於

火災煙霧降低紅外光與紅光波段的對比，造成災時影像植生指標明顯的降低，透過假色影像的套疊分析，能呈現出較高熱輻射發射的火源區域，並由煙霧相較於火點的方位，判定災時風場及火勢可能的延燒方向，在此觀測案例中，火災起火點應位於南側的東南向山脊，受到北北西風向的影響，火勢逐漸向北及向上方稜脊延燒，但配合數值地形模型及災後焚燒區的辨識，顯示當時火勢延燒未跨越稜線並向西發展，在 1/13 10:00AM 的衛星影像中，主要火源應已有效控制。

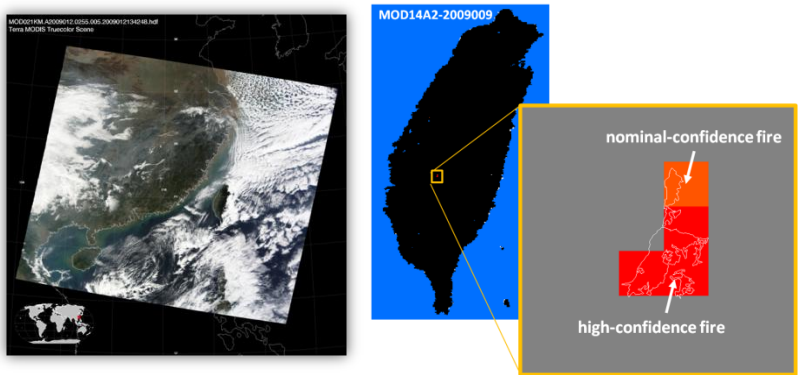


圖 111 MODIS 火點偵測(2009/1/9-1/17)-阿里山林火

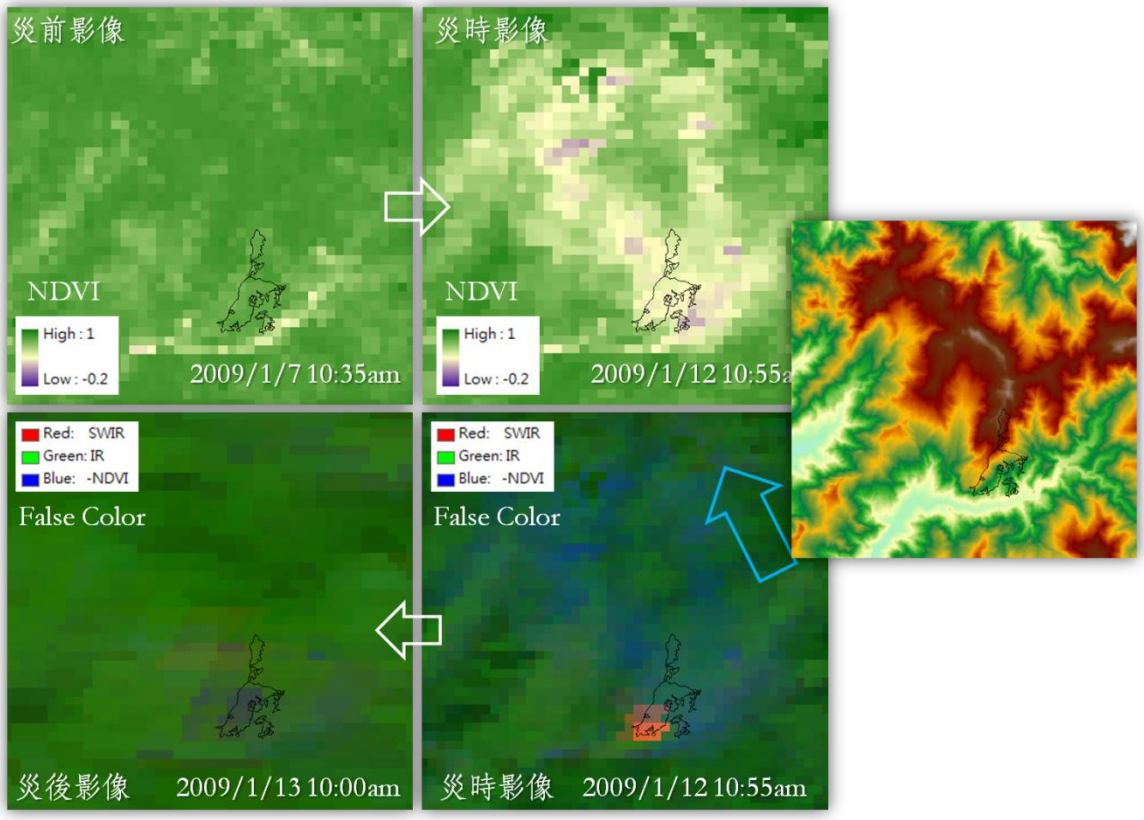


圖 112 阿里山火災災前、災時 NDVI 影像及災時、災後假色影像

配合火點偵測，本計畫也進行火災區的植生指標分析，透過災後的植生異常指標影像(圖 113)，顯示火災焚燒中較嚴重的受災區域，主要為南側的火燒區塊；研究並針對此區塊進行時序性的植生指標監測，圖 114 呈現出歷年基期的植生指標(2001-2008、及 2010-2011 年共 10 期 NDVI 影像平均值)，以及 2009 年的植生指標，顯示在火災發生後，植生指標急遽降低，低植生現象持續約 4-5 個資料週期，隨著雨季開始，植生狀態也快速回復，到了 5 月份，植生的光譜反應已和基期資料無太大差異，顯示災後火災基地迅速的植生生長及地貌變遷。

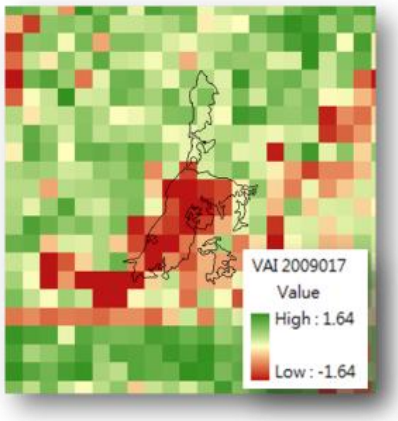


圖 113 阿里山林火災後植生異常指標影像(2009/1/17-2009/2/1)

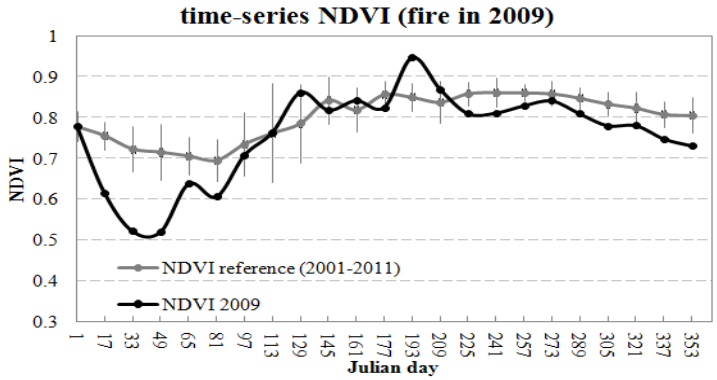


圖 114 2009 年 MODIS NDVI 及基期 NDVI(10 年平均值)(阿里山火燒區域)

透過常態時序性的植生指標觀測，能對火災區域的植生背景及災後復育進行瞭解，圖 115 為阿里山火災點位 2001-2010 年的 MODIS NDVI 時序資料；在歷年的觀測中，此區域呈現近似的生長型態，在生長季前的 1-4 月份，NDVI 逐漸遞減，顯示受到相似的生長條件約制(土壤水分)，隨著 4 月底、5 月初雨季來臨，植生指標迅速上升，生長季也就此展開；經由觀測發現，2009/1/12 發生的火災為二次火災，同區域在

2005/1/31 即已發生過，火災發生後，皆可看到植生指標迅速的下跌，隨後並緩慢的回升，由於兩次火災皆於一月份發生，此高頻率的火災周期可能與乾季的植生型態有關。

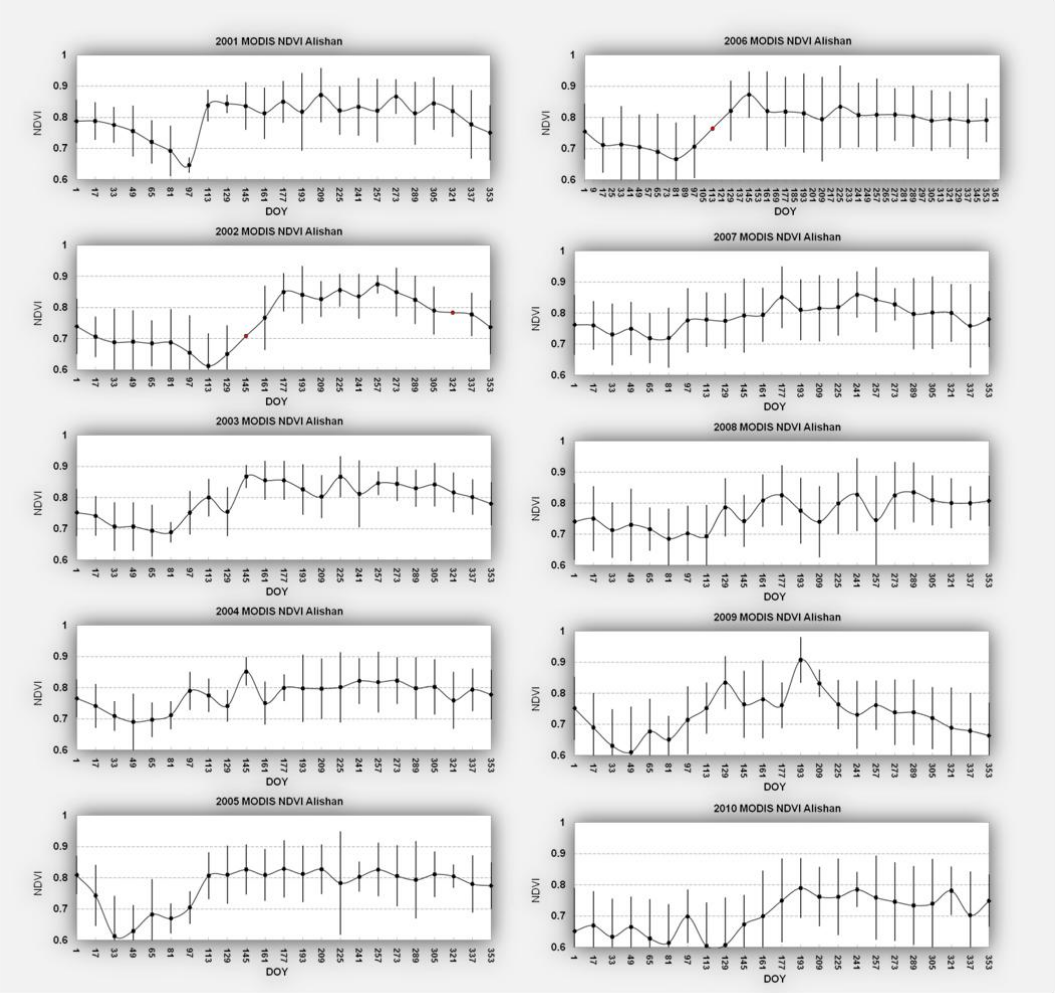


圖 115 阿里山火災事件點位 2001-2010 年 MODIS NDVI 時序資料

MODIS 影像雖能針對大範圍區域進行森林火災初期的火點偵測，並進行常態性的森林健康評估，但如要進行火災範圍界定，高解析遙測影像仍為不可或缺的工具，圖 116 為 2009/1/12 火災的災前及災後 SPOT 衛星影像及植生指標，藉由火災範圍界定，焚燒面積共計約 140ha，透過時序性的高解析影像資料，同樣呈現在火災後的四個月，地表已多為植生覆蓋，回復至災前的草生地地貌。

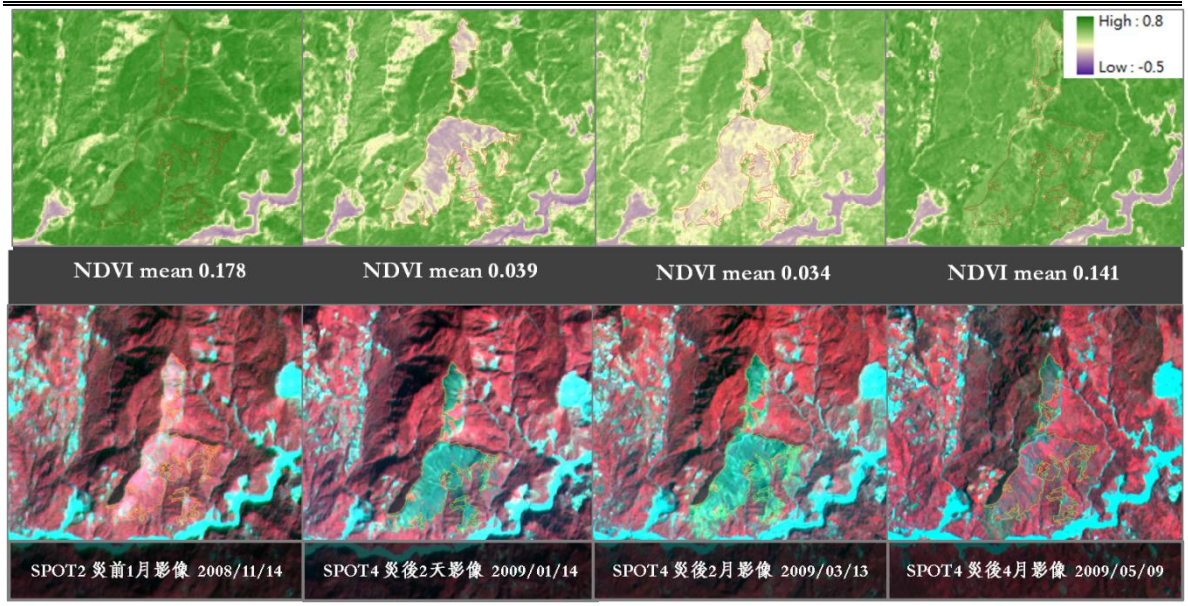


圖 116 阿里山火災事件 SPOT 影像及 SPOT NDVI

為判定火災發生及火災後的植生狀況，本計畫於 2011 年 8 月進行阿里山區現場調查，透過高解析福衛影像及現地照片(圖 117)，可見此區域火災後主要為草生地所覆蓋，與火災範圍外的喬木及竹林呈現明顯對比，也由於草本植物的迅速生長，造成植生指標在災後四個月後即回升至先前水平。

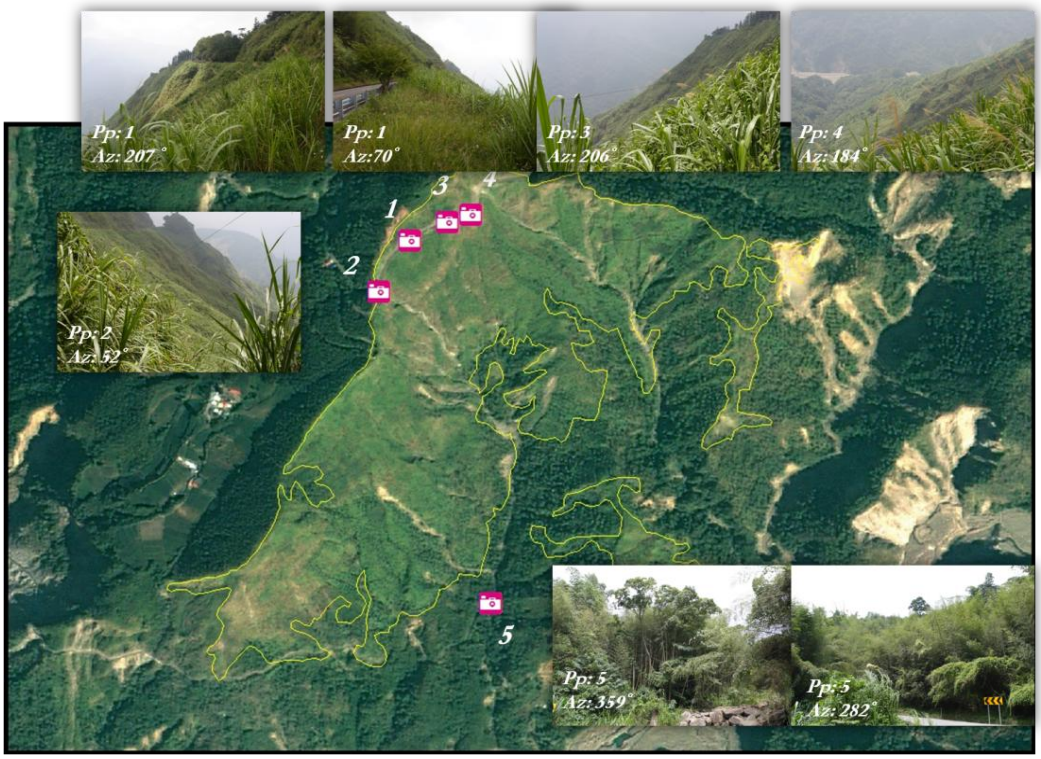


圖 117 2011 年 8 月份阿里山火災實地勘查

火災在瞬間對森林環境產生劇烈擾動，此擾動除了地面溫度的迅速提高，將生物體內固存的養分、碳量釋放出來，地貌改變也同時擾動了受災區的能量平衡，圖 118 為阿里山火災基地在火災發生前後的光譜變化，包含 MODIS 感測器對地表觀測的前 7 個波段地表反射率，以及可見光波段(前 3 波段)的放大圖，為火災前 5 日至災後約 5 月的觀測值，透過時序資料的分析，顯示在火災發生後，綠光、近紅外光、中紅外光波段(1.2 及 1.6μm)反射率皆降低，藍光、紅光、紅外光反射率(2.1μm)則提高，原先可見光及紅外光的反射率對比因此降低，也由原先植生型態的光譜反應，改變為裸露焦黑荒地的光譜情形，但由於火災後養分的大量釋放，原先未被燒死的根系重新發芽，並伴隨周圍環境植生的逐漸入侵，植生地貌也漸進式的恢復，以此案例而言，約在災後 102 天後植生光譜反應已逐漸明顯，並在 168 天後回復至災前的光譜情形，亦即草生地的地貌型態。

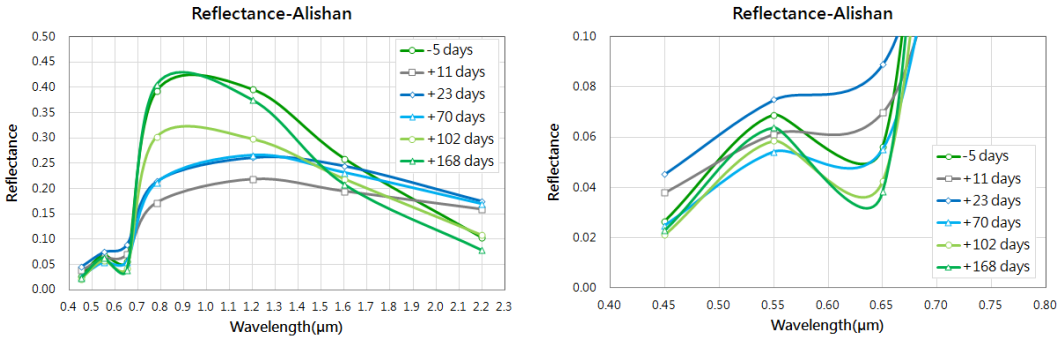


圖 118 阿里山火災前後地表反射率變化

火災後地貌改變，除了造成短波地表反照的變化，也在熱紅外光發射波段產生影響，在此以 MODIS 日間(~10:40am 觀測)及夜間(~10:30pm)觀測的地表溫度差異表示，圖 119 包含火災發生點位及鄰近未發生火災參考點位在火災前後的日夜溫差，雖然地表溫度在時序上受到天候的影響，火災與參考點位在溫度變化上呈現近似的趨勢，但相較於參考點位，火災點位在災後日夜溫度差有明顯提高的傾向，主要由於火災焚燒破壞原本的植被覆蓋，地表含水及含熱能力下降，土壤濕度降低，造成地表發射率的明顯變化；此外，藉由觀測數據分析，此日夜溫差的上升，與夜間地表溫度的明顯偏低有關。

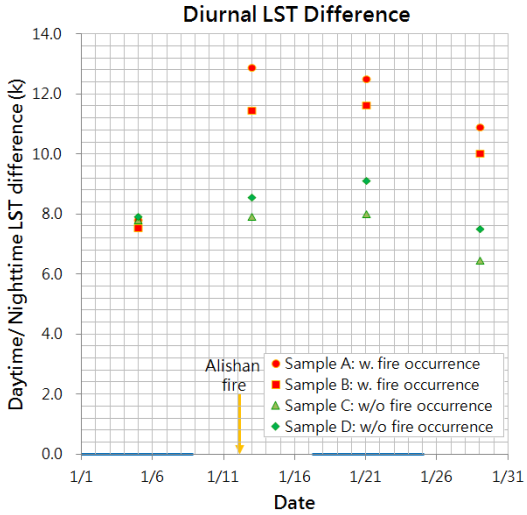


圖 119 阿里山火災前後日間及夜間地表溫度差異

3.5.3.2 丹大火燒事件

南投縣信義鄉的丹大山區在 2004/11/21 發生森林火災，以受災面積而言，為近年較大型的焚燒事件；透過時序性的植生指標及植生異常指標分析(圖 120、121)，可見此區域在火災後，植生指標急遽降低，2 月份雖稍微回復，但在 3 月又呈現異常情形，研判在林火發生後，此區域緩慢的恢復為原先的草生地覆蓋，且由於歷年 1 月底至 2 月初皆處於乾季，故植生指標相較於基期年份沒太大差異，但由於持續缺水，3 月時植生指標又再度下滑，最後在 4 月底左右降雨後，植生指標才回復至先前水準。

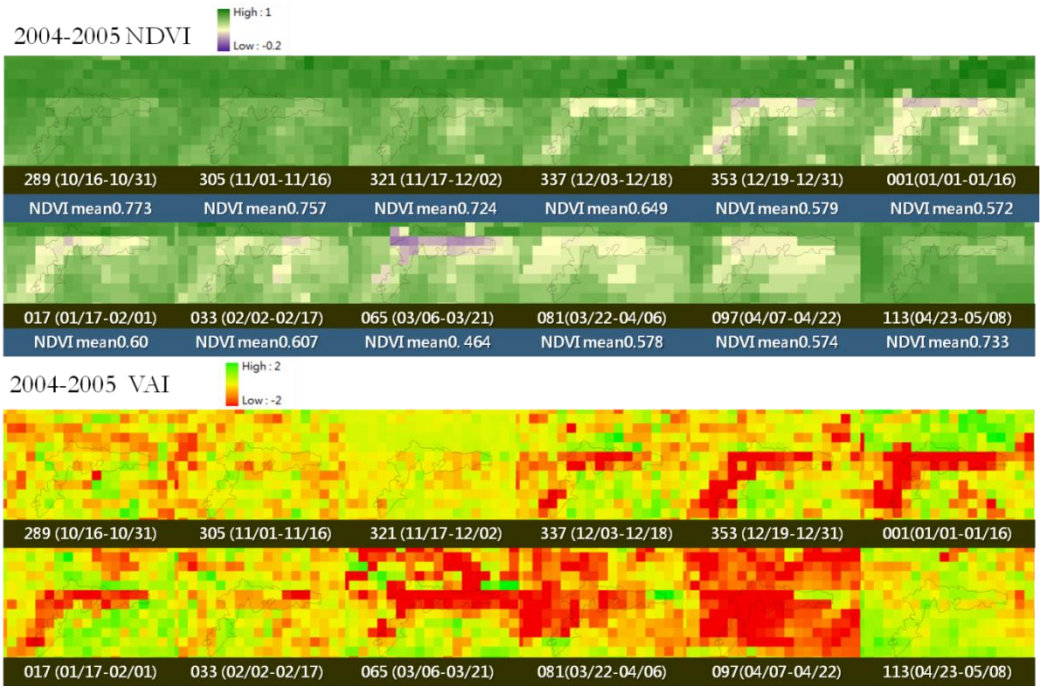


圖 120 丹大山區火災事件 MODIS NDVI 及 VAI 時序資料

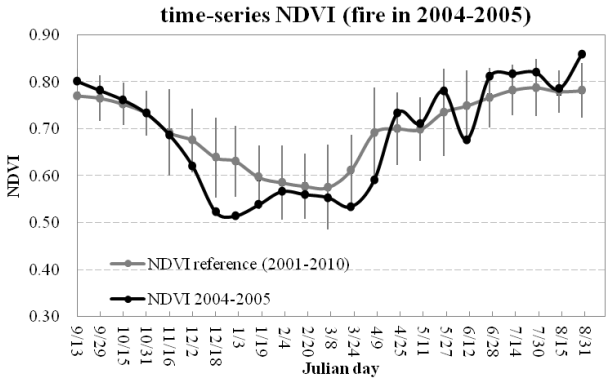


圖 121 丹大山區火災事件 2004-2005 年 MODIS NDVI 及基期 NDVI 時序資料

除了時序性的 MODIS 植生指標資料，本計畫也蒐集丹大火災在災前及災後的 SPOT 衛星影像，經由影像變遷分析，火災焚燒面積共達約 168 公頃，透過災前影像判釋，此區域在火災發生前，即主要為草生地的地貌型態，且 2004/11/21 丹大火災的受災範圍也與此植生型態的分佈相符合，故火災應屬於淺層的迅速延燒，造成較大的焚燒面積，在災後 6 個月的影像中，植生指標雖已逐漸回復(先前即為草生地)，但在假色影像中，仍可見到火燒區草生地與周圍林地的明顯區隔(圖 122)。

