

行政院農業委員會林務局委託研究計畫系列編號 99-00-5-25

# 平地造林對二氧化碳通量監測、分析之研究

## Study on CO<sub>2</sub> Flux Monitoring of the Plantations



委託機關：行政院農業委員會林務局

執行機關：國立臺灣大學

中華民國 99 年 12 月

## 摘要

本研究運用渦度相關法(Eddy Covariance method)之理論基礎於屏東設立通量觀測塔，監測平地造林地之二氧化碳通量，希望能計算出平地造林地之碳吸存能力，並將在二氧化碳減量上之具體數據估算出來，突顯本研究在全球氣候變遷、碳稅上之重要貢獻。

樣區已進行六次每木調查，試驗地範圍內共計十二種造林樹種。試驗地今年一至十月的平均垂直風速為  $-0.062(\text{m/s})$ ，由此可見試驗地處於穩定狀態，符合實驗的要求，風向以東北風為主，由地圖判斷屬山風。二氧化碳濃度逐年遞增，今年一至十月平均二氧化碳濃度為  $393.23 \text{ ppm}$ ，較2009年( $387.52 \text{ ppm}$ )及2008年( $379.24 \text{ ppm}$ )略增，每日二氧化碳濃度變化幅度平均為  $79.47 \text{ ppm}$ ；其二氧化碳平均通量值為  $0.247 \text{ mmol/m}^2/\text{s}$ 。從二氧化碳濃度及通量的日夜週期變化，就所得數據換算之二氧化碳固定量，近兩年來平均每天每公頃林地可以從空氣中固定約  $24.60$  公斤的二氧化碳，換算全造林面積  $290.66$  公頃，則每年約可固定  $2609.84$  公噸之二氧化碳。地表淨輻射值逐月增加，到十月才開始下降，於白天日照強烈時可出現最大正值，而夜晚則出現負值，表示地表能量散失；屏東試驗站一至十月的平均可感熱通量為  $32.156 \text{ W/m}^2$ ，白天日照強烈時可感熱通量最大值可達  $595.131 \text{ W/m}^2$ ，而夜晚逆溫現象發生時有最小值；潛熱通量平均值從一月份  $9.043 \text{ W/m}^2$  逐月增加至八月份的  $110.051 \text{ W/m}^2$ ，於白天日照強烈時出現最大正值，而夜晚空氣溼度較大時潛熱通量值則會出現負值。

**關鍵字：**全球氣候變遷、二氧化碳通量、渦度相關法、碳吸存量

## Abstract

Based on the theory of Eddy Covariance method, flux monitoring towers were established in Pingtung, in order to monitor the CO<sub>2</sub> flux of the reforestation on the plain, with the hope that we can calculate the capacity of carbon storage of there forestation on the plain, and the realistic figures in the reduction of CO<sub>2</sub> emission thereof. We sincerely hope that this study would provide some contribution to the carbon tax involved in the global climate change.

Up to the present, 6 complete enumerations have been carried; there are 12 tree species in the experimental plots. From January to October of 2010, northeast wind is the prevailing wind direction in the experimental plots, with an average wind speed of -0.062 m/s, therefore the experimental plots are under stable conditions, which meet the requirements of this study. The CO<sub>2</sub> Concentrations of each month in the experimental plots increase during night time, and reach the maximum concentration around 5 AM, and decrease gradually during day-time and reach the minimum concentration around noon-time or right after it. The average atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration increases progressively year by year (379.24, 387.52, 393.23 ppm), and the daily variation of CO<sub>2</sub> Concentration of 79.47 ppm. the average CO<sub>2</sub> flux is 0.247  $\mu$  mol/m<sup>2</sup>/s, and the average monthly CO<sub>2</sub> flux increase from January to October of 2010. According to the CO<sub>2</sub> Concentration and the day and night cyclic variation in CO<sub>2</sub> flux, we can calculate the carbon storage capacity of forest, on the average, each ha, of forest can absorb 24.60 kg of CO<sub>2</sub> from the air daily or the total experimental plots can sequester 2609.84 metric ton of CO<sub>2</sub> each year. The net radiation increases from January to October of 2010. And reaches the maximum positive value during the day time with great solar intensity, and reaches negative value during night time indicating the dissipation of energy. The mean sensible heat flux is 32.156 W/m<sup>2</sup>, and reaches the maximum value during day time with maximum solar intensity and reaches the minimum value during night time when the temperature inversion phenomenon happens. The average latent heat flux is 9.043 W/m<sup>2</sup> in January of 2010, which increases to 110.051 W/m<sup>2</sup> in August, and reaches the maximum value during day time with maximum solar intensity, and approaches negative value during night time with increased atmospheric moisture content.

**Keywords:** Global climate change, Carbon dioxide flux, Eddy covariance method, the amount of carbon sequestration.

## 目錄

摘要.....	1
Abstract.....	2
一、前言.....	4
二、材料與方法.....	4
三、結果與討論.....	8
四、結論.....	20
五、參考文獻.....	21
附錄一、各樹種生長基本資料.....	22
附錄二、風向及風速基本資料.....	24
附錄三、大氣二氧化碳濃度資料.....	25
附錄四、微氣候基礎資料.....	27
期中審查意見回覆.....	32
期末報告委員審查意見辦理情形.....	34

## 一、前言

近年來氣候異常而變遷帶來很多災難，造成人類生存上的危機，造林減碳政策是全世界目前最重要的工作。隨著全球環境變遷課題的日益重要，建立連續且長期監測地表二氧化碳、水氣、及可感熱(sensible heat)流通量(flux)的觀測站也愈趨需要。利用渦度相關法測量地面層與大氣CO<sub>2</sub> 交換已是全球性研究課題，且長期監測地表二氧化碳、水氣、及可感熱(sensible heat)流通量(flux)的觀測站也愈趨需要(Yu *et al.*, 2006)。這些觀測站所獲得的數據也是研究區域氣候、水文、及生態的重心。

美國航空及太空總署於1998 年決定支助建立全球性的地表二氧化碳、水氣、及熱能流通量的監測網，稱為fluxnet。 Fluxnet主要結合數個區域性監測網，分別是位於北美及南美的AmeriFlux 在1996 年成立，歐洲的CarboEuroFlux 也於2004 年成立，在澳洲和紐西蘭有OzFlux 監測網，而加拿大地區的監測網為Fluxnet -Canada，非洲地區的CarboAfrica 是在2006 年由歐盟設立，而亞洲的AsiaFlux 在1999 年成立，韓國也於2002 年起成立其觀測網KoFlux，中國大陸的ChinaFLUX 也於2002 年成立，加上一些獨立觀測站，根據fluxnet 網站公布的資料顯示，全球已超過500 個觀測站，分布範圍從南緯30 度至北緯70 度，遍布五個大陸的針葉林、闊葉林、熱帶林、草地、農田、北方森林、凍原、濕地等生態系。亞洲區域監測網AsiaFlux 主要由日本主導，已有25 個觀測站加入，中國大陸的ChinaFlux 有8 個觀測站加入，而與Fluxnet 連線的觀測站有22 個。鑑於此課題的重要性，台灣應速建立起自己的觀測站，獲取觀測值，分析其區域特性，並加入Fluxnet 監測網。

國內平地景觀造林政策自民國90 年8 月31 日經行政院核定，民國91 年1 月1 日開始執行，預定至民國96 年12 月31 日總共造林 25,100 公頃。至民國94 年底止，平地造林面積為8,010 公頃，平地造林除了有國土保安、資源保育、景觀維護、維護生物多樣性之存續效應外，造林木可從空氣中吸收二氧化碳、改善大氣組成，降低溫室效應，正是減低二氧化碳最環保、最低成本與最有效的方法，平地景觀造林政策是臺灣配合京都議定書，善盡地球村一份子的責任，監測評估平地造林地二氧化碳通量之變化，提昇我國友善環境的形象。

本研究運用渦度相關法(Eddy Covariance method)之理論基礎於屏東設立通量觀測塔，監測平地造林地之二氧化碳通量，希望能計算出平地造林地之碳吸存能力，並將在二氧化碳減量上之具體數據估算出來，突顯本研究在全球氣候變遷、碳稅上之重要貢獻。

## 二、材料與方法

## 1. 試驗樣區位置

本試驗觀測站設置於屏東縣新埤鄉海豐段 176 號，該區段屬台灣糖業股份有限公司屏東區處萬隆農場，合計總面積約為 290.66 ha。平地景觀造林開始於民國 91 至民國 94 年止，於萬隆農場 25 個區塊中共計栽植 14 個樹種，栽植密度每公頃 1500 株，共計栽植 435,990 株造林木，各區塊詳細造林樹種、樹種基本資料詳如(附錄一)。

觀測站架設於 8 號地東北角的觀測塔，可觀測範圍約為 1 平方公里，涵蓋範圍主要為萬隆農場 3、4、8、9 號地，以及此四區塊周圍的 2、5、7、10、11 號地等五個區塊，因此觀測塔所測得的二氧化碳通量資料主要為 2、3、4、5、7、8、9、10、11 號地等九個區塊(圖 1)。於觀測塔周邊鄰近 9 個區塊，依各區塊面積大小，系統取樣 3% 設置樣區，共設置 73 個 0.05 公頃(20x25cm)樣區，樣區面積共 3.65 公頃，對個樣區進行每木調查，測量樹高、胸徑、冠幅及枝下高，以了解試驗地林木基礎狀況。

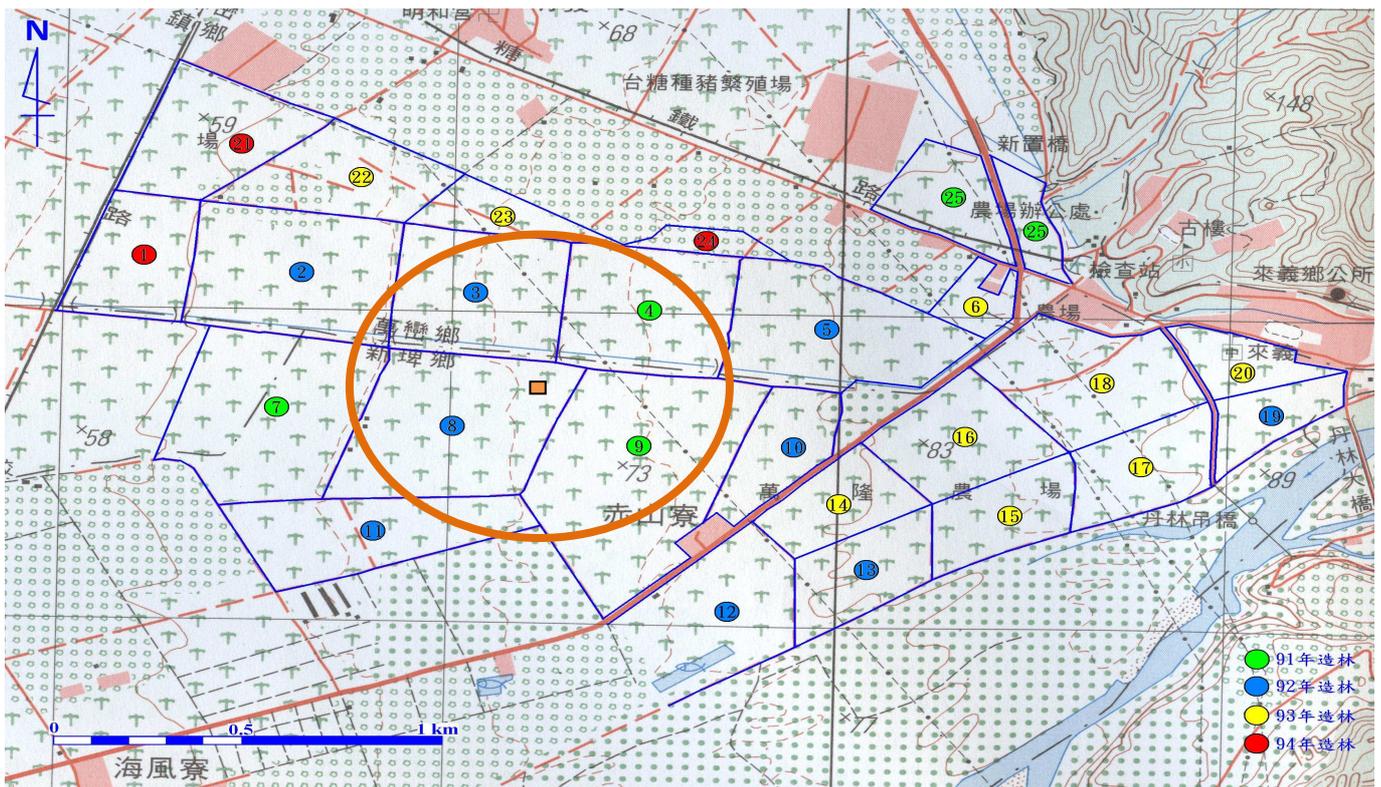


圖 1 萬隆農場 25 區塊分佈位置圖及造林年度，橘色方塊表觀測塔位置，圓框為直徑 1 公里的範圍，代表渦度相關法可觀測之範圍(背景地圖摘自經建版台灣地區二萬五千分之一地形圖)。

