



☐ 公開  
☒ 密件、不公開

執行機關(計畫)識別碼：070101e200

## 農業部林業及自然保育署112年度科技計畫研究報告

計畫名稱：因應淨零排放精進林業部門清冊計算及應用機制探討 (第1年/全程1年)

(英文名稱) Study on the accounting and application mechanism of national inventory of the forestry sector in response to net zero emissions

計畫編號：112農科-7.1.1-務-e2

全程計畫期間：自 112年6月21日 至 112年12月31日

本年計畫期間：自 112年6月21日 至 112年12月31日

計畫主持人：邱祈榮

研究人員：王兆桓、陳子英、楊惇淳、鄧翔耀、黃紀晴、譚亦欣、林澤禹、蘇宸寬、王彥翰、曹銘軒、許喆皓、彭婕綺、賴頡丞、許雯燕、謝雯、伍好晨、黃鈺庭

執行機關：國立臺灣大學



1123971



# 因應淨零排放精進林業部門清冊 計算及應用機制探討

## 第二次進度報告

執行機關：國立臺灣大學 生物多樣性研究中心

國立宜蘭大學 森林暨自然資源學系

112 年 12 月 29 日





## 目 錄

壹、前言 .....	1
貳、計畫目標 .....	1
參、112 年度工作項目及內容 .....	1
一、完成 112 年國家溫室氣體排放清冊報告之林業部門章節編製工作 .....	1
二、精進國家溫室氣體排放清冊報告之林業部門章節編製方式 .....	36
三、建置人工林蓄積量預測模式及研提「森林碳匯調查手冊」初稿 .....	57
四、研析國際最新氣候變化減緩及調適之林業相關議題資料 .....	92
肆、113 年度工作項目及內容 .....	104
一、完成 113 年國家溫室氣體排放清冊報告之林業部門章節編製工作 .....	104
二、精進國家溫室氣體排放清冊報告之林業部門編製方式 .....	105
三、建置人工林蓄積量預測模式及研提「森林碳匯調查手冊」完稿 .....	106
四、研析國際最新氣候變化減緩及調適之林業相關議題資料 .....	109
五、說明 114 年預定辦理之初步工作項目、內容及預算分析，以取得續約之權利 .....	112
伍、預定進度 .....	112
陸、審查標準 .....	114
柒、參考文獻 .....	115
附錄一、1990-2022 年我國林業溫室氣體清冊報告草案 .....	119
附錄二、美國、日本清冊數據 .....	145
附錄三、森林碳匯手冊初稿 .....	148





## 壹、前言

依據我國溫室氣體減量及管理法及其施行細則，各中央目的事業主管機關進行排放量調查、統計成果及清冊報告，每年提送環境保護署彙整。有關林業碳匯量估算部分，應參照「IPCC2006 年國家溫室氣體清冊指南」（以下簡稱 IPCC 指南）、行政院環境保護署所提「國家溫室氣體清冊報告（NIR）格式與內容規劃」，及本局 102-104 年「建置符合 MRV 原則林業溫室氣體清冊編製及試算」科技計畫之編製流程，彙集既有各部會土地利用監測、調查資訊，以掌握林地面積變動狀態，發展主要林型生長與損失碳匯估算方法，據以推估國家森林碳匯效益。

因應國家淨零排放路徑，本局提出「增加森林面積」、「加強森林經營」及「提升國產材利用」三項策略以提升我國森林碳匯能力，為於林業部門清冊報告中確實反映各項推動措施之成效，本計畫將檢討現行清冊計算方法並優化數據蒐集流程。

## 貳、計畫目標

- 一、完成林業部門溫室氣體排放清冊報告編製工作
- 二、精進國家溫室氣體排放清冊報告之林業部門章節編製方式
- 三、建置人工林蓄積量預測模式及研提「森林碳匯調查手冊」
- 四、研析國際最新氣候變化減緩及調適之林業相關議題資料

## 參、112 年度工作項目及內容

### 一、完成 112 年國家溫室氣體排放清冊報告之林業部門章節編製工作

(一)分析歷年森林樣區複查資料，更新年度森林生長量活動數據。

1. 整理林業保育署新給的森林永久樣區及系統樣區複查資料，逐一估算各樣區之蓄積量與碳儲存量。另外，前輪資料如有更新修正者亦一併處理

#### (1) 樣區複查資料的檢查：

將新取得的本輪調查森林永久樣區及系統樣區之複查資料，併入之前已取





得的本輪複查資料；資料如有更新修正者，亦一併處理。本研究已經取得林業保育署 107~111 年系統樣區、森林永久樣區的複查資料，另外含 106 年 4 個事業區的永久樣區及 110 及 111 年度各有 7 個林區的複測樣區，共 2,216 個。由於原始資料是一個樣區一個 excel 檔案，檔案裡面再分為數個工作表，樣區資料與樣木資料分開放在各別的工作表。為了後續分析的效率，本研究先將所有的樣區資料整合放在同一個檔案內，而所有的樣木資料亦整合放在另一個檔案內。樣區複查資料的檢查：依據提昇調查品質之方法，檢查新取得本輪調查的系統樣區、森林永久樣區之複查資料。

#### A. 樣區格式

本計畫樣區檔案名稱的命名方式，以關鍵變數命名，即能區別出系統樣區與永久樣區；系統樣區的檔名以基本圖號 8 碼和樣點編號 3 碼共 11 碼命名，而永久樣區以事業區代碼 2 碼和樣點編號 3 碼共 5 碼命名。有少數幾個樣區資料的欄位格式之排版方式異於其他樣區資料；本研究直接修正排版異常的樣區，使其格式統一。同一個欄位，有些樣區資料是使用“事業區”，而有些是使用“基本圖號”，前者為永久樣區常用格式，後者為系統樣區常用格式；有些永久樣區的檔名誤用 11 碼命名，本研究分析時使用程式判斷以取得其前次調查的檔名，以利於進行後續的分析。

#### B. 樣區面積的檢核

樣區面積經由 PDA 輸出後顯示，代碼 0 指 0.01ha，代碼 1 指 0.05ha，代碼 2 指 0.1ha，代碼 3 指 0.02ha。在樣區面積檢核過程中，會參考以前調查的樣區面積進行比對，如發現調查人員選擇不同的樣區面積時，則會與林管處承辦人員聯繫確認。

#### C. 死亡林木的檢核

本次調查資料沒有樣木的狀態變數以描述林木是為生立木或是死亡木。一般而言，亦可以用無胸徑資料代表死亡。然而本次調查資料有很多樣木對胸徑、樹高、枝下高皆有調查數據，但在備註欄以不同方式表示該樹已經死亡；另外，有些的樣區樹種名稱有「枯死」、「枯木」、「枯倒」、「枯立」