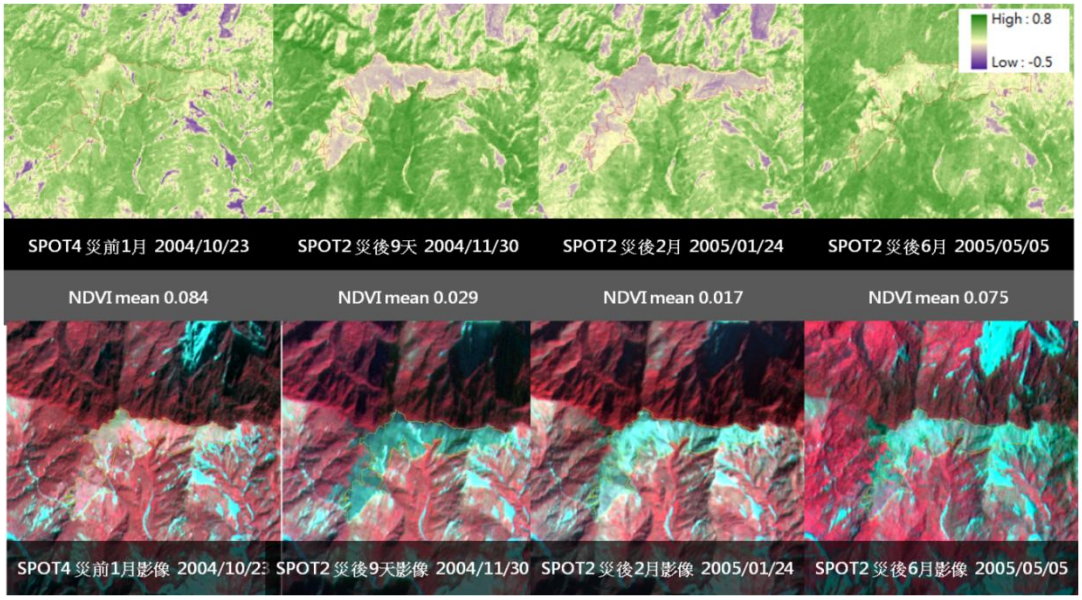


圖 122 丹大山區火災事件 SPOT 影像及 SPOT NDVI

由森林碳匯的角度出發，林火不僅將森林碳庫釋放出來，也破壞了原先的碳吸存效能，圖 123 顯示丹大火災前後總初級生產力及葉面積指數的時序性變遷，為突顯火災對森林生長及碳匯效能所造成的影響，研究並選定兩個未受火災波及的參考點位(一

鄰近火災點位，與火災點位呈現相同植群型態，另一點位則屬於不同植群型態)以輔助說明，經由分析顯示，在火災發生後，植生的葉面積指數及初級生產力迅速下降，與參考點位呈現明顯對比，顯示出林火對當地生態環境的嚴重衝擊。

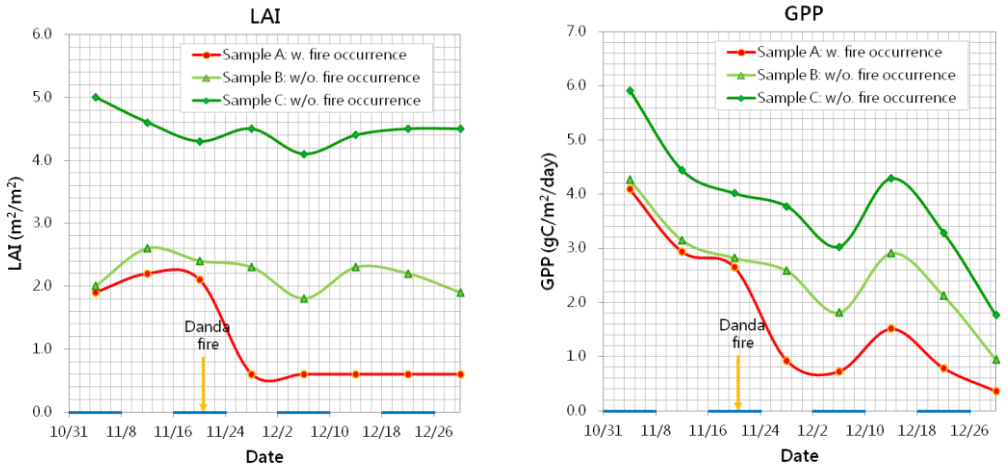


圖 123 丹大火災前後總初級生產力及葉面積指數變化

3.5.3.3 梨山火燒事件

大甲事業區梨山區域在 2009/9/12 發生火災，本計畫也對此火災事件進行 MODIS 及 SPOT 衛星影像的蒐集處理；透過時序性植生指標資料的分析(圖 124)，顯示此區域歷年 9 月份仍處於生長季節，且火災發生前並無水份短缺造成植生指標逐漸下降的趨勢，與先前阿里山及丹大火災的植生環境背景有所不同；藉由 SPOT 影像的研判(圖 125)，焚燒區域共計約 27.2 ha，災前影像則顯示此區域在火災發生前，應為作物或低植被區域所覆蓋，在火災後的 3 個月份，植生指標雖無明顯上升，但由於歷年此時已屬於乾季月份，植生指標已與基期資料無明顯落差。

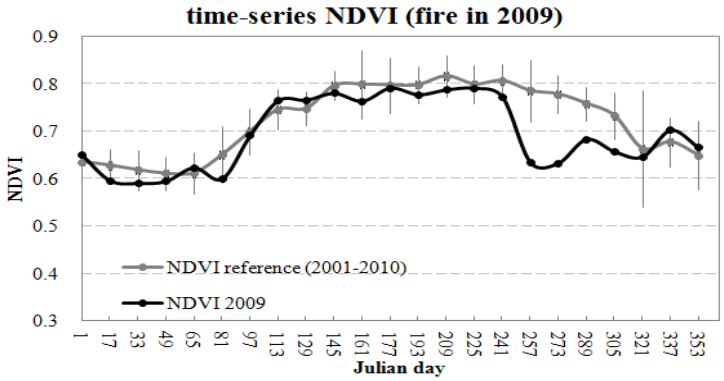


圖 124 梨山火災 2009 年 MODIS NDVI 及基期 NDVI 時序資料

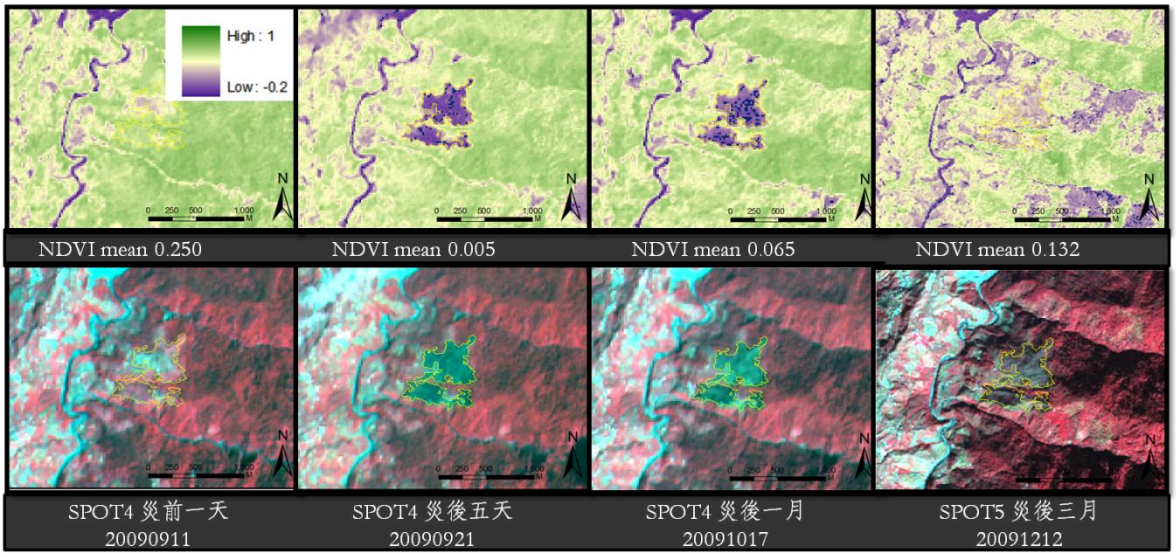
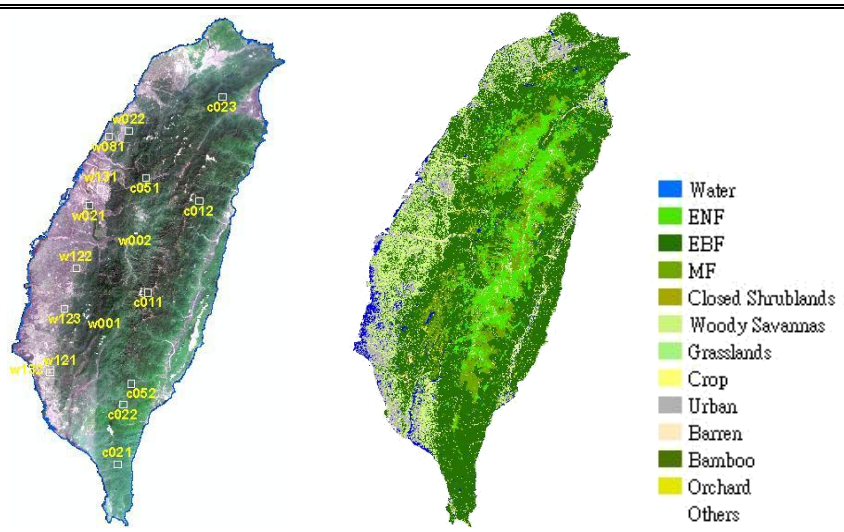


圖 125 梨山火災前後 SPOT 假色影像及植生指標影像

3.6 MODIS 資料森林健康監測應用評估

3.6.1 Terra MODIS 與 SPOT HRV NDVI 資料比對

MODIS 資料雖能提供冠層葉面的光譜反射資訊，藉由植生指標評估森林生長狀況與異常情形，但畢竟仍為一相對性的參考指標，在地形地貌較為複雜的台灣地區，MODIS 中尺度的空間解析是否適合於台灣森林環境的應用，仍需仰賴不同平台的資料進行比對驗證；由於 SPOT 衛星已長年應用於台灣全島綠色資源評估，故蒐集 2007/1/29、2007/1/30 Terra MODIS 及 SPOT-2 HRV 紅光及紅外光波段光譜資料，據以演算 NDVI，並藉由第三次森林資源調查分類圖資及 2006 年 SPOT 影像分類成果，選定 5km*5km 均質區域(山地測區藉由森林資源調查成果，平地區域藉由 SPOT 分類成果)(圖 126、表 17)，包含常綠針葉林(ENF)、闊葉林(EBF)、針闊葉混合林(MF)、作物(Cr)、草生地(Gr)及都市區域(Ur)等台灣地區主要地貌類型，以進行不同感測器 NDVI 值的比對分析(圖 127)。

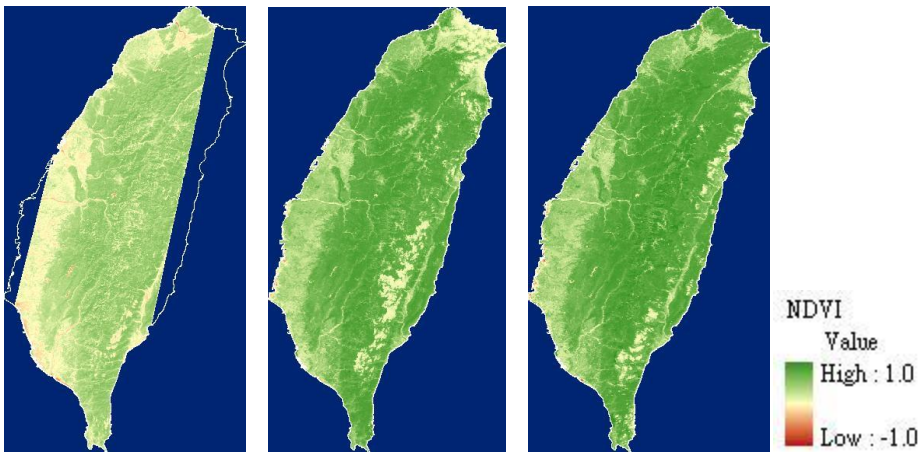


(a) (b)

圖 126 (a)測試區域分佈；(b)森林資源調查(山區)及 SPOT 分類(平地)影像

表 17 NDVI 測試區域(5km*5km)

Site	LC	Elevation(m)	X(m)	Y(m)	Site	LC	Elevation(m)	X(m)	Y(m)
c011	ENF	2790	250277	2596164	w021	EBF	124	206864	2660495
c012	ENF	2436	287770	2664047	w022	EBF	131	235674	2716143
c021	EBF	644	227781	2468293	w081	Gr	64	221072	2712196
c022	EBF	1558	231728	2512495	w121	Cr	21	177659	2536964
c023	EBF	654	300400	2741796	w122	Cr	42	197392	2613924
c051	MF	1662	248698	2681017	w123	Ur	29	188709	2583535
c052	MF	1681	237648	2527887	w131	Ur	85	215152	2672335
w001	Wa	222	205285	2577220	w132	Cr	16	170555	2545647



(a) (b) (c)

圖 127 (a)2007/1/29、1/30 HRV NDVI 影像(兩航帶影像)；(b)2007/1/29 MODIS NDVI 影像；(c)2007/1/30 MODIS NDVI 影像

MODIS 與 HRV NDVI 比對成果如圖 128 (單一測區 MODIS 樣本數: 400；HRV 樣本數:62500)，其中水體(W001、W002)、都市建物(W131、W132)及作物區(W121、W122)

皆呈現較低的 NDVI 數值，常綠針葉林、闊葉林及混合林的 NDVI 則沒有顯著差異，此外，作物區由於涵蓋零星散佈的建物，故 HRV NDVI 變異值較大，而內陸水體區域則由於涵蓋到周邊植生區域，亦造成較大的 NDVI 變異情形；整體而言，兩感測器 NDVI 呈現高度相關性，故以 MODIS 資料進行植生分析，雖其空間解析度無法有效反應細微地貌資訊，但在中、大尺度範圍的應用上，應能如 SPOT HRV 資料，有效反映出地表植生情形，作為全台森林健康的評估資訊。

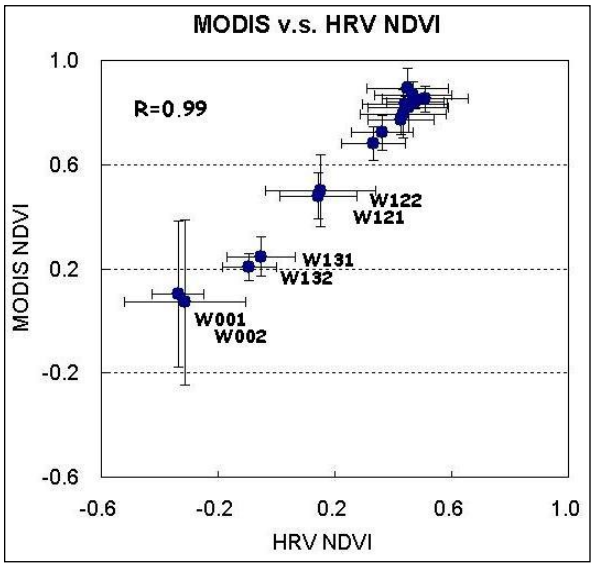


圖 128 MODIS 與 HRV NDVI 關係圖（±1 SD）(R=0.99 (p<0.05))

3.6.2 MODIS 資料森林健康監測應用評估

透過 MODIS 常態且長期的森林觀測以及植生異常指標的演算，雖能提供量化的森林植生變異範圍及程度，但變異原因仍有賴其他參考資料的詮釋，以輔助並佐證此異常情形，例如氣象資料對乾旱的解釋，及森林病蟲害、林火等相關報告，以適時適地的評估森林環境變遷及森林健康情形。

NDVI 及 VAI 提供一相對性的參考指標，但並非對森林健康程度進行評分，僅為對森林生態進行體檢，挑選出植生光譜反應不同於常態的地方，此與傳統森林健康研究的現地觀測(冠層結構、土壤養分及侵蝕、地被層組成、植生多樣性、燃料負載、動物棲地)及評比方式仍有相當落差，若需結合遙測觀測及傳統森林健康的評估方式，仍需透過廣泛的外業調查資料，針對單株及林分尺度進行詳細的健康評分及取樣分析，並考量到實際 MODIS 資料的空間解析(最小單一像元 250*250m)，以分析森林健康與

遙測森林冠層葉面資訊的相關性，建立植生異常指標與森林健康評比的迴歸關係式，以進一步推廣為大範圍區域的評估應用；有鑑於目前台灣地區的實地森林健康研究主要仍針對少數特定樹種及生態區域進行，在台灣森林環境多樣生態組成及 MODIS 中尺度空間解析力的前提考量下，要有效結合健康評比及 MODIS 指標仍有相當的尺度落差，故本計畫主要著重於 MODIS 遙測影像的分析，進行全台尺度的植生異常研究，以輔助林業單位並提供國有林區森林健康的參考資訊。

五、結論與建議

5.1 執行成果與結論

森林碳吸存估算

1. 完成 2000 年 10 月至 2012 年 9 月 Terra/Aqua -MODIS MOD17 產品資料的蒐集處理，以及全台、各地理氣候區、各植群帶、長期生態研究地的逐月碳匯分佈分析，並選取均質樣區，進行柳杉、紅檜扁柏、二葉松人工林以及不同林型或氣候區的碳匯比較。
2. 透過 2001-2010 年 MODIS 淨初級生產力的估算，台灣全島每年可吸存 22.2 -29.9 百萬公噸碳量，約相當於 81.4-109.6 百萬公噸的二氧化碳，這包含林地、草生地、農地作物、以及濕地上所有草本、木本植物的貢獻，在這些地貌種類中，森林區域約佔碳吸存總量的 76%，在國有林區內，平均每年每公頃森林能吸存 7.5-10.2 公噸碳量，顯示林業經營在碳吸存、碳保存政策中的重要性；在台灣本島所屬的七個地理氣候區中，國有林區內的森林碳吸存大抵呈現由南向北逐漸遞減的趨勢，最南側的 SE 區由於充足的日照，以及相較於西部區域較不明顯的乾季，且以中低海拔的榕楠林及楠儲林帶為主要林相，呈現出最高的淨初級生產力，平均每年每公頃區域能吸存 9.5-12.7 公噸的碳量，而位處最北側的 NE 區，恆濕型的氣候型態及雲層覆蓋影響，造成較低的光合作用有效輻射及植生生產力，平均吸存約 6.3-8.8 公噸的碳量。
3. 在碳吸存的植群分佈上，以低海拔的榕楠林、楠櫧林碳匯效能最高，平均每年每公頃森林能吸存 7.99-11.08 公噸碳量，隨著高度海拔的提升，林相由櫟林帶下層、櫟林帶上層，轉變為以鐵杉、雲杉、冷杉、以及高山植群，固碳能力亦逐漸遞減；以季節趨勢而言，總初級生產力(GPP)在 6 月底至 7 月初，臨近夏至的時期達到生產量高峰，與此時的高日照輻射與高輻射吸收有關(配合較高的葉面積指數 LAI 與光合作用有效吸收輻射分量 FPAR)，但由於此時相對較高生物量，亦造成較高的呼吸成本(respiration cost)，實際的生長旺期，約在生長季初期至 3 月底左右，並反應在最高的淨光合作用(PSNnet)，以及植生

量的迅速增加。

4. 在各林區中，花蓮林區由於面積較廣，碳吸存為所有林區最高，2000 至 2010 年間每年碳匯量可達到 2.28-3.19 百萬噸，但若考量單位區域的固碳能力，則以位於南部地理氣候區(SE、ES、SW)的台東、屏東、嘉義林區較高，平均每年每公頃達到 7.89-12.17 噸的固碳效能。
5. 透過霞雲、巴陵、東石、嘉義氣象站渦流協變系統通量資料的分析，能呈現出各測站二氧化碳濃度的日夜變化及季節性變遷，研究顯示，大氣中的二氧化碳濃與測站所處的海拔高度有關，並配合日照幅射的強弱及光合作用的進行，呈現明顯的日夜變動及季節性變化，在逐時觀測資料的比較中，日間的二氧化碳沉積速率與光合作用有效輻射的強度變化呈現相關，但到了夜間，呼吸作用造成二氧化碳排放，其排放速率則與夜間均溫及蒸發散量呈現相關。
6. 在地面驗證資料上，本計畫進行通量資料律定及淨生態系統生產力、總初級生產力的推演，完成遙測成果的比對驗證；成果顯示遙測與通量資料的季節性變化趨勢相符，相關係數 R=0.79 (p<0.05)，但若進行量級上的比較，則遙測推演高於通量的觀測成果(GPP 高約 30.02%，NPP 高約 18.93 %)，且在生長季高峰時，差異現象更為明顯，推測可能與光合作用有效輻射分量的錯估，或與假定中恆定的最大光能利用效率有關。
7. 為分析國有林區的碳匯分佈情形，本計畫並透過永久樣區資料的蒐集彙整，分析歷次調查成果在地理氣候區及植群帶的蓄積量、碳蓄積變化量及碳吸存量，研究成果顯示，在各地理氣候區中，以位處西部的 CW、SW、及 NW 蓄積量較高(所有樣區平均值)，並以位於中央山脊南北兩端的東北部 NE 區，及東南部 SE 區蓄積量較低，但如以碳匯效能來看，則以南部的 SW、ES、及 SE 區具有較高的碳吸存量，北部的 EN 區及 NE 區較小，平均每年每公頃森林吸存約 6.0 公噸(NE 區)-9.0 公噸(SE 區)碳量，故在空間趨勢而言，反應出光合作用量的南北差異，並與遙測觀測成果的分佈趨勢相符，但就量級而言，遙測數據約為永久樣區資料的 1.07-1.27 倍，同樣呈現出遙測推演高於地面觀測

值的現象。

森林生長分析

1. 完成 2009 年 10 月至 2012 年 9 月 Terra/Aqua -MODIS MOD15 產品資料的蒐集處理，進行國有林區各植群帶、長期生態研究地的葉面積指數分析，並選取均質樣區，進行人工林(柳杉、紅檜扁柏、二葉松) 、平地造林、以及不同林型或氣候區的季節性森林生長比較。
2. 經由三年期的研究成果顯示，森林生長呈現明顯的季節性變化，在夏季的 6-8 月份，葉面積指數達到最高，並在冬季的 1-2 月份為最低，在各植群型態中，中低海拔的闊葉林帶，如榕楠林、楠櫧林與櫟林帶下層，呈現的葉面積指數較為相似，而櫟林帶上層為針闊葉混合林型，葉面積略低於闊葉林的冠層狀態，其他如鐵杉、雲杉及冷杉林帶均為針葉林及高山植群，其葉面積較低，大致呈現隨著海拔上升，葉面積指數逐次遞減的趨勢。
3. 本計畫透過植冠分析儀，進行每月至每兩月的地面資料收集，取得時序性的葉面積指數實測資料，研究區域包含常綠闊葉林(嘉義蘭潭測區)、針葉林、針闊混淆林(台中大雪山測區)等不同林型，並進行不同年齡人工林、坡向、林型間的葉面積指數比較；相關地面實測資料已彙整於林務局生態調查資料庫，提供後續學界及政府單位在生態研究上的應用分析。
4. 為驗證遙測葉面積指數的推演成果，本計畫進行多重地貌林型的系統性取樣(包含天然林地、人造林地、防風林、竹林、果園、農作區等)，完成遙測與地面觀測資料的分析驗證；藉由 20 個 1× 1 公里測區(每一測區平均約 31 筆觀測資料)的比對成果顯示，在空間趨勢上，地面觀測與遙測推演的葉面積指數大致相符(R=0.87) (p<0.05)，但相較於地面資料，遙測推演在低植生區(稻田、箭竹林、果園等低葉面積指數區域)呈現些微偏低，高植生區(竹林、闊葉林等)又呈現些微偏高的趨勢，但整體而言，遙測值能大致掌握葉面積指數在空間分佈上的變異，有效作為台灣地區森林生長監測的分析依據。