## 2.研究方法

### (1)渦度相關法(eddy covariance method)

渦度相關法(eddy covariance method)是微氣候學的一種研究方法，目前是通量監測中公認最準確的方法，同時此法具有連續觀測及具有大尺度範圍之代表性的優點。國內外許多長期通量觀測站都使用渦度相關法直接量測生態系中二氧化碳、水氣、熱通量等數值。渦度相關是指某物質的垂直通量，即此物質濃度與其垂直速度之共變異數(協方差, covariance)，因此二氧化碳在單位體積空間內濃度的變化率等於二氧化碳在垂直方向的通量。大氣邊界層中之熱、水氣、動量及其他質量的傳輸，主要是由紊流主導，因此二氧化碳、可感熱、潛熱通量可用下式求得(宋霞等，2004；賴玫君，2007)：

#### A.可感熱通量

$$H = \rho C_p \overline{w't'}$$

H 為可感熱通量(W/m<sup>2</sup>)

$\rho$  表示空氣密度(=1.225 kg m<sup>-3</sup>)

$C_p$  是比熱容(= 29.3 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)

$w't'$  表示溫度垂直紊流通量

#### B.潛熱通量

$$LE = L_v \overline{w'q'}$$

LE 為潛熱通量(W/m<sup>2</sup>)

$L_v$  為水的汽化熱(= 2,450 J/g)

$w'q'$  表示水氣垂直紊流通量

#### C.二氧化碳通量

$$F_{CO_2} = \overline{w'c'}$$

$F_{CO_2}$  為二氧化碳通量(mmol/m<sup>2</sup>s)

$w'c'$  二氧化碳垂直紊流通量。

當觀測環境滿足以下三個大氣條件時：一、大氣觀測環境需為穩定狀態，二、水平均質的碳源、碳匯，三、大氣的下墊面為平坦地形，生態系各通量值可由三維風速計與紅外線氣體分析儀監測數據求得(宋霞等，2003；夏禹九等，2005)。

## (2) 渦度相關系統

本觀測塔以渦流相關系統 (eddy-covariance system) : 包含開放式紅外線氣體分析儀 (LI-COR/LI-7500 open-path infrared gas analyzer) 與三維音波風速計 (CAMPBELL/CSAT3 three-dimensional sonic anemometer) 等, 觀測二氧化碳通量值, 同時觀測平地造林地之熱通量值, 作為修正二氧化碳通量值之依據。另配合各項氣象監測儀器以瞭解樣區之試驗背景資料。

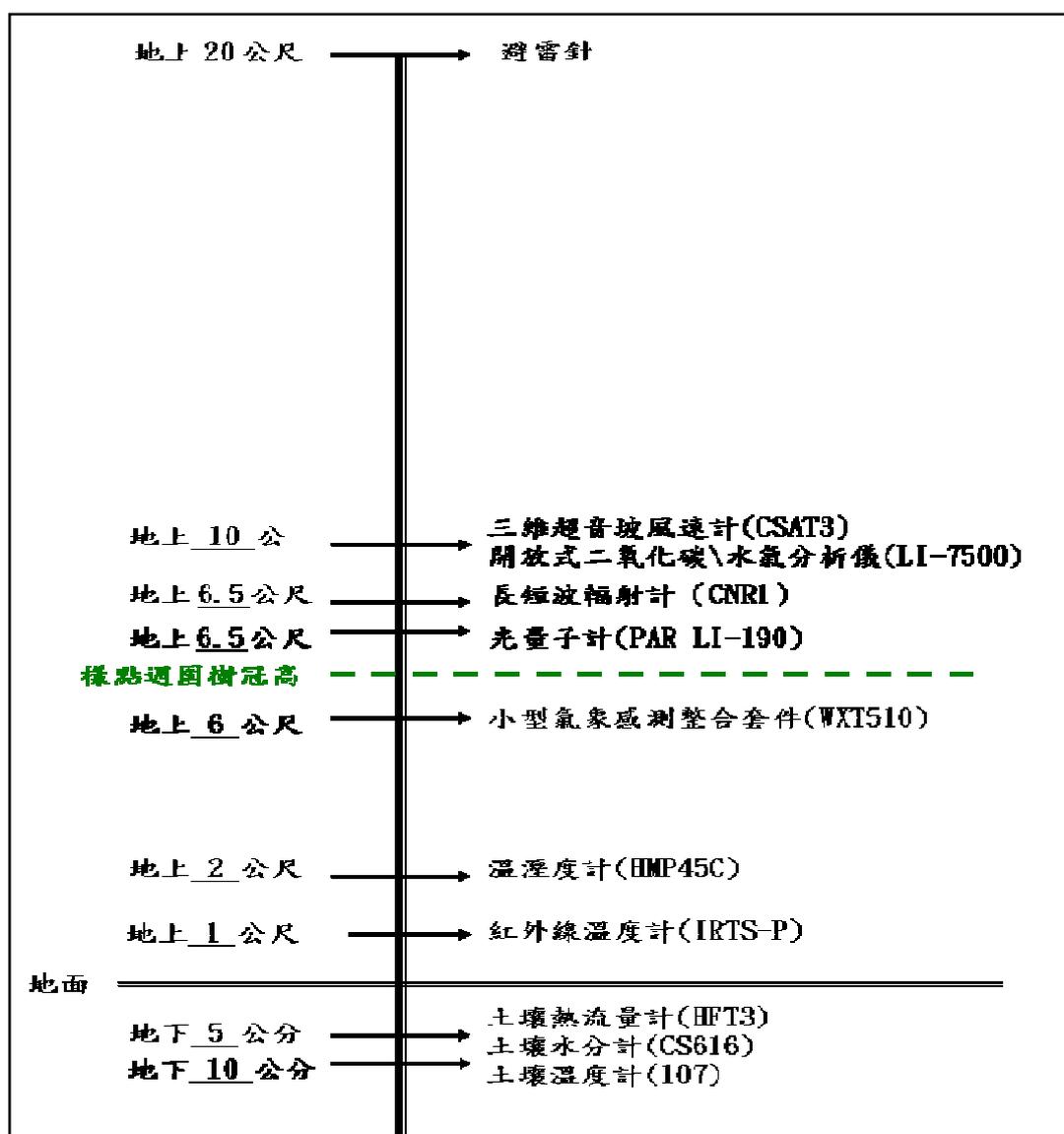


圖 2 渦度相關系統與微氣候監測儀器架設高度示意圖。

### 3. 資料處理

渦度相關系統之三維風速、氣溫、二氧化碳及水氣含量的取樣頻率為10 Hz，每30 分鐘計算並記錄一筆平均值資料。量測生態系二氧化碳、水氣、熱通量，取得原始資料，而利用渦度相關法量測通量需符合三項基本假設：觀測地點需為地勢平坦之處、水平均勻地表存量分佈(horizontal homogeneous)、以及在某一段時間內流況為穩態(steady state)。因此大氣條件不符合的情況下，會出現錯誤的數據，需先將錯誤的量測數據除去，透過三維音波風速計所測得的資料，渦度相關系統會對資料進行初步處理，再以剩餘的原始資料，每30 分鐘取一次平均值，代表某時間點的通量值，若是原始資料錯誤筆數過多，則需對儀器進行校調 (Sun *et al.*, 2006)。

然而大氣的空氣密度與一些較小的組成成份(如CO<sub>2</sub> 或水氣等)，都會影響量測到的紊流通量值，前人實驗結果發現，誤差最高甚至可達到10%，根據表面能量守恆定律，地表淨輻射量(R<sub>n</sub>)是所有表面能量來源：部分能量提供地表熱能，稱作可感熱通量(H<sub>s</sub>)；有些則成為水氣蒸發散的能量，形成潛熱通量(LE)；其他由土壤吸收變成土壤熱通量(G) (Guan *et al.*, 2006; Klemm *et al.*, 2006)。因此可用(式4)來判定通量值是否有誤：

$$R_n = H_s + LE + G \quad (4)$$

因此當  $H_s + LE + G \geq 1.2 * R_n$  時，該筆資料可判定為錯誤資料，又由於土壤熱通量(G)數值比潛熱通量(LE)與可感熱通量(H<sub>s</sub>)小很多，所以也可用(式5、式6)來判定：

$$H_s > R_n + 50 \quad (5)$$

$$LE > R_n + 50 \quad (6)$$

因此原始通量資料可用式4、5、6 將錯誤資料去除，再以其餘資料計算平均值，若錯誤資料過多，則該筆資料(30分鐘平均值)判定為錯誤資料。經過資料處理，量測到的通量值可能出現資料缺失(gap)，此時可用二氧化碳通量值與地表淨輻射量兩項資料求出回歸式進行資料補遺(gap filling)。

## 三、結果與討論

### 1. 每木調查

搭配屏東二氧化碳通量觀測站設立，於2008 年初開始每半年進行一次每木調查，至今已進行6次每木調查，測量樹高、胸徑、冠幅及枝下高，以了解試驗地林木基礎狀況及生長情形，2008 年初調查樣木約4,200株。

試驗地範圍內共計12種造林樹種，於民國91、92年造林，造林密度1,500

株/ha，平均樹高以苦楝、桃花心木最高，超過 6 m 最高可超過 13 m，而胸徑平均一年可增加 0.8 cm 至 2.8 cm，以楓香及台灣欒的胸徑增長量最大(表 1)。調查初期大部分造林地尚未鬱閉，經過三年，大部分造林地已鬱閉，或接近鬱閉。試驗地經歷莫拉克及凡那比颱風侵襲後，許多造林木風折或風倒，2010 年 8 月調查結果樣區內樣木約 3800 株，較 2008 減少約 400 株，5 號地的土肉桂造林木有許多遭人為截幹，樣區內死亡率達 14.55%，樣區內以台灣欒造林木的死亡率最高，達 22.17%(表 2)。

各樹種樹冠幅有逐漸增長趨勢，但受季節變化影響，冬季冠幅有些微下降趨勢，而土肉桂則因許多造林木遭截幹導致冠幅明顯縮減。枝下高大致上變化不大，有人為修枝的區域枝下高明顯增加。