等中名，且其胸徑、樹高、枝下高皆有調查數據。因此在計算蓄積量和 CO<sub>2</sub> 儲存量時需要特別小心，本研究使用程式搜尋關鍵字，判定其是否為死亡林木。另外，備註「找不到」的林木，則視為死亡。

#### D. 樹號查核

近年來資料中絕大部份的樣區已經使用電子標籤(Tag)作為樣木號碼，亦有 Tag 更換的情形發生，使用的新的 Tag 更換舊的 Tag；但有少數樣區在更換 Tag 時產生錯誤，原為一筆樣木資料，變成兩筆資料(1 筆新資料和 1 筆舊資料)，造成生長量異常增加，本研究會將多餘的舊資料備註刪除，程式讀入時會跳過此列。

#### E. 樹高與胸徑之查核

樹高和胸徑有異常的資料，經比對判斷後，需要再向林管處相關人員詢問。樹高值很大時，常常是打錯數字。可以由樹種和胸徑協助判斷其樹高值是否合理。胸徑值過大時，需要查詢上次調查資料。並由兩次的樹高，協助判斷。

### (2) 依地面樣區樣木調查資料及材積式，逐一估算各地面樣區(林分)之蓄積量與碳儲存量。其步驟如下：

- i. 計數樣木株數。
- ii. 以樣木胸高直徑計算樣木的斷面積。
- iii. 各樣木依照樹種別的材積式(如表1)計算單木材積。
- iv. 再乘以擴展係數(即樣區面積的倒數)轉成以公頃為單位的蓄積量。
- v. 森林的碳儲存量(C)是由面積(A)、材積(V)、生物量轉換與擴展係數(BCEF)、全株生物量對地上部生物量之比值(1+R)、碳含率(CF)等相乘而得如下式(IPCC, 2006; Wang et al., 2008)：

$$C = A * V * BCEF * (1+R) * CF$$

國內主要樹種的生物量轉換與擴展係數如表2所示，如果無提供BCEF時，則以基礎密度(BD)乘以地上部擴展係數(EF<sub>a</sub>)取代：

$$BCEF = BD * EF_a$$

- vi. 計算後得各樣區以公頃為單位的株數、斷面積、材積與碳儲存量。





表 1 樹種材積式一覽表

樹種別	材積式	備 註
扁柏 101 紅檜 102 肖楠 103 臺灣杉 119	$V = 0.0000944 * D^{1.9947405} * H^{0.659691}$	林務局(1973)，葉楷勳編製
香杉 104 紅豆杉 105 鐵杉 113	$V = 0.0000728 * D^{1.944924} * H^{0.8002212}$	林務局(1973)，葉楷勳編製
琉球松 108	$V = 0.0000502 * D^{1.66283} * H^{1.45112}$	劉慎孝與林子玉(1970)
冷杉 114 雲杉 115	$V = 0.0001136 * D^{1.71018} * H^{0.97120}$	林務局(1973)，葉楷勳編製
杉木 117	$V = 0.00008440 * D^{1.6790} * H^{1.06550}$	中興大學劉慎孝等三人(1964)共編製
柳杉 118	$V = 0.00009015 * D^{1.98858} * H^{0.68785}$	中興大學劉慎孝等三人(1964)共編製
松類 106,109-112 馬尾松 107 帝杉 116 其他針 150	$V = 0.0000625 * D^{1.77924} * H^{1.05866}$	中興大學劉慎孝等三人(1964)共編製
貴重闊葉樹 201-208	$V = 0.000035555 * H * D * D$	
樟樹 301-304 楠木類 350-352	$V = 0.0000489823 * D^{1.60450} * H^{1.25502}$	羅紹麟、馮豐隆(1987)
槠 櫟 類 401-450 一般闊葉樹 600	$V = 0.00008626 * D^{1.8742} * H^{0.8671}$	陳松藩(1972)於林業試驗所編製
鐵刀木等 501-540 其他闊葉樹	$V = 0.0000464 * D^{1.53573} * H^{1.50657}$	劉慎孝與林子玉(1968) (引自：馮豐隆與鄭美如(1992)編輯)

(引自：林務局第三次森林資源調查)

註：D=胸徑(cm)；H=樹高(m)







表 2 國內主要樹種的生物量轉換與擴展係數 BCEF (或 BD 及  $EF_a$ )、R 及 CF 值

係數值	樹種代號與名稱	引用來源說明
BCEF=0.515	102 檜木	王兆桓等(2008)；林務局(2010)委託李明仁等編輯
BCEF=0.654	103 肖楠	王兆桓等(2008)；林務局(2010)委託李明仁等編輯
BCEF=0.517	110 臺灣二葉松	王兆桓等(2008)；林務局(2010)委託李明仁等編輯
BCEF=0.423	117 杉木，104 香杉	王兆桓等(2008)；林務局(2010)委託李明仁等編輯
BCEF=0.497	118 柳杉	王兆桓等(2008)；林務局(2010)委託李明仁等編輯
BCEF=0.464	119 臺灣杉	王兆桓等(2008)；林務局(2010)委託李明仁等編輯
BCEF=0.510	其他針葉樹	取前面 6 種針葉樹的平均數
BCEF=0.712	201 烏心石	王兆桓等(2008)；林務局(2010)委託李明仁等編輯
BCEF=1.428	202 臺灣櫟	林國銓等(2008) [台東 1.528，苗栗 1.328]
BD=0.500 $EF_a=1.230$ $BCEF=BD*EF_a$	206 大葉桃花心木 206 大葉桃花心木 206 大葉桃花心木	林裕仁等(2002)；林裕仁等(2005) 李宣德，馮豐隆(2010)
BD=0.534 $EF_a=1.340$ $BCEF=BD*EF_a$	301 樟樹 301 樟樹 301 樟樹	王兆桓等(2008) 李宣德，馮豐隆(2010)
BCEF=1.190	502 相思樹	林國銓等(2007)；林國銓等(2009) [台東 1.137，苗栗 1.240]
BCEF=0.855	506 楓香	林國銓等(2009) [台東地區]
BCEF=0.920	508 木麻黃	許原瑞等(2006)
BCEF=0.524	510 木油桐	林國銓等(2007) [苗栗地區]
BCEF=0.520	512 桉樹	許原瑞等(2008)
BCEF=1.106	516 光臘樹	林國銓等(2010)， [六龜 1.137，太麻里 0.894]
BCEF=0.920	其他闊葉樹	取闊葉樹的中位數