森林健康評估

1. 完成 2009 年 10 月至 2012 年 9 月 Terra/Aqua-MODIS MOD13 植生指數產品

(NDVI 及 EVI)的蒐集處理，並透過 12 年期的植生指標分析，建立植生指數參考基準，並藉此與歷年植生資料比較，探討森林健康與植生異常情形，

2. 透過時序性的植生異常指標資料(VAI)，辨識植生異常區域及發生時點，並以案例分析方式，探討乾旱、崩塌等較大規模的異常事件。以 2002 年中西部山區植生乾旱為例，植生指標在 2002 年初連續數期資料中皆呈現持續偏低的趨勢，為辨識及驗證此異常狀況，研究中結合累計雨量及常態化差異水指標(NDWI)的分析，顯示乾旱區域與 200mm 等雨量線及 NDWI 的變遷區域相互吻合，也間接佐證植生異常的判釋成果。

3. 藉由時序常態的觀測，南部山區在 2009-2012 年 VAI 影像中皆呈現出異常狀況，透過高解析 SPOT 及福衛影像的交互比對，顯示此異常情形與 2009 年 88 風災後南部山區的大範圍崩塌有關。為評估此災害事件對森林碳匯的影響，研究中並結合永久樣區及森林資源調查資料，演算出各林型及各事業區的蓄積損失量，研究顯示，大武、荖濃溪事業區在此事件的受災情形較為嚴重，而在各林型中，以闊葉林及混合林的損失量較大。

4. 本計畫結合 12 年期 MODIS 火點偵測及 VAI 資料分析，辨識及彙整近十年來較大型的林火事件(遙測判釋)，並配合高解析衛星影像及數值地形模型的分析應用，對火災分佈區域進行定量探討。研究顯示，火災多發生於中高海拔東南向、南向、及西南向的高坡區域，11 月至翌年 4 月乾季為火災易發的季節，以地理區位來看，主要集中於大甲、大埔、及丹大幾個事業區中，共計偵測出 18 筆林火事件。

5. 本計畫以案例探討方式，呈現遙測技術在林火偵測、焚燒範圍辨識、森林健康評估、及植生復育追蹤的應用成果，並分析林火擾動對森林碳吸存、水文收支、輻射收支的影響。研究顯示，在火災發生後，火燒基地的植生初級生產力、葉面積指數皆明顯下降，日夜溫差也有擴大的趨勢，在反射輻射方面，綠光、近紅外光、中紅外光波段(1.2μm 及 1.6μm)反射率降低，而藍光、紅光、

紅外光反射率則提高(2.1μm)，原先紅光及近紅外光的反射率對比也因此降低。

5.2 建議

森林碳吸存估算

1. 衛載遙測能提供規律常態性的碳匯定量監測，以中尺度空間解析力的 MODIS 感測器而言，能相對的以較低的資源成本，提供高時間解析(8 日週期)的全島碳匯資訊，此為地面調查或通量觀測所無法達成。
2. 透過通量觀測與永久樣區地面調查資料的比對，證實遙測資料能分別在空間上及時間上反應出實地的碳匯變化趨勢，雖然在定量上仍有差異，但透過標準測站的比對及碳吸存機制的探討，已能逐步掌握遙測數據的誤差範圍，相信在未來能提供國家層級森林碳匯更精確的估算，作為碳吸存、碳保存政策所需的輔助資訊。
3. MODIS 遙測能提供規律常態性的全島碳匯定量監測，但由於中尺度空間解析力的限制，在地形地貌複雜度較高的台灣地區，考量地區均質性及空間對位的誤差，較不適宜進行單點資訊的應用，或針對特定的小範圍區域(<2x2km 的區域)進行分析，而較適合提供大範圍區域，或國家層級的碳吸存概觀資訊。
4. 本計畫以 NASA MODIS 標準產品推估，著眼於地理氣候區、植群帶等大空間範圍區域的碳匯比較，針對特定生態區位或小尺度的碳吸存估算，仍有賴更高空間解析力的遙測資料，例如空載或高解析衛載資料的應用，並透過整合氣象資料及生態模型的推估，自行研發出演算技術，以提供適於台灣，且多重尺度的碳匯觀測成果，此基礎研究值得後續的研究推廣。
5. 森林的碳匯功能需分別由碳儲存量(碳蓄積量)及碳吸存量的角度詮釋，MODIS 初級生產力產品主要藉由植物光合作用所產生的光譜反應，推估碳吸存的速率；在碳儲存量的研究上，則需透過不同的遙測技術，例如空載光達、全偏極雷達技術的應用，以求取樹高、孔隙率、地上部蓄積量等觀測數據，以提供更完整的碳匯估算，並輔助永久樣區或森林資源調查中的蓄積量量測，此

基礎研究亦相當值得後續的研究推廣。

6. 渦流協變性系統提供高時間解析度的實地觀測資料，不僅能提二氧化碳動態的變化資訊，也能透過氣象、水文、輻射等觀測參數的綜合分析，探討影響碳吸存的控制機制，但由於侷限於少數塔台點位的觀測，較難在空間上提供碳吸存的分佈趨勢，故透過遙測與通量資料的綜合分析，能在時間及空間上對森林碳匯及其影響機制進行較完整的詮釋。
7. 通量觀測與遙測在碳吸存的推估及假定上皆有所不同，以通量觀測為例，需要平坦均質的下墊面，以及紊流發展良好等環境條件，在非理想的假定條件下，平流通量及夜間林下儲存項的分析，仍為國內當前渦流協變理論研究的重要課題，故如要進行遙測與通量觀測參數的比對，確實很難釐清差異來源為遙測或塔台觀測誤差所造成，故分析應著重於遙測及塔台在碳匯分析上的優勢，共同詮釋森林碳匯在空間及時間上的變異，而非僅著重於兩者資料是否相符。
8. 地面調查能提供實地且高準確度的森林碳匯資訊，也為清潔發展機制(CDM)中估算各國土地利用及林業碳排放及碳移除的採用方法，為符合國際潮流，傳統森林資源調查及土地利用調查仍為不可或缺的工具，但由於地面調查的空間代表性較小，在林型及地形複雜度較高的台灣山區，取樣設計及量測誤差成為重要的考量，在環境梯度較大的台灣地區，適度的應用遙測技術，不僅能在空間上提供較全面的森林監測，更能相較於每五至十年的森林資源調查或永久樣區調查，提供規律常態且高時間解析，以及國有林區外的的碳匯資訊；透過各先進國家的經驗，整合森林資源地面調查、遙測技術、模型推估、以及通量觀測，已為世界各國設計所屬森林碳監測及測計系統的主要方向。

森林生長分析

1. 傳統的森林生長研究著重於樹高、胸徑、枝下高等有關森林蓄積的量測，透過 MODIS 的高再訪觀測，能在相較於傳統觀測下，提供更多元的森林動態資訊，反應出樹冠層的季節性變遷，適合作為長期生態或森林動態研究的基礎

資料。

2. 如同 MODIS 資料在森林碳吸存的應用，由於 MODIS 中尺度空間解析力的特性，配合其規律常態性的全島定量監測，在地形地貌複雜度較高的台灣地區，較適合提供大範圍區域、以及季節性的森林生長動態資訊，如欲應用 MODIS 資料於小尺度區域的森林生長研究，則需考量各別像元內地貌、林型的均質性，以及影像處理中可能產生的空間對應誤差。
3. 經由遙測與地面實測資料比對，顯示遙測值能大致掌握葉面積指數在空間分佈上的變異，但如欲應用 MODIS 葉面積指數於定量分析，仍需注意其在高植生區及低植生區可能產生的推估誤差，以及山區地形陰影對葉面積指數估算的影響。

森林健康評估

1. 植生異常指標以統計檢定方式，評估植生在擾動事件後的光譜異常情形，在 MODIS 的觀測尺度下，較適合針對大範圍區域的異常事件進行偵測，例如乾旱、風災對森林健康的影響，對於小尺度空間範圍的異常現象，例如火災、病蟲害等擾動事件，則較難單獨於中尺度的 MODIS 遙測資料中有效辨識，故針對局部區域的森林健康分析，建議仍需結合高解析衛星影像及實地勘查，以對單株、林分、或區域性尺度的擾動進行較深入的調查。
2. 雲霧覆蓋為植生異常分析最主要的不確定性來源，在 MODIS 的觀測解析力下，零星分佈的碎雲及所產生的混合像元資訊，常易造成植生異常的誤判，故以 VAI 進行擾動事件的辨識，仍應以影響範圍較大，或延時較久的異常現象作為主要的偵測對象。
3. 藉由 MODIS 常態且長期的森林觀測，以及植生異常指標的演算，雖能對變異程度及範圍提供定量的描述，但實際的變異原因，仍有賴地面調查或其他參考資料的綜合分析，以輔助佐證 MODIS 偵測出的異常情形，故未來以遙測技術進行森林健康分析，仍需結合氣象、遙測、實地勘查等多元的觀測成果，才能對森林健康進行較完整的評估。

六、參考文獻

(一)森林碳吸存研究

Baldocchi, D., Valentini, R., Running, S., Oechel, W., Dahlman, R., 1996. Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapor fluxes over terrestrial ecosystems. Global Change Biology, 2: 159-168.

Butcher, S. S., and Charlson, R. J. (Eds.), 1992. Global biogeochemical cycles, academic press. CA: Academic Press.

Churkina, G., Tenhunen, J., Thornton, P., Falge, E. M., Elbers, J. A., Erhard, M., Grunwald, T., Kowalski, A. S., Rannik, U., Sprinz, D., 2003. Analyzing the ecosystem carbon dynamics of four European coniferous forests using a biogeochemistry model. Ecosystems, 6(2): 168-184.

Curtis, P. S., Hanson, P. J., Bolstad, P., Barford, C., Randolph, J. C., Schmid, H. P., Wilson, K. B., 2002. Biometric and eddy-covariance based estimates of annual carbon storage in five eastern North American deciduous forests. Agricultural and Forest Meteorology, 113:3-19.

Etheridge, D. M., Steele, L. P., Langenfelds, R. L., Francey, R. J., 1998. Historical CO_2 records from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS ice cores. Retrieved from Carbon Dioxide Information Analysis Center Web site: http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/ lawdome.html.

Fluxnet, 2003. Fluxnet integrating worldwide CO_2 flux measurements. Retrieved from: http://www.daac.ornl.gov/ FLUXNET/fluxnet.html.

Gurevitch, J., Scheiner, S.M., Fox, G.A., 2002. The ecology of plants. Massachusetts: Sinauer Associates.

Heinsh, F. A., Reeves, M., Votava, P., Kang, S., Mllesl, C., Zhao, M., Glassy, J., Jolly, W. M., Loehman, R., Bowker, C. F., Kimball, J. S., Nemanl, R. R., Running, S. W., 2003. User's guide: GPP and NPP (MOD17A2/A3) products NASA MODIS land algorithm. Retrieved from : http://www.ntsg.umt.edu/modis/MOD17UsersGuide.pdf.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2003. Climate change 2001: the scientific

basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate. Cambridge: Cambridge University Press.

Keeling, C. D., and Whorf, T. P.,2004. Atmospheric carbon dioxide record from Mauna Loa. Retrieved from Carbon Dioxide Information Analysis Center Web site: http://cdiac.esd.ornl.gov/trends /co2/sio-mlo.htm

Monteith, J., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. Journal of Applied Ecology, 9: 747-766.

Monteith, J., 1977. Climate and efficiency of crop production in Britain. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B., 300: 277-294.

National Forest Carbon Monitoring, Accounting and Reporting System (NFCMARS), 2009. Forest carbon accounting. Retrieved from Natural Resources Canada Web site: http://carbon.cfs.nrcan.gc.ca/ForestCarbonAccount_e.html.

National Carbon Accounting System (NCAS), 2010. National carbon accounting system. Retrieved from Department of Climate Change and Energy Efficiency Web site: http://www.climatechange.gov.au/government/initiatives/national-carbon-accounting.aspx.

Reich, P. B., Turner, D. P., Bolstad, P. ,1999. An approach to spatially distributed modeling of net primary production (NPP) at the landscape scale and its application in validation of EOS NPP products. Remote Sensing of Environment, 70: 69-81.

Running, S., Nemani, R., Glassy, J., Thornton, P., 1999. MODIS daily photosynthesis and annual net primary production product –algorithm theoretical basis document. NASA MODIS land algorithm. Retrieved from: http://www.ntsg.umt.edu/modis/MOD17 UsersGuide.pdf.

Schimel, D., Melillo, J., Tian, H., McGuire, A. D., Kicklighter, D., Kittel, T., Rosenbloom, N., Running, S., Thorton, P., Ojima, D., Parton, W., Kelly, R., Sykes, M., Neilson, R., Rizzo, B., 2000. Contribution of increasing CO_2 and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. Science, 287(5460): 2004-2006.

Turner, D., Ritts, W., Cohen, W., Maeirsperger, T., Gower, S., Kirschbaum, A., Running, S.,

Zhao, M., Wofsy, S., Dunn, A., Law, B., Campbell, J., Oechel, W., Kwon, H., Merers., T., Small, E., Kurc., S., Gamon, J., 2005. Site-level evaluation of satellite-based global terrestrial gross primary production and net primary production monitoring. Global Change Biology, 11: 666-684.

Valentini, R. , Matteucci, G., Dolman, A. J., Schulze, E. D., Rebmann, C., Moors, E. J., Granier, A., Gross, P., Jensen, N. O., Pilegaard, K., 2000. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. Nature, 404: 861-865.

Walker, H., Keim, B., Arndt, M. B., 2001. Natural and anthropogenic factors affecting global and regional climate. Retrieved from National Health and Environmental Effects Research Laboratory Web site: http://www.necci.sr.unh.edu/necci-report/2001- Foundation-PDF/ Chapter3.pdf.

王立志，1996。氣候變遷對台灣林業的衝擊與適應。氣候變遷評估衝擊與因應策略建議研討會論文集: 215-229。

王亞男，2009。平地造林樹種對二氧化碳通量監測、分析之研究。行政院農業委員會林務局。

王義仲，2003。林木對碳吸存效益評估。華岡農科學報，10: 53-68。

林俊成，2007。台灣森林碳量估算及不確定性來源探討。碳循環在台灣研討會。

林裕仁、李國忠、林俊成，2002。以生物量與材積關係式推估台灣地區森林林木碳儲存量之研究。台大實驗林研究報告，16(2):71-79。

林務局，1995。第三次台灣森林資源及土地利用調查。行政院農業委員會林務局，台北。

邱祈榮、王瑞閔、梁玉琦，2006。台灣森林碳量估算面面觀。2006 森林碳吸存研討會論文集: 79-97。

邱祈榮，林俊成，陳莉坪，2010，植林碳匯專案管理，台北。

夏禹九，2008。二氧化碳通量儀器運轉維護及資料分析專案工作計畫期末報告。行政院環境保護署，台北。

莊振義，2010。Investigating the flux patterns within forest sub-canopy over a hilly terrain。

莊振義中央大學水文所演講簡報 2010/12/21。

楊榮啟、馮豐隆、黃俊雄，1998。林業對溫室氣體減量策略規劃及衝擊評估(二)期末報告。行政院環境保護署，台北。

(二)森林生長研究

Gholz, H. L., 1982. Environmental limits on aboveground net primaryproduction, leaf area, and biomass in vegetation zones of the PacificNorthwest. Ecology, 63: 469-481.

Norman, J. M., and Campbell, G. S., 1989. The description and measurement of plant community structure. In: Russell, G., Marshall, B. , Jarvis, P.G. (eds.)Plant canopies: their growth, form, and function. Society for Experimental Biology, 31: 1–19.

Maass, J. M., Vose, J. M., Swank, W. T., Martínez-Yrízar, A., 1995. Seasonal changes of leaf areaindex (LAI) in a tropical deciduous forest in west Mexico. Forest Ecology Management, 74(1):171-80.

Myneni, R. B., Knyazikhin, Y., Zhang, Y., Tian, Y., Wang, Y., Lotsch, A., Privette, J. L., Morisette, J. T., Running, S. W., Nemani, R., Glassy, J., Votava, P., 1999. MODIS leaf area index (LAI) and fraction of photosynthetically active radiation absorbed by vegetation (FPAR) product (MOD15) algorithm theoretical basis document. Retrieved from Web site: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod15.pdf.

Myneni, R. B., Knyazikhin, Y., Glassy, J., Votava, P., Shabanov, N., 2003. User's guide: FPAR, LAI (MOD15A2) 8-day composite NASA MODIS land algorithm. Retrieved from：http://cybele.bu.edu/modismisr/products/modis/userguide.pdf.

LI-COR, 1992. LAI-2000 plant canopy analyser operating manual. Retrieved from LI-COR Web site：http://www.csafrica.co.za/AllDocs/LI-COR/LAI-2000/Manual/LAI-2000_Manual.pdf.

邱祈榮、黃愷茹、潘孝隆，2006。臺灣地區柳杉生長模式研究之回顧。中華林學會 95 年度學術論文發表會：733-744。

陳朝圳，1985。大雪山地區紅檜人工幼齡林生長模式之研究。國立中興大學森林學研究所碩士論文。

(三)森林健康研究

Eidenshink, J. C. , and Faundeen, J. L., 1994. The 1km AVHRR global land data set: first stages in implementation. International Journal of Remote Sensing, 15(17): 3443-3462.

Goward, D. G., Turner, S., Dye, D. G., Liang, J., 1994. University of Maryland improved Global Vegetation Index. Internaitonal Journal of Remote Sensing, 15(17): 3365-3395.

Green, E. P., Mymby, P. J., Edwards, A. J., Clark, C. D., Ellis, A. C., 1997. Estimating leaf area index of mangroves from satellite data. Aquatic Botany, 58: 11-19.

Huete, A., Justice, C., Leeuwen, W. V., 1999. MODIS vegetation index (MOD 13) algorithm theoretical basis document. Retrieved from Web site: http://modis. gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf.

Moore, B., and Allard, G. ,2008. Climate change impacts on forest health. Forest Resources Development Service Working Paper FBS/34E. FAO, Rome, Italy.

Pontius, J., Hallett, R., Martin, M., 2005. Using AVIRIS to assess hemlock abundance and early decline in the Catskills, New York. Remote Sensing of Environment 97: 163-173.

Price, J. C. , and Bausch, W. C., 1995. Leaf area index estimation from visible and near-infrared reflectance data. Remote Sensing of Environment, 52(1): 55-65.

Smith, W. B. , 2002. Forest inventory and analysis: a national inventory and monitoring program. Environmental Pollution, 116: 233-242.

Stone, C., Chisholm, L., Coops, N., 2001. Spectral reflectance characteristics of eucalypt foliage damaged by insects. Australian Journal of Botany 49: 687-698.

Solberg, S., Næsset, E., Lange, H., Bollandsås, O. M., 2004. Remote sensing and spatial information sciences. Remote Sensing and Spatial Science, 35: 161-166.

USDA Forest Service, 2005. Forest inventory and analysis. National Core Field Guide, version 3.0: 203.

Zarco-Tejada, P. J., Miller, J. R., Mohammed, G. H., Nol, T. L., Sampson, P. H., 2002. Vegetation stress detection through chlorophyll a and b estimation and fluorescence effects on hyperspectral imagery. Journal of Environmental Quality, 31:1433-1441.

王兆桓、陳子英，2002。 林木健康指標評估方法之建立-以棲蘭地區老熟檜木為例。行政院農業委員會林務局保育研究系列第 91-6 號。

肖文發、韓景軍、馬娟，2001。美國國家森林健康監測與評價計畫及對我國的啟示。世界林業研究 14(3): 67-74。

肖興威、姚昌恬、陳雪峰、宋常青、曾偉生、張鐵平，2005。美國森林資源清查的基本作法與啟示。林業資源管理，2: 27-33。

陳朝圳，2005。利用遙測與地理資訊系統監測土地利用與生態系變遷。國家公園生物多樣性與環境監測研討會論文集: 7-20。

陳朝圳、鍾玉龍、吳守從、陳建璋，2007。第四次全國森林資源調查技術研習訓練班訓練計畫。行政院農業委員會林務局委辦計畫。

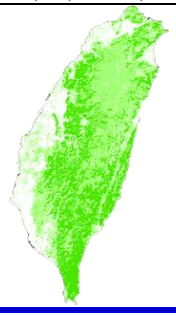
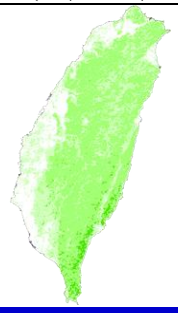
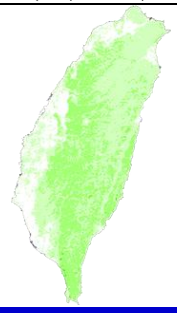
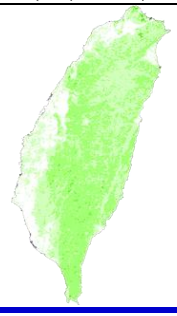
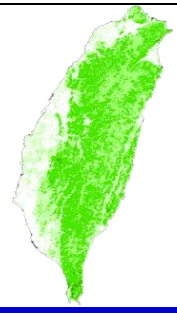
焦國模，1997。植生指標在林木測定上應用之研究。航遙測與地理資訊系統於森林資源經營上之應用研討會論文集: 1-16。

謝漢欽，1998。SPOT 綠度與森林生育地因子於台灣杉材積推估之探討。台灣林業科學，13(3):175-188。

羅時凡、陳淯婷、沙學均、陳朝圳，2008。林木健康指標之建立與效度評估。林業研究季刊，30(3):41-52。

羅時凡、魏浚紘、李崇誠、陳朝圳，2009。遙測技術應用於溪頭地區柳杉人工林之森林健康調查。林業研究季刊，31(1):37-54。

表 A-1 2011 年 10 月至 2012 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 GPP 套色影像表

年度	2011			2012		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/30-10/07） 281（10/08-10/15） 289（10/16-10/23） 297（10/24-10/31）	305（11/01-11/08） 313（11/09-11/16） 321（11/17-11/24） 329（11/25-12/02）	337（12/03-12/10） 345（12/11-12/18） 353（12/19-12/26） 361（12/27-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/05-03/12） 073（03/13-03/20） 081（03/21-03/28）
GPP 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

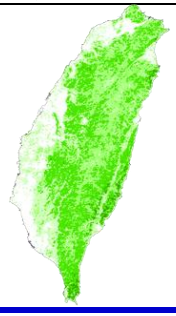
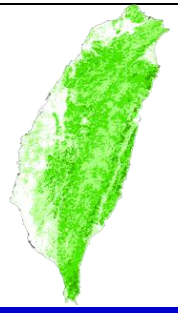
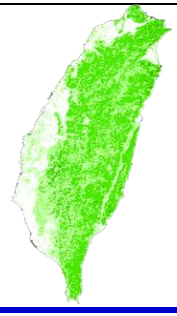
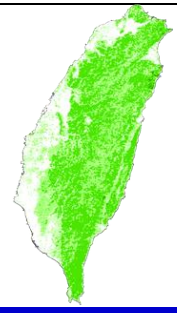
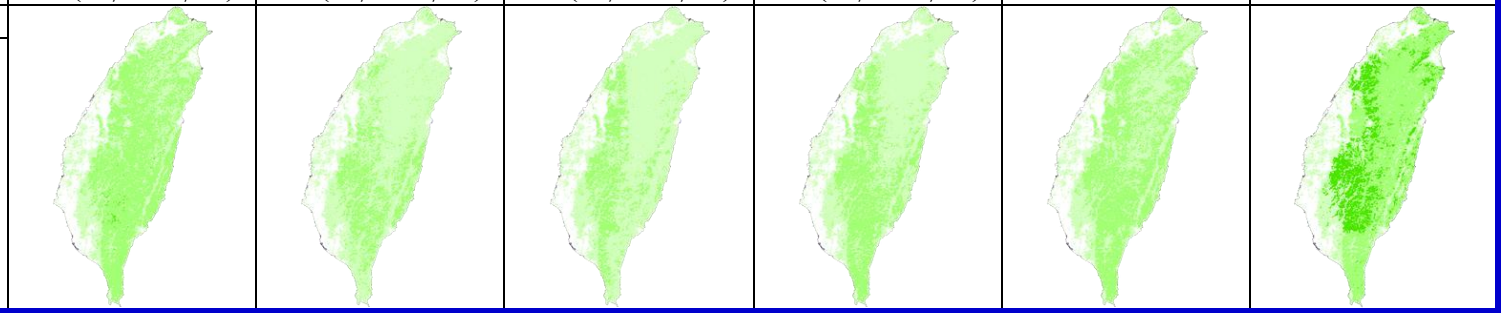
年度	2012					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/29-04/05） 097（04/06-04/13） 105（04/14-04/21） 113（04/22-04/29）	121（04/30-05/07） 129（05/08-05/15） 137（05/16-05/23） 145（05/24-05/31）	153（06/01-06/08） 161（06/09-06/16） 169（06/17-06/24）	185（07/03-07/10） 193（07/11-07/18） 201（07/19-07/26）	217（08/04-08/11） 225（08/12-08/19） 233（08/20-08/27）	249（09/05-09/12） 257（09/13-09/20） 265（09/21-09/28）
GPP 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