表 1 試驗地林木樹種基礎資料平均值

樹種	樹高(m)			胸徑(cm)			冠幅(m)			枝下高(m)		
	09 夏	09 冬	10 夏	09 夏	09 冬	10 夏	09 夏	09 冬	10 夏	09 夏	09 冬	10 夏
土肉桂	3.53	4.01	3.36	5.39	6.44	6.89	2.47	2.26	1.68	1.07	1.18	1.18
水黃皮	2.6	2.74	2.70	4.60	5.56	5.66	1.9	1.87	1.89	1.20	1.23	1.22
台灣欒	3.78	3.99	4.33	3.80	4.80	5.78	2.06	2.54	3.30	1.61	1.26	1.27
光臘樹	3.47	3.71	4.20	4.06	4.71	5.34	2.14	2.16	2.39	1.34	1.36	1.36
印度紫檀	4.94	5.81	5.93	7.26	7.96	8.43	3.05	2.85	3.41	1.87	1.95	1.92
波斯皂莢	5.24	6.05	6.25	6.65	7.23	7.61	3.51	2.85	2.92	1.94	1.92	1.93
茄苳	3.24	3.64	3.90	6.98	8.32	9.08	2.46	2.82	2.9	1.28	1.54	1.55
苦楝	6.05	6.66	6.92	7.52	7.94	8.37	3.21	2.83	4.077	2.48	2.23	2.26
桃花心木	5.61	5.96	6.52	6.24	6.64	7.54	1.66	1.56	1.95	2.12	2.21	2.20
無患子	3.70	3.84	4.54	4.01	4.51	5.33	2.02	1.60	2.14	1.45	1.50	1.51
楓香	3.37	3.79	5.25	3.72	4.19	6.56	1.67	1.93	2.85	1.02	1.21	1.20
欒仁樹	4.82	5.75	6.20	8.13	8.61	9.35	3.78	3.86	4.47	1.93	2.03	2.00

表 2 試驗地各樹種 2010 年 8 月調查株數及死亡率

數種	株數	死亡率
土肉桂	47	14.55%
欒仁	478	2.65%
水黃皮	11	0.00%
光臘樹	419	3.68%
印度紫檀	897	3.03%
波斯皂莢	145	0.68%
苦楝	418	1.18%

茄苳	31	3.13%
桃花心木	418	5.86%
無患子	283	4.71%
楓香	24	0.00%
欖木	632	22.17%

屏東試驗地中造林木之栽植密度均為每公頃 1,500 株，由觀測塔範圍內 12 種樹種的栽植面積與光合作用速率計算得光合固碳貢獻率如表 3，結果顯示在不考慮土壤呼吸及地表植被光合固碳的情況下，各樹種光合固碳貢獻率因光合作用速率或栽植面積不同而有差異，台灣欖因為栽植面積大而有較高貢獻率，印度紫檀栽植面積雖大，但因 1-4 月落葉及蟲害嚴重致其貢獻率降低，無患子及苦楝則因光合作用速率較高而表現出較高的固碳貢獻率，而桃花心木雖與欖仁栽植面積差不多，但因光合作用速率較低及嚴重落葉使其固碳貢獻率僅有欖仁的一半。

表 3 試驗地 12 種樹種栽植面積及光合固碳貢獻率

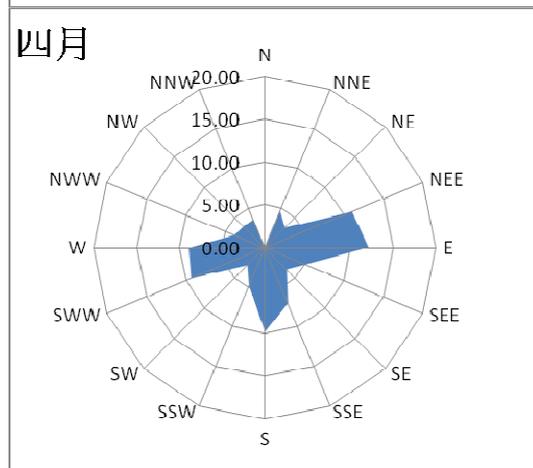
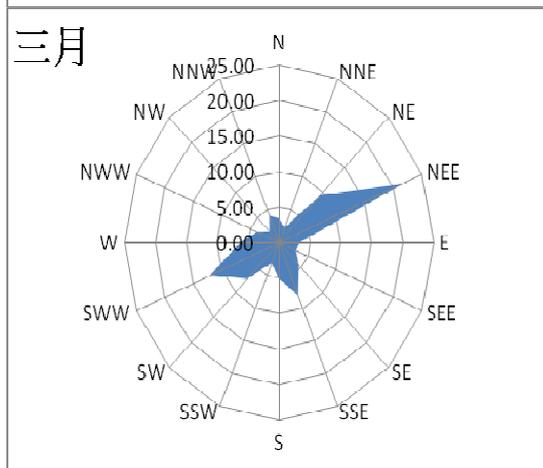
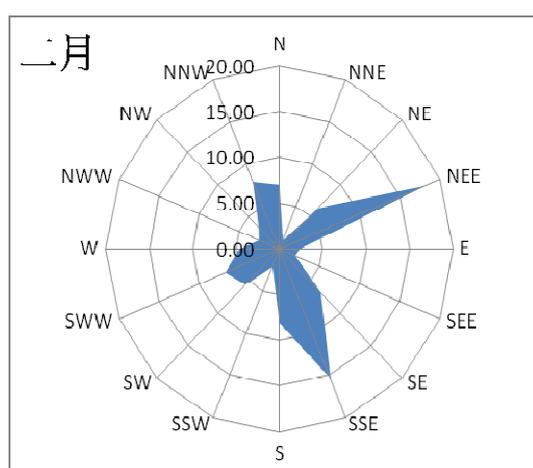
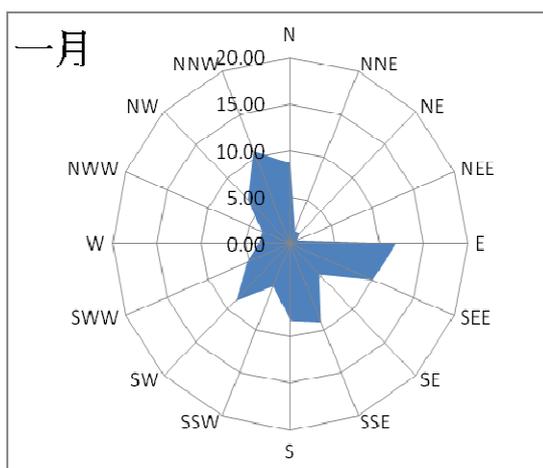
樹種	固碳貢獻率	面積(ha)	樹種	固碳貢獻率	面積(ha)
土肉桂	0.33%	0.04	茄苳	0.41%	0.02
桃花心木	7.77%	0.33	無患子	12.91%	0.18
水黃皮	2.17%	0.05	印度紫檀	10.28%	0.56
光臘樹	7.84%	0.29	楓香	3.15%	0.06
波斯皂莢	1.51%	0.09	台灣欖	24.90%	0.57
苦楝	14.39%	0.29	欖仁	14.34%	0.32

## 2. 平地造林地通量監測

以渦度相關法進行二氧化碳通量觀測具有非破壞性、連續觀測、及較大區域(大尺度, 100m - 2km)代表性之優點，不過需依賴穩定狀態、水平均質的碳源與碳匯、與平坦的下墊面，將渦流三維的傳輸過程簡化為一維方向的傳輸過程，而穩定狀態需在一段時間(通常為 30 分鐘)內之平均垂直風速為零，而一月至十月試驗地的平均垂直風速，數值相當小，平均值為 -0.062 m/s，負號表示向下，因此可發現試驗地處於穩定狀態，符合渦度相關法的前提假設，而平均風速為 1.218 m/s(表 4)。一月至十月風向以東北風為主(圖 3)，由地圖判斷屬山風，且穩定地在夜間發生。

表 4 2010 年觀測站風速基本資料(m/s)

月份	平均水平風速	最大水平風速	平均垂直風速
一月	1.250	5.50	-0.023
二月	1.399	5.80	-0.045
三月	1.406	7.60	-0.038
四月	1.273	9.10	-0.033
五月	1.265	7.80	-0.044
六月	1.176	6.60	-0.078
七月	1.105	6.00	-0.090
八月	1.078	8.00	-0.086
九月	1.294	10.1	-0.085
十月	0.936	7.90	-0.097
平均	1.218	-	-0.062



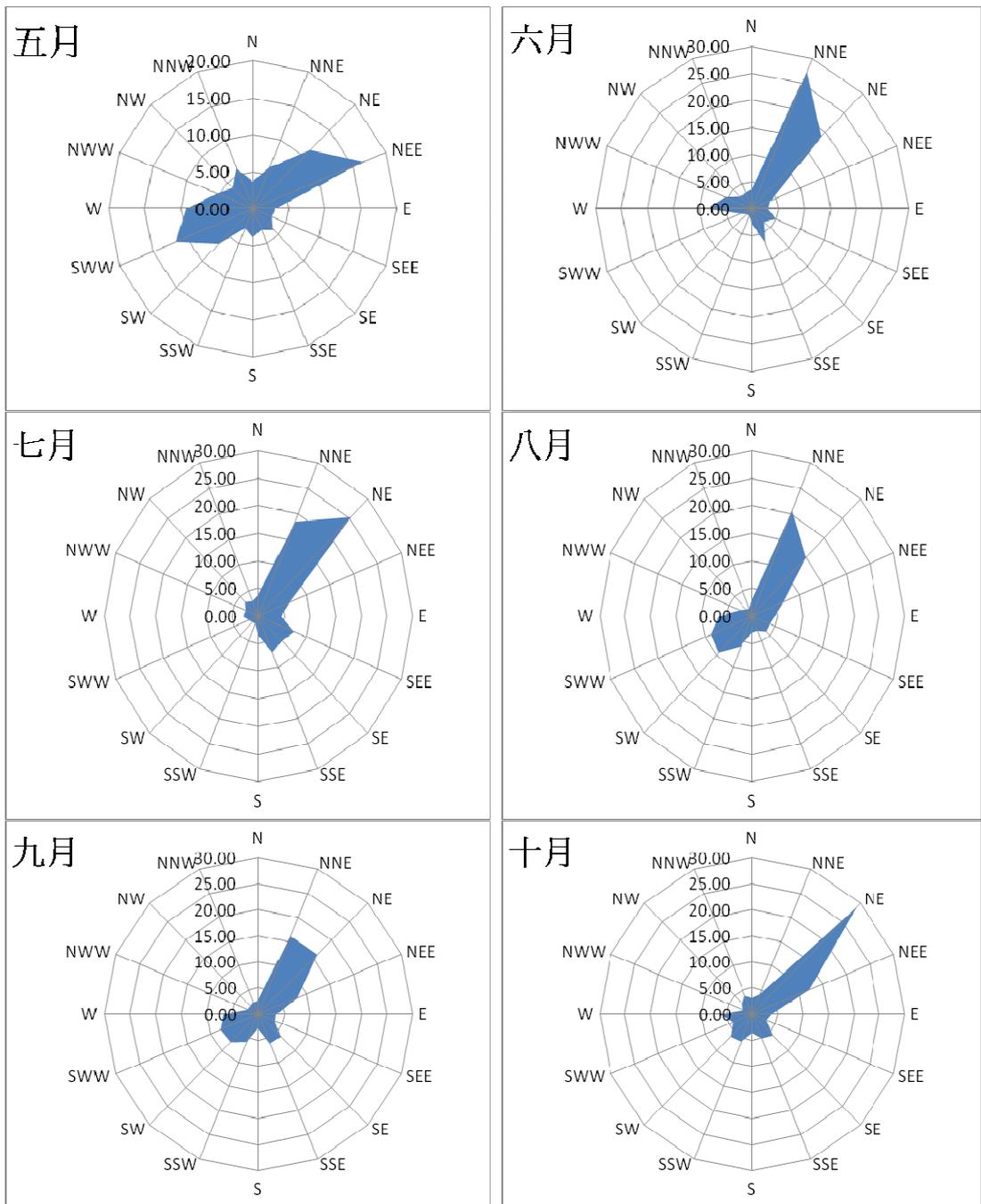


圖 3 觀測站 2010 年 1 月至 10 月風向圖(%)