註：中括號[]內顯示有不同的地區調查的BCEF。

BD：基礎密度； $EF_a$ ：地上部擴展係數。

R：林木地下部生物量對地上部生物量之比值；

針葉樹=0.22（IPCC預設值），闊葉樹=0.24（各文獻成果之中位數）。

CF：碳含率；

針葉樹=0.4821，闊葉樹=0.4691（林裕仁等，2002）。

本研究將個別樣區的樣木資料，去除死亡林木後，計數樣木株數，以樣木胸高直徑計算樣木的斷面積，依樹種別的材積式計算單木材積，再乘以擴展係數(即樣區面積的倒數)轉成以公頃為單位的蓄積量。其碳儲存量是材積







(V)、生物量轉換與擴展係數(BCEF)、全株對地上部之比值(1+R)、碳含率(CF)等相乘。計算後得各樣區以公頃為單位的株數、斷面積、材積與碳儲存量。

以前永久樣區的調查資料會提供土地利用型變數，但是此次少了該欄位，而有些樣區的樹種組成和舊資料有很大的差異。因此，本研究先以實際樣區內樣木資料所顯示的樹種組成進行分類，依 IPCC 分型，先分類為針葉樹林型、針闊混淆林、闊葉樹林型、竹林、竹針混淆林、竹闊混淆林等 6 種，因為竹針混淆林只有零星幾個樣區，故與竹闊混淆林合併為木竹混淆林。

取得本輪調查至 111 年的樣區數總計 2,216 個，已完成計算各樣區以公頃為單位的株數、斷面積、材積與碳儲存量。分析這些 2,216 個樣區，經剔除 28 個樣區(包含系統樣區中有 7 個崩塌、3 個同 SP2 資料、1 個流失、1 個漏測；永久樣區中有 11 個崩塌、1 個燒毀、1 個流失、1 個無效、1 個重複、1 個全死樣區)，剩下系統樣區與永久樣區的林木資料總計有 2,188 個樣區(含林木 2,109 個、竹子 79 個)，統計結果如表 3 至表 6 所示，其中闊葉樹林型具最多個樣區，有 1190 個。在每公頃平均材積方面，以針葉樹林型的  $639.1\text{m}^3/\text{ha}$  最高，其次依序為針闊葉樹混淆林  $415.3\text{m}^3/\text{ha}$ ，闊葉樹林型  $268.1\text{m}^3/\text{ha}$ ，木竹混淆林  $147.2\text{m}^3/\text{ha}$ ，竹林  $25.4\text{m}^3/\text{ha}$ 。在  $\text{CO}_2$  儲存量方面，雖然闊葉樹的 BCEF 係數值大於針葉樹的係數值，但此次調查針葉樹林型的以公頃為單位的蓄積量遠高於闊葉樹林型的蓄積量，故仍以針葉樹林型的平均  $\text{CO}_2$  儲存量 ( $703.0\text{Mg}/\text{ha}$ ) 為最高，而針闊葉樹混淆林和闊葉樹林型的  $\text{CO}_2$  儲存量也分別達到  $637.0\text{Mg}/\text{ha}$  和  $526.0\text{Mg}/\text{ha}$ 。另外，永久樣區幾乎沒有設立竹林的樣區，表 4 和表 5 顯示永久樣區的針葉樹林型與闊葉樹林型之平均蓄積量和  $\text{CO}_2$  儲存量略高於系統樣區的值，但是永久樣區的針闊混淆林之平均材積低於系統樣區的值。

森林資源調查的系統樣區是來自客觀的取樣，適合於估算清冊資料。而國有林事業區的永久樣區是來自主觀的取樣，適用於各林區森林經營計畫中林型蓄積量之更新，如圖 1 美國林務署整合的監測架構所示。



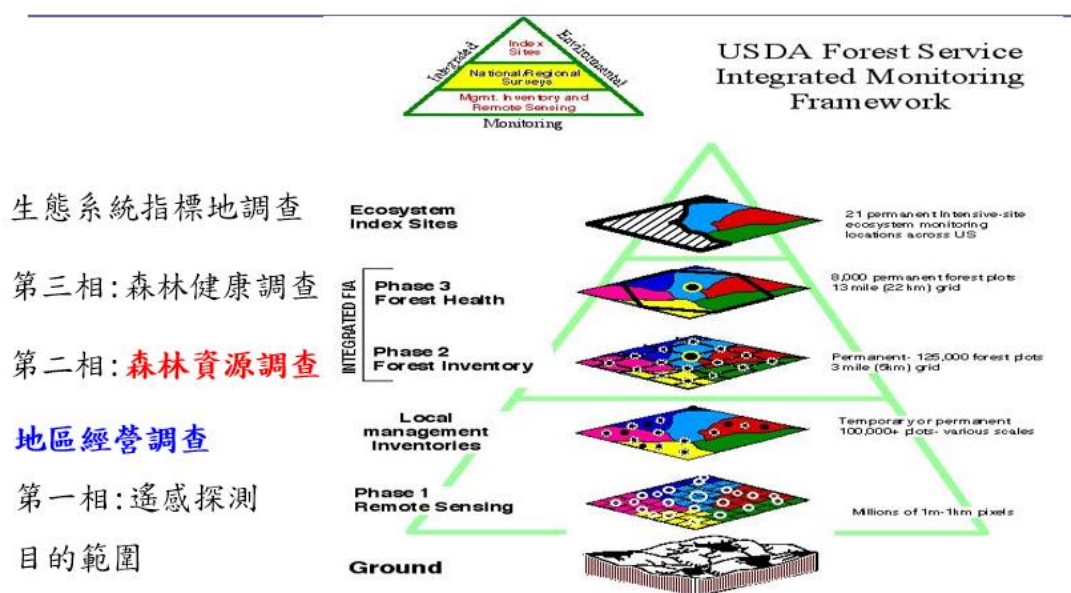


圖 1 美國林務署整合的監測架構圖(引自 USDA Forest Service 2004)

經查 2020 年全球森林資源評估報告 (FAO, 2020)，全世界平均每公頃材積為  $137.1 \text{ m}^3/\text{ha}$ ，其生物量中的碳為  $72.6 \text{ Mg C}/\text{ha}$ ，亦即為  $266.2 \text{ Mg CO}_2/\text{ha}$ 。本研究系統樣區的平均每公頃材積為  $329.4 \text{ m}^3/\text{ha}$  與平均每公頃  $\text{CO}_2$  儲存量為  $536.7 \text{ Mg CO}_2/\text{ha}$ ，兩者皆高於世界的平均值。鄰近國家，日本：蓄積量為  $209.79 \text{ m}^3/\text{ha}$ ， $\text{CO}_2$  儲存量為  $260.3 \text{ Mg CO}_2/\text{ha}$ ；中國：蓄積量為  $87.24 \text{ m}^3/\text{ha}$ ， $\text{CO}_2$  儲存量為  $145.4 \text{ Mg CO}_2/\text{ha}$ ；越南：蓄積量為  $83.17 \text{ m}^3/\text{ha}$ ， $\text{CO}_2$  儲存量為  $136.8 \text{ Mg CO}_2/\text{ha}$ 。本研究的系統樣區僅涵蓋臺灣的國有林事業區，其每公頃蓄積量高於日本，且遠高於中國和越南。另外，一般而言闊葉樹種的碳儲存量之相關的綜合轉換係數會大於針葉樹種，而日本的樹種是以針葉樹為主，故臺灣與日本平均每公頃  $\text{CO}_2$  儲存量的差額會大於兩國平均每公頃材積的差額。