表 A-2 2011 年 10 月至 2012 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 PSN 套色影像表

年度	2011			2012		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/30-10/07） 281（10/08-10/15） 289（10/16-10/23） 297（10/24-10/31）	305（11/01-11/08） 313（11/09-11/16） 321（11/17-11/24） 329（11/25-12/02）	337（12/03-12/10） 345（12/11-12/18） 353（12/19-12/26） 361（12/27-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/05-03/12） 073（03/13-03/20） 081（03/21-03/28）
PSN 套色影像						
圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

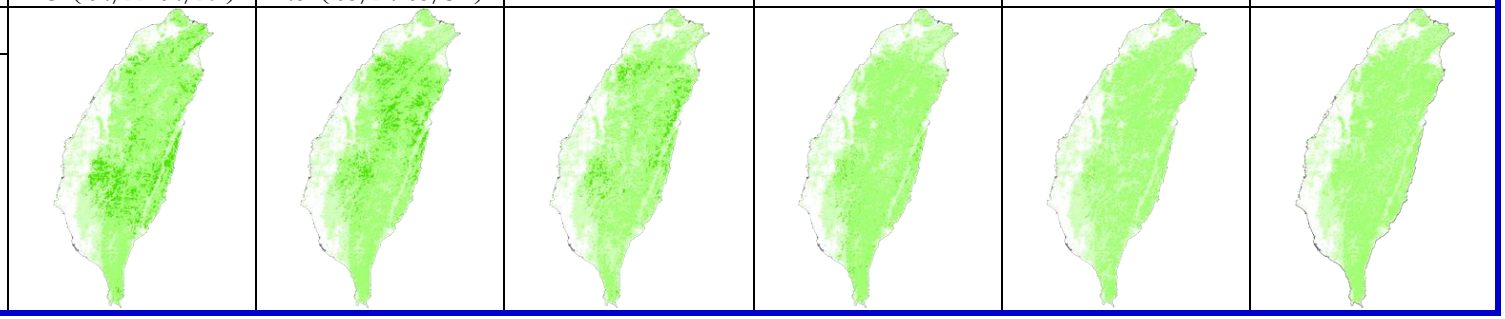
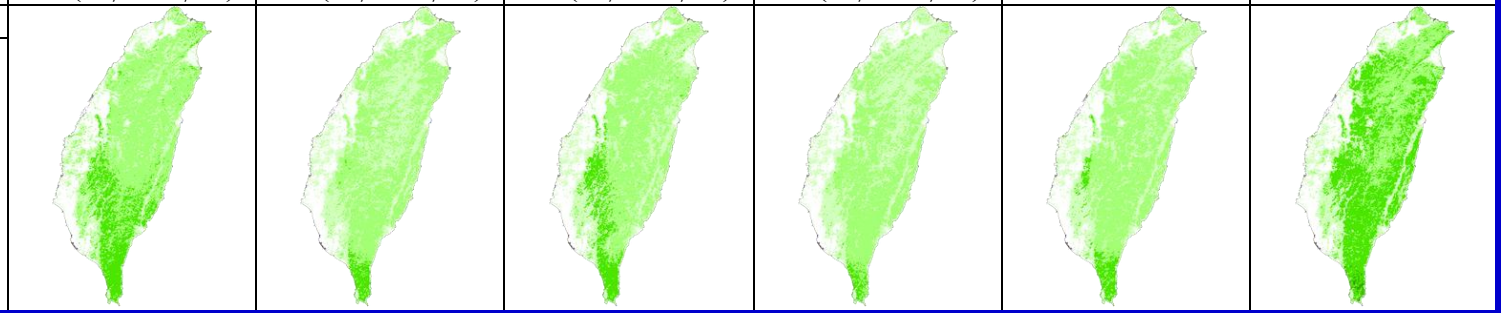
年度	2012					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/29-04/05） 097（04/06-04/13） 105（04/14-04/21） 113（04/22-04/29）	121（04/30-05/07） 129（05/08-05/15） 137（05/16-05/23） 145（05/24-05/31）	153（06/01-06/08） 161（06/09-06/16） 169（06/17-06/24）	185（07/03-07/10） 193（07/11-07/18） 201（07/19-07/26）	217（08/04-08/11） 225（08/12-08/19） 233（08/20-08/27）	249（09/05-09/12） 257（09/13-09/20） 265（09/21-09/28）
PSN 套色影像						
圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

表 A-3 2000 年 10 月至 2001 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 GPP 套色影像表

年度	2000			2001		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/30-10/07） 281（10/08-10/15） 289（10/16-10/23） 297（10/24-10/31）	305（11/01-11/08） 313（11/09-11/16） 321（11/17-11/24） 329（11/25-12/02）	337（12/03-12/10） 345（12/11-12/18） 353（12/19-12/26） 361（12/27-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/05-03/12） 073（03/13-03/20） 081（03/21-03/28）
GPP 套色影像						
圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

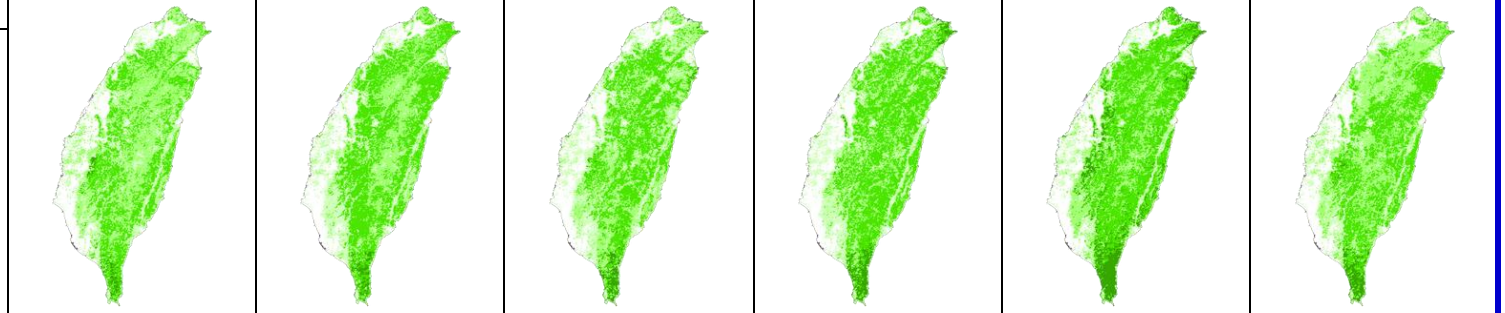
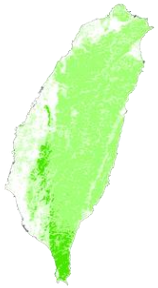
年度	2001					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/29-04/05） 097（04/06-04/13） 105（04/14-04/21） 113（04/22-04/29）	121（04/30-05/07） 129（05/08-05/15） 137（05/16-05/23） 145（05/24-05/31）	153（06/01-06/08） 161（06/09-06/16） 169（06/17-06/24）	185（07/03-07/10） 193（07/11-07/18） 201（07/19-07/26）	217（08/04-08/11） 225（08/12-08/19） 233（08/20-08/27）	249（09/05-09/12） 257（09/13-09/20） 265（09/21-09/28）
GPP 套色影像						
圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

表 A-4 2001 年 10 月至 2002 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 GPP 套色影像表

年度	2001			2002		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/30-10/07） 281（10/08-10/15） 289（10/16-10/23） 297（10/24-10/31）	305（11/01-11/08） 313（11/09-11/16） 321（11/17-11/24） 329（11/25-12/02）	337（12/03-12/10） 345（12/11-12/18） 353（12/19-12/26） 361（12/27-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/05-03/12） 073（03/13-03/20） 081（03/21-03/28）
GPP 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

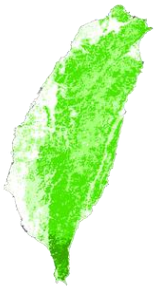
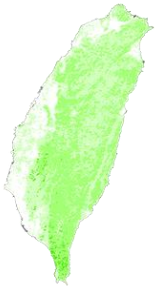
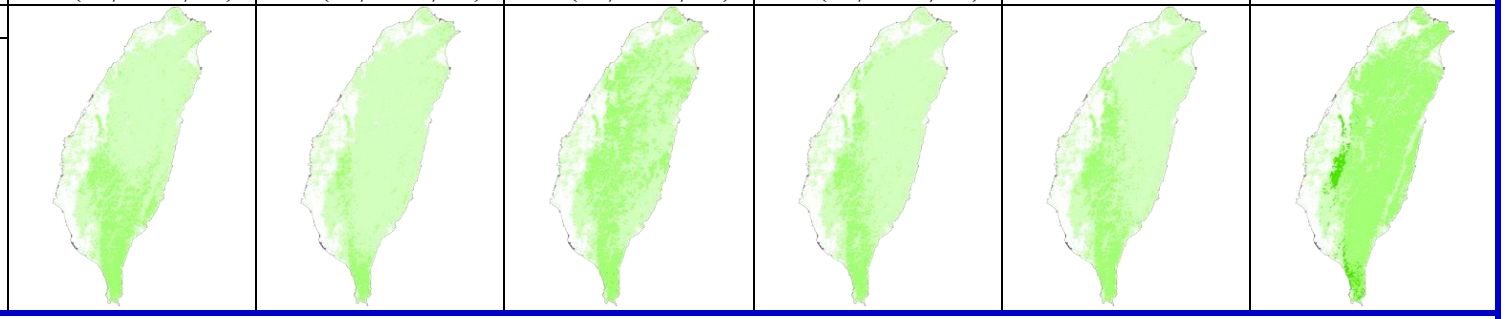
年度	2002					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/29-04/05） 097（04/06-04/13） 105（04/14-04/21） 113（04/22-04/29）	121（04/30-05/07） 129（05/08-05/15） 137（05/16-05/23） 145（05/24-05/31）	153（06/01-06/08） 161（06/09-06/16） 169（06/17-06/24）	185（07/03-07/10） 193（07/11-07/18） 201（07/19-07/26）	217（08/04-08/11） 225（08/12-08/19） 233（08/20-08/27）	249（09/05-09/12） 257（09/13-09/20） 265（09/21-09/28）
GPP 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

表 A-5 2002 年 10 月至 2003 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 GPP 套色影像表

年度	2002			2003		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/29-10/06） 281（10/07-10/14） 289（10/15-10/22） 297（10/23-10/30）	305（10/31-11/07） 313（11/08-11/15） 321（11/16-11/23） 329（11/24-12/01）	337（12/02-12/09） 345（12/10-12/17） 353（12/18-12/25） 361（12/26-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/06-03/13） 073（03/14-03/21） 081（03/22-03/29）
GPP 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

年度	2003					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/30-04/06） 097（04/07-04/14） 105（04/15-04/22） 113（04/23-04/30）	121（05/01-05/08） 129（05/09-05/16） 137（05/17-05/24） 145（05/25-06/01）	153（06/02-06/09） 161（06/10-06/17） 169（06/18-06/25）	185（07/04-07/11） 193（07/12-07/19） 201（07/20-07/27）	217（08/05-08/12） 225（08/13-08/20） 233（08/21-08/28）	249（09/06-09/13） 257（09/14-09/21） 265（09/22-09/29）
GPP 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

表 A-6 2000 年 10 月至 2001 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 PSN 套色影像表

年度	2000			2001		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/30-10/07） 281（10/08-10/15） 289（10/16-10/23） 297（10/24-10/31）	305（11/01-11/08） 313（11/09-11/16） 321（11/17-11/24） 329（11/25-12/02）	337（12/03-12/10） 345（12/11-12/18） 353（12/19-12/26） 361（12/27-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/05-03/12） 073（03/13-03/20） 081（03/21-03/28）
PSN 套色影像						
圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

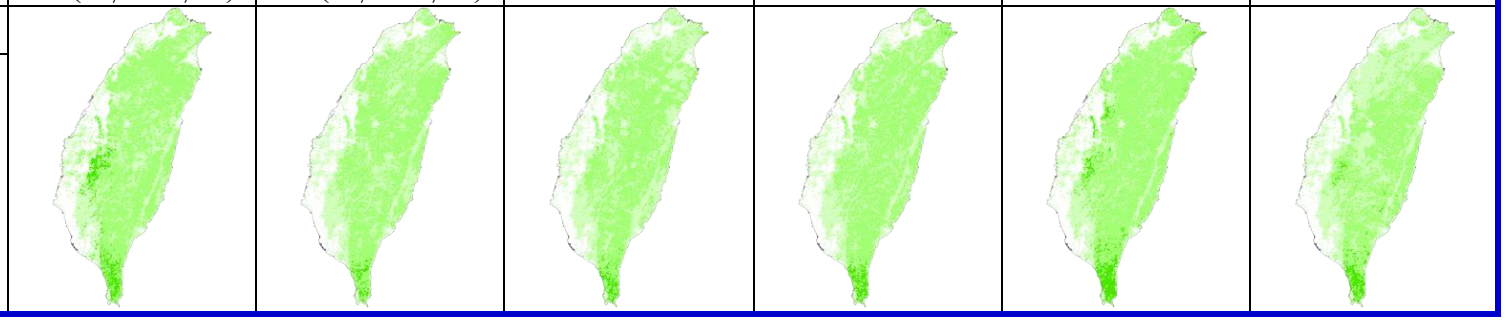
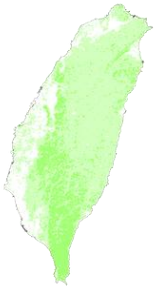
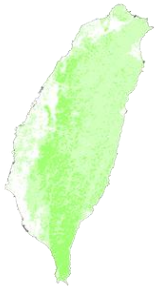
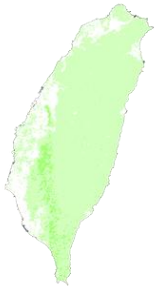
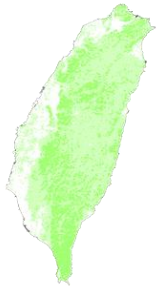
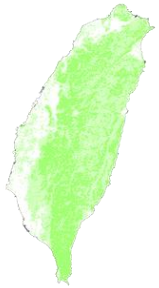
年度	2001					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/29-04/05） 097（04/06-04/13） 105（04/14-04/21） 113（04/22-04/29）	121（04/30-05/07） 129（05/08-05/15） 137（05/16-05/23） 145（05/24-05/31）	153（06/01-06/08） 161（06/09-06/16） 169（06/17-06/24）	185（07/03-07/10） 193（07/11-07/18） 201（07/19-07/26）	217（08/04-08/11） 225（08/12-08/19） 233（08/20-08/27）	249（09/05-09/12） 257（09/13-09/20） 265（09/21-09/28）
PSN 套色影像						
圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

表 A-7 2001 年 10 月至 2002 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 PSN 套色影像表

年度	2001			2002		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/30-10/07） 281（10/08-10/15） 289（10/16-10/23） 297（10/24-10/31）	305（11/01-11/08） 313（11/09-11/16） 321（11/17-11/24） 329（11/25-12/02）	337（12/03-12/10） 345（12/11-12/18） 353（12/19-12/26） 361（12/27-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/05-03/12） 073（03/13-03/20） 081（03/21-03/28）
PSN 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

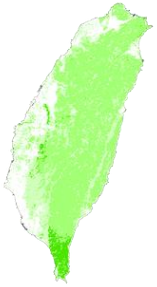
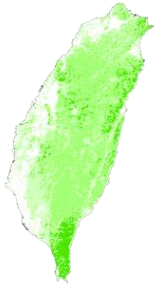
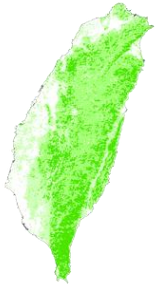
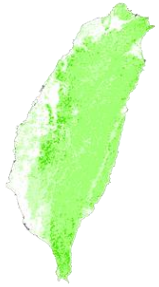
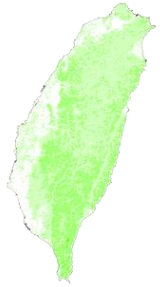
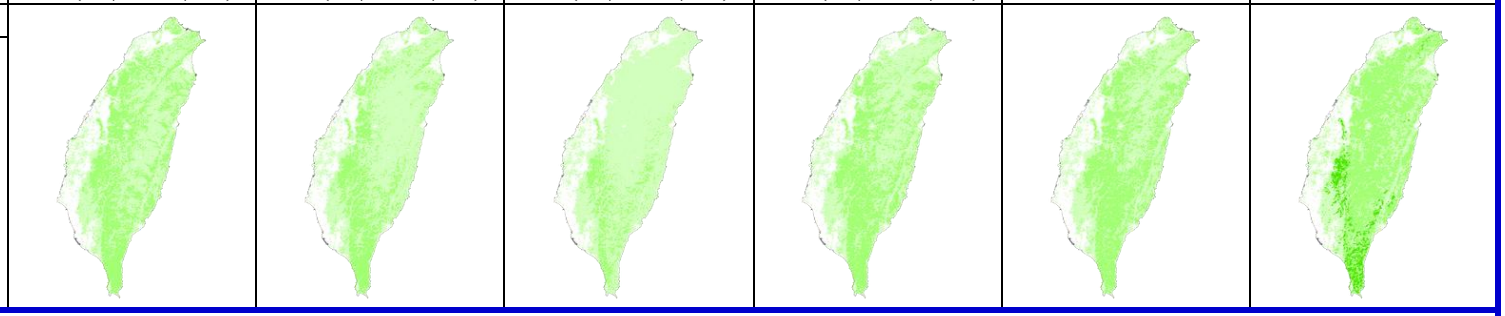
年度	2002					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/29-04/05） 097（04/06-04/13） 105（04/14-04/21） 113（04/22-04/29）	121（04/30-05/07） 129（05/08-05/15） 137（05/16-05/23） 145（05/24-05/31）	153（06/01-06/08） 161（06/09-06/16） 169（06/17-06/24）	185（07/03-07/10） 193（07/11-07/18） 201（07/19-07/26）	217（08/04-08/11） 225（08/12-08/19） 233（08/20-08/27）	249（09/05-09/12） 257（09/13-09/20） 265（09/21-09/28）
PSN 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

表 A-8 2002 年 10 月至 2003 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 PSN 套色影像表

年度	2002			2003		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/29-10/06） 281（10/07-10/14） 289（10/15-10/22） 297（10/23-10/30）	305（10/31-11/07） 313（11/08-11/15） 321（11/16-11/23） 329（11/24-12/01）	337（12/02-12/09） 345（12/10-12/17） 353（12/18-12/25） 361（12/26-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/06-03/13） 073（03/14-03/21） 081（03/22-03/29）
PSN 套色影像						
圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

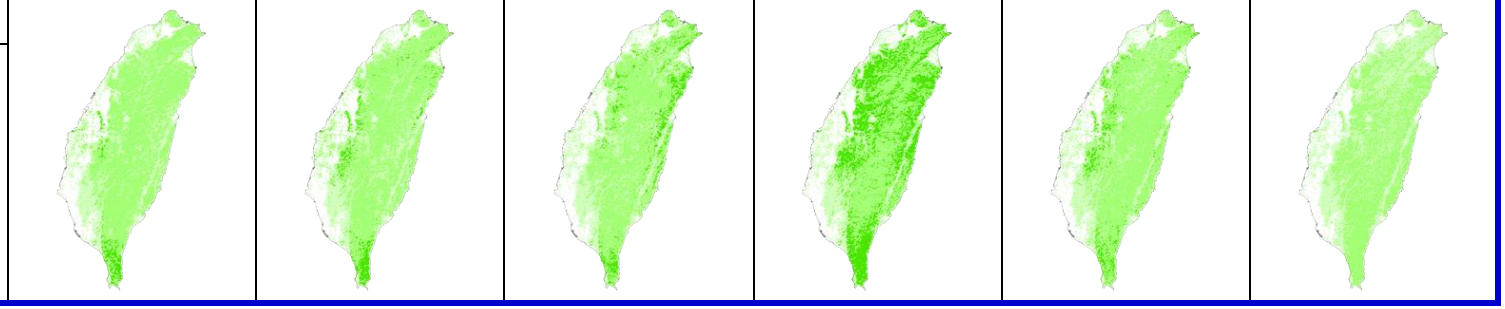
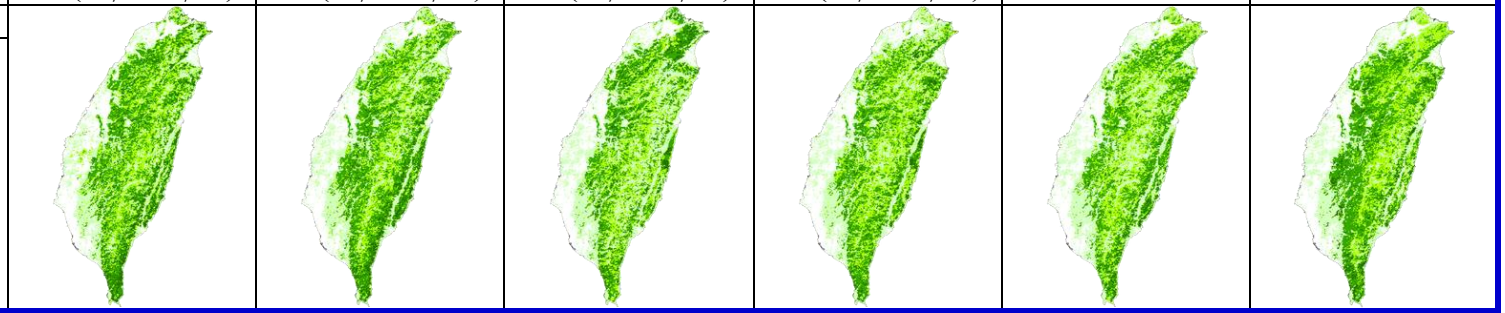
年度	2003					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/30-04/06） 097（04/07-04/14） 105（04/15-04/22） 113（04/23-04/30）	121（05/01-05/08） 129（05/09-05/16） 137（05/17-05/24） 145（05/25-06/01）	153（06/02-06/09） 161（06/10-06/17） 169（06/18-06/25）	185（07/04-07/11） 193（07/12-07/19） 201（07/20-07/27）	217（08/05-08/12） 225（08/13-08/20） 233（08/21-08/28）	249（09/06-09/13） 257（09/14-09/21） 265（09/22-09/29）
PSN 套色影像						
圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

表 A-9 2011 年 10 月至 2012 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD15 衛星產品各月份 LAI 套色影像表

年度	2011			2012		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/30-10/07） 281（10/08-10/15） 289（10/16-10/23） 297（10/24-10/31）	305（11/01-11/08） 313（11/09-11/16） 321（11/17-11/24） 329（11/25-12/02）	337（12/03-12/10） 345（12/11-12/18） 353（12/19-12/26） 361（12/27-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/05-03/12） 073（03/13-03/20） 081（03/21-03/28）
LAI 套色影像						
圖例 0.0 - 1.6 1.6 - 3.2 3.2 - 4.8 4.8 - 6.4 6.4 - 8.0						