### 3.平地造林地之二氧化碳通量

本試驗地各月份 CO<sub>2</sub> 濃度值雖不相同，但皆在夜間上升，於清晨 5 點左右達最高濃度，並在白天逐漸下降，於中午或午後達最低濃度(圖 4)，由表 3 可知一至十月大氣平均二氧化碳濃度為 393.23 ppm，每日二氧化碳濃度變化幅度平均為 79.47 ppm，在一至十月期間二氧化碳濃度日平均變化量以三月的 28.69 ppm 最低，而九月有最大日變化量 160.16 ppm，推測主要是受颱風影響，在 9/19 有最大 CO<sub>2</sub> 濃度達 767.28 ppm(表 5)。

表 5 屏東試驗地 2010 年一至十月大氣平均二氧化碳濃度(ppm)

月份	平均值	最大值	最小值	日平均變化量
一月	362.52	428.13	312.68	40.69
二月	392.66	446.41	365.49	36.34
三月	385.87	442.21	358.71	28.69
四月	386.32	441.56	341.39	40.54
五月	394.21	445.73	367.45	43.20
六月	392.16	487.41	353.91	94.10
七月	395.80	517.09	356.35	71.66
八月	401.27	645.50	358.21	142.66
九月	411.24	767.28	355.83	160.16
十月	410.26	585.09	368.33	136.63
平均值	393.23	—	—	79.47

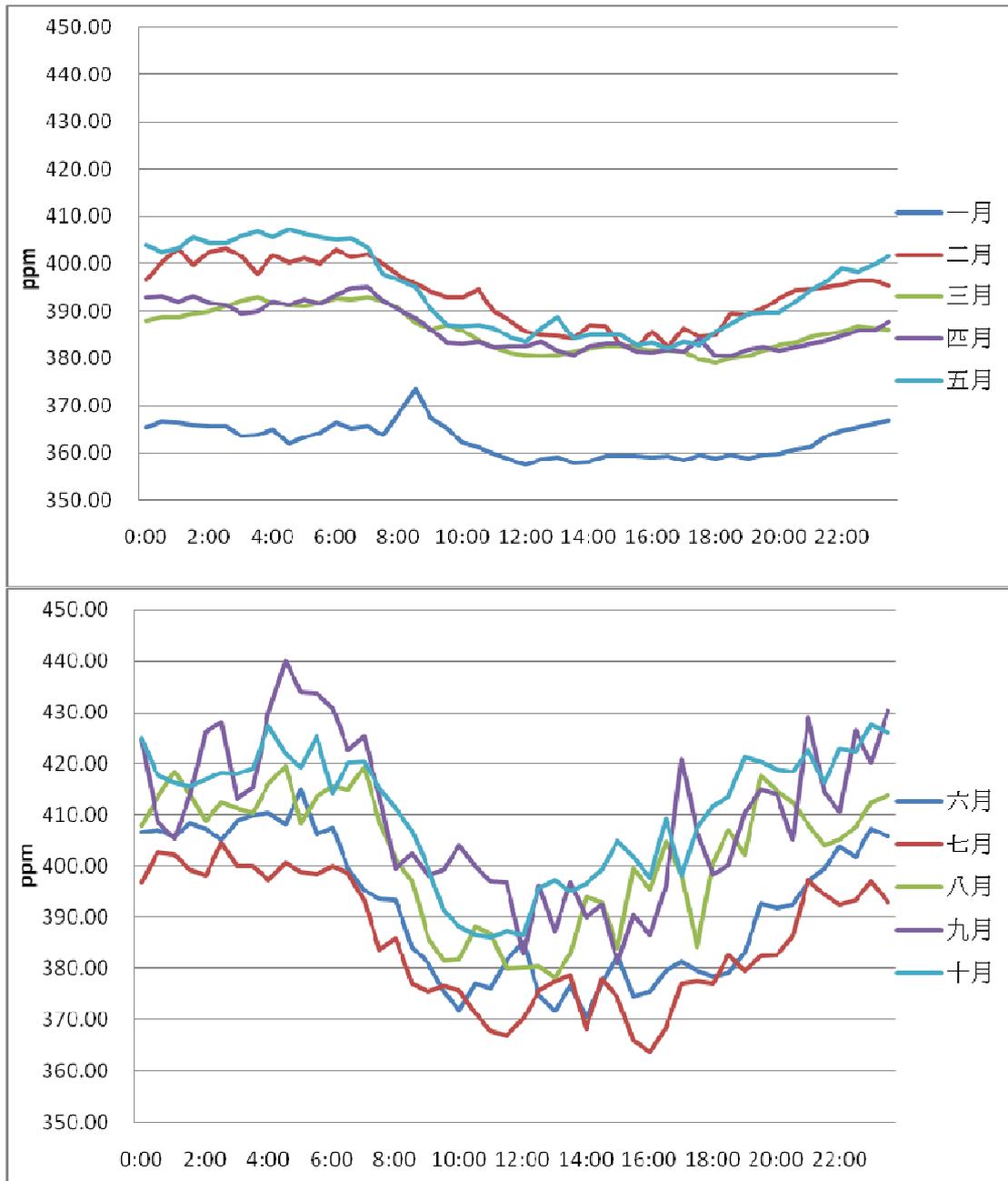


圖 4 屏東觀測站各月份大氣二氧化碳濃度日變化。

由表 6 得知試驗地二氧化碳通量平均值為  $0.256 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，各月份平均二氧化碳通量值大致上逐月增加，但只有在 6 月及 8~10 月碳吸存，其餘月份皆為碳排放，但二月有效資料不多，九月因凡那比颱風資料也有短缺，故得到的平均值會有所差異。

表 6 屏東試驗地一至十月二氧化碳通量值。

月份	平均值 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$ )	平均碳吸存量 ( $\text{kg}/\text{ha day}$ )
一月	0.093	-3.6
二月	1.417	-53.9
三月	0.481	-18.3
四月	0.934	-35.5
五月	0.654	-24.9
六月	-0.719	27.3
七月	0.900	-34.2
八月	-0.005	0.2
九月	-0.725	27.5
十月	-0.558	21.2
總平均值	0.247	-2.6

植物體透過光合作用吸收大氣中二氧化碳，而淨光合作用受許多環境因子影響，其中太陽輻射量為光合作用最主要的能量來源，而植物體周遭的溫度會影響呼吸作用，使淨光合作用值變動，植物體蒸散作用與水分利用息息相關，也影響光合作用速率，因此利用能量守恆定律，太陽輻射到達地表的淨輻射量( $R_n$ )是所有表面能量來源：部分能量提供地表熱能，稱作可感熱通量( $H_s$ )，會影響地表周圍的溫度；部分則成為水氣蒸發散的能量，形成潛熱通量( $LE$ )；其他由土壤吸收變成土壤熱通量( $G$ )。

$$R_n = H_s + LE + G$$

若等式兩側數值相差太大( $H_s + LE + G \geq 1.2 * R_n$ )，則表示儀器觀測值錯誤，該時間點之二氧化碳通量值也為錯誤數值，搭配公式可將大部分錯誤值去除。

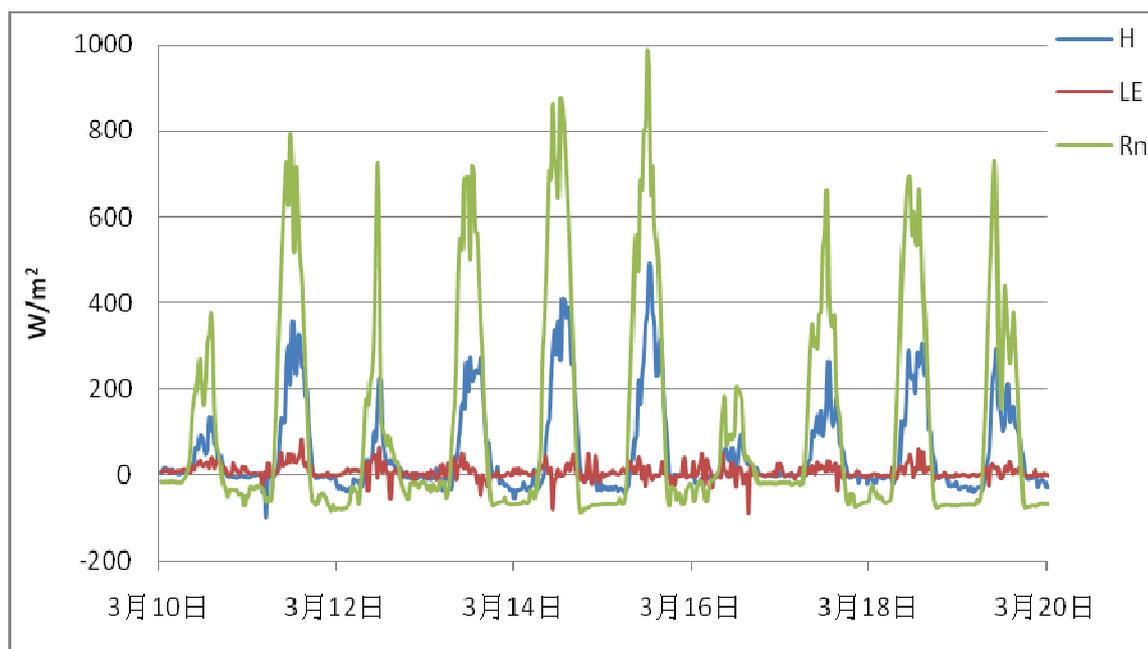
表 7 2010 年屏東試驗地各月份熱通量平均值

月份	項目	平均值	最小值	最大值
一月	$H_s(\text{W}/\text{m}^2)$	44.083	-119.433	370.821
	$LE(\text{W}/\text{m}^2)$	9.043	-404.986	445.530
	$G(\text{W}/\text{m}^2)$	0.207	-30.250	74.150
	$R_n(\text{W}/\text{m}^2)$	83.332	-92.986	657.247
二月	$H_s(\text{W}/\text{m}^2)$	43.464	-94.651	416.271
	$LE(\text{W}/\text{m}^2)$	15.546	-282.001	334.279
	$G(\text{W}/\text{m}^2)$	0.335	-26.310	77.230
	$R_n(\text{W}/\text{m}^2)$	105.059	-111.493	876.326

三月	$H_s(\text{W/m}^2)$	64.080	-97.974	534.708
	$LE(\text{W/m}^2)$	11.059	-220.598	568.202
	$G(\text{W/m}^2)$	2.543	-46.580	127.700
	$R_n(\text{W/m}^2)$	129.557	-93.189	986.359
四月	$H_s(\text{W/m}^2)$	63.975	-99.664	595.131
	$LE(\text{W/m}^2)$	21.879	-218.427	613.977
	$G(\text{W/m}^2)$	0.464	-51.850	114.000
	$R_n(\text{W/m}^2)$	140.946	-105.948	995.056
五月	$H_s(\text{W/m}^2)$	54.761	-888.147	526.546
	$LE(\text{W/m}^2)$	58.390	-1940.847	1234.132
	$G(\text{W/m}^2)$	1.479	-57.650	122.800
	$R_n(\text{W/m}^2)$	189.668	-84.946	1085.591
六月	$H_s(\text{W/m}^2)$	15.891	-168.059	238.574
	$LE(\text{W/m}^2)$	103.620	-765.963	1511.578
	$G(\text{W/m}^2)$	-0.977	-28.960	94.800
	$R_n(\text{W/m}^2)$	181.971	-67.482	1085.631
七月	$H_s(\text{W/m}^2)$	21.478	-190.208	288.772
	$LE(\text{W/m}^2)$	86.736	-861.497	1135.319
	$G(\text{W/m}^2)$	-2.113	-46.080	73.260
	$R_n(\text{W/m}^2)$	177.146	-67.683	1221.101
八月	$H_s(\text{W/m}^2)$	9.749	-77.631	214.908
	$LE(\text{W/m}^2)$	110.051	-391.151	1025.035
	$G(\text{W/m}^2)$	-1.155	-40.030	81.000
	$R_n(\text{W/m}^2)$	186.728	-62.862	1124.574
九月	$H_s(\text{W/m}^2)$	1.250	-157.219	421.633
	$LE(\text{W/m}^2)$	95.309	-900.465	957.043
	$G(\text{W/m}^2)$	0.140	-27.550	65.030
	$R_n(\text{W/m}^2)$	150.902	-63.709	1110.032
十月	$H_s(\text{W/m}^2)$	2.828	-76.901	181.767
	$LE(\text{W/m}^2)$	87.644	-156.752	513.752
	$G(\text{W/m}^2)$	-1.589	-28.470	49.060
	$R_n(\text{W/m}^2)$	126.070	-79.092	992.239