竹子資料總計有 79 個樣區，其統計結果如表 6 所示，本研究將竹針混淆林與竹闊混淆林合併成木竹混淆林。由竹子的生物量所轉換的  $\text{CO}_2$  儲存量，竹林為  $115.4 \text{ Mg}/\text{ha}$ ，木竹混淆林為  $39.4 \text{ Mg}/\text{ha}$ 。另外，考慮這些樣區裡面，由林木的材積量所轉換的  $\text{CO}_2$  儲存量(如表 3)，竹林為  $49.8 \text{ Mg}/\text{ha}$ ，木竹混淆林為  $282.0 \text{ Mg}/\text{ha}$ ，如果同時考慮樣區內的竹子和林木的  $\text{CO}_2$  儲存量，竹林為  $165.2 \text{ Mg}/\text{ha}$ ，而木竹混淆林為  $321.4 \text{ Mg}/\text{ha}$ 。





表 3 2018#~2022\*合併永久樣區和系統樣區之各林型平均每公頃蓄積量與 CO<sub>2</sub> 儲存量之統計

項次	分型名稱	樣區	平均株數 (株/ha)	最小	最大	標準差	平均斷面積 (m <sup>2</sup> /ha)	最小	最大	標準差	平均材積 (m <sup>3</sup> /ha)	最小	最大	標準差	平均 CO <sub>2</sub> (Mg/ha)	最小	最大	標準差
1	竹木混淆林	45	687.6	0.0	1380.0	350.7	21.5	0.0	58.4	12.9	147.2	0.0	546.9	105.4	282.0	0.0	746.0	190.2
2	竹林	34	120.0	0.0	1260.0	286.7	3.5	0.0	35.0	8.1	25.4	0.0	210.9	59.4	49.8	0.0	413.9	116.6
3	針葉樹林型	619	949.0	80.0	3150.0	515.5	77.4	0.8	493.1	48.7	639.1	2.1	4058.3	497.6	703.0	2.3	4463.6	547.3
4	針闊混淆林	300	1148.7	100.0	3850.0	643.7	56.0	4.6	156.9	29.2	415.3	17.5	1532.6	278.1	637.0	26.8	2350.5	426.4
5	闊葉樹林型	1190	1011.8	0.0	3840.0	541.4	40.1	0.0	171.0	22.3	268.1	0.0	1464.2	198.1	526.0	0.0	2873.1	388.8

註：標準差= $\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)}$ ，x：樣區特徵值(例如：株數、斷面積、材積)，n：樣區數量。

此處林型是暫時以地面樣區的針、闊葉樹種材積比例而定。

本表中的竹林和木竹混淆林僅計算樣區內林木的 CO<sub>2</sub> 儲存量

#有 4 個林區管理處在 2017 年已開始進行本輪調查、\*有 7 個林區管理處有 2021 及 2022 年的資料。

表 4 2018~2022\*系統樣區之各林型平均每公頃蓄積量與 CO<sub>2</sub> 儲存量之統計

項次	分型名稱	樣區	平均株數 (株/ha)	最小	最大	標準差	平均斷面積 (m <sup>2</sup> /ha)	最小	最大	標準差	平均材積 (m <sup>3</sup> /ha)	最小	最大	標準差	平均 CO <sub>2</sub> (Mg/ha)	最小	最大	標準差
1	針葉樹林型	187	916.6	80.0	2980.0	547.9	75.3	0.8	493.1	58.3	616.5	2.1	3618.0	544.7	678.0	2.3	3979.4	599.1
2	針闊混淆林	151	1252.0	280.0	3580.0	689.5	56.3	10.9	156.9	29.3	421.2	48.5	1532.6	283.9	646.0	74.3	2350.5	435.4
3	闊葉樹林型	742	997.1	0.0	3840.0	534.9	39.5	0.0	143.5	22.5	263.3	0.0	1401.4	199.5	516.6	0.0	2749.9	391.5

註：標準差= $\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)}$ ，x：樣區特徵值(例如：株數、斷面積、材積)，n：樣區數量。

此處林型是暫時以地面樣區的針、闊葉樹種材積比例而定。

本表中的竹林和木竹混淆林僅計算樣區內林木的 CO<sub>2</sub> 儲存量。

\* 有 7 個林區管理處有 2021 及 2022 年的資料。





表 5 2018#~2022\*永久樣區之各林型平均每公頃蓄積量與 CO2 儲存量之統計

項次	分型名稱	樣區	平均株數 (株/ha)	最小	最大	標準差	平均斷面積 (m <sup>2</sup> /ha)	最小	最大	標準差	平均材積 (m <sup>3</sup> /ha)	最小	最大	標準差	平均 CO2 (Mg/ha)	最小	最大	標準差
1	針葉樹林型	432	963.1	140.0	3150.0	500.9	78.3	8.5	377.1	43.9	648.9	11.0	4058.3	476.1	713.8	12.1	4463.6	523.7
2	針闊混淆林	149	1044.1	100.0	3850.0	577.4	55.7	4.6	154.2	29.3	409.4	17.5	1407.9	272.8	627.9	26.8	2159.1	418.4
3	闊葉樹林型	448	1036.0	80.0	3650.0	551.9	41.0	3.8	171.0	21.9	276.0	15.6	1464.2	195.8	541.5	30.7	2873.1	384.1

註：標準差= $\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)}$ ，x：樣區特徵值(例如：株數、斷面積、材積)，n：樣區數量。