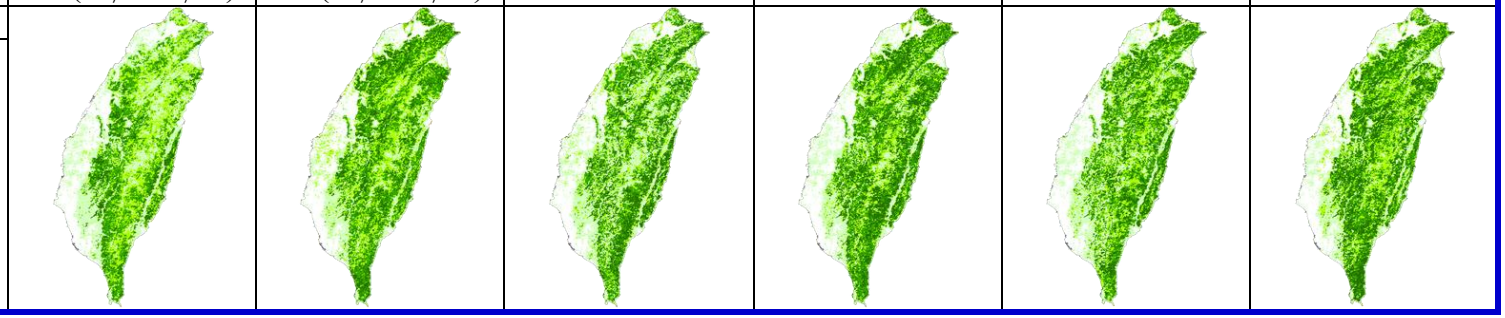
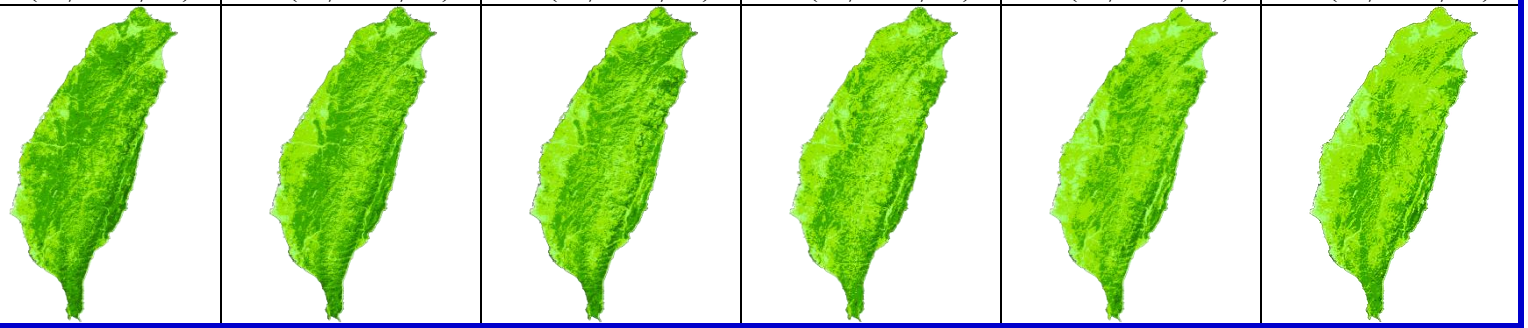
年度	2012					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/29-04/05） 097（04/06-04/13） 105（04/14-04/21） 113（04/22-04/29）	121（04/30-05/07） 129（05/08-05/15） 137（05/16-05/23） 145（05/24-05/31）	153（06/01-06/08） 161（06/09-06/16） 169（06/17-06/24）	185（07/03-07/10） 193（07/11-07/18） 201（07/19-07/26）	217（08/04-08/11） 225（08/12-08/19） 233（08/20-08/27）	249（09/05-09/12） 257（09/13-09/20） 265（09/21-09/28）
LAI 套色影像						
圖例 0.0 - 1.6 1.6 - 3.2 3.2 - 4.8 4.8 - 6.4 6.4 - 8.0						

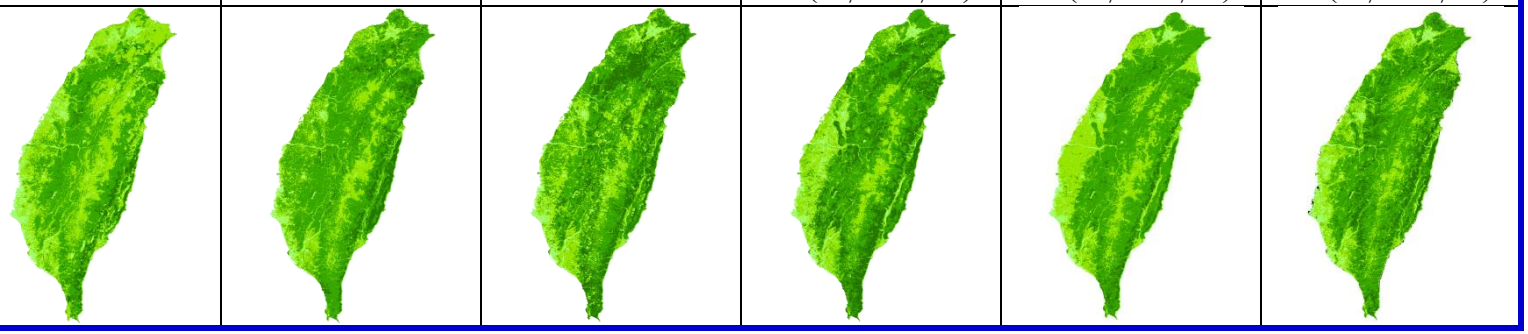
表 A-10 2011 年 10 月至 2012 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD13 衛星產品各月份 NDVI 套色影像表

年度	2011			2012		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/30-10/15） 289（10/16-10/31）	305（11/01-11/16） 321（11/17-12/02）	337（12/03-12/18） 353（12/19-12/31）	001（01/01-01/16） 017（01/17-02/01）	033（02/02/02/17） 049（02/18-03/05）	065（03/06-03/21） 081（03/22-04/06）
Max NDVI 套色影像						
圖例 -1.00 - 0.00 0.00 - 0.08 0.08 - 0.18 0.18 - 0.28 0.28 - 0.35 0.35 - 0.45 0.45 - 1.00						

年度	2012					
期別	4	5	6	7	8	9
	097 （04/07-04/22）	129 （05/09-05/24）	161 （06/10-06/25）	177（06/26-07/11） 193（07/12-07/27）	209（07/28-08/12） 225（08/13-08/28）	241（08/29-09/13） 257（09/14-09/29）
Max NDVI 套色影像						
圖例 -1.00 - 0.00 0.00 - 0.08 0.08 - 0.18 0.18 - 0.28 0.28 - 0.35 0.35 - 0.45 0.45 - 1.00						

表 A-11 2011 年 10 月至 2012 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD13 衛星產品各月份 EVI 套色影像表

年度	2011			2012		
月份	10	11	12	1	2	3
期別	273（09/30-10/15） 289（10/16-10/31）	305（11/01-11/16） 321（11/17-12/02）	273（09/30-10/15） 289（10/16-10/31）	305（11/01-11/16） 321（11/17-12/02）	273（09/30-10/15） 289（10/16-10/31）	305（11/01-11/16） 321（11/17-12/02）
EVI 套色影像						

年度	2012					
期別	4	5	6	7	8	9
	097 （04/07-04/22）	129 （05/09-05/24）	161 （06/10-06/25）	177（06/26-07/11） 193（07/12-07/27）	209（07/28-08/12） 225（08/13-08/28）	241（08/29-09/13） 257（09/14-09/29）
EVI 套色影像						

附錄 B、分析理論

B.1 遙測碳吸存研究方法

B.1.1 研究理論基礎-以植生吸收輻射推估植生生產力

植物淨初級生產力(NPP)及光合作用有效吸收輻射(APAR)之關係由 Monteith(1972, 1977)所提出，其光能利用效率理論說明受到充分養份及水分灌溉下的生長作物，淨初級生產力(NPP)與光合作用有效吸收輻射(APAR)呈現線性關係，其中光合作用有效吸收輻射受到日照時數、潛勢入射輻射以及植物葉面幾合呈現方式(geometry of displayed leaf material)所影響，而地理空間區位、季節及雲層覆蓋等因素則影響潛勢入射輻射量；此光能利用效率提供另一途徑估算植生生產力，考量空間區位上有效日照輻射及植物本身輻射吸收的限制，排除探討碳循環及養分平衡等複雜的植生生長機制(Heinsch *et al.*, 2003)。

Monteith(1972, 1977)光能利用效率理論主要針對在充分養份及水分灌溉下的生長作物進行研究，實際應用於生態系統初級生產力的估算時，需考量植物種類及所處環境的約制條件，且 Monteith 研究著重於一年生草本作物，其維持機能所需的自營性呼吸較低，相對地，多年生木本植物由於木質邊材(sapwood)比例較大，其維持性呼吸成本(maintenance respiration cost)較高，導致淨初級生產力(NPP)較低，由於植物在不同年齡及樹種的情況條件下，其維持機能所需的自營性呼吸差異極大，進而影響光合作用有效吸收輻射(APAR)與淨初級生產力(NPP)的相關性，研究顯示若排除植物維持性呼吸的因素，光合作用有效吸收輻射(APAR)與總初級生產力(GPP)呈現出較佳的相關性，亦即光能利用效率更能反映 APAR 與 GPP 間的關係(Running *et al.*, 1999)。

光能利用效率理論另一應用考量來自於非極適天候情況，並以溫度及溼度為植生生長的主要制約因素，當氣溫低於冰點溫度或蒸氣壓力差(vapor pressure deficit, VPD)過大，將導致植物氣孔關閉，限制光合作用的進行，進而造成光能利用效率的降低，故 Monteith 理論在實際應用於非極適氣候情況時，尚需考量約制因素所造成的影響。

表 B-1 植生碳吸存估算相關名詞表

中文全名/英文全名	英文簡稱	單位	說明
總初級生產力 Gross Primary Productivity	GPP	t C/ha/month g C/m²/day	在生態系統中初級生產者的總碳吸存量
淨光合作用 Net Photosynthesis	PSNnet	t C/ha/month g C/m²/day	植生為維持生理機能，亦進行呼吸作用，進而造成碳的排放。淨初級生產力為總初級生產量與植生細根及葉面維持性呼吸的差值；以每日或每 8 日表示
淨初級生產力 Net Primary Productivity	NPP	t C/ha/year Kg C/m²/year	總初級生產量扣除葉面及細根維持性呼吸、成長性呼吸、以及 live wood 維持性呼吸，為植生碳吸存；以年表示(GPP-Ra)
淨生態系統生產力 Net Ecosystem Productivity	NEP	g C/m²/day	生態系統中總初級生產量扣除自營性及異營性呼吸，為生態系統碳吸存（GPP-Ra-Rh）
淨生態系統二氧化碳交換 Net Ecosystem Exchange	NEE	g CO_2/m²/sec	生態系統中的二氧化碳淨流通量
光合作用有效輻射 Incident Photosynthetically Active Radiation	IPAR	MJ/m²/day	太陽光電磁波長約介於 400-700nm 的光譜波段，為植物進行光合作用所仰賴的太陽光能
光合作用有效輻射分量 Fraction of Incident PAR Absorbed by the Surface	FPAR	ratio	光合作用有效輻射中實際為植被層吸收的比率
光合作用有效吸收輻射 Absorbed Incident PAR	APAR	MJ/m²/day	植被層實際吸收的光合作用有效輻射量，為前兩者乘積

			（IPAR×FPAR）
光能利用效率 Radiation Use Efficiency	ε	Kg C/MJ	綠色植生在單位輻射能量下所產生的碳吸存量

B.1.2 MODIS 總初級生產力演算式

MODIS 總初級生產力推估(MOD17 GPP)主要參酌 Monteith(1972, 1977)研究，藉由有效吸收輻射(APAR)及光能利用效率(ε)推估總初級生產量(GPP)(式 B.1) (圖 B-1)，其中光能利用效率考量溫度及蒸氣壓力差兩項約制因素(式 B.2)；光合作用有效吸收輻射(APAR)則藉由入射有效輻射(IPAR)及有效輻射分量(FPAR)計算而得(式 B.3)(Heinsch *et al.*, 2003)：

$$GPP = \varepsilon * APAR \quad \text{……(式 B.1)}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{max} * TMIN_{scalar} * VPD_{scalar} \quad \text{……(式 B.2)}$$

$$APAR = IPAR * FPAR \quad \text{……(式 B.3)}$$

ε_{max}：最大光能利用效率(kgC/MJ)

VPD_{scalar}：蒸氣壓力差約制乘數

$TMIN_{scalar}$：最低溫約制乘數

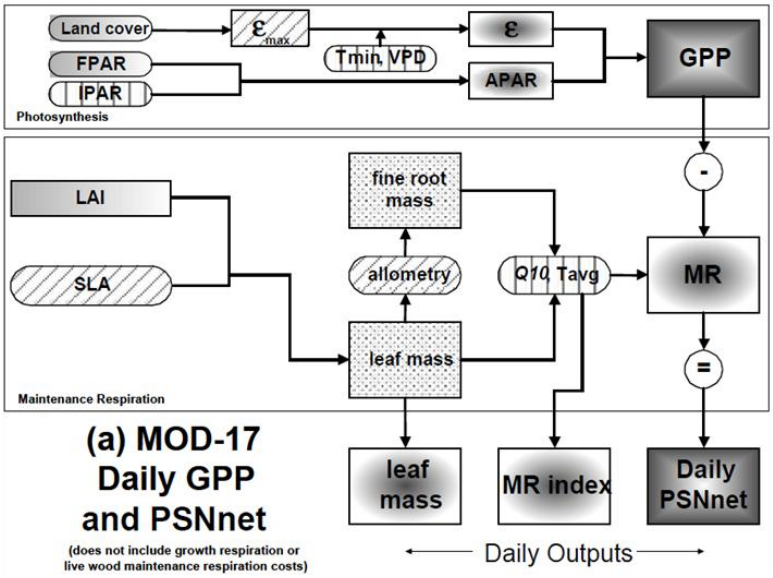


圖 B-1 MOD17 每日總初級生產力及淨光合作用資料處理流程 (資料來源: MOD17 ATBD)

在光能利用效率的推估上，MOD17 研究團隊採用 BIOME-BGC 模型，針對全球主要植生型態進行總初級生產量(GPP)及光合作用有效吸收輻射(APAR)的模擬估算，計算出各生態植群最大光能利用效率(ε_{max})，由於溫度及蒸氣壓力差對植物光合作用產生約制效應，降低光能利用效率，MOD17 演算式採用一簡單線性關係，表示日低溫及蒸氣壓力差對最大光能利用效率產生的衰減作用(圖 B-2)。圖中 $TMIN_{max}$(℃)、$TMIN_{min}$(℃)、VPD_{max}(Pa)、VPD_{min}(Pa)分別為當 $\varepsilon=\varepsilon_{max}$ 之日低溫(在極適蒸氣壓情況下)、當 $\varepsilon=0$ 之日低溫(在任何蒸氣壓情況下)、當 $\varepsilon=\varepsilon_{max}$ 之日間平均蒸氣壓力差(在極適日低溫情況下)以及當 $\varepsilon=0$ 之日之平均蒸氣壓力差(在任何日低溫情況下)。藉由廣泛先期研究，全球主要植生型態的 ε、$TMIN_{min}$、$TMIN_{max}$、VPD_{min}、VPD_{max} 以表列形式呈現於生態群系參數對照表(Biome Parameter Look-Up Table, BPLUT) (表 B-2)；配合此 BPLUT，以及 MOD12 產品的地貌分類資訊、資料融合中心(DAO)提供的每日最低溫及蒸氣壓差等氣象資料，可據以推估光能利用效率。

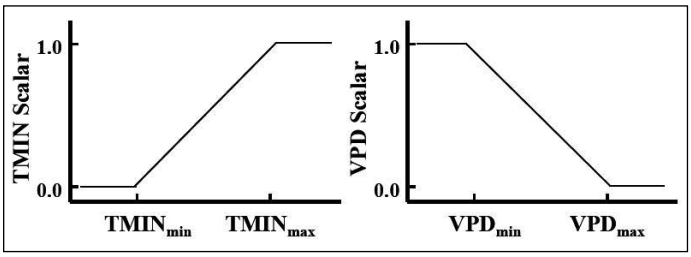


圖 B-2 低溫及蒸氣壓力差對最大光能利用效率產生之線性衰減 (資料來源: MOD17 ATBD)

表 B-2 生態群系參數對照表 (資料來源: MOD17 ATBD)

參數 Parameter	生態群系分類					
	常綠針葉林（ENF）	常綠闊葉林（EBF）	落葉針葉林（DNF）	落葉闊葉林（DBF）	混合林（MF）	草生地（WL）
最大光能利用效率 ε_{max}	0.001008	0.001159	0.001103	0.001044	0.001116	0.000800
每日						
當 $\varepsilon=\varepsilon_{max}$ 之日低溫	8.31	9.09	10.44	7.94	8.50	11.39

$TMIN_{max}$（℃）						
當 ε=0 之日低溫 $TMIN_{min}$（℃）	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00
當 $\varepsilon=\varepsilon_{max}$ 之日間平均蒸氣壓力差 VPD_{max}（Pa）	2,500.00	3,900.00	3,100.00	2,500.00	2,500.00	3,100.00
當 ε=0 之日平均蒸氣壓力差 VPD_{min}（Pa）	650.00	1,100.00	650.00	650.00	650.00	930.00
比葉面積 SLA（projected leaf area m^2/kg leaf C）	21.10	23.30	31.00	26.20	21.50	33.80

光合作用有效吸收輻射(APAR)需由入射有效輻射(IPAR)及有效輻射分量(FPAR)進行計算，其中入射有效輻射(IPAR)由美國太空總署(NASA)資料同化中心(Data Assimilation Office, DAO)提供 1°*1.25°解析度的入射短波輻射量資料(incident shortwave radiation)，進行光合作用有效輻射估算（式 B.4），光合作用有效輻射分量(FPAR)則為 MOD15 產品，主要藉由地表反射率(MOD09 Reflectance)與地貌覆蓋(MOD12 Land Cover)進行推估演算，其流程圖如圖 B-3 所示。

$$IPAR = 0.45 * SW_{rad} \quad \text{……..(式 B.4)}$$

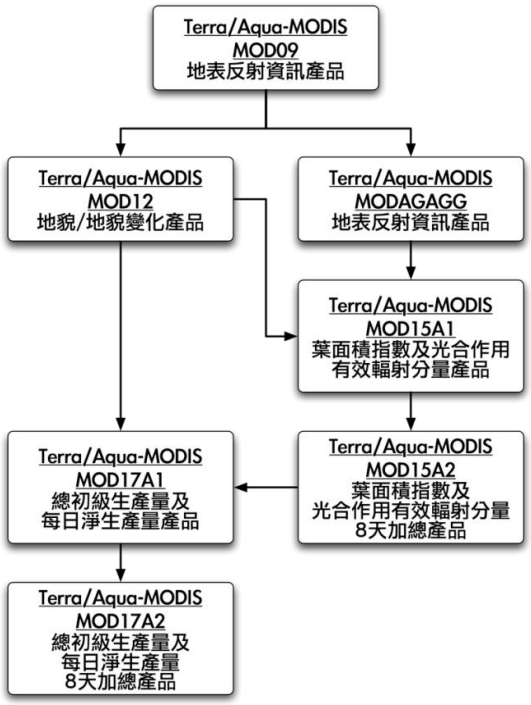


圖 B-3 MODIS 總初級生產力(GPP)及淨光合作用(PSNnet)產品鏈結(資料來源: MOD17 ATBD)

B.1.3 MODIS 淨光合作用演算式

植物藉由光合作用將大氣中的碳吸存，轉化為本身生物量，但為維持生理機能，仍需進行呼吸作用，進而將碳釋放出來；總初級生產力與維持性呼吸所產生碳排放的差值，即為淨光合作用，在 MODIS 演算式針對每日 GPP 及 PSNnet 的演算中，此碳排放主要包含植物葉面及細根(fine root)的維持性呼吸(maintenance respiration)(式 B.5)，藉由各別生物量及維持性呼吸比率演算而得，而生物量則以植物葉面積(leaf area index)(MOD15 產品)進行推估(式 B.7、B.9)，而維持性呼吸比率則藉由 DAO 提供的氣溫資料進行律定(式 B.6、B.8)；各生態群系參數(SLA、$Leaf_{mr_base}$、$Q10_{MR}$、$ratio_{Froot_leaf}$)則為廣泛先期研究的成果，詳列於 BPLUT 供對照演算。

$$PSNnet = GPP\text{-}Leaf_{MR}\text{-}Froot_{MR} \quad \text{.....(式 B.5)}$$

$$Leaf_{MR} = Leaf_{Mass} * Leaf_{MR_base} * Q10_{MR}^{\left[T_{avg}\text{-}20.0 \ /10.0\right]} \quad \text{.....(式 B.6)}$$

$$Leaf_{Mass} = LAI \ / \ SLA \quad \text{.....(式 B.7)}$$

$$Froot_{MR} = Froot_{Mass} * Froot_{MR_base} * Q10_{MR}^{\left[T_{avg}\text{-}20.0 \ /10.0\right]} \quad \text{.....(式 B.8)}$$

$$Froot_{Mass} = Leaf_{Mass} * ratio_{Froot_Leaf}$$ …….....…..(式 B.9)

PSNnet:淨光合作用(kg C day^{-1}),

$Leaf_{MR}$, $Froot_{MR}$: 葉面及細根維持性呼吸 (kg C day^{-1})

$Leaf_{Mass}$, $Froot_{Mass}$: 葉面及細根質量(kg C)

$Leaf_{MR_base}$, $Froot_{MR_base}$: 於 20°C 情況下每單位葉面及細根碳量所需的維持性呼吸(kg C kg C^{-1} day^{-1})

$Q10_{MR}$: 以植生溫度為控制項的維持性呼吸函數(指數型式)

T_{avg}: 日均溫(°C)

LAI: 葉面積指數(m^2 leaf m^{-2} ground area)

SLA: 比葉面績(m^2 kg C^{-1})

$ratio_{Froot_Leaf}$: 細根碳量與葉面碳量的比值

B.1.4 MODIS 淨初級生產力演算式

在 MOD17 初級生產力的演算中，淨光合作用以日尺度演算，扣除總初級生產力中葉面及細根為維持生理機能所產生的維持性呼吸，但由於未考量植株增長及全株生立木所產生的碳排放，可視為日尺度的近似值；如將時間尺度拉長，以年為尺度演算，則需綜何考量觀測年度內生立木及植株增長所產生的呼吸作用，在 MOD17 演算式中(圖 B-4)，此生產淨值以淨初級生產力(NPP)表示(式 B.10)，可視為自營性生物光合作用及呼吸作用後的淨碳吸存量或淨生長量 :

$$NPP = \sum_{i=1}^{365} PSNnet_i\text{-}Livewood_{MR}\text{-}Leaf_{GR}\text{-}Froot_{GR}\text{-}Livewood_{GR}\text{-}Deadwood_{GR}$$

.....(式 B.10)

NPP :淨初級生產力(kg C $year^{-1}$)

$Livewood_{MR}$:生立木維持性呼吸 (kg C $year^{-1}$)

$Leaf_{GR}$, $Froot_{GR}$, $Livewood_{GR}$, $Deadwood_{GR}$: 葉面、細根、生立木、枯立倒木成長性呼吸 (kg C $year^{-1}$)

生立木呼吸作用所產生的碳排放與其質量及維持性呼吸比例有關，生物量則藉由觀測年度內的最大葉面質量，及生立木與葉面質量的比例推求(式 B.11-B.12) :

$$Livewood_{MR} = Livewood_{Mass} * Livewood_{MR_base} * \sum_{i=1}^{365} Index_{MRi} \quad \text{.....(式 B.11)}$$

$$Livewood_{Mass} = Ann_Leaf_{Mass} * ratio_{Livewood_Leaf} \quad \text{.....(式 B.12)}$$

$Livewood_{Mass}$: 生立木質量(kg C)

$Livewood_{MR_base}$: 於 20°C 情況下每單位生立木碳量產生的維持性呼吸(kg C kg C^{-1} day^{-1})

Ann_Leaf_{Mass}:年度觀測周期內最大葉面質量(kg C)

$ratio_{Livewood_Leaf}$: 生立木碳量與年度最大葉面積碳量的比值

成長性呼吸包含植物葉面、細根、生立木、枯立倒木等部分，如同生物量的推求，成長性呼吸的推演以葉面呼吸作為參考，再探討相互間的比例關係；而葉面的成長呼吸則與其所佔生物量、成長呼吸比例、及葉面的枯死率有關(式 B.13-B.16)。

$$Leaf_{GR} = Ann_Leaf_{Mass} * Ann_turnover * Leaf_{GR_base} \quad \text{.....(式 B.13)}$$

$$Froot_{GR} = Leaf_{GR} * ratio_{Froot_Leaf_GR} \quad \text{.....(式 B.14)}$$

$$Livewood_{GR} = Leaf_{GR} * ratio_{Livewood_Leaf_GR} \quad \text{.....(式 B.15)}$$

$$Deadwood_{GR} = Leaf_{GR} * ratio_{Deadwood_Leaf_GR} \quad \text{.....(式 B.16)}$$

Ann_turnover:年度葉面的枯死率

$Leaf_{GR_base}$:每單位葉面碳量增長所需的呼吸成本(kg C kg C^{-1})

$ratio_{Froot_Leaf_GR}$, $ratio_{Livewood_Leaf_GR}$, $ratio_{Deadwood_Leaf_GR}$: 細根、生立木、枯立倒木與葉面成長性呼吸的比例