分析屏東試驗地之可感熱通量 Sensible heat flux ( $W/m^2$ )、潛熱 Latent heat flux ( $W/m^2$ )、土壤熱通量 Soil heat flux ( $W/m^2$ )及地表淨輻射量數值。地表淨輻射值 (Rn)逐月增加，於白天日照強烈時可出現最大正值，而夜晚則出現負值，表示地表能量散失；屏東試驗站一至十月的平均可感熱通量為  $32.156 W/m^2$ ，白天日照強烈時可感熱通量最大值可達  $595.131 W/m^2$ ；潛熱通量平均值從一月份  $9.043 W/m^2$  逐月增加至八月份的  $110.051 W/m^2$ ，於白天日照強烈時出現最大正值，而夜晚空氣溼度較大時潛熱通量值則會出現負值(表 7)。

圖 5 各項通量整合圖(以 3 月 10~20 日為例)



植物體光合作用速率生育地因子影響，隨季節轉換太陽輻射增強，月均溫逐月上升至 7 月達最高月均溫( $27.5^{\circ}C$ )，而土溫也隨之漸增，相對溼度平均值則是逐月增加，在 9 月凡那比颱風時達最高(表 8)；基本微氣候資料顯示氣溫、土溫、空氣相對溼度有日週期性變化資料(圖 6)，可用於初步判斷各項儀器正常運作，並作為運算時校正的基礎。

試驗地造林時間最長之區塊僅有 8 年林齡，從冠幅及栽植密度評估仍屬未鬱閉林分，長期監測二氧化碳通量可進一步了解鬱閉成林過程平地造林地對二氧化碳固定量的變化。本研究監測時間尚短，但初步所得資料，仍可做為台灣平地造林地二氧化碳通量之代表樣本。

圖 6 一月至十月屏東觀測站微氣候資料。

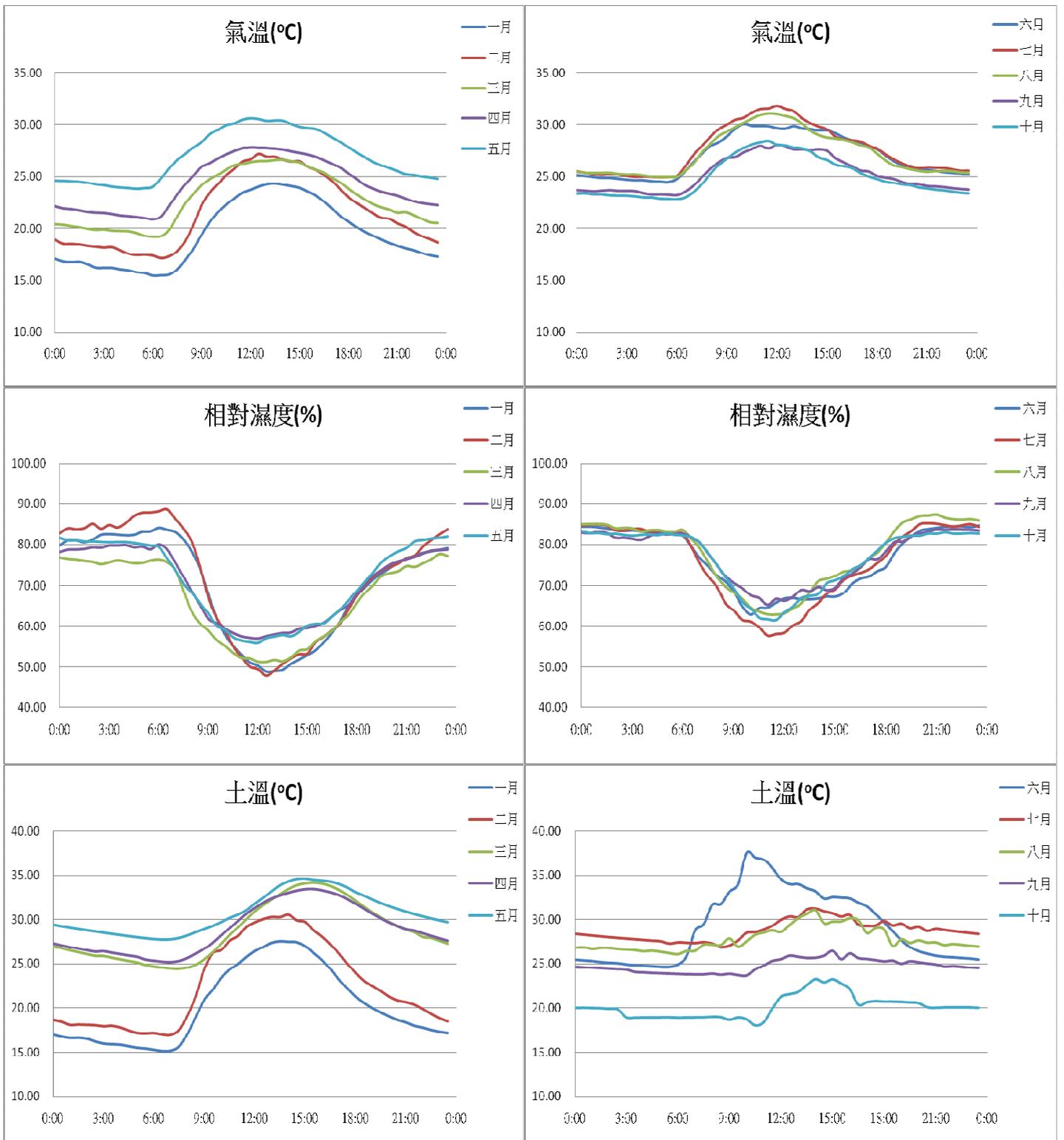


表 8 2010 年屏東觀測站氣溫、土溫、相對溼度之變化

月份	項目	平均值	最大值	最小值
一月	氣溫(°C)	19.40085	28.9	9.4
	土溫(°C)	20.25376	33.34	8.61
	相對溼度(% )	69.89823	91.9	25.6
二月	氣溫(°C)	21.40056	29.6	15.3
	土溫(°C)	22.37031	33.41	15.01
	相對溼度(% )	72.15742	90.9	34
三月	氣溫(°C)	22.71264	32.7	11.1
	土溫(°C)	28.60617	40.51	19.23
	相對溼度(% )	66.6837	88.2	35.8
四月	氣溫(°C)	24.22882	33.7	17.6
	土溫(°C)	28.86813	41.71	22.46
	相對溼度(% )	70.1184	90.9	27.1
五月	氣溫(°C)	26.86288	34.6	19.3
	土溫(°C)	30.48419	40.95	21.52
	相對溼度(% )	71.28414	91.1	36.7
六月	氣溫(°C)	27.0081	34.8	22.6
	土溫(°C)	29.17629	42.07	23.72
	相對溼度(% )	76.38649	91.4	46.7
七月	氣溫(°C)	27.5239	35.1	23.2
	土溫(°C)	28.66274	34.38	18.15
	相對溼度(% )	75.58641	91.6	40.8
八月	氣溫(°C)	27.1213	34	22.5
	土溫(°C)	27.64526	32.83	17.04
	相對溼度(% )	77.87345	91.3	47.3
九月	氣溫(°C)	26.27802	34.3	21.9
	土溫(°C)	27.02554	30.81	20.33
	相對溼度(% )	80.60338	92.2	43
十月	氣溫(°C)	25.50266	32.9	17.4
	土溫(°C)	22.11028	30.32	14.01
	相對溼度(% )	79.61534	92.1	43

---

#### 四、結論

1. 目前樣區已進行6次每木調查，通量塔監測範圍內共計12種造林樹種，合計調查樣木約3,800株，試驗地經歷2009年莫拉克及2010年凡那比颱風侵襲後風倒、風折情況嚴重，另2009年11月至2010年5月試驗地幾乎沒有降雨，有明顯乾季，因此樣木數量較三年前初次調查減少約400株。在今年夏季調查結果在高生長方面無患子增長最多，其次是光臘樹、苦楝、楓香及桃花心木，土肉桂則因許多苗木遭人工截幹致高生長為負，大部分樹種高生長在冬季過後至夏季之間，而夏季過後至冬季之間高生長較少。平均胸徑以桃花心木、無患子及欖木增加最多，波斯皂莢及水黃皮最少。樣區內樣木胸徑平均一年可增加0.8~2.8 cm，調查初期大部分造林地尚未鬱閉，經過兩年多，部分造林地已鬱閉，或接近鬱閉。
2. 2010年1月至10月試驗地的平均垂直風速相當小，平均值為-0.062，因此可發現試驗地處於穩定狀態，符合實驗的要求，而平均風速為1.218 m/s。風向以東北風為主，由地圖判斷屬山風，且穩定地在夜間發生。試驗地基本氣象數據與預期結果十分符合，風速風向的基本條件，亦適合本套裝儀器進行監測。
3. 本試驗地各月份CO<sub>2</sub>濃度值雖不相同，但皆在夜間上升，於清晨5點左右達最高濃度，並在白天逐漸下降，於中午或午後達最低濃度，由表3可知一至十月大氣平均二氧化碳濃度為393.23 ppm，較2009年的387.52 ppm略為增加，每日二氧化碳濃度變化幅度平均為79.47 ppm，在一至十月期間二氧化碳濃度平均變化量以三月的28.69 ppm最低，九月因凡那比颱風有最大日變化值160.16 ppm。
4. 從二氧化碳通量的日夜週期變化，就所得數據換算成二氧化碳固定量，近兩年來平均每天每公頃林地可以從空氣中固定約24.60公斤的二氧化碳，樣區160公頃一天可固碳3.94公噸，換算全造林面積290.66公頃，則每年約可固定2609.84公噸之二氧化碳。此雖僅為初估，但仍具有參考價值，預期在資料繼續累積後將日趨精準。
5. 分析屏東試驗地之可感熱通量、潛熱、土壤熱通量及地表淨輻射量數值。地表淨輻射值逐月增加，到十月才開始下降，於白天日照強烈時可出現最大正值，而夜晚則出現負值，表示地表能量散失；屏東試驗站一至十月的平均可感熱通量為32.156 W/m<sup>2</sup>，白天日照強烈時可感熱通量最大值可達595.131 W/m<sup>2</sup>，而夜晚逆溫現象發生時有最小值；潛熱通量平均值從一月份9.043 W/m<sup>2</sup>逐月增加至八月份的110.051 W/m<sup>2</sup>，於白天日照強烈時出現最大正值，而夜晚空氣溼度較大時潛熱通量值則會出現負值。

6. 植物體光合固碳速率受生育地因子影響，隨季節轉換太陽輻射增強，月均溫逐月上升，而土溫也隨之漸增，相對溼度平均值則是逐月增加；基本微氣候資料顯示氣溫、土溫、空氣相對溼度有日週期性變化資料，可用於初步判斷各項儀器正常運作，並作為運算時校正的基礎。
7. 試驗地造林時間最長之區塊僅有8年林齡，從冠幅及栽植密度評估仍屬未鬱閉林分，長期監測二氧化碳通量可進一步了解鬱閉成林過程平地造林地對二氧化碳固定量的變化。本研究監測時間尚短，但所得資料，仍可做為台灣平地造林地二氧化碳通量之參考。

## 五、參考文獻

- 宋霞、於貴瑞、劉允芬、任傳友、溫學發 (2004) 開路與閉路渦度相關系統通量觀測比較研究。中國科學 D 輯 34(增刊II) 67-76。
- 宋霞、劉允芬、徐小鋒 (2003) 箱法和渦度相關法測碳通量的比較研究。江西科學 21(3) 207-210。
- 夏禹九、謝正義、張世杰、林佩蓉、賴正偉(2005) 二氧化碳通量測站設置相關成果及未來努力方向。環境資料庫暨空氣品質監測系統建置成果發表會。
- 賴玫君 (2007) 以通量變化法估計地表之可感熱、潛熱、以及二氧化碳通量。國立臺灣大學生物資源暨農學院生物環境系統工程學系碩士論文。
- Guan, D. X., J. B. Wu, X. S. Zhao, S. J. Han, G. R. Yu, X. M. Sun, C. J. Jin( 2006) CO<sub>2</sub> fluxes over an old, temperate mixed forest in north-eastern China. Agric. Forest Meteorol 137:138–149.
- Klemm, O., S. C. Chang, Y. J. Hsia. (2006) Energy Fluxes at a subtropical mountain cloud forest. Forest Ecology and Management 224:5-10.
- Sun, X. M., Z. L. Zhu, X. F. Wen, G. F. Yuan, G. R. Yu (2006) The impact of averaging period on eddy fluxes observed at China-FLUX sites. Agric. Forest Meteorol. 137:188–193.
- Yu, G. R., X. F. Wen, B. D. Tanner, X. M. Sun, X. H. Lee, J. Y. Chen (2006) Overview of ChinaFLUX and evaluation of its eddy covariance measurement. Agric. Forest Meteorol. 137:125–137.