此處林型是暫時以地面樣區的針、闊葉樹種材積比例而定。

本表中的竹林和木竹混淆林僅計算樣區內林木的 CO<sub>2</sub> 儲存量。

#有 4 個林區管理處在 2017 年已開始進行本輪調查、\*有 7 個林區管理處有 2021 及 2022 年的資料。

表 6 2018~2022\*系統樣區為竹林與木竹混淆林之平均每公頃生物量及 CO2 儲存量

項次	分型名稱	樣區數	項目	平均個體數	最小	最大	標準差	平均生物量/材積	最小	最大	標準差	平均 CO <sub>2</sub>	最小	最大	標準差
1	竹林	34	竹子	9176.5 (桿/ha)	0	45900	10192.4	66.5 (Mg/ha)	0.0	295.4	67.7	115.4 (Mg/ha)	0.0	512.5	117.5
			林木	120.0 (株/ha)	0	1260	286.7	25.4 (m <sup>3</sup> /ha)	0.0	210.9	59.4	49.8 (Mg/ha)	0.0	413.9	116.6
2	木竹混淆林	45	竹子	1524.4 (桿/ha)	0	12200	2973.8	22.7 (Mg/ha)	0.0	264.8	47.7	39.4 (Mg/ha)	0.0	459.4	82.7
			林木	687.6 (株/ha)	0	1380	350.7	147.2 (m <sup>3</sup> /ha)	0.0	546.9	105.4	282.0 (Mg/ha)	0.0	746.0	190.2

註：生物量方程式：孟宗竹、桂竹（王義仲 2009），麻竹（陳財輝等 2012）；BEF=1.40，R=0.46（呂錦明與陳財輝（1992））；CF=0.4732（林裕仁等 2011）。

本表中的竹林和木竹混淆林僅計算樣區內竹子的 CO<sub>2</sub> 儲存量。

\* 有 7 個林區管理處有 2021 及 2022 年的資料。





(二) 依照林業碳匯估算標準流程，配合本局林業統計數據以及前項工作成果之森林生長量活動數據，進行 1990 至 2021 年之林業活動碳匯計算，並依據行政院環境保護署所提「國家溫室氣體清冊報告（NIR）格式與內容規劃」及不確定性分析表單，撰擬林業部門溫室氣體排放清冊報告。

IPCC2006 指南提供二個基本碳儲存變化量的估算方法，分別為增減法（Gain-Loss Methods）及儲存量差異法（Stock-Difference Methods）；前者著重於不同時期碳量的增加及減少，後者則討論不同時期碳儲存量的變化。由於國內全面性的森林調查通常間隔較久，無法準確推算各年度的碳儲存量情形，因此過去計算均採使增減法，以年度林地維持林地面積為基準，分別估算出不同林型的面積有多少，再配合不同林型的年生長量估算出不同林型年度碳增加量，再扣除掉當年度因各種原因致使林地產生碳排放量為碳減少量，兩者相加減即為年度森林碳匯數量。依據前期計畫所建立臺灣林業活動溫室氣體清冊編製流程，計算所需活動數據主要為年度森林面積與年度生長量兩個數據地提供：

#### 1. 年度森林面積

年度森林面積可分為林地維持林地與非林地轉成林地兩部分，其中非林地轉成林地面積能以年度造林面積做為活動數據來源，相對單純可靠。至於林地維持林地森林覆蓋面積，則常隨各種自然(崩塌、風倒及火燒)及人為原因(濫墾、砍伐等)，致使影響年度生長量的森林覆蓋面積，會隨之每年變動，尤其從森林覆蓋變成沒有森林覆蓋時，該區域即不應計算其年度生長量。基於此，年度森林面積資訊的獲取實務操作上，為求算出年度林地維持林地的年度森林面積，2009 年後之林型面積，以第四次森林資源調查成果（含事業區內及事業區外）的土地利用圖為森林基線，包含天然針葉林、天然針闊葉混淆林、天然闊葉林、人工針葉林、人工針闊葉混淆林、人工闊葉林、木竹混淆林和竹林等八種林型分布做為林地維持林地面積基線。於 2010 年至 2016 年，考量林地崩塌主要為林地覆蓋的改變，並非使用狀態的改變，因此仍屬於林地維持林地的狀態，但由於林地崩塌，其覆蓋的林木亦皆隨之崩落，







無法持續生長，乃依據林業保育署委託成功大學執行「運用衛星影像於全島崩塌地判釋與災害分析」研究成果，將此種林地崩塌的面積予以扣除，並將各年度崩塌地圖層以空間聯集的方式累加，取得年度總累計崩塌面積，再採取排除方式來運算，以第四次臺灣森林資源調查成果的森林面積為森林基線面積，透過森林基線面積扣除每年度總累積崩塌面積。因 2017 年「運用衛星影像於全島崩塌地判釋與災害分析」計畫調整研究期程，因此 2017 年起崩塌地資料使用並分析林業保育署執行之森林樣區調查及土地覆蓋型圖編修成果。林業保育署於 2013 年完成第四次全國森林資源調查後，為掌握森林面積之動態，規劃建立長期森林資源監測體系，整併既有國有林事業區檢訂作業，推動「森林資源調查暨國有林事業區檢訂土地覆蓋型及航照樣點圖資更新作業」計畫，以持續性、逐年辦理更新的方式，取代以往專案性的調查，比照國際上聯合國糧農組織(FAO)或美、日等國家作法，每 5 年發布一次全國暨各林區森林資源狀況報告。因此，2018 年崩塌面積取自前揭更新作業成果，所產出 2013-2022 年的坡地崩塌區域，並聯集「運用衛星影像於全島崩塌地判釋與災害分析」成果之 2010-2016 年崩塌區域，做為估算排除生長量區域面積。

本年度修正以 2009 年第四次森林資源調查所得的森林面積 2,155,140 公頃為基準(表)，並與 1991 年第三次森林調查各林型面積做內插，求得 1991-2009 年的森林面積並取代過去 1991-2009 年的數據。修正後之 2022 年度林地維持林地面積為 2,188,236 公頃如下表：

表 7 調整後 1990 至 2022 年林地維持林地面積（單位：公頃）

林型 年份	天然 針葉林	天然針闊 葉混淆林	天然 闊葉林	人工 針葉林	人工針闊 葉混淆林	人工 闊葉林	木竹 混淆林	竹林	總計
1990	220,100	286,376	975,800	218,400	37,287	144,600	67,537	152,300	2,102,400
1991	220,100	286,376	975,800	218,400	37,287	144,600	67,537	152,300	2,102,400
1992	219,324	277,044	995,550	211,415	38,155	143,578	70,171	150,093	2,105,330
1993	218,548	267,713	1,015,300	204,430	39,023	142,556	72,805	147,886	2,108,261
1994	217,772	258,381	1,035,050	197,445	39,891	141,534	75,438	145,679	2,111,190
1995	216,996	249,050	1,054,800	190,460	40,759	140,512	78,072	143,472	2,114,121
1996	216,220	239,718	1,074,550	183,475	41,627	139,490	80,706	141,264	2,117,050