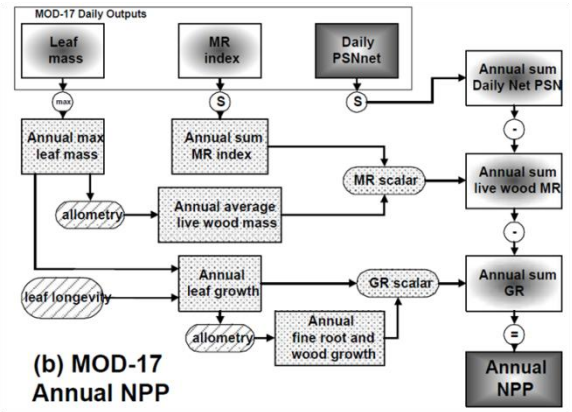


圖 B-4 MOD17 年度淨初級生產力資料處理流程 (資料來源: MOD17 ATBD)

B.2 渦流協變性系統觀測原理及森林碳收支

生態圈與大氣圈間的能量及物質交換主要發生在交會的近地層，受到地表摩擦、熱傳導對流、蒸發散作用以及地形效應的影響，造成近地層溫濕度、風速、與物質濃度具有較大的垂直梯度；在近地層的大氣運動中，大致可分為平均風及紊流運動，平均風在水平方向的物質及能量傳輸扮演支配作用，紊流運動則關係著垂直方向的傳輸運動，紊流的產生則主要由於當空氣通過平坦表面，受地面摩擦力及空氣黏滯力的影響，不同層空氣分子無法保持平行移動(Laminar flow)，逐漸發展成不規則旋轉的渦流(eddy)，呈現隨機與混亂的分子運動與紊流(turbulence)，並造成垂直方向上的能量及物質傳送(夏禹九，2008)；為描述此混亂的紊流運動，雷諾分解法(Reynolds decomposition)將大氣中某一瞬時及位置的物理量拆解為平均項與擾動項，透過此定量的分析方式，描述平均項為平均風運動，象徵較大時空尺度的天氣現象，而擾動項則由紊流運動所貢獻:

$$x = \bar{x} + x' \ , \ \overline{x'} = 0 \qquad \text{.....(式 B.17)}$$

通量為某物質在單位時間及單位區域面積的變化量，描述近地層某物質的垂直通量，可藉由其濃度與垂直風速的乘積來表示，此兩物理量皆可透過雷諾分解法區分為平均項及擾動項，由於紊流具有隨機與不規則的特性，瞬時通量觀測不具有實質的意義，藉由考慮某單位時間的平均通量，垂直通量可表示為:

$$F = \overline{wc} = \overline{(\bar{w}+w')(\bar{c}+c')} = \overline{(\overline{wc} + \bar{w}c' + w'\bar{c} + w'c')} = \overline{wc} + \overline{w'c'} \qquad \text{....(式 B.18)}$$

式中 w 為垂直風速(m/s)，c 為所觀測物質的濃度，$\overline{wc}$ 可依此解釋為平流通量，意即平均風所造成的通量，而 $\overline{w'c'}$ 則為紊流運動所貢獻的通量，在水平均質的地形表面及一般大氣條件下，當空氣具非壓縮性，平均垂直風速可假定為零，亦即垂直方向的物質或能量傳輸主要透過紊流運動的輸送，故上式可簡化為:

$$F = \overline{wc} + \overline{w'c'} = \overline{w'c'} \qquad \text{.....(式 B.19)}$$

此 $\overline{w'c'}$ 為所求物質濃度與垂直方向風速共同擾動的平均協變量，也是渦流協變性系統觀測理論及命名的基礎依據；依據所觀測的物理量，代換 c 為二氧化碳濃度 ρ_c、

比濕(specific humidity, q)、或位溫(potential temperature,θ)，則二氧化碳通量 F_c、潛熱通量(latent heat flux, F_q)、可感熱通量(sensible heat flux, F_θ)可分別計算如下：

$$F_c = \overline{w'\rho_c'},$$
$$F_q = L_v \overline{\rho}\,\overline{w'q'},$$
$$F_\theta = c_p \overline{\rho}\,\overline{w'\theta'} \qquad \text{……..(式 B.20)}$$

式中 ϱ 為溼空氣密度，C_p 為空氣熱容(J/kg K)，L_v 為蒸發潛熱(J/kg)

渦流協變系統的觀測理論，假定通量的垂直輸送以紊流運動為主，如欲取得小型氣旋垂直風速與觀測物質濃度的瞬時變量，須使用高速反應的感測儀器，此儀器通常架設於高台上，以 10Hz 或 20Hz 的觀測頻率量測三維風速及音波溫度(如超音波風速計)，並同步觀測二氧化碳、水氣、溫度或其他微量氣體隨渦流輸送的變化(如開放式或封閉式的紅外線二氧化碳、水氣分析儀)。

以二氧化碳而言，所關注為一生態系統中的淨生態系統交換(NEE)，除了垂直方向的通量，尚須考量水平方向的貢獻及系統內的暫存效應(莊振義，2010)；透過物質守恆的觀點，若假定生態系統為一可控制的容積，並以儀器架設高度視為此容積的上邊界，則 NEE 可表示為

$$NEE = \overline{w'\rho_c'}(h_r) + \int_0^{h_r} \frac{\partial \overline{\rho_c}}{\partial t} dz + \int_0^{h_r} (\bar{u}(z)\frac{\partial \overline{\rho_c}(z)}{\partial x} + \bar{v}(z)\frac{\partial \overline{\rho_c}(z)}{\partial y})dz + \int_0^{h_r} \bar{\omega}(z)\frac{\partial \overline{\rho_c}(z)}{\partial z} dz$$

I　　II　　III　　IV　….(式 B.21)

式中 h_r 為儀器架設高度，$u(z)$、$v(z)$為風速在 z 高度水平方向的分量，I 為儀器高度所量測的二氧化碳渦流通量，II 為地表至儀器高度間的暫存量，III 為水平方向的平流通量，IV 為垂直方向的平流通量；在理想的環境條件下，當近地層滿足以下假定條件，則 NEE 的演算可進一步簡化：

1.當紊流發展良好，二氧化碳被紊流運動所混合，保持相當小的湧動現象，地表至儀器高度間的二氧化碳濃度無明顯差異時，暫存項 II 可予以忽略。

2.當量測所在地的下墊面植被為水平均質，水平方向的二氧化碳濃度梯度變化相當小，則水平方向的平流通量可視為零。

3.當量測所在地無特殊地形效應或受到地區性環流的垂直風場，在理想大氣條件下，

平均垂直風速應為零，垂直平流通量可忽略不計。

綜合以上的簡化假設，式 B.21 可簡化為

$$NEE = \overline{w' \rho_c'} \quad \text{.....(式 B.22)}$$

由此可知，渦流協變系統觀測立基於理想的大氣及地形條件，假定透過架設於樹冠層上的單點觀測儀器，量測大氣與下墊面生態系間的渦流通量，能代表所觀測林分尺度的二氧化碳通量；但實際儀器架設場址常存在於非理想的地形條件及受到複雜風場的影響，當觀測的時間尺度擴大，也必然遭遇特殊的天候狀況，而無法完全滿足理想的假定條件，以下列舉幾項渦流協變系統的觀測考量：

1.當水平風場較弱，大氣相對穩定，導致無明顯的渦流發展及紊流運動，此時地被植物與土壤呼吸作用所釋放的二氧化碳無法有效傳輸至冠層上的架設儀器高度，而持續的累積於冠層底層，此儲存效應將造成量測通量無法有效代表生態系的二氧化碳交換；在夜間，輻射冷卻造成較微弱的空氣對流，冠層下的溫度分層現象較為明顯，將造成二氧化碳的暫存效應並影響渦流觀測的資料代表性；故針對森林氣象的渦流協變系統觀測，常在冠層下各高度剖面架設觀測儀器，透過垂直輪廓線的二氧化碳觀測，量測各分層在不同時點的通量及儲存量，以有效解釋樹冠層下暫存效應的影響。

2.受到複雜地形或非均質植被、樹冠間隙的影響，促使重力泄流(drainage flow)或二氧化碳在水平方向碳源與碳匯分布的不均勻，此平流通量將造成通量觀測的不確定性，並影響生態系統內的二氧化碳交換；由於平流通量在發生機制及時間變化上具有高複雜性，造成平流通量不論在理論及實測上皆具有困難性，故在傳統通量量測上多藉由假定理想的觀測環境將其忽略，或僅針對特定的平流運動進行探討；在台灣地區，受到平地環境高度利用的影響，森林多位於地勢起伏的山地區域，要尋覓地勢平坦及地覆均質的通量觀測點位具有相當的困難性，若架設點位地勢複雜，則須謹慎考量平流通量的影響。

3.垂直平流通量除了受到複雜地形的影響，即使在平坦均質的環境下，亦可能受到熱對流或地區性環流的影響，造成冠層上下風場的退耦現象(decoupling)，或平均垂直風速不等於零，故簡化架設將造成生態系統交換的錯誤解釋；近年來，垂直平流通量為

複雜地形或非理想大氣條件下通量觀測的重要研究課題，前人研究中，藉由垂直溫度與二氧化碳濃度的剖面量測，或透過水平風速的剖面量測以進行垂直平流項的估測。

森林生態系中存在複雜的碳循環機制，IPCC 建立的土地利用、土地利用改變和林業(Land Use, Land Use Change and Forestry, LULUCF)亦明確界定森林碳匯分布於地上部生物量(Above-ground Biomass)、地下部生物量(Below-ground Biomass)、枯死木(Dead wood)、枯枝落葉(Litter)以及土壤有機土(Soil organic matter)等五大碳庫，前述的渦流協變系統透過近地層微氣象的觀點，將下墊面的生態體系視為一黑箱，排除探討觀測儀器下方複雜的碳循環及碳收支情形，僅探討此黑箱對外及對內的二氧化碳通量變化，故在森林生態學的解釋應用上亦具有侷限性；若從生態機制的角度出發，森林碳匯功能可透過碳收支及物質守恆來進行解釋：

$$NEP = GPP - R_a - R_h + F_{leach} \quad \text{.....(式 B.23)}$$

式中 R_a 為植物呼吸作用所產生的二氧化碳排放，包含維持性呼吸及成長性呼吸，R_h 為土壤微生物及其他異營性生物呼吸作用造成的排放，F_{leach} 則為土壤淋洗作用所產生的淨貢獻項，透過森林中各組成分子碳匯與碳源機制的探討，常為生態系碳循環模型的理論基礎，而此模型的建構，亦提供不同觀測技術(通量觀測、實地量測、生態模型、遙感)一有效的整合及交互比對平台，透過多尺度而有相互獨立的碳儲存量及碳吸存量觀測，分別從生態學與森林氣象的觀點出發，才能對複雜的森林碳匯結構及功能進行概觀性的分析。

B.3 植冠分析儀 LAI-2000 觀測原理

本計畫透過與國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心合作，以 Li-COR 植冠分析儀(canopy analyzer) LAI-2000 進行實地葉面積指數量測，並以此觀測數值與遙測反演值比對，評估 MOD15 LAI 產品在台灣地區的適用性；以下對植冠分析儀量測葉面積指數的理論基礎進行說明。

LAI-2000 主要藉由測定林木冠層的孔隙率(gap fraction)，亦即太陽輻射能透過林木冠層，而不被樹葉截取的空間比例，推求感測區的樹葉密度(foliage density)，其感測鏡頭限定入射光波長介於 320 至 490nm 間，此波段輻射主要為植物光合作用所吸收，且產生較少的散射情形，故在冠層下量測到的太陽輻射，主要由樹冠間隙所透過，此為其 black foliage 的假定。

其量測理論假定當冠層葉面積增加，陽光射入樹冠而未被枝葉截取，並進入到感測鏡頭的機率，將呈現一指數型式的衰減(式 B.24)；故此光線截取與葉面密度、植冠層內的光學路徑長度、以及葉面的傾角有關，亦即當葉面密度愈高、光線所需穿越的路徑愈長、以及葉面與光線射入方向呈現正交，則光線能透射入鏡頭的機率將愈低。

$$T(\theta,\varphi) = \exp[-G(\theta,\varphi)\mu S(\theta,\varphi)] \quad \text{……(式 B.24)}$$

θ：天頂角(°)(圖 B-5)

φ：方位角(°)

T(θ, φ)：光線由(θ, φ)方向射入樹冠，未被枝葉截取的機率

G(θ)：植物枝葉投影到 θ 方向後的面積比例

μ：枝葉密度(m^2/m^3)

S(θ)：光線在植冠層的路徑長度(m)

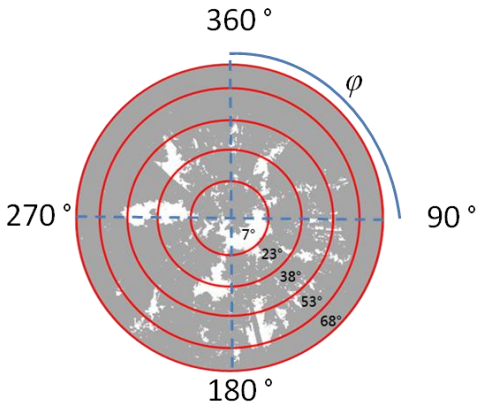


圖 B-5 方位角及天頂角示意圖(由 LAI-2000 感測鏡頭向上直視)

由於儀器假定枝葉在各方位方向呈現隨機分佈，故將上式簡化為

$$T(\theta) = \exp[-G(\theta)\mu S(\theta)] \quad \text{.....(式 B.25)}$$

將式(B.25)整理，並對天頂角方向進行積分，即為綜合所有方向孔隙所表示的葉面密度

$$\mu = -2\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\ln[T(\theta)]}{S(\theta)} \sin\theta d\theta \quad \text{.....(式 B.26)}$$

式(B.26)中葉面密度(平均值)與冠層高度的乘積，即為葉面積指數；冠層內的光學路徑長度則與冠層高度及入射夾角(天頂角)有關，亦即假定樹冠頂部呈現一連續平面，且與地面平行。

$$\text{LAI} = \mu \cdot \text{z} \quad \text{.....(式 B.27)}$$

z：冠層高度 canpoy height (m)

$$z = S(\theta) \cdot \cos\theta \quad \text{.....(式 B.28)}$$

結合式 B.26-式 B.28，即可推得式 B.29

$$\text{LAI} = -2\int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln[T(\theta)] \cos\theta \sin\theta d\theta \quad \text{.....(式 B.29)}$$

理論推演雖可對天頂角方向進行積分，但在實作上，由於工程設計的限制，感測鏡頭需在天頂角方向進行有限的區分，以考量各方向路徑長度及葉面傾角的影響。LAI-2000 所裝載的魚眼鏡頭將感測區分隔為五個環狀(圖 B-6)，透過各環狀冠層孔隙率

的測定，即能推演出葉面積指數。

$$\mathrm{LAI} = -2\sum_{i=1}^{5} \ln[T(\theta_i)] \cos\theta_i \, w(\theta_i) \quad \text{……(式 B.30)}$$

w(θi)：sinθ dθ

其中

Angle θi	Wi = sinθi dθi
7	.034
23	.104
38	.160
53	.218
68	.494

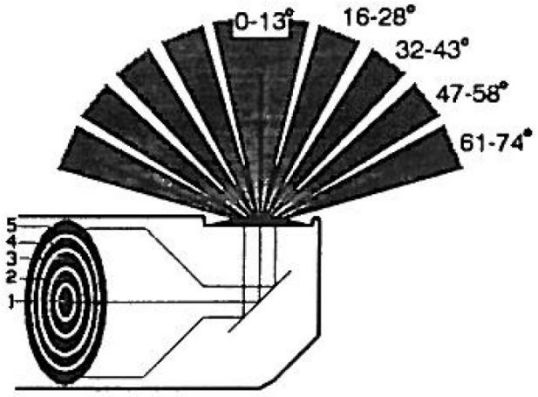


圖 B-6 LAI-2000 魚眼鏡頭天頂角方向觀測示意圖

由於 LAI-2000 主要透過孔隙率的測定，推求出葉面積指數，故不僅可針對林分，亦可對獨立的單株植株，或草生地、農地作物進行測定，但在量測時，需注意感測鏡頭與枝葉間的距離不可過近，以免影響量測數值的代表性，且儀器需在無直射光的光照環境下使用，故較適合在清晨、傍晚，或陰天時進行量測。此外，LAI-2000 為可攜式儀器，且能迅速讀取量測數值，故適宜在各種林型區域進行多筆量測，減緩取樣數過少所產生的偏差。

B.4 常態化差異植生指標及植生異常指標分析流程

常態化差異植生指標(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)由於能反映地表植生覆蓋及植生綠度，可藉以評估森林受到非常態性干擾所造成的植生異常情形，作為森林健康的分析依據，並廣泛應用於衛載遙測在陸域系統的森林生態研究及變遷分析(Eidenshink and Faundeen, 1994；Goward *et al.*, 1994) ，其演算方式由紅光(620-670nm) 及近紅外光 (841-876nm) 波段的地表反射率演算而得(Huete *et al.*, 1999)(式 B.31) :

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{\mathrm{Red}}}{\rho_{NIR} + \rho_{\mathrm{Red}}} \qquad \text{.....(式 B.31)}$$

ϱ_{NIR}=近紅外光反射率

ϱ_{Red}=紅外光反射率

MODIS NDVI 以 16 日為資料週期，每年有 23 期觀測資料，並從 2000 年開始觀測，至今有約 12 年的資料產品，除了提供空間上二維維度的地表資訊，在時間軸上，也包含季節性橫向、以及年度間縱向的連續資料，故在時間維度上可以二維矩陣來表示(圖 B-7)。

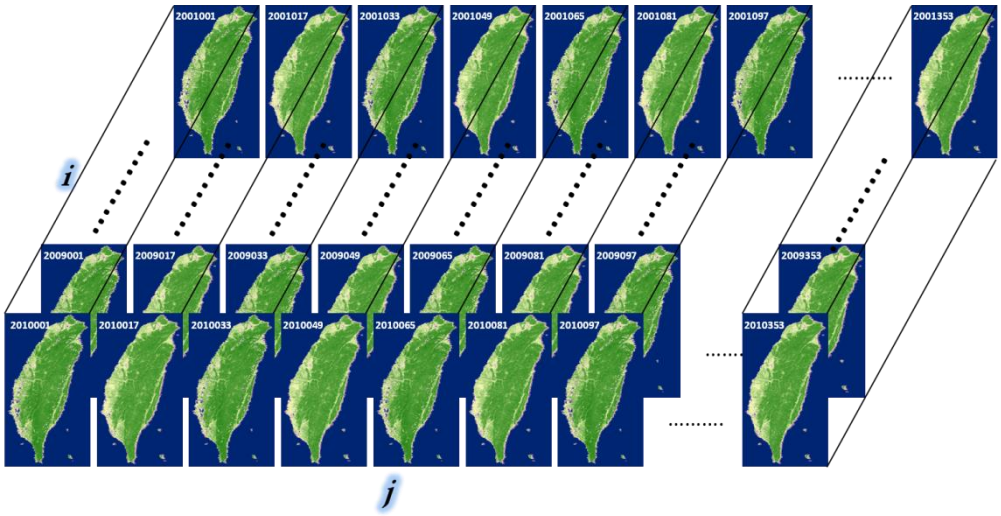


圖 B-7 MODIS NDVI-時間維度的二維矩陣

雲層覆蓋影響光學遙測觀測，降低植生區域的 NDVI 數值，如未將其剔除，將成為錯誤的植生異常區域,在資料前處理中,雖可利用 pixel reliability 刪除雲區影響像元，但雲區周圍的薄雲及氣膠仍常存在，有必要在異常分析前將其去除；由於薄雲氣膠在

時間及空間分佈上皆為隨機出現，並造成植生指標明顯的降低，在 NDVI 時序資料上呈現短期距間突然降低及上升的特性，故利用 NDVI 在時間上的變化率，並設定 $NDVI_j'$ 及 $NDVI_{j-1}'$ 的門檻值，能有效移除薄雲及氣膠的影響像元(式 B.32)(圖 B-8)。

$$NDVI_j' = 100 \times \frac{NDVI_{j+1} - NDVI_j}{t_{j+1} - t_j} \quad \text{.....(式 B.32)}$$

t_j:第 j 資料週期中的觀測日期(Julian day)

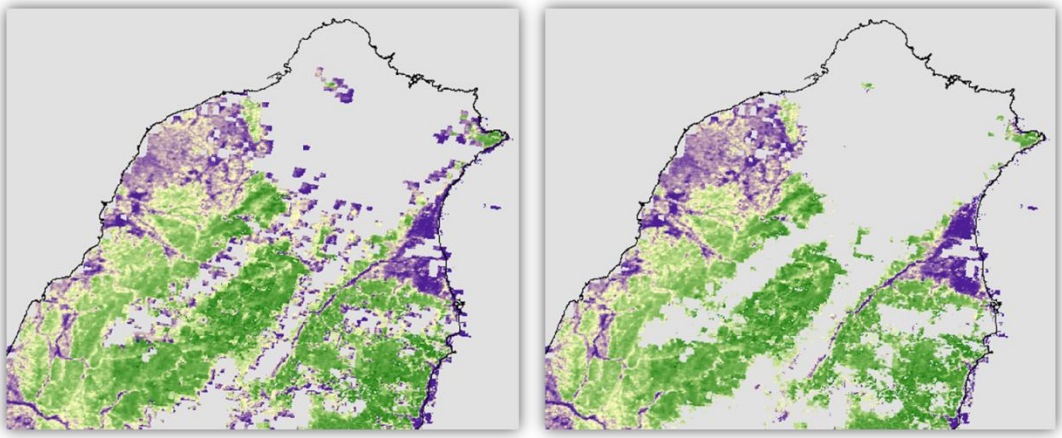


圖 B-8 MODIS NDVI 雲區移除

排除受到雲層及氣膠影響的像元後，透過歷年同期植生指標資料的分析，能建立一植生狀態的參考基準(式 B.33)，並界定歷年間的變異範圍(式 B.34)，而所謂的植生異常，即意指相較於此參考基準，植生狀態有明顯的變化，而此變化是否顯著，則除了與參考基準的差值，亦需顧及歷年間的變動範圍，故植生異常指標(Vegetation Anomaly Index)為一常態化後的數值，亦即訊雜比(signal to noise ratio)，代表統計意義上植生狀態相較於基準值的差異顯著性(式 B.35)，當數值為負值，表示當期影像的植生密度或活躍性(vegetation vigor)相較於歷年同期為低，如數值愈低，表示此異常情形愈為顯著，可能受到非常態性事件的擾動，或生長季的延遲所致。

$$NDVI_mean_j = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} NDVI_{i,j} \quad \text{.....(式 B.33)}$$

$$NDVI_std_j = \frac{1}{N-1}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(NDVI_{i,j} - NDVI_mean_j)^2} \quad \text{.....(式 B.34)}$$

$NDVI_{ij}$: 第 i 年中第 j 期的 NDVI

$$VAI_{i,j} = \frac{NDVI_{i,j} - NDVI_mean_j}{NDVI_std_j} \quad \text{.....(式 B.35)}$$

植生指標差值雖反應出植生狀態差異，但僅為一相對性資訊，並無絕對的意涵，透過與歷年變異範圍相除的常態化過程，不僅提供植生異常分析所需的統計意義，也具有提高偵測率，及降低誤警率的功用，舉例而言，當乾旱事件發生時，常造成天然植生區域植生綠度及 NDVI 的降低，但在 MODIS 250×250m 的觀測尺度上，此降低範圍通常不致過大，如單純以植生差值來看，很難觀測其顯著性，但由於天然植生區亦維持較穩定的生長趨勢，歷年間的變異較小，透過常態化的過程，能將此 NDVI 微小的差異突顯出來，提高乾旱異常的偵測率；而在農作區域，受到農作栽植與休耕農地的影響，植生指標的落差可能較大，如以植生指標差值來看，很可能將此類區域界定為植生異常區域，但由於歷年同期間的植生指標變異亦偏高，故透過常態化分析，能將此異常訊號有效抑制，降低錯誤的異常辨識。

VAI 為一連續性指標，但為方便資料解讀與應用，可簡易區分為常態(或異常不顯著)與異常區域兩種植生狀態，亦即透過門檻值的設定，將異常區域(VAI 過高或過低的區域)界定出來；而植生異常區域的篩選，主要仍需考量到大氣的干擾，透過前述 NDVI 的時間變化率，雖可濾除部分受雲層氣膠影響的像元，但由於資料不連續(故無法演算 $NDVI_j'$或 $NDVI_{j-1}'$)或時序資料接連受到大氣干擾，雲層氣膠仍為影響異常分析準確性的主要因素；由於大氣干擾在時序上為隨機出現，而植生異常多為連續呈現，故透過時序性的資料分析，亦即界定在連續幾期資料中，VAI 皆低於設定門檻值，能進一步排除大氣的干擾；最後，在 VAI 門檻值及持續期數的設定上，不同擾動事件對植生狀態常產生不同程度的影響，舉例而言，乾旱事件造成 NDVI 降低，但往往降低幅度不大，時間卻持續較久，草生地的火災則由於延燒迅速，多為淺層植被的破壞，火災後植生指標雖顯著降低，但由於同時釋放出固存養分，如能配合適時的降雨，常能迅速回復為先前的草生地貌；為能判釋出不同型態的擾動事件，需在 VAI 及持續期數的門檻上，給予相對應的設定值。