附錄一 觀測站周圍 9 區塊造林樹種、樹高、冠幅、胸高直徑基本資料。

地號	樹種	樹高(公尺) 平均值±SD	冠幅(公尺) 平均值±SD	枝下高(公尺) 平均值±SD	胸徑(公分) 平均值±SD	樣本數
2 號 地	台灣檫	3.33 ± 1.17	2.34 ± 0.79	0.98 ± 0.44	3.07 ± 1.60	115
	茄苳	3.73 ± 0.65	2.47 ± 0.66	1.30 ± 0.24	6.65 ± 2.84	6
	印度紫檀	5.22 ± 1.18	3.90 ± 1.68	0.88 ± 0.44	8.60 ± 3.23	5
	楓香	3.79 ± 1.11	1.93 ± 0.59	1.21 ± 0.39	4.19 ± 2.01	101
3 號 地	欖仁樹	5.27 ± 1.20	3.81 ± 0.96	2.02 ± 0.46	7.58 ± 2.23	229
	苦楝	2.90 ± 0.14	0.40 ± 0.35	2.20 ± 0.28	2.25 ± 0.35	4
	桃花心木	5.52 ± 1.44	1.36 ± 0.41	2.29 ± 0.44	6.02 ± 0.51	260
4 號 地	光蠟樹	3.84 ± 1.24	2.23 ± 0.63	1.40 ± 0.47	5.05 ± 2.41	306
	印度紫檀	6.52 ± 1.10	3.01 ± 1.51	2.25 ± 0.43	8.81 ± 2.31	301
5 號 地	台灣檫	3.16 ± 1.05	2.24 ± 1.06	1.09 ± 1.07	3.48 ± 0.39	96
	印度紫檀	4.35 ± 1.34	3.11 ± 1.41	1.42 ± 0.46	7.39 ± 3.11	61
	土肉桂	4.01 ± 1.36	2.26 ± 0.71	1.18 ± 0.48	6.44 ± 3.17	47
	桃花心木	4.17 ± 1.66	1.26 ± 0.56	2.00 ± 0.74	4.79 ± 2.54	18
	無患子	3.60 ± 0.84	1.38 ± 0.68	1.45 ± 0.61	4.45 ± 1.84	79
7 號 地	印度紫檀	7.19 ± 1.46	3.26 ± 1.05	2.56 ± 0.50	9.65 ± 3.30	57
	苦楝	5.74 ± 1.44	2.62 ± 1.00	2.23 ± 0.55	6.57 ± 2.61	213

附錄一 觀測站周圍 9 區塊造林樹種、樹高、冠幅、胸高直徑基本資料(續)。

地 號	樹種	樹高(公尺) 平均值	冠幅(公尺) 平均值	枝下高(公尺) 平均值	胸徑(公分) 平均值	樣本 數
8 號 地	水黃皮	2.74 ± 0.96	1.87 ± 1.03	1.23 ± 0.55	5.56 ± 2.49	11
	台灣檫	3.73 ± 1.17	2.45 ± 1.06	1.47 ± 0.43	4.97 ± 2.18	53
	光蠟樹	3.46 ± 1.29	2.02 ± 1.29	1.29 ± 0.86	4.02 ± 1.90	121
	印度紫檀	5.40 ± 3.64	2.58 ± 0.89	1.85 ± 0.60	7.19 ± 2.28	301
	苦楝	4.30 ± 1.42	2.38 ± 1.00	1.52 ± 0.53	5.99 ± 2.71	31
	茄苳	3.62 ± 0.79	2.92 ± 1.08	1.59 ± 0.74	8.70 ± 3.14	27
	桃花心木	5.38 ± 2.01	1.87 ± 0.65	1.66 ± 0.96	6.86 ± 3.02	56
	無患子	2.99 ± 0.84	1.21 ± 0.57	1.32 ± 0.51	3.27 ± 1.28	37
	瓊崖海棠	1.88 ± 0.63	1.03 ± 0.35	0.53 ± 0.42	2.51 ± 1.29	8
9 號 地	印度紫檀	5.75 ± 1.47	2.93 ± 1.02	2.00 ± 0.66	8.67 ± 3.30	103
	波斯皂莢	6.05 ± 1.69	2.85 ± 1.04	1.92 ± 1.20	7.23 ± 2.96	146
	苦楝	9.29 ± 1.92	3.45 ± 1.06	2.43 ± 0.83	11.42 ± 4.08	101
	桃花心木	8.47 ± 2.42	2.13 ± 0.62	2.44 ± 0.76	9.17 ± 2.77	79
	無患子	3.28 ± 0.89	0.61 ± 0.32	1.43 ± 0.59	2.53 ± 0.83	15
	台灣檫	4.47 ± 3.26	2.81 ± 1.07	1.40 ± 1.04	5.79 ± 0.59	252
	欖仁樹	5.91 ± 1.69	3.64 ± 1.40	2.08 ± 0.73	9.14 ± 3.01	139
10 號 地	光蠟樹	2.75 ± 0.91	1.66 ± 0.51	1.09 ± 0.25	3.09 ± 1.12	8
	無患子	4.28 ± 0.74	1.94 ± 1.72	1.60 ± 1.34	5.12 ± 1.55	152
	台灣檫	4.10 ± 1.22	2.11 ± 0.85	1.39 ± 1.21	4.95 ± 2.06	101
11 號 地	台灣檫	3.93 ± 1.20	2.63 ± 0.98	0.96 ± 0.51	4.16 ± 1.95	94
	印度紫檀	4.84 ± 1.69	2.70 ± 1.18	1.08 ± 0.45	5.87 ± 2.71	67
	苦楝	4.55 ± 1.14	1.90 ± 0.72	2.36 ± 0.54	6.13 ± 3.09	70
	無患子	2.84 ± 1.55	1.76 ± 1.38	1.01 ± 0.28	2.68 ± 1.60	8
	欖仁樹	6.55 ± 1.56	4.25 ± 1.08	1.97 ± 0.46	10.05 ± 2.56	110

附錄二 屏東觀測站各風向平均風速基本資料

方位	角度範圍(度)	平均風速(m/s)									
		一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月
N	348.75-11.25	1.40	1.48	1.48	1.41	1.69	1.79	2.28	1.53	2.05	1.15
NNE	11.25-33.75	0.80	1.41	1.09	1.15	1.47	1.94	1.90	1.77	1.75	1.24
NE	33.75-56.25	0.86	1.88	1.69	1.58	1.47	1.74	1.84	1.76	1.68	1.71
NEE	56.25-78.75	1.69	2.23	1.84	1.58	1.62	1.24	1.41	1.21	1.32	1.57
E	78.75-101.25	1.61	1.08	1.07	1.02	1.05	1.35	1.17	1.23	1.27	0.98
SEE	101.25-123.75	0.96	1.21	1.02	1.01	1.12	1.49	1.51	1.57	1.55	0.98
SE	123.75-146.25	0.82	1.36	1.12	1.33	1.19	1.34	1.61	1.66	1.85	1.21
SSE	146.25-168.75	1.14	1.55	1.48	1.55	1.47	1.40	1.97	1.59	2.49	1.21
S	168.75-191.25	1.23	1.60	1.47	1.53	1.55	2.36	1.99	1.48	1.76	1.37
SSW	191.25-213.75	2.03	1.27	1.13	1.43	1.40	1.11	1.63	2.01	2.08	3.24
SW	213.75-236.25	2.38	2.79	3.14	3.09	2.30	1.34	1.76	2.87	3.05	2.37
SWW	236.25-258.75	1.99	2.99	2.75	2.72	2.41	2.03	2.42	2.78	3.32	1.91
W	258.75-281.25	1.80	2.57	2.08	2.40	2.63	2.93	2.62	2.73	3.23	1.80
NWW	281.25-303.75	1.67	2.11	2.16	1.93	2.25	2.25	2.11	1.56	2.98	1.25
NW	303.75-326.25	1.48	1.91	1.99	1.92	2.42	1.92	2.34	1.45	3.19	1.13
NNW	326.25-348.75	1.51	1.82	1.81	1.98	2.61	2.28	1.79	1.17	3.56	1.14

附錄三 屏東試驗地一至十月大氣二氧化碳濃度日平均值

時間	大氣二氧化碳濃度(ppm)									
	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月
00:00	365.50	396.68	387.87	393.39	392.99	406.58	396.74	407.93	424.61	424.90
00:30	366.69	400.16	388.77	393.48	393.12	407.01	402.58	413.30	408.80	417.79
01:00	366.29	403.22	388.77	393.21	391.92	405.71	402.07	418.45	405.19	416.13
01:30	365.77	399.78	389.38	394.82	393.16	408.48	399.27	413.87	413.66	415.56
02:00	365.60	402.46	389.84	395.69	391.65	407.28	398.09	408.96	426.21	416.88
02:30	365.62	403.38	390.98	397.53	391.31	405.12	404.47	412.34	428.02	418.31
03:00	363.56	401.55	392.15	396.42	389.37	408.88	399.90	411.28	413.03	417.89
03:30	363.75	397.86	393.00	396.58	389.75	409.98	399.96	410.42	415.21	419.05
04:00	365.02	401.84	391.72	396.24	391.99	410.49	397.32	415.91	429.98	427.26
04:30	361.83	400.20	391.18	395.82	391.20	408.08	400.68	419.59	440.08	421.91
05:00	363.28	401.16	391.15	393.96	392.48	414.76	398.89	408.46	434.02	419.25
05:30	364.25	400.01	391.82	392.85	391.51	406.27	398.41	413.63	433.77	425.33
06:00	366.38	403.05	392.59	395.99	393.32	407.49	399.96	415.46	430.90	414.12
06:30	365.10	401.30	392.35	397.70	394.85	399.53	398.59	414.77	422.62	420.14
07:00	365.65	402.00	392.97	394.22	395.12	395.37	393.24	419.35	425.44	420.52
07:30	363.88	400.03	392.32	393.52	392.31	393.53	383.69	408.68	413.60	415.17
08:00	368.64	397.47	390.25	392.56	390.04	393.35	385.92	401.29	399.55	411.35
08:30	373.40	395.78	387.46	391.45	388.42	384.18	377.00	396.96	402.45	406.86
09:00	367.38	394.06	386.11	389.16	386.11	380.97	375.49	386.04	398.12	399.70
09:30	365.07	392.93	386.95	388.64	383.20	375.39	376.63	381.49	399.37	391.26
10:00	362.21	392.82	385.82	387.37	382.97	371.92	375.76	381.59	404.00	388.07
10:30	361.15	394.55	383.84	388.60	383.47	377.04	371.30	388.25	399.87	386.52
11:00	359.84	389.96	382.33	385.71	382.35	376.14	367.76	386.87	396.96	386.25
11:30	358.49	388.07	381.27	385.20	382.48	381.43	366.87	379.95	396.93	387.24
12:00	357.51	385.74	380.71	386.12	382.53	385.25	370.22	380.14	382.71	386.63
12:30	358.54	384.82	380.41	387.16	383.58	374.80	375.69	380.31	396.07	395.71
13:00	359.13	384.71	380.70	384.40	381.62	371.63	377.40	378.16	387.18	397.19
13:30	357.92	384.27	381.50	384.61	380.76	376.64	378.50	382.78	396.88	395.16
14:00	358.07	387.01	382.11	383.17	382.68	370.61	368.19	393.95	390.02	396.58
14:30	359.26	386.82	382.57	385.92	382.96	377.09	378.01	392.80	392.46	399.31
15:00	359.29	382.82	382.61	380.42	382.94	382.49	374.45	383.93	381.10	404.92
15:30	359.24	382.32	382.16	383.06	381.43	374.56	365.95	399.57	390.44	401.78
16:00	359.11	385.51	381.67	379.36	381.10	375.41	363.69	395.42	386.60	397.68
16:30	359.35	382.33	381.69	378.90	381.88	379.53	368.29	404.66	396.09	409.35