1997	215,445	230,386	1,094,300	176,490	42,495	138,467	83,339	139,057	2,119,979
1998	214,669	221,055	1,114,050	169,505	43,364	137,445	85,973	136,850	2,122,911
1999	213,893	211,723	1,133,800	162,520	44,232	136,423	88,607	134,643	2,125,841
2000	213,117	202,392	1,153,550	155,535	45,100	135,401	91,240	132,436	2,128,771
2001	212,341	193,060	1,173,299	148,550	45,968	134,379	93,874	130,229	2,131,700
2002	211,565	183,729	1,193,049	141,565	46,836	133,357	96,508	128,022	2,134,631
2003	210,789	174,397	1,212,799	134,580	47,704	132,335	99,141	125,815	2,137,560
2004	210,013	165,066	1,232,549	127,595	48,572	131,313	101,775	123,608	2,140,491
2005	209,237	155,734	1,252,299	120,610	49,440	130,291	104,409	121,400	2,143,420
2006	208,461	146,403	1,272,049	113,625	50,308	129,269	107,042	119,193	2,146,350
2007	207,685	137,071	1,291,799	106,640	51,176	128,246	109,676	116,986	2,149,279
2008	206,909	127,740	1,311,549	99,655	52,044	127,224	112,310	114,779	2,152,210
2009	206,134	118,408	1,331,299	92,670	52,913	126,202	114,943	112,572	2,155,140
2010	204,950	117,573	1,323,524	92,417	52,681	125,289	114,382	112,215	2,143,031
2011	204,503	117,366	1,321,770	93,302	52,699	127,835	114,296	112,323	2,144,094
2012	203,957	117,103	1,319,728	94,569	52,703	130,681	114,259	112,551	2,145,551
2013	203,765	116,955	1,318,232	96,289	52,703	133,580	114,218	112,785	2,148,527
2014	203,424	116,714	1,316,654	97,720	52,659	136,482	114,183	113,067	2,150,903
2015	203,297	116,620	1,315,897	98,707	52,645	139,931	114,161	113,187	2,154,445
2016	203,203	116,559	1,315,323	99,301	52,626	142,729	114,146	113,282	2,157,169
2017	203,041	116,415	1,314,321	100,443	52,598	146,569	114,133	113,378	2,160,898
2018	202,975	116,322	1,313,717	102,148	52,586	149,986	114,132	113,476	2,165,342
2019	202,848	116,265	1,313,035	103,215	52,414	155,855	114,132	113,546	2,171,310
2020	202,785	116,210	1,312,327	104,729	52,414	162,467	114,122	113,664	2,178,718
2021	202,778	116,199	1,312,239	105,759	52,411	166,586	114,119	113,734	2,183,826
2022	202,745	116,162	1,311,881	106,549	52,348	170,639	114,112	113,800	2,188,236

2009 年後的森林面積因為前述調整面積，因此也同樣需做修正，2010 年後各年度的森林面積以新的 2009 年森林面積扣除各年度累計崩塌地而得。2011 年後「其他土地轉變為林地」經過 20 年之過渡期，計算時納入林地維持林地的面積估算。

崩塌地面積由於 2017-2019 年部分崩塌面積重複計算的問題，因此將 2017-2019 年的資料做更新，將重複計算的面積扣除(上表)。並新增 2022 年度的崩塌地面積。







表 8 調整後 2010 至 2022 年因崩塌或風災減少森林覆蓋面積

林型 (公頃)	天然 針葉林	天然針 闊葉混 淆林	天然 闊葉林	人工 針葉林	人工針 闊葉混 淆林	人工 闊葉林	木竹 混淆林	竹林	總計
2010	1,184	835	7,775	253	232	913	561	357	12,109
2011	447	207	1,755	74	49	150	87	53	2,821
2012	545	263	2,041	83	48	157	37	24	3,197
2013	192	148	1,496	60	47	75	41	45	2,104
2014	341	241	1,578	50	45	97	35	21	2,408
2015	127	94	757	18	13	39	22	10	1,080
2016	94	62	574	19	20	34	15	17	834
2017	162	144	1,002	79	27	60	13	11	1,500
2018	66	93	604	5	12	21	1	2	804
2019	128	57	682	374	172	109	0	0	1,521
2020	62	55	708	2	2	40	9	11	890
2021	7	10	89	1	3	6	3	0	120
2022	34	37	358	6	63	15	8	5	524
累計減 少面積	3,389	2,246	19,418	1,024	733	1,716	832	555	29,913
累計減 少比例	11%	8%	65%	3%	2%	6%	3%	2%	100%

## 2. 年度生長量

由前述配合林業保育署地面樣區複查及航照樣點，更新年度森林生長量活動數據，做為不同林型年度生長量使用，據以計算年度林業活動碳匯計算。

另外在其他活動數據方面，尚有每年伐採量(H)、每年收穫薪材材積(FG<sub>Trees</sub>)及受干擾影響的森林面積(Disturbance)與損失材積量(DV)等碳排放量的活動數據。其相關活動數據均整理自林業保育署林業統計資料。綜合上述活動數據，將可進行 1990 至 2022 年之林業活動碳匯計算。

依據我國行政院環境保護署所提「國家溫室氣體清冊報告(NIR)格式與內容規劃」，撰擬 1990-2022 年我國林業溫室氣體清冊報告，包含「6.1 部門概述」、「6.2 森林土地」、「6.2.1 維持為森林土地之森林土地」、「6.2.2 轉變為森林土地之土地」。

不確定性分析方面推算臺灣林地碳量與收穫林產品碳量之不確定性採用「誤差傳遞法」，因蒙地卡羅法進行估算時在數據的應用上較為複雜且須





統計軟體的協助，而誤差傳遞法即可符合目前國內資料處理的需求。

林地碳量的不確定性討論對象包含林業活動數據（如土地使用面積）與排放係數（如各種碳轉換係數）二大項目。其中因林業活動數據取自全國森林資源調查，第四次森林資源調查以航照圖判釋，繪製土地利用型圖，無法以統計之方式估算不確定性，且其為國家統計資料，是唯一的資料來源，因此此部分的不確定性暫時予以忽略。在此背景之下，臺灣林地碳量的不確定性分析以排放係數為主要對象（包含碳轉換係數與年生長量）。

進行不確定性分析有四個主要步驟。首先，整理碳轉換係數文獻中的研究成果與標準差或標準誤，不確定性是由平均值和標準差所推估（95%信賴區間），計算每篇文獻各樹種之不確定性；第二步則視取平均與中位數的過程為不同變量相加，採用誤差傳遞法的加法規則計算出各係數之不確定性；因估算林地碳量時，各個排放係數為相乘的關係，故依據誤差傳遞法乘法規則來合併係數之不確定性；最後，國家林業部門溫室氣體清冊是將各林型排放/移除的碳量相加，因此再以加法規則合併各林型不確定性，再合併林地維持林地與土地轉變為林地兩部分之不確定性。