B.5 增進植生指標演算

NDVI 公式簡易且為學界最常引用的植生指標之一，但其演算仍有部分缺陷，如高覆蓋植被區的飽和問題，以及未考慮到植生背景及大氣中氣膠含量的影響，造成無法確實反應出地表的植生狀態，學者 Huete 和 Liu 於 1994 年透過反演的方式，推估出冠層背景及大氣影響之間的相互關係，將此土壤及大氣因子修正植生指標定義為 EVI，其演算式如式 B.36 所示。

$$EVI = G\frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + C_1\rho_{Red} - C_2\rho_{Blue} + L} \quad \text{(式 B.36)}$$

G=增益值（Gain）

ϱ_{NIR}=近紅外光波段反射率

ϱ_{Red}=紅光波段地表反射率

ϱ_{Blue}=藍光波段地表反射率

C_1=氣溶膠校正係數(紅光波段)

C_2=氣溶膠校正係數(藍光波段)

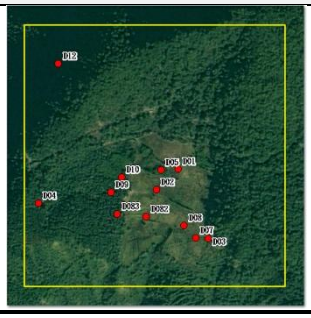
L=植生背景亮度校正值

在 MODIS EVI 推演中，L、C1、C2、G 分別採用固定數值(L=1、C1=6、C2=7.5、G=2.5)。

附錄 C、葉面積指數現地量測資料

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
大雪山林道 30.3K	2011/5/18	針闊葉混和林	X: 245997	Y: 2680326

測點位置



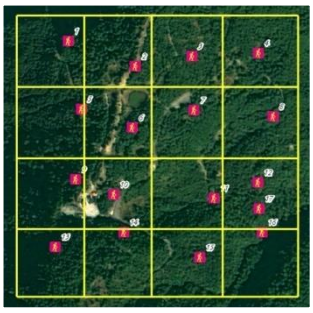
現地照片

量測數據

No	LAI mean	LAI stdev	Samples
D01	0.70	0.04	4
D02	0.64	0.10	4
D03	1.23	0.19	4
D04	2.47	0.04	4
D05	4.04	0.11	4
D07	0.82	0.06	4
D08	0.44	0.02	4
D082	0.61	0.06	4
D083	3.13	0.24	4
D09	3.80	0.04	4
D10	4.79	0.05	4
D12	2.65	0.56	4
Tot.	2.11	1.56	48

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
大雪山林道 46K	2011/7/27	針闊葉混和林	X: 251997	Y: 2686326

測點位置



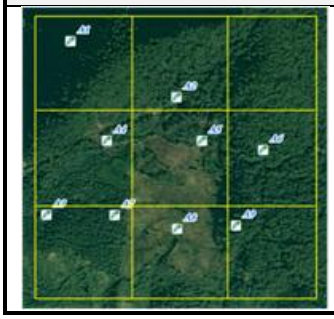
現地照片

量測數據

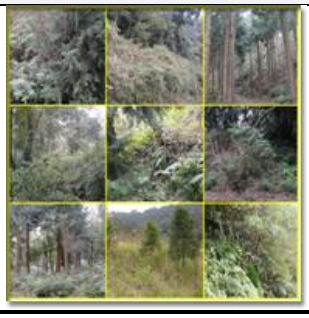
No	LAI mean	LAI stdev	Samples
1	2.55	0.58	4
2	4.60	0.13	4
3	3.27	0.32	4
4	3.60	0.63	4
5	4.24	0.31	4
6	2.49	0.84	4
7	3.52	0.82	4
8	4.22	0.38	4
9	4.24	0.36	4
10	2.99	0.48	4
11	4.90	0.39	4
12	3.01	0.06	4
13	4.33	0.12	4
14	3.33	0.62	4
15	3.05	0.76	4
16	3.57	0.44	4
Tot.	3.62	0.45	64

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
大雪山林道 30.5K	2012/2/20	針闊葉混合林	X: 245997	Y: 2680326

測點位置



現地照片



量測數據

No	LAI mean	LAI stdev	Samples
1	5.12	1.03	8
2	3.72	0.51	4
3	4.09	0.83	4
4	5.37	0.93	4
5	4.17	1.07	4
6	5.12	0.46	4
7	5.33	0.87	4
8	2.81	1.61	4
9	5.45	0.36	4
Tot.	4.58	0.92	40

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
大雪山林道 41K	2012/2/21	針闊葉混合林	X: 249997	Y: 2683326

測點位置	現地照片	量測數據

No	LAI mean	LAI stdev	Samples
1	4.96	0.58	2
2	4.74	0.60	4
3	3.32	0.68	4
4	4.64	0.24	2
5	3.24	0.62	4
6	3.50	0.77	4
7	5.22	0.66	2
8	5.18	0.75	2
Tot.	4.35	0.85	24

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
台中豐原	2012/4/24	闊葉林	X: 223997	Y: 2681326

測點位置	現地照片	量測數據

No	LAI mean	LAI stdev	Samples
1	3.79	0.53	4
2	5.44	0.59	4
3	2.92	0.74	4
4	6.58	0.76	4
5	5.52	0.29	4
6	5.69	0.49	4
7	5.56	0.32	4
8	5.49	1.08	4
9	4.12	0.62	4
Tot.	5.07	1.26	28

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
台中港防風林	2012/4/25	木麻黃防風林	X: 200997	Y: 2688326

測點位置	現地照片	量測數據

No	LAI mean	LAI stdev	Samples
1	2.88	0.13	4
4	3.76	0.44	4
5	3.55	0.36	4
7	2.92	0.24	4
8	2.96	0.46	4
Tot.	3.21	0.41	20

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
嘉義蘭潭	2012/4/25	闊葉林	X: 197997	Y: 2597326

測點位置	現地照片	量測數據

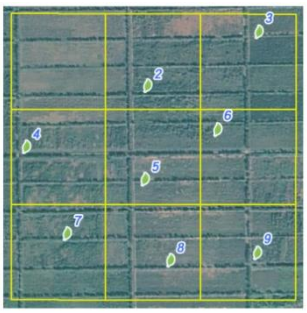
No	LAI mean	LAI stdev	Samples
1	3.02	0.59	4
2	5.06	0.60	4
3	5.20	1.31	4
4	4.55	1.07	4
5	3.36	0.21	4
6	3.32	0.71	4
7	5.45	0.69	4
8	3.60	0.25	4
9	2.72	0.99	4
Tot.	4.03	1.04	36

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
台中東勢	2012/7/9	果園	X: 233996	Y: 2682327

測點位置	現地照片	量測數據

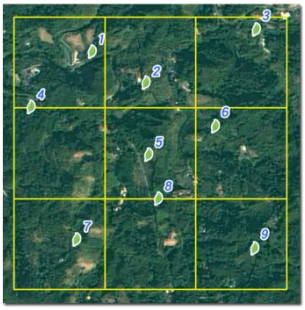
No	LAI mean	LAI stdev	Samples
1	2.23	0.37	4
2	1.74	0.42	4
3	3.74	0.75	4
4	1.48	0.30	4
5	1.69	0.33	4
6	2.13	0.42	4
7	2.44	1.39	4
8	1.74	0.03	4
9	1.86	0.31	4
Tot.	2.21	0.68	36

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
嘉義東石	2012/7/11	人造林	X: 161379	Y: 2600993

測點位置	現地照片	量測數據
		

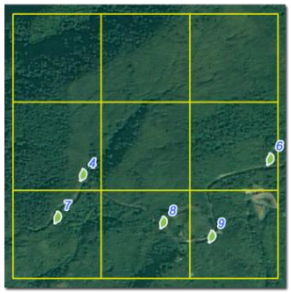
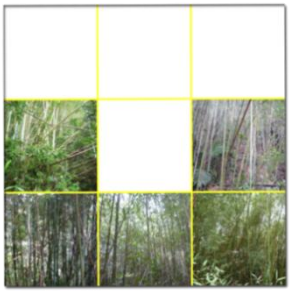
No	LAI mean	LAI stdev	Samples
2	0.88	0.33	4
3	2.98	0.26	4
4	1.56	0.25	4
5	1.26	0.09	4
6	4.59	1.84	4
7	4.55	0.49	4
8	2.46	0.62	4
9	2.04	0.18	4
Tot.	2.54	1.42	32

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
桃園枕頭山	2012/7/12	竹林	X: 282996	Y: 2746327

測點位置	現地照片	量測數據
		

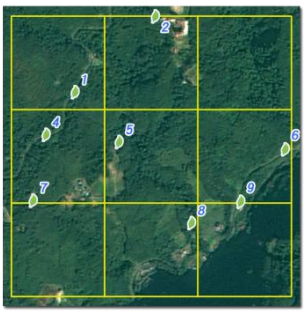
No	LAI mean	LAI stdev	Samples
1	3.35	1.24	4
2	4.61	0.72	3
3	2.58	1.26	4
4	4.91	0.67	4
5	4.08	0.74	4
6	5.25	2.02	4
7	3.05	0.58	4
8	3.26	1.20	4
9	3.74	0.94	4
Tot.	3.87	0.91	35

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
桃園石門水庫北側	2012/8/6	竹林	X: 285996	Y: 2745327

測點位置	現地照片	量測數據
		

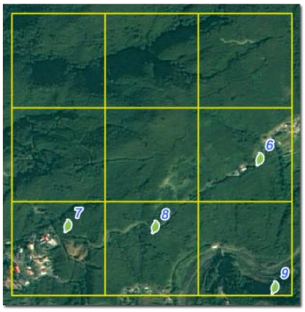
No	LAI mean	LAI stdev	Samples
4	5.43	0.84	4
6	4.38	1.42	4
7	4.63	0.37	4
8	5.20	0.17	4
9	5.38	0.54	4
Tot.	5.00	0.47	20

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
桃園石門水庫北側	2012/8/6	竹林	X: 286996	Y: 2745327

測點位置	現地照片	量測數據
		

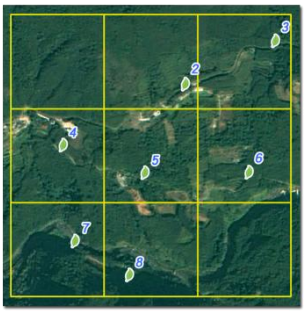
No	LAI mean	LAI stdev	Samples
1	5.31	0.35	4
2	5.05	0.34	4
4	3.67	0.74	4
5	3.72	0.38	4
6	3.79	0.86	8
7	4.87	1.55	4
8	5.65	1.03	4
9	5.69	0.84	4
Tot.	4.72	0.87	36

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
桃園小烏來	2012/8/7	竹林	X: 287996	Y: 2743326

測點位置	現地照片	量測數據
		

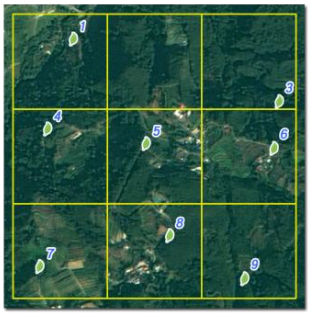
No	LAI mean	LAI stdev	Samples
6	4.41	0.12	4
7	4.88	0.71	4
8	4.72	0.22	4
9	4.14	0.35	4
Tot.	4.54	0.33	16

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
桃園小烏來	2012/8/7	竹林	X: 288996	Y: 2743326

測點位置	現地照片	量測數據
		

No	LAI mean	LAI stdev	Samples
2	4.01	0.61	4
3	4.14	0.75	4
4	5.41	0.51	4
5	3.59	0.25	4
6	4.21	0.18	4
7	5.94	1.13	4
8	4.78	1.01	4
Tot.	4.58	0.84	28

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
桃園石門水庫南側	2012/8/7	竹林	X: 281996	Y: 2741326

測點位置	現地照片	量測數據
		

No	LAI mean	LAI stdev	Samples
1	3.91	0.63	4
3	5.17	0.76	4
4	4.57	1.05	4
5	4.42	0.07	4
6	3.01	0.56	4
7	4.13	1.07	4
8	4.80	1.42	4
9	3.59	1.26	4
Tot.	4.20	0.69	32

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
南投埔里	2012/9/3	稻田	X: 242994	Y: 2653328

測點位置	現地照片	量測數據

No	LAI mean	LAI stdev	Samples
1	2.19	0.62	4
2	2.12	0.43	4
3	1.40	0.68	4
5	1.82	0.07	4
6	1.91	0.66	4
8	1.85	0.76	3
9	1.40	0.45	4
Tot.	1.81	0.31	27

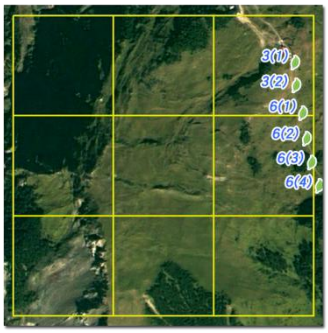
Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
南投埔里	2012/9/3	稻田	X: 243994	Y: 2653328

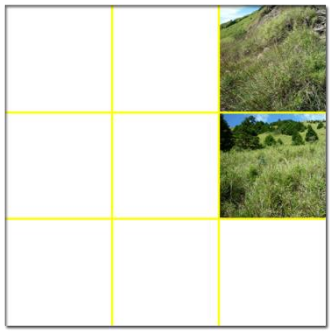
測點位置	現地照片	量測數據

No	LAI mean	LAI stdev	Samples
1	0.90	0.38	4
2	3.43	0.27	4
3	2.29	0.40	3
5	2.55	0.67	4
6	1.19	0.14	4
7	1.93	1.00	4
8	1.62	0.44	4
9	1.74	0.40	4
Tot.	1.96	0.80	31

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
合歡山東峰	2012/9/4	高山箭竹	X: 277994	Y: 2670328

測點位置	現地照片	量測數據

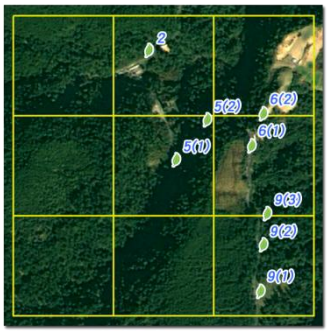


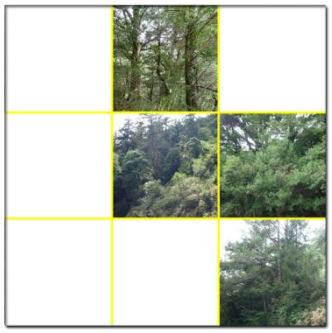


No	LAI mean	LAI stdev	Samples
3(1)	2.27	0.76	4
3(2)	2.73	1.06	4
6(1)	2.64	1.11	4
6(2)	3.34	1.47	3
6(3)	2.65	0.77	4
6(4)	3.88	0.94	4
Tot.	2.92	0.58	23

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
合歡山大禹嶺	2012/9/4	針葉林	X: 279994	Y: 2676288

測點位置	現地照片	量測數據

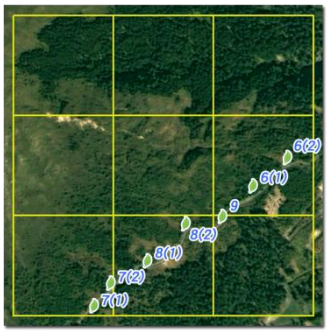


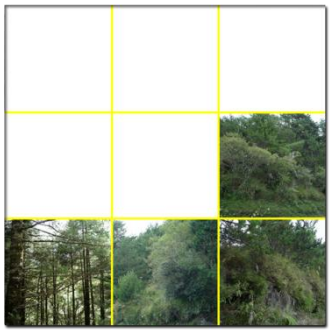


No	LAI mean	LAI stdev	Samples
2	3.60	0.25	4
5(1)	4.58	0.47	4
5(2)	3.78	0.77	4
6(1)	4.42	0.92	4
6(2)	3.16	0.80	4
9(1)	3.86	1.99	4
9(2)	5.12	0.90	4
9(3)	3.64	1.38	4
Tot.	4.07	0.67	28

Location	Date	Land Cover	測區中心座標	
北合歡山	2012/9/4	針葉林	X: 278994	Y: 2674328

測點位置	現地照片	量測數據





No	LAI mean	LAI stdev	Samples
6(1)	3.84	0.95	4
6(2)	3.37	1.19	4
7(1)	3.77	0.46	4
7(2)	4.37	0.77	4
8(1)	2.58	1.16	4
8(2)	2.80	1.24	4
9	3.04	1.59	4
Tot.	3.40	0.64	28

附錄 D、審查會議及工作會議辦理情形

D.1 期初審查會議辦理情形

1. **有關清潔發展機制（CDM）中計算人工林固碳貢獻，是否可透過 MODIS 遙測技術達成估算此部分碳吸存的貢獻？**

   由於觀測尺度的關係，MODIS 較適宜針對大範圍區域的碳匯效能進行估算，先前計畫曾針對空間區域上較均質的特定樹種(柳杉、扁柏、紅檜、二葉松)進行 GPP 及 PSN 時序分析，今年度計畫也將針對花蓮大農大富農場平地造林區域進行分析，提供植林碳匯的參考資訊。

2. **請說明葉面積指數地面取樣點的面積範圍？海岸林的遙測 LAI 觀測值顯示較低，實際情況是否如此？亦或是尺度的問題?未來是否能由地面資料修正遙測的觀測成果？**

   葉面積指數實地量測主要為評估 MODIS LAI 產品在台灣地區的適用情形，故取樣範圍比照 MODIS1km*1km 的網格像元；台中港海岸林遙測數值偏低，主要由於 MODIS LAI 估算奠基於一冠層輻射模型，不同林型或地貌所採用的模型參數亦有所不同，而 MOD12 產品將台中港防風林區域的地貌誤推為都市建地，故產生與實際狀況差異較大的 LAI 數值；地面與遙測資料所採用的觀測方式不同，尺度也有相當落差，且有各自的假定條件，假使觀測數值有落差，也很難立即評斷誤差來源為何；本計畫的量測目的，主要為評估遙測在各別林型或地貌的推估上，與地面觀測資料間是否存在顯著的差異，以及其差異情形為何，以提供 MODIS LAI 資料應用所需的統計輔助資訊，並對其應用效能有較概觀的評估。

3. **葉面積指數調查數據是否能結合現有的「全台生態植群結構調查資料」進行分析瞭解葉面積指數取樣點之林型結構，輔助遙測資料的佐證或推演？**

   葉面積指數現地調查時，會同時記載觀測區域的林型結構，但受限於目視所及的觀測區域，紀錄到的林型結構可能較為偏頗，如能配合全台生態植群結構調查資料，應能對 1*1km 測區有較全面概觀的了解。

4. **恆春半島的碳匯較高，可能與此區域的灰背櫟族群有關，大陸東南沿海的環境與此類似，其黃背櫟同樣呈現較高的 GPP，此為值得探討的方向。**

恆春半島由於充足的日照，並以低海拔常綠闊葉林為主要林相，歷年皆呈現較高的初級生產力，至於是否與灰背櫟族群有關，如能取得相關的分佈圖資，將進一步進行空間上的分析比對。

5. **期初報告書第 62 頁圖 48，沿海區域紅色部分所表示的意義為何?**

紅色區域顯示植生覆蓋比例趨近於零，圖中東南側呈現紅色的區域主要為沿岸地帶，不屬於陸域的部分，在資料處理上應將其剔除。

6. **有關全台淨初級生產力 NPP 圖在陽明山及臺灣東北區一帶等數值偏低之趨勢，分別與大屯山系完整之植群分布、東北區檜木林廣布等實地情況無法相符，是否這些數值偏低有可能是受到雲霧或其他因素的干擾？如果是，應設法排除此變量所造成的影響；此外，蘭嶼與東北區均屬於冬雨型氣候，如果需要解決雲霧等上述問題，兩區的資料可相互佐證。**

在森林碳匯議題的探討上，可區分為碳儲存量(carbon stock)與碳吸存量(carbon flux)兩個子題，前者與森林的蓄積量，後者則與植株的初級生產力有關，本計畫分析處理 MODIS GPP/PSNnet/NPP 資料，主要針對碳匯的效能進行探討；陽明山大屯山系及東北部檜木林帶林相完整，有大片的天然林相，但由永久樣區調查的資料顯示，此 NE 區的森林蓄積量及碳儲存量低於其他地理氣候區，在碳吸存效能方面，由於東北部相對較多的雲雨天氣，累積光合作用有效輻射較低，故呈現出較低的初級生產力及碳吸存速率；本計畫後續將針對東北區及南部恆春地區的碳蓄積及碳吸存效能同時進行分析探討，以釐清說明兩者間的差異。

7. **嘉義竹崎一帶主要以果園及次生林相為主，實際 NPP 數值不應如此高，圖面上的呈現會誤解為果園的碳匯效能高於天然林區。**

竹崎一帶以果園及次生林相為主，其蓄積量確實應不高，但 NPP 為淨初級生產力，與單一時距內(一年內)的增長量有關，果園在充份養分及水分灌溉，以及農民對病蟲害的防治下，在 MODIS 演算成果中呈現出較高的固碳效能。

8. **未來仍會有相當多的研究利用遙測 LAI 資料進行分析，故實地量測與 MODIS**

遙測資料比對仍有其重要性，建議持續分析實地觀測成果與遙測資料間的相關性，並進一步檢測統計上是否有顯著差異。

本計畫將持續進行地面量測，蒐集不同林型及地貌的葉面積指數資料，並與遙測觀測成果進行分析比對，以統計方式檢核兩者間的相關性。

9. **目前對於 NPP 的統計分析只有 2001-2006 年資料，是否能進一步分析到 2012 年的資料？**

本計畫將持續蒐集處理 MODIS NPP 資料，完成較近期的淨初級生產力評估分析(目前 NASA MODIS NPP 資料提供至 2010 年，但 2007-2010 與 2001-2006 年資料分屬不同版本)。

10. **簡報 P5 以及報告書中，將 ES 區歸屬為南部區域，與一般區域的劃分較有落差，建議應歸為東部區域。**

感謝委員建議，在內容描述上將進行調整，以符合一般地理區位上的劃分。

11. **簡報 P7 的呈現會讓人誤認為都市區域的 NPP 仍偏高，似乎在鼓勵都市擴張，請針對此加以說明。**

簡報 P7 的圖資有再重新分析及更新，顯示都市區域的 NPP 在所有類別中最低。

12. **報告書 P13 表 2 中，最大光能利用效率是否能在不同衛星的初級生產力推估中使用，並延伸出相對應的公式，演算出不同環境尺度的生產力，並以台灣主要的七個林型作為分界切割，推演出符合台灣林業應用的碳吸存資料?**

最大光能力用效率為 MODIS 科學團隊藉由 BIOME-BGC 模型，針對全球主要地貌進行廣泛推演所產生，要直接套用到台灣的主要林型，適時適地的推演符合台灣林業應用的生產力，應仍有相當疑慮，較可行的作法是藉由 BIOME-BGC 或其他生態系統模型，輸入符合台灣地區地理與生長條件的參數，以建立符合台灣主要七林型的光能利用效率。

13. **通量塔台資料與 MODIS 遙測成果之比對過程，是否透過 SPOT 等中尺度衛星資料之連結可以有較佳之詮釋？**

通量塔所觀測的區域主要為觀測點位上風處 100-1000m 的區域(受架設高度、冠層高度、及地形風場所影響)，觀測到的二氧化碳通量則與周邊的林型及地貌型

態有關，本計畫利用 SPOT 或 FORMOSAT2 衛星影像資料檢視塔台周邊的地貌類型，以對觀測到的通量數值進行較完整的解析，但如要藉由中高尺度衛星影像推演其相應尺度的生態系統初級生產力，除了影像所能提供的地貌及光合作用有效吸收輻射分量(FPAR)等資訊，尚需累積日照輻射(IPAR)及光能利用效率(ε)等參數的推演，並考量影響植生光合作用的箝制因素(ex:蒸氣壓差及最低溫度)，這方面的參數無法單獨藉由遙測影像取得所需的資訊，較可行的作法為結合氣象觀測及生態系統模型的推演，以因應尺度需求推估植生初級生產力及呼吸排放，如此應能更符合台灣山林的應用，這部分的研究或許可為未來探討的課題。

14. 碳儲存量的估算分為 IPCC 生物量推估及遙測推演等兩種方式，在生物量的推估中，可藉由前後期生物量相減，推演出歷年間的生長量，並與遙測的成果進行比較。

本計畫已於去年計畫(2/3)中，整理歷次永久樣區蓄積量資料，分析單位區域蓄積量、觀測期距內的蓄積增長量、以及淨增長量，並比較遙測與此實測資料在空間上的分佈趨勢；今年將持續蒐集更新後的永久樣區資料，整合第一次與第二次、以及第二次與第三次間的觀測成果，以結合地面與遙測資料綜合析台灣森林的碳蓄積量及碳蓄積效能，以對森林碳匯進行較完整的解析。