17:00	358.37	386.45	381.28	378.55	381.35	381.26	377.00	398.40	420.94	398.09
17:30	359.57	384.43	379.65	378.77	384.22	379.44	377.48	384.25	406.55	407.60
18:00	358.92	385.04	379.03	379.91	380.51	378.38	376.92	400.61	398.29	411.83
18:30	359.55	389.45	379.95	382.34	380.47	378.98	382.65	407.04	400.28	413.51
19:00	358.77	389.05	380.51	386.48	381.92	383.02	379.51	402.26	410.37	421.43
19:30	359.60	390.50	381.68	381.12	382.35	392.52	382.31	417.57	414.98	420.46
20:00	359.74	392.74	382.90	382.09	381.52	391.79	382.62	414.63	414.04	418.82
20:30	360.60	394.33	383.37	386.04	382.36	392.28	386.26	412.33	405.12	418.36
21:00	361.20	394.54	384.53	386.37	382.93	397.07	397.18	408.17	428.80	422.61
21:30	363.55	395.05	385.27	387.49	383.81	399.45	394.39	403.88	414.51	416.31
22:00	364.74	395.41	385.59	387.03	384.67	403.84	392.28	405.05	410.63	422.94
22:30	365.46	396.38	386.76	388.15	385.81	401.65	393.29	407.80	426.40	422.45
23:00	366.17	396.47	386.33	389.97	385.95	407.34	397.08	412.50	420.26	427.51
23:30	366.78	395.31	386.11	389.79	387.66	405.70	392.94	413.70	430.34	425.93
平均	362.52	392.66	385.87	386.32	394.21	391.58	385.48	401.97	409.65	410.41

附錄四 屏東試驗地微氣候基礎資料

時間	屏東試驗地氣溫 (°C)									
	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月
00:00	17.09	18.91	20.42	22.13	24.60	25.15	25.51	25.46	23.68	23.38
00:30	16.84	18.54	20.37	21.93	24.59	25.07	25.37	25.37	23.63	23.40
01:00	16.77	18.53	20.24	21.86	24.55	24.97	25.27	25.36	23.58	23.30
01:30	16.81	18.48	20.13	21.74	24.49	24.89	25.18	25.36	23.63	23.30
02:00	16.57	18.35	19.98	21.59	24.40	24.88	25.28	25.36	23.69	23.21
02:30	16.26	18.26	19.87	21.52	24.23	24.80	25.21	25.26	23.62	23.18
03:00	16.24	18.18	19.91	21.49	24.15	24.72	25.09	25.20	23.63	23.18
03:30	16.24	18.21	19.79	21.39	24.01	24.66	25.00	25.21	23.60	23.11
04:00	16.09	17.91	19.77	21.25	23.93	24.66	25.02	25.12	23.41	23.02
04:30	16.01	17.58	19.74	21.19	23.88	24.57	25.00	25.01	23.29	23.01
05:00	15.81	17.44	19.57	21.10	23.81	24.54	24.95	24.98	23.30	22.89
05:30	15.73	17.48	19.31	21.00	23.87	24.50	24.99	24.98	23.27	22.87
06:00	15.49	17.39	19.20	20.86	23.99	24.78	25.07	24.99	23.23	22.84
06:30	15.51	17.15	19.27	21.14	24.82	25.50	25.99	25.56	23.54	23.01
07:00	15.58	17.31	19.87	22.16	25.75	26.42	27.10	26.28	24.10	23.52
07:30	16.09	17.84	21.17	23.29	26.59	27.18	27.94	27.32	24.96	24.26
08:00	16.99	18.81	22.44	24.26	27.17	27.93	28.81	28.16	25.73	25.27
08:30	18.06	20.39	23.36	25.11	27.79	28.28	29.54	28.90	26.37	26.10
09:00	19.42	22.25	24.17	25.94	28.31	28.85	29.99	29.32	26.79	26.75
09:30	20.62	23.48	24.77	26.32	29.05	29.59	30.44	29.77	26.87	27.31
10:00	21.58	24.28	25.18	26.76	29.48	30.05	30.63	30.18	27.30	27.75
10:30	22.27	25.14	25.64	27.14	29.92	29.86	31.13	30.58	27.62	28.12
11:00	22.90	25.74	26.10	27.46	30.10	29.85	31.47	30.92	27.95	28.31
11:30	23.43	26.46	26.21	27.71	30.44	29.83	31.52	31.05	27.68	28.45
12:00	23.71	26.67	26.40	27.84	30.58	29.65	31.78	31.01	28.05	28.07
12:30	24.01	27.19	26.50	27.81	30.50	29.60	31.49	30.83	27.88	28.02
13:00	24.24	26.91	26.51	27.72	30.33	29.84	31.27	30.61	27.59	27.80
13:30	24.30	26.91	26.30	27.68	30.38	29.63	30.59	30.12	27.60	27.69
14:00	24.20	26.64	26.63	27.59	30.34	29.56	30.13	29.39	27.52	27.42
14:30	24.05	26.46	26.48	27.42	30.03	29.41	29.80	28.99	27.59	26.87
15:00	23.90	26.50	26.37	27.28	29.77	29.48	29.53	28.76	27.46	26.61
15:30	23.55	25.96	25.97	27.13	29.65	29.14	28.83	28.68	26.77	26.18

16:00	23.17	25.64	25.64	26.91	29.56	28.74	28.59	28.53	26.37	26.00
16:30	22.58	25.17	25.38	26.59	29.19	28.47	28.48	28.32	25.97	25.81
17:00	21.93	24.59	24.89	26.25	28.74	28.27	28.37	28.01	25.57	25.36
17:30	21.22	23.79	24.43	25.87	28.32	27.91	27.97	27.81	25.47	25.01
18:00	20.65	23.04	23.83	25.31	27.81	27.60	27.67	27.20	25.07	24.78
18:30	20.14	22.46	23.30	24.79	27.30	27.04	27.15	26.58	24.90	24.52
19:00	19.69	21.99	22.81	24.19	26.86	26.49	26.67	26.08	24.77	24.40
19:30	19.33	21.49	22.35	23.84	26.41	26.12	26.30	25.90	24.48	24.24
20:00	18.94	21.06	22.05	23.55	26.08	25.87	25.98	25.70	24.29	24.17
20:30	18.62	20.94	21.84	23.36	25.80	25.74	25.83	25.55	24.25	23.95
21:00	18.35	20.50	21.53	23.17	25.52	25.65	25.89	25.46	24.07	23.86
21:30	18.11	20.19	21.58	22.89	25.23	25.55	25.86	25.53	24.04	23.74
22:00	17.92	19.69	21.30	22.61	25.14	25.44	25.83	25.55	23.97	23.68
22:30	17.65	19.27	20.94	22.43	25.00	25.36	25.70	25.52	23.87	23.56
23:00	17.42	18.97	20.60	22.32	24.90	25.31	25.56	25.40	23.80	23.46
23:30	17.28	18.66	20.53	22.23	24.78	25.21	25.58	25.37	23.74	23.40

時間	屏東試驗地相對溼度 (%)									
	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月
00:00	79.84	82.80	76.87	78.23	81.65	84.35	84.73	85.05	82.96	83.32
00:30	81.09	83.98	76.45	78.80	81.01	84.39	84.92	85.08	82.80	82.80
01:00	81.09	83.73	76.31	78.82	81.02	84.20	84.93	85.11	83.23	82.85
01:30	80.59	84.03	75.98	78.99	80.76	83.93	84.66	84.92	82.87	82.56
02:00	81.29	85.08	75.75	79.37	80.74	83.52	83.57	84.05	81.69	82.67
02:30	82.47	83.88	75.19	79.29	80.63	83.35	83.48	84.17	81.69	82.37
03:00	82.63	84.78	75.63	79.82	80.54	83.47	83.84	84.04	81.43	82.14
03:30	82.51	84.19	76.12	79.81	80.62	83.27	83.86	83.25	81.15	82.37
04:00	82.36	85.26	75.79	79.90	80.60	82.97	83.17	83.58	82.03	82.51
04:30	82.46	87.03	75.43	79.39	80.38	82.96	82.90	83.66	82.78	82.31
05:00	83.22	87.84	75.51	79.55	80.06	82.92	82.93	83.29	82.50	82.72
05:30	83.32	87.89	76.07	78.89	79.73	82.47	82.68	83.24	82.63	82.40
06:00	84.17	88.20	76.32	80.06	79.40	82.13	82.72	83.63	82.68	82.23
06:30	83.69	88.66	75.65	78.90	76.62	79.44	79.36	81.46	81.75	81.77
07:00	83.15	86.30	73.78	75.58	73.74	76.67	75.27	79.07	80.43	80.32
07:30	81.31	83.89	68.65	72.10	70.39	74.66	72.12	75.65	77.70	77.84
08:00	78.30	80.66	63.52	68.55	68.18	72.43	69.69	72.15	74.99	75.04
08:30	74.10	74.48	60.73	65.16	65.64	70.98	65.68	69.83	72.30	72.04