由於今年林地維持林地之更動，下表為計算本年度及歷年碳吸存量之結果，2022 年度之總碳移除量為 21,835 公噸：





表 9 1990 至 2022 年林業部門碳移除量變化

(單位：ktCO<sub>2</sub>e)

年份	林地			總二氧化碳 碳移除量 ΔCO <sub>2</sub>	不確定性 (%)
	林地維持林地		其他土地轉變 為林地 生物量 碳移除量 ΔCO <sub>2</sub> G		
	生物量 碳移除量 ΔCO <sub>2</sub> G	生物量 碳排放量 ΔCO <sub>2</sub> L			
1990	-23,902.42	607.25	-90.76	-23,385.93	7.92
1991	-23,902.42	2,502.94 <sup>1</sup>	-90.76	-21,490.24	7.50
1992	-23,740.99	333.15	-135.99	-23,543.83	8.00
1993	-23,579.55	215.80	-182.45	-23,546.20	8.03
1994	-23,418.11	189.72	-230.49	-23,458.88	8.04
1995	-23,256.68	201.99	-285.11	-23,339.80	8.04
1996	-23,095.24	559.32	-315.07	-22,850.99	7.94
1997	-22,933.80	266.20	-392.43	-23,060.03	8.04
1998	-22,772.36	326.03	-440.18	-22,886.51	8.05
1999	-22,610.93	400.62	-553.38	-22,763.69	8.03
2000	-22,449.49	388.77	-656.02	-22,716.74	8.05
2001	-22,288.05	1,111.82 <sup>2</sup>	-673.30	-21,849.53	7.88
2002	-22,126.62	166.59	-747.38	-22,707.41	8.22
2003	-21,965.18	227.05	-886.16	-22,624.29	8.23
2004	-21,803.74	243.37	-981.32	-22,541.69	8.27
2005	-21,642.31	368.56	-1,016.11	-22,289.86	8.29
2006	-21,480.87	250.78	-1,029.21	-22,259.30	8.42
2007	-21,319.43	307.59	-1,061.96	-22,073.80	8.48
2008	-21,157.99	198.76	-1,122.50	-22,081.73	8.61
2009	-20,996.56	2,753.45 <sup>3</sup>	-1,144.82	-19,387.93	7.96
2010	-20,889.44	218.09	-1,217.68	-21,889.03	8.67
2011	-20,906.55	140.35	-1,180.62	-21,946.82	8.71
2012	-20,932.22	145.14	-1,172.56	-21,959.64	8.69
2013	-20,969.81	135.33	-1,139.44	-21,973.92	8.69
2014	-21,003.81	196.95	-1,078.79	-21,885.65	8.67
2015	-21,040.14	188.79	-1,049.03	-21,900.38	8.68
2016	-21,068.11	153.01	-1,010.79	-21,925.89	8.70
2017	-21,105.16	107.14	-963.25	-21,961.27	8.72
2018	-21,148.04	82.69	-918.17	-21,983.52	8.74
2019	-21,201.90	115.73	-830.67	-21,916.84	8.74
2020	-21,271.30	90.23	-723.94	-21,905.01	8.78
2021	-21,318.12	121.19	-653.59	-21,850.51	8.78
2022	-21,358.53	113.50	-589.01	-21,835.04	8.80

備註：

1. 1991 年其他災害包括颱風災害次數共 7 次，面積共 295.74 公頃，被害材積 1,348,998.61m<sup>3</sup>，損失材積 1,348,992.06 m<sup>3</sup>。
2. 2001 年除丹大、梨山、雪山東峰及陽明山國家公園所發生之五次森林大火外，尚發生 59 次小火警，火災受損面積廣達 395 公頃，森林資源損失慘重。
3. 2009 年莫拉克風災對臺灣中、南部造成嚴重災害，尤其在高雄、屏東部分地區 3 天內降下超過 2,500 毫米的雨量，產生約 125 萬噸漂流木，致林木損失材積量大。

本計畫依據我國行政院環境保護署所提「國家溫室氣體清冊報告(NIR)格式與內容規劃」，完成撰擬 1990-2022 年我國林業溫室氣體清冊報告草案，





草案結果如附錄一。

**(三) 蒐集國內進出口資料，包含非林業用地木材生產數量，完成 1990 至 2021 年國內收穫林產品（HWP）排放量之計算及說明。**

收穫林產品（Harvested Wood Product, HWP）包含所有搬離自收穫林地的木質材料，其中亦包含樹皮（bark）；另外，枯枝和其他被留置於收穫林地的殘餘部分，在 IPCC 土地利用分類中被視為死有機質（dead organic matter）（IPCC, 2006）。除此之外，木材加工後的產品，如製材（lumber）、合板（panel）、紙（paper）等，皆為收穫林產品所包含的項目。收穫林產品被視為一碳庫，碳留置於其中的時間隨產品的使用情形而變動，例如薪炭材和廢料可能於收穫當年即燒毀、不同種類的紙張（包括再生紙）的平均使用壽命少於五年、被作為建材上的製材或合板可維持數十年甚至百年之久（IPCC, 2006）。

收穫林產品所儲存的碳量，會隨著林產品的使用在人類社會中流動、延遲其釋放至大氣中的時間。自林木收穫至林產品棄置的木材存置時限，可將該時期的碳流動情形分為三個階段，其中亦須考慮林產品進、出口的情況（林俊成，2002）。第一階段始於林木收穫後，自林地取出可利用之木材，而其他部分則留置於林地成為殘材，經時間收分解作用而將碳釋放於大氣中。第二階段開始前應先將收穫材積加上進口木材及減去出口木材的材積，計算結果為供給國內林產工業加工使用的木質材料材積；在加工的過程中，一部分的材積將成為廢料，遭到棄置或燃燒而將碳釋放回大氣中，大部分則成為林產品供人們消費使用。在國內市場上流動的林產品，除了在本國加工的成品外，亦包括進口林產品以及需扣除出口林產品。最後一個階段為林產品到達使用年限，而不同的林產品具有不同的使用年限，且部分林產品可回收成為木質材料、再製成不同的產品，另外不可回收的部分即成為廢棄物，經由燃燒或棄置於固體廢棄物處理場（Solid Waste Disposal Sites, SWDS）中氧化，最後將碳釋放回大氣中。當再次於森林收穫的林地造林時，林木生長將再次將碳儲存於材積中，再加上長時間消費使用的林產品，將增加收穫林產品的





碳儲存量。由此可知，若對森林資源及林產品進行適當的管理，將能影響國內二氧化碳的排放水準。

## 1. 影響 HWP 碳量之變數

表 10 為 IPCC 指南根據不同計量法估算 HWP 碳庫時整理的 5 個變數，其中有二個變數又分為二個項目，即「使用中的 HWP(A)」和「棄置於 SWDS 的 HWP (B)」：

表 10 算 HWP 碳庫之碳移除/排放量時使用的變數 資料來源：IPCC (2006)

定義	名稱	
	使用中之 HWP	廢棄之 HWP
1. 報告國內之 a)使用中及 b)廢棄狀態的 HWP 年碳變化量，僅討論國內消費的產品， $\Delta C_{HWP\ DC} = \Delta C_{HWP\ IU\ DC} + \Delta C_{HWP\ SWDS\ DC}$	變數 1A $\Delta C_{HWP\ IU\ DC}$	變數 1B $\Delta C_{HWP\ SWDS\ DC}$
2. 報告國內之 a)使用中及 b)廢棄狀態的 HWP 年碳變化量，僅討論國內收穫的產品(包含出口至其他國家)， $\Delta C_{HWP\ DH} = \Delta C_{HWP\ IU\ DH} + \Delta C_{HWP\ SWDS\ DH}$	變數 2A $\Delta C_{HWP\ IU\ DH}$	變數 2B $\Delta C_{HWP\ SWDS\ DH}$
3. 進口至報告國之 HWP 的碳量，包括所有木質產品：原木、木材產品、紙、紙漿和回收紙	$P_{IM}$	
4. 自報告國出口之 HWP 的碳量，包括所有木質產品：原木、木材產品、紙、紙漿和回收紙	$P_{EX}$	
5. 年度收穫原木製成產品的碳量(報告國收穫之原木，包括木質燃料)	$H$	

變數 1A、1B、2A 和 2B 分別表示 HWP 的碳量年變化量，前二個變數討論國內消費的產品，後二個變數討論國內收穫原木加工製成的產品；另外，亦對進出口產品（PIM、PEX）以及國內收穫原木製成之產品（H）的碳量進行估算。

國際既有收穫林產品（HWP）不同係數及估算方法有下列 3 種方法：

### ① 儲量變化法

儲量變化法(SCA)將一個國家視為一密閉式系統，不論木材的來源地，







根據國家使用的 HWP 數量估算其一年當中的碳儲存變化量，亦即產品可能進口自不同國家，但最終碳量還是計算於報告國之下（IPCC，2003），因此碳儲存變化量為變數 1A，國內消費使用之碳儲存量，加上變數 1B，國內廢棄之碳排放量。因此，當木質產品因貿易而出口至消費國時，產品出口國的碳儲存量即降低；反之，消費國的碳儲量隨之增加，成為碳儲存的一方。但當 HWP 到了使用年限而廢棄不用時，其分解、釋放的碳量將視為消費國的碳排放量（UNFCCC，2003）。

## ② 生產法

生產法(PA)主要估算報告國中二個碳庫的碳儲存變化量，分別為森林碳庫以及自該國林地收穫之木材所製造的木質產品碳庫，後者包括出口至國外及留在國內使用的產品。此方法與其他二個方法最大的差異為當碳儲存量轉移至不同國家時，該碳儲存量還是維持在生產國；因此其碳變化量估算為變數 2A 和變數 2B 的總和，各自代表生產產品的碳儲存變化量以及棄置之國產產品碳排放量（IPCC，2006）。

生產法估算 HWP 碳庫的碳儲存量時，皆將變化量歸於生產國之下，消費國則無碳量的計算問題。此計量方式主要以一個地區的木材動向為基礎，包括木質產品在國外的流向及配置情形；而估算時使用的數據，如木材的利用和配置以及木質產品的消費情形，則需結合不同國家的資料。生產國主要的碳排放量來自木材收穫時的排放，其他製成產品的部分則被視為儲存於其中的碳量，直至使用年限才將碳釋放回大氣中。

## ③ 大氣流動法

大氣流動法(AFA)與上述二種方法不同，碳量的計算未將焦點放置於儲存量變化，而是直接注重往返於大氣中碳通量。主要以國家為界，估算大氣與森林碳庫及木質產品碳庫之間的碳通量（IPCC，2006）。

此方法中，由大氣儲存的碳量源自於森林的生長，因此儲存量歸於生產國之下，而因木質產品氧化所排放的碳量則歸於消費國之下；意即生產國的碳變化量報告僅包含收穫林木所造成的碳排放量。另外，與儲量變化法相反，





消費國不因進口林產品而增加其碳儲存量，反而會因木質產品棄置於國內而增加該國的碳排放量。由此可知，僅在木質產品的生產國與消費國為相同國家時，其中所含的碳才被視為被延遲排放，而長時間儲存於 HWP 碳庫中（UNFCCC，2003）。

因此在碳量的估算上，碳儲存量包含國內生產使用的產品以及出口至國外的產品，分別為變數 1A 和出口變數；碳排放量則包含國內消費的廢棄產品以及進口產品的排放量，分別為變數 1B 和進口變數。其他因素，如土地利用變遷，造成的碳排放及儲存量則於此碳庫忽略不計。

本計畫推算收穫林產品(HWP)，將運用上述三個方法，分別進行計算並加以比較。資料方面將收集國內進出口資料，包含非林業用地木材生產數量，完成 1990-2021 年國內收穫林產品 HWP 計算過程及說明：

## 2. 排放源及碳匯分類的敘述

本計畫推算 HWP，運用上述三個方法，分別進行計算並加以比較，估算產品包含製材、木質人造板、紙和紙板三類。

## 3. 方法學議題

### (1) 計算方法

計算方法如上敘生產法、儲量變化法及大氣流動法，參考 2006、2019 年 IPCC 報告之方法(IPCC, 2006; IPCC, 2019)，分別進行估算製材、木質人造板、紙和紙板之 HWP，以下列出三個方法之計算公式。

#### ● 生產法

估算使用的係數包含國產產品的消費比例以及不同經營活動伐採之原料來源比例，採用下式 1 估算其碳量時需推估林木伐採後轉國內使用產品之比例，估算結果的工業用原木比例可作為製材和木質人造板的比例。估算紙和紙板項目產品數量時須結合  $f_{IRW}(i)$ 、 $f_{PULP}(i)$  及  $f_{RecP}(i)$  三個係數，以排除使用進口工業用原木製成的木漿、自進口木漿及進口回收紙製成的紙類產品。







$$f_R(i) = \frac{R_P(i) - R_{EX}(i)}{R_P(i) + R_{IM}(i) - R_{EX}(i)} \quad (1)$$

$R$  = 工業原木 ( $IRW