15. 國家溫室氣體排放清冊中列舉 10 年期的全島森林碳量變化資料，可參考。

感謝委員提議，本計畫將參考國家溫室氣體排放清冊中的森林碳量數據，並比較遙測與此數據的異同。

16. 局內今年度是否有關病蟲害方面之計畫，又是否有調查分布範圍？希望可以提供中大評估遙測技術在森林健康的分析效能。

感謝局內病蟲害資料的提供，本計畫將藉此資料評估 MODIS 遙測技術在森林病蟲害的監測應用效能。

D.2 期中審查會議辦理情形

1. **從報告書內容豐富可見執行團隊用心，值得肯定；利用遙測技術進行碳吸存議題之研究，為永續發展重視之一環與未來遙測之趨勢。**

   感謝委員的肯定，遙測技術能提供穩定、長期、且客觀的定量觀測資訊，適合作為廣大國有林區森林碳匯研究所需的基礎資料。

2. **報告書圖 13 針對 GPP 及 NPP 資料的分析中，所使用資料為 2001-2006 年，但在圖 15 的分析中，又包含 2000-2006 年的分析成果，此年份的差異是否為筆誤?MODIS 是否有 2000 年的資料?**

   由於不同資料版本所含蓋的資料年份有所不同(MODIS 資料不斷持續更新中)，造成分析成果的資料年分存有差異，但目前新版的 NPP 資料已包含 2000-2010 年資料。

3. **圖 13 GPP 及 NPP 為 2001-2006 年的分析成果(平均值)，但在各地貌類別的面積比例上，其地貌分類是否為逐年的成果？**

   台灣地區的 MOD12 地貌類別資料並未逐年更新，圖 13 分析所使用的資料為 2004 年 UMD 類別成果。

4. **在 GPP 及 PSNnet 逐月的資料分析中，以 10 月至翌年 9 月為年度的劃分，在年度資料的分析中，是否也依此進行劃分?在圖 11 針對四季的 PSNnet 分析上，月份又是如何區分?**

   逐月資料為配合計畫年度，故以 10 月至翌年 9 月作為逐年的工作進程，年度資料則為當年 1-12 月的觀測成果；一年四季的界定上，以 3-5 月為春季、6-8 月為夏季、9-11 月為秋季、以及 12-翌年 2 月為冬季區分。

5. **針對永久樣區資料，報告書中已針對第一至第三次調查的成果進行分析，目前林務局也已委請王兆桓老師針對第一次及第二次調查資料進行檢核，建議資料分析仍應以檢核過的資料來著手。**

   目前分析成果為今年度 7 月份下載的永久樣區資料成果，內容以第一次及第二次的調查數據較為完整，第三次複查的成果尚未完全上載，未來如能取得

更新過的檢核資料，將由此資料著手分析。

6. **報告書 P47 式 2 中對單株碳固存量的計算已包含擴展係數，並可進一步由單株固存量推估為樣區的固存量；目前在永久樣區的資料分析中，蓄積量是否為樣區全株的蓄積量?或僅考量地上部的蓄積?**

永久樣區資料為林務局"森林資源碳吸存資料庫管理系統"的蓄積量分析成果，本計畫依此資料成果進行分析，應屬於地上部的蓄積，尚未乘上擴展係數推估為全株蓄積量，未來分析將就此進行修正。

7. **圖 40-43 針對永久樣區資料的分析中，相同的調查資料確有不同的樣本數量，此樣本數差異的原因為何?**

由於對不同分析參數使用不同的資料律定門檻值，造成樣本數的些微差異。

8. **永久樣區的資料分析為何以地理氣候區來進行劃分，而不先以全台的尺度進行說明?**

如以全台尺度分析，無法突顯出地區性的差異，僅能看出永久樣區五年複查週期間的變化趨勢；計畫中以地理氣候區劃分，不僅能分析空間上的差異，並以此與遙測成果比較，也能提供時間上的變化趨勢。

9. **永久樣區資料應為檢核後的分析資料(例如: 台灣年平均生長量)，再來與 MODIS 資料進行比較，才能在碳吸存趨勢的分析上得到較客觀的解釋，但目前資料檢核仍為局裡著手的計畫項目之一。**

永久樣區資料仍在檢核當中，本計畫如能取得更新過的檢核資料，將以此檢核完成的資料進行分析。

10. **在今年度工作項目中，為何僅針對 2000-2003 年，以及 2011-2012 年資料進行分析?在資料年份上是否有落差?**

前兩年度已分別針對 2004-2010 年 GPP、PSNnet 資料進行分析，總計三年期計畫將完成 12 年度的分析資料，在資料年份上並無間斷。

11. **恆春半島 SE 區的碳匯變化，可能與此區域的灰背樵族群，以及銀合歡的入侵與消長有關，此為值得探討的方向。**

目前研判南部區域的高碳吸存效能與其高日照輻射、穩定天候、及以低海拔

常綠闊葉林為主要分佈林型(相較於其他地理氣候區)有關，未來如能取得灰背櫟族群的相關分佈資訊，可就其地域分佈上是否呈現穩合進行分析。

12. 第 31 頁圖 20 之每公頃年均淨碳吸存量的標準偏差值為何有 0，請確認。

由於當筆資料僅有一樣本，故無標準差數值，表格中的樣本數有誤，將就此進行更正。

13. SE 區在分析成果中呈現出較高的碳匯效能，為何在報告書圖 11 中卻呈現較其他地理氣候區較低的數值?

圖 11 為空間區域上的 PSNnet 總量，SE 區雖呈現較高的碳匯效能，但由於區域面積較小，故其總量偏低。

14. 在先前的分析成果中，阿里山與恆春半島為台灣的生態熱點，為何在圖 11 中 SE 區卻呈現出較低的碳吸存量?

如同前述，圖 11 為各地理氣候區的 PSNnet 總量，SE 區由於區域面積較小(各地理氣候區面積比例呈現於圖 11 左下方的圓餅圖)，故其總量偏低。

15. 報告書中的專有名詞有混用的狀況，例如表 B-1 中 NPP 定義為淨初級生產力，但在報告書中又以碳吸存量使用。

從森林生長的角度來看，NPP 表示為森林植生的淨初級生產力，但由碳吸存的角度而言，植物藉由光合作用將大氣中的二氧化碳吸存，增加本身的生質量，此 NPP 表示為轉化固存的碳量，故亦可解釋為碳吸存量，由於本計畫同時針對森林生長及森林碳吸存議題進行探討，故在 NPP 的分析說明上有同時使用的情形，而在表 B-1 的說明欄位上，已對此進行述明；如報告書中專有名詞有其他混用的情形，計畫中將就其使用進行較詳細的解釋。

16. 在大農大富平地造林的分析中，由其生長趨勢來看，看不出造林的效益為何?建議改變分析方式，如改採趨勢分析或挑選特定季節資料進行比較。

分析資料以 8 日為資料週期，所呈現的生長趨勢包含季節及年度間的變遷，由於季節性變遷呈現出較大的變化幅度，造成年際間的生長趨勢不甚顯著，計畫將針對同季節的資料(例如逐年最大 LAI)進行比較，以突顯出平地造林較高的生長趨勢；就造林的效益而言，NPP 所呈現為逐年的碳吸存量，與逐

年的生長量有關(而非逐年的蓄積量)，NPP 正值即呈現出此區因造林所產生的碳匯效能，且由十年資料來看，此逐年間的碳匯速率仍在上升中，顯示造林地仍處於初期的生長階段。

17. MODIS 2001-2006 NPP(淨碳吸存量)的碳吸存估算成果及影像，可否提供並彙整至綠資源查詢系統中?並註明其與每年每月收集之 GPP、PSNnet 影像及估算成果之差異?

NPP 資料雖不在本計畫的交付項目內，但為碳吸存分析的重要基礎資料，期末時也將彙整提供給委辦單位；有關 NPP 的應用及理論說明，在報告書的附錄及碳吸存成果分析中也將分別述明。

18. 森林健康部分，第 94 頁以 SPOT 及福衛影像分析崩塌地面積，其影像時間分別為何?因崩塌面積與 98 年莫拉克颱風災前災後衛星影像崩塌地調查資料數據存有落差。

2007 年為 8-10 月 SPOT 影像，2011 年為 5-10 月福衛影像；由於影像期距、感測器差異，以及判釋方式的不同，皆可能造成分析成果上的落差。

19. 針對第 37 頁通量資料的收集期間，巴陵、嘉義及東石農場在內文與表 2 所列時間不同。

感謝指正，報告書內文將進行修正。

20. 錯別字請進行修改(第 26 頁 11 行的甚至、14 行的保守)。

感謝指正，錯別字將進行修正。

21. 依上次會議提出意見之回覆,因目前 MODIS 碳吸存模式採用許多假設參數,請評估明年度計畫內容建立符合台灣七林型的光能利用效率等相關參數的可行性。

本計畫將於期末報告書中提出結論與建議，評估符合台灣地區應用，並以台灣七林型為主的碳吸存估算之可行性。

D.3 十月份工作會議辦理情形

1. **新竹客雅溪口及大莊溪口之間紅樹林自 94 年起有陸續移除的現象，面積約 10 公頃，在 Google Earth 的時序地圖上也呈現此一現象，此區是否可作為 MODIS 驗證的實例，建議中大團隊將其納入研究參考。**

   由於 MODIS 空間尺度的關係(1×1 公里像元解析度，相當於 100 公頃區域)，碳吸存或森林生長分析較適宜針對大範圍區域進行探討，針對小尺度的區域(相較於 MODIS 觀測尺度)，易受到混合像元的影響，而無法突顯出生態區位的獨特性；但如能取得此紅樹林的切確範圍及位置，本計畫也將對此變遷區域進行探討。

2. **簡報標題「葉面積測量及比對」應為「葉面積指數測量及比對」。**

   感謝委員的指正。

3. **本次簡報指出地形陰影對 MODIS 葉面積指數之影響，後續研究應如何校正?**

   以光學遙測技術進行地表參數的分析，都難免受到地形遮蔽的影響，此陰影效應也隨者太陽仰角、方位角、以及觀測時的天候狀況(例如直射光或散射光的光照環境)有關，無法藉由單一的校正係數予以改正；本計畫應用 NASA MODIS MOD15 產品於台灣地區，除了對不同林型區域的森林生長進行探討，突顯出遙測資料在森林研究的應用效能，另一重點為對此資料進行比對驗證，並提出遙測資料應用上的考量，以提供未來學術或研究應用上的參考。

4. **以 MODIS 分析各長期生態研究地之初級生產力、淨光合作用及葉面積指數時間變化，福山試驗區 LAI 值高於塔塔加，而 PSNnet 值兩者卻相近，福山淨光合作用是否有低估的現象?**

   塔塔加以箭竹草原、常綠針葉林等高山植群為主，相較於以闊葉林相(樟櫧林)為主的福山試驗區，其葉面積指數及總初級生產力(GPP)較低，但配合其較小的生物量，維持生理運作所需的呼吸作用亦偏低，造成較少的呼吸排放(Ra)，故與福山試驗區相較，其淨光合作用(PSNnet=GPP-Ra)沒有產生太大的差異。

5. 簡報 P7，玉山的全天空日射量與 GPP 值是否低估，請說明之。此外，氣象局提供之全天空日射量資料是否有乘以 0.5 校正值?

玉山全天空日射量為氣象站的觀測資料，GPP 則為 MODIS 的推演成果，由於氣象站周圍以箭竹草原、針葉林為主要地貌，其 GPP 相較於其他位處中低海拔區域的測站(以闊葉林或針闊葉混合林為主)明顯偏低；此外，P7 圖中橫軸應為全天空日射量，而非 IPAR。

6. 大農大富園區及參考闊葉林地兩區葉面積變動趨勢統計，建議加入地面林相資料，以提供統計檢定佐證說明。

感謝委員建議，後續將加入地面林相資料。

7. 2000 至 2010 年 NPP 總量統計，2000、2001 及 2007、2008 似乎較其它年度為低，是因為取得資料的來源不同所致?或為其他原因。

NPP 分析採用相同資料來源，無不同資料版本的問題，但促成此年度間變遷趨勢的原因仍有待進一步探討。

8. 分析大農大富園區及參考闊葉林地的葉面積變動趨勢，期中會議的趨勢圖顯示兩者 LAI 差異性不大，為何此次工作會議的統計分析卻說兩者有顯著差異，請說明之。

期中會議的趨勢圖中，呈現出所有 8 日週期的逐期資料，受到季節性變遷的影響，較難突顯出年度間的生長趨勢，為說明大農大富農場與參考闊葉林地逐年間的森林生長差異，在此次工作會議中，僅呈現出夏季的 LAI 值，並藉由趨勢檢定，彰顯出平地造林相對較高的生長效能。

9. MODIS 的火點偵測中，950 個偵測火點是否代表發生火災的點位?偵測火點是否可與林務局歷年森林火災紀錄相對應?

MODIS 偵測出的火點多位於農作區，研判應與農耕整地有關，而非森林火災；藉由與林務局火災記錄的比對，顯示相當比例的林火未被 MODIS 偵測出來(針對 2000-2009 年大於 10 公頃焚燒區域的火點，MODIS 偵測率約為 36%)，此低偵測率與雲層煙霧遮蔽、火災焚燒溫度、焚燒範圍、以及林火焚燒與衛星觀測的時間落差有關。

10. 簡報 P12 至 P14 的說明中提及，GPP 及 NPP 主要受到緯度及海拔高度影響，林型等其他因素是否就不影響？請就影響程度說明之。

日射量與緯度有關，林型與所處海拔高度的生態區位有關，氣候、林相當然是影響 GPP、NPP 變化的主要條件，在本計畫中，也特別針對各植群帶、各地理氣候區的初級生產力進行比較分析。

11. 大陸發表之 MODIS 碳吸存估算未估呼吸量，直接以 GPP 為 NPP，針對此種處理有什麼看法? 台灣地區是否也能用 GPP 值來代替 NPP 值?

如所探討的植群種類具有近似的生物量，Ra/GPP 維持相近的比例，則 GPP 即能大致反應出碳吸存效能的差異，但如台灣地區相對複雜的林型、林齡而言，以 NPP 應較能反映出多重地貌的碳匯趨勢。

12. 簡報 P17 推論草生火燒區呈現二次火燒跡象，是否適宜?

如斷定草生火燒區即為二次火燒跡象，或許過為武斷，但針對近十年遙測資料的林火分析中，大甲、丹大、大埔事業區為火災頻發的區域，焚燒區域在災前影像中多呈現出草生地的地貌型態，此為值得探討的課題。

13. 關於林火的火燒面積，如為林務局所提供的資料，數據是否已公開?如否，建議報告內不列入。

報告內未列入林務局的林火紀錄資料。

14. 計畫執行的成果相當好，將來勢必會有許多研究會採用本計畫內的研究數據，希望資料準確性要夠高，以供其他研究引用參考。

感謝委員的認可，除了降低資料處理可能產生的誤差，本計畫也對遙測資料的應用與比對驗證進行統計檢定，以突顯出計畫的執行成效，期能在未來作為林業與學界應用的參考。

D.4 期末審查會議辦理情形

1. **本計畫工作項目中，有關利用二氧化碳通量相關研究成果、實地觀測資料或其他碳吸存相關研究資料與 Terra/Aqua MODIS 遙測所估算碳吸存成果加以比對，計畫結論是否已符合計畫要求?有明確校正量?**

   本計畫分別利用通量資料及永久樣區資料，進行遙測碳匯在時間及空間尺度上的比較，並提出統計檢定成果；藉由比對成果顯示，遙測與實測數據仍有些微落差，但由於不同觀測方式的理論假定不同，觀測尺度也存有落差，雖然已提出個別的差異量，但很難由此判定差異來源為遙測推演，亦或地面量測誤差所造成，但綜合而言，遙測不論在空間及時間的尺度上，皆能有效反映碳吸存的變異，可作為評估不同地理氣候區、植群帶的森林碳匯效能；此外，為輔助說明不同平台碳匯估測成果的落差，計畫中也分別針對遙測、通量、永久樣區資料的估測理論，以及可能的誤差來源進行說明。

2. **報告中呈現多元碳吸存分析成果，但在國家溫室氣體排放清冊中，有關林業碳匯移除量的部分僅需提供單一數值，這方面資訊應如何呈現?**

   為方便政策應用，報告中除了提出逐年全台的碳吸存量、國有林地的碳吸存量，也從研究的角度，探討不同氣候區、植群帶、以及地貌林型的碳匯效能，並分別以表格、碳匯空間分布圖、趨勢圖等多元方式呈現；在摘要及結論建議中，也因應政策需求，列舉出關鍵的碳匯數據，以及相關的統計檢核成果，透過科學數據的呈現方式，滿足政策面及研究面的應用需求。

3. **有關建議中所提後續可針對特定生態區位或小尺度進行碳吸存估算，是否能實際執行?**

   針對特定生態區位或小尺度區域的碳吸存估算，為遙測碳匯的研究基礎，須結合高解析遙測資料、地面調查、及生態系統模型進行推估，並輔以通量觀測、實地量測資料來佐證;本計畫已陸續針對多元的觀測方式進行說明解析，並完成產出資料分析並比對遙測估算成果，唯獨遙測資料為 NASA 的既有產品，並非本土產製；在特定生態區域的估算上，目前所缺乏的僅是結合前述

的觀測方式，應用較高解析的遙測資訊，推演出符合台灣林型地貌的碳吸存估算模型，這方面在台灣尚未有前例，故較適合針對小尺度區域進行研究分析，但在各技術的應用上，皆已經相當成熟。

4. **報告書文句描述上常一段落中缺乏斷句，建議可善用句號，協助閱讀。**

感謝委員建議，文句敘述上將再作調整。

5. **通量資料比對是否有透過其他的統計方式檢測? 此外，使用相關分析的部分，在 R 值的陳述上，須增列 p 值以協助讀者了解統計上的顯著性。**

在遙測碳匯資料的比對中，主要透過一般通用的統計檢測方式，提出多平台觀測成果在定性及定量上的差異；後續將增列 p 值以標示比對成果的顯著性。

6. **計畫英文標題 forest health growth and carbon sequestration，建議在 health 及 growth 間加註一逗號，改為 forest health, growth and carbon sequestration，較為通順。**

英文標題將更改為 forest health, growth, and carbon sequestration。

7. **本計畫引用碳存量及碳通量的詞彙，在生態用法上，分別為碳儲存量及碳吸存量的概念，用字上可再作斟酌。**

感謝委員建議，用字將再作調整。

8. **在遙測資料與碳吸存相關資料比對分析結果，永久樣區的比對成果相較於通量觀測之相關係數為高，是否可建議未來在碳吸存的議題上，應更著重於永久樣區的量測，而非通量的觀測?**

永久樣區與遙測資料的比對，主要針對碳匯在空間上(地理氣候區)的分佈趨勢是否相同，並非點對點的比較；而通量資料的驗證，則著重兩資料在時間尺度上的變動趨勢是否相符，故著眼點有所不同；透過不同平台資料的交互驗證，才能分別在時間與空間尺度上，對遙測估測的準確性進行較完整的評估。

9. **簡報中提及碳存量(carbon stock)及碳通量(carbon flux)，並分別與 forest structure 與 forest functioning 連結，從地景生態學的角度來看，此兩者相互**

關聯而密不可分，且應再包含時間的因子加以考量，其中 forest functioning 較為複雜，較難於外部結構中加以觀測。關於這部分建議可總體提出國家層級森林碳匯研究之內容與項目，以利林務單位整體規劃執行上之參考及安排優先順序。

感謝委員建議。

10. **在森林健康的評估中，監測出 2002 年的乾旱災情，但在碳吸存的研究成果中，2002-2004 年卻呈現出較高的碳匯效能，是由於延遲效應，還是其他因素所造成?**

透過 MODIS 例行常態的觀測，2002-2004 年間呈現出較高的碳匯效能，可能受到較高的日照輻射影響所致,但也可能為空間尺度上的落差所造成(乾旱受災區域相較於 MODIS 全台的觀測尺度)，實際原因仍有賴多元資料的分析評估以進行評論。

11. **從 MODIS 遙測資料來看，PSNnet 在季節分布趨勢為 3、4 月較高，但 LAI 值為 7、8 月較高，此外，GPP 較 PSNnet 值高很多，兩者之趨勢與森林生理研究觀察之現象不一致，應如何解釋。**

LAI 的高低一方面影響到日照輻射的吸收，另一方面也與植物生物量的大小有關，並反映到植物維持生理運作所需的呼吸成本；當 7、8 月份 LAI 較高，植物的光合作用較為旺盛，故 GPP 在此時達到最高，但相較而言，較大的生物量亦造成較多的呼吸排放，故 Ra 亦高，促使 GPP 與 PSNnet 相互間產生較大的落差，而 PSNnet 多在春季 3、4 月份間即達到最高，並反映在生長季初期時植生的迅速增長。

12. **附錄表 B-1 的相關名詞對照表中，有部份英文譯名與一般用法不符(例如 PSNnet)，建議可再參酌林業界普遍表示專用名詞。**

感謝委員建議，PSNnet 的英文譯名將修改為淨光合作用，IPAR 則修改為光合作用有效輻射，內文中也將進行調整。

13. **SE 區在分析成果中呈現出較高的碳匯效能(圖 12)，但在報告書圖 13 中卻呈現較其他地理氣候區為低的數值，主要為 SE 面積較小，造成其總量較低的**

現象，但在報告書的閱讀上，易讓人造成誤解或困擾。建議圖 13 之呈現除總量圖外，可增加一單位面積分布圖，輔助了解。

感謝委員建議，除呈現總量圖外，將增加一單位面積分布圖。

14. **建議在小尺度區域可以提出持續性計畫，例如海岸防風林建造或移除，以與遙測碳吸存資料比對。**

感謝委員建議。

15. **簡報第 23 頁的林地面積建議改成森林面積。**

感謝委員建議，報告書內文中將加以修正。

16. **NPP 在 2009-2010 年明顯呈現出較高數值，是否有合理解釋?**

此現象仍有賴日照輻射量、輻射吸收分量等氣象及遙測觀測資料的整合分析，以評估高碳匯的可能原因。

17. **在 88 風災後蓄積量損失的估算中，草生地樣區的樣本數較少，缺乏統計上的代表性，且雖然界定為草生地，但蓄積量實際為草生地上零星分布木本植物的量測成果，並非草生地的生物量。針對蓄積量損失的計算，建議再重新評估。**

除了草生地，竹林、高山箭竹、以及灌木林都應該有類似的情形，除了樣本數較少，其蓄積量也為木本植物的量測成果，報告中將刪除屬於這些類別的蓄積量損失。

18. **森林健康的結論部分列舉了工作項目，而非計畫執行成果，建議可再調整編寫，另外，森林健康的第一項建議較適合放在結論中陳述。**

感謝委員建議，結論部分將再作修改，森林健康的第一項建議將再作調整，以提出適用的建議。

19. **有關建議案列舉了三項建議，是否有短期內較建議採行的具體方案?**

此三項皆為具體可行的方案，但如從應用層面而言，國家層級的碳匯研究推廣將有助於整合各方資源，提供政府所需的森林碳匯科學數據，具有立即的實質效益，而另兩項建議以長遠來看，則具有較高的研究價值，畢竟嚴謹的科學數據仍有賴此類型基礎研究的投入，以提升森林碳匯估測的準確度與精

確性。

20. 針對森林健康中 88 風災的變遷判釋，請在內文中清楚說明分析過程中所使用的影像日期、感測器種類及判釋方法。

內文中將再補充說明所需資訊。

21. 報告書圖 95 流程圖的年份資料須更新。

將更新流程圖中的年份資料。

附錄 E、教育訓練辦理

本計畫於 2012 年 9 月 7 日(五)在林務局農林航空測量所舉辦計畫成果教育訓練，針對 MODIS 遙測影像在森林碳吸存、森林生長、森林健康等研究議題的應用，以及 MODIS 影像的實務操作進行說明。

表 E-1 教育訓練課程安排

時程	課程及時程安排	講員
10:00-10:10(10 分鐘)	開場致詞	
10:10-11:00(50 分鐘)	衛星遙測森林生長及健康評估	江陽聖先生
11:00-11:10(10 分鐘)	茶敘及休息	
11:10-12:10(60 分鐘)	多平台森林碳匯估算	江陽聖先生
12:10-13:30(80 分鐘)	午休及用餐	
13:30-14:10(40 分鐘)	MODIS 遙測資料介紹與前處理	林瑜儒小姐
14:10-14:30(20 分鐘)	茶敘及休息	
14:30-15:50(80 分鐘)	森林碳匯與生長資料演算操作	吳煥清先生
總計教育訓練時數：240 分鐘		

圖 E-1 教育訓練現場照片