09:00	67.91	67.03	58.91	61.80	63.11	68.55	63.79	68.27	70.56	69.39
09:30	62.01	62.00	56.69	60.71	60.11	64.97	61.56	66.77	69.34	66.09
10:00	57.93	59.03	55.21	59.29	59.11	62.89	61.13	64.66	67.52	64.37
10:30	55.13	55.06	53.51	58.26	57.29	64.54	59.70	63.60	66.86	62.12
11:00	52.99	52.40	52.25	57.46	56.53	64.63	57.68	62.94	65.24	61.77
11:30	51.08	50.11	52.16	57.12	56.18	65.85	58.04	62.89	66.65	61.58
12:00	50.26	49.43	51.32	56.94	55.93	66.81	58.38	63.20	66.21	63.43
12:30	48.78	47.83	51.29	57.50	57.07	66.94	60.18	64.41	67.16	64.93
13:00	48.91	49.11	51.77	57.92	57.48	66.63	61.29	65.73	68.89	66.90
13:30	49.24	50.76	51.42	58.27	57.88	66.65	64.10	68.47	68.55	67.43
14:00	50.69	52.10	52.42	58.38	57.54	66.81	65.69	71.08	69.61	67.90
14:30	51.76	53.10	54.06	59.32	58.59	67.29	67.94	71.68	68.84	70.52
15:00	52.88	53.29	54.43	59.50	60.17	67.26	69.08	72.39	69.44	71.24
15:30	54.07	56.11	56.40	60.02	60.61	68.18	71.29	73.47	71.82	72.28
16:00	56.08	57.43	57.60	60.88	60.73	70.41	72.41	73.69	72.86	73.94
16:30	58.42	59.01	58.94	62.38	62.40	71.66	73.09	74.47	74.48	74.93
17:00	61.34	60.76	61.16	63.91	64.19	72.19	73.96	76.85	76.42	76.72
17:30	64.91	64.27	62.82	65.28	66.41	73.55	75.52	78.13	76.40	78.58
18:00	67.57	67.54	65.87	67.96	68.73	74.52	77.27	80.53	78.34	80.42
18:30	69.69	70.10	68.27	70.47	70.97	77.91	80.10	83.42	80.63	81.56
19:00	71.52	72.04	70.19	72.47	73.35	80.32	82.00	85.51	80.73	81.90
19:30	73.02	73.61	72.36	73.86	75.70	81.95	83.33	86.30	82.05	82.20
20:00	74.34	74.54	73.02	75.13	77.22	83.36	85.03	87.12	82.72	82.20
20:30	75.56	75.36	73.52	75.90	78.33	83.77	85.26	87.22	83.11	82.72
21:00	76.52	76.69	74.73	76.41	79.16	84.05	85.13	87.47	83.75	82.67
21:30	77.36	77.31	74.53	77.04	80.77	84.32	84.75	86.68	83.62	83.04
22:00	78.03	79.56	75.44	77.88	81.10	84.41	84.39	86.31	83.78	82.68
22:30	78.42	81.11	76.40	78.56	81.46	84.40	84.73	86.20	83.67	82.70
23:00	78.77	82.56	77.72	78.67	81.67	84.23	85.01	86.35	83.64	82.80
23:30	79.17	83.76	77.21	78.80	81.99	84.63	84.36	85.98	83.45	82.70

時間	屏東試驗地土溫 (°C)									
	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月
00:00	16.99	18.67	26.99	27.30	29.38	25.49	28.37	26.81	24.65	20.00
00:30	16.76	18.45	26.73	27.08	29.21	25.41	28.27	26.88	24.58	20.03
01:00	16.60	18.11	26.50	26.87	29.04	25.34	28.17	26.65	24.52	20.00
01:30	16.62	18.14	26.28	26.68	28.89	25.22	28.08	26.76	24.46	19.97
02:00	16.52	18.11	26.08	26.51	28.75	25.15	27.99	26.75	24.41	19.90
02:30	16.20	18.07	25.88	26.34	28.61	25.10	27.91	26.64	24.35	19.84
03:00	15.96	17.96	25.86	26.39	28.47	24.97	27.84	26.59	24.30	18.92
03:30	15.89	18.00	25.67	26.22	28.33	24.85	27.76	26.53	24.02	18.90
04:00	15.84	17.82	25.48	26.06	28.20	24.82	27.68	26.39	23.97	18.91
04:30	15.67	17.48	25.31	25.91	28.07	24.78	27.61	26.45	23.92	18.90
05:00	15.51	17.21	25.14	25.76	27.96	24.71	27.54	26.33	23.87	18.92
05:30	15.43	17.16	24.85	25.46	27.85	24.70	27.28	26.18	23.84	18.93
06:00	15.28	17.20	24.70	25.33	27.75	24.96	27.42	26.07	23.80	18.90
06:30	15.14	17.03	24.55	25.22	27.70	25.87	27.38	26.41	23.76	18.91
07:00	15.19	17.00	24.43	25.17	27.72	28.77	27.34	26.44	23.75	18.92
07:30	15.66	17.56	24.41	25.31	27.88	29.50	27.45	27.18	23.75	18.94
08:00	17.09	19.19	24.55	25.65	28.16	31.66	27.28	27.17	23.83	18.98
08:30	19.03	21.41	24.91	26.13	28.53	31.75	26.90	27.13	23.71	18.95
09:00	20.94	24.42	25.51	26.68	28.89	33.15	27.06	27.86	23.82	18.66
09:30	22.05	26.19	26.27	27.39	29.25	33.97	27.64	26.95	23.67	18.92
10:00	23.40	26.53	27.27	28.19	29.67	37.52	28.48	27.55	23.62	18.71
10:30	24.32	27.60	28.22	29.01	30.15	37.01	28.57	28.26	24.32	18.03
11:00	25.01	28.14	29.12	29.85	30.52	36.75	28.86	28.52	24.80	18.38
11:30	25.77	29.15	30.03	30.65	31.01	35.80	29.30	28.77	25.31	19.95
12:00	26.41	29.68	30.91	31.31	31.77	34.56	29.97	28.58	25.50	21.25
12:30	26.91	30.04	31.63	31.91	32.43	33.98	30.34	29.38	25.90	21.55
13:00	27.39	30.28	32.26	32.39	33.16	33.98	30.27	30.14	25.76	21.80
13:30	27.57	30.26	32.87	32.74	33.82	33.53	31.14	30.62	25.64	22.60
14:00	27.51	30.53	33.43	33.02	34.26	33.18	31.23	31.02	25.66	23.26
14:30	27.45	29.90	33.86	33.27	34.53	32.37	30.92	29.58	25.88	22.90
15:00	27.01	29.72	34.07	33.43	34.58	32.54	30.70	29.76	26.42	23.25
15:30	26.19	28.76	34.15	33.45	34.44	32.48	30.33	29.77	25.49	22.77
16:00	25.42	28.06	34.05	33.30	34.35	32.39	30.52	30.12	26.13	22.12
16:30	24.40	27.22	33.77	33.08	34.24	31.90	29.42	29.90	25.62	20.37
17:00	23.23	26.15	33.35	32.78	33.98	31.49	29.30	28.45	25.52	20.66

---

17:30	22.22	25.05	32.79	32.33	33.57	30.63	29.32	29.03	25.40	20.77
18:00	21.29	23.96	32.13	31.80	33.06	29.68	29.84	28.86	25.25	20.72
18:30	20.57	23.09	31.44	31.22	32.66	28.69	29.32	27.03	25.34	20.72
19:00	19.98	22.49	30.79	30.64	32.23	27.68	29.54	27.77	25.00	20.69
19:30	19.48	21.90	30.21	30.12	31.82	26.91	29.01	27.37	25.27	20.63
20:00	19.04	21.29	29.70	29.66	31.47	26.42	29.18	27.65	25.15	20.56
20:30	18.64	20.86	29.25	29.25	31.14	26.14	28.71	27.40	25.03	20.09
21:00	18.35	20.67	28.84	28.90	30.85	25.92	28.95	27.42	24.91	20.02
21:30	17.98	20.39	28.55	28.73	30.57	25.80	28.81	27.12	24.68	20.07
22:00	17.78	19.90	28.02	28.42	30.31	25.75	28.68	27.24	24.73	20.07
22:30	17.51	19.35	27.92	28.13	30.08	25.68	28.57	27.15	24.65	20.08
23:00	17.32	18.86	27.59	27.86	29.87	25.61	28.46	27.05	24.53	20.06
23:30	17.18	18.49	27.28	27.60	29.67	25.50	28.35	26.97	24.48	20.02

---

## 期中審查意見回覆

### (一) 臺灣大學郭教授幸榮

1. 本計畫係以屏東萬隆農場的造林地所設立之觀測塔，監測該林地的二氧化碳通量，作為估算平地造林碳蓄存能力之依據。
2. 本年度研究內容與過去 2 年計畫如何銜接或新擬訂哪些項目、研究方法等未予敘明致不清楚，建議在期末報告予以補強。

→已在期末報告補上

3. 研究林分的林況如何？在過去 2 年是否曾受到颱風、病蟲、人為等因素之干擾而有不同的生長表現與蓄積，以及鄰近地區二氧化碳的排放源等，建議在期末報告予以補述。

→已在期末報告補上

4. 何謂固碳貢獻率？計算式為何？請敘明。

→已在期末報告補上

5. 建議在期末報告能就過去 3 年的研究成果予以整合，且在學術期刊發表，供各界參考。

### (二) 林業試驗所陳研究員財輝

1. 報告第 5 頁平均垂直風速為負？最低是否應為 0；另水平風速過低，與附錄二不同。

→垂直風速負值表風向下吹

2. 第 8 頁表 4 數據如何求出？碳排放如何證明？

→平均值為儀器測出，固碳量由平均值單位換算得來。平均值為正值表二氧化碳離開生態系，即碳排放

3. 第 9 頁表 5 地熱通量為何有負值？

→負值表地熱通量方向為向上，即熱由土壤往大氣方向流動

4. 第 12 頁土溫(在地下 10 公分處調查)大於氣溫，是否合理？

→資料數據經確認無誤，土溫在下午 2 點到次日上午 8 點均高於氣溫

### (三) 嘉義大學何副教授坤益

1. 本研究為持續第 3 年，對於林分中二氧化碳通量監測分析，獲致較穩定之監測資料亦持續收集，符合計畫預期目標。
2. 撰寫內容及參考文獻，請依據格式調整。

→已調整

## 99 年度委託研究計畫期末報告委員審查意見辦理情形表

計畫編號：99-00-5-25

計畫名稱：平地造林對二氧化碳通量監測、分析之研究

審查委員意見	辦理情形
<p>1. 本計畫係以屏東縣新埤鄉臺糖的造林地為對象，觀測二氧化碳的通量及調查林況，以估算該林地的碳吸存能力，為期 3 年，本年度為最後 1 年。</p> <p>2. 本試驗地在 2009 年及 2010 年曾兩度受颱風的侵襲而降低林分密度，致影響二氧化碳之固定能力，在估算林分每公頃的固碳能力時會有偏低的可能，期末報告在結論第四項所列之固碳能力時是否經過修正？</p> <p>3. 本試驗林分的生長狀況（附錄 1）在平地造林的林分中，是否有調查資料可資比較？建議在討論及結論中予以補</p>	<p>1. 感謝委員意見</p> <p>2. 所列為修正後固碳能力</p> <p>3. 有三年的調查資料可資比較</p> <p>4. 一般狀況下周邊排放源應該不會影響結果，除非主風向改變影響 footprint</p>

<p>強。</p> <p>4. 試驗林周邊的二氧化碳排放源是否會影響本試驗林二氧化碳的固定效率?如何排除?</p>	
<p>1. 第 9 頁表 1 之 10 冬是否為 09 冬?</p> <p>2. 第 10 頁表 3 固碳貢獻率為何?如何求得?第 11 頁表 4 最大風速 1.11?第 15 頁表 6 幼齡木吸存量?</p> <p>3. 二氧化碳吸收量觀測主要為微氣象學(渦度相關法)及生態學林木生長測定法兩種。本研究依前者,可直接測量每日的二氧化碳吸收量,甚至林分吸收量的季節性變化,並進而可供國際間二氧化碳通量觀測比較,極具有觀測價值。</p> <p>4. 惟在未鬱閉林分,如何消除二氧化碳通量觀測影響因子,以及風速、日射量、二氧化碳濃度垂直分布、有機</p>	<p>1. 修改為 09 冬(10 年 1 月)</p> <p>2. 固碳貢獻率以各樹種平均淨光合速率配合其栽植株數計算得來。11 頁表 4 誤植,應為 7.90。推測應為土壤呼吸影響生態系碳吸存</p> <p>3. 感謝委員建議</p> <p>4. 感謝委員建議</p>

<p>物分解呼吸與光合成吸收量之計算模式，有待日後加速調查研究。</p>	
<p>1. 本研究經 3 年觀測與作業程序修訂，目前已有穩定之監測成果，尤以本年度 1-10 月間之觀測結果，獲取日夜間二氧化碳濃度之實際變化及其季節性變化，並推估全造林面積固碳效益，對於分析平地造林對二氧化碳通量，有具體之貢獻，值得肯定。</p> <p>2. 部分引用文獻漏列（如第 4 頁），及引用數據誤植等（第 14 頁及表 6），請予以修正。</p>	<p>1. 感謝委員建議</p> <p>2. 已修正</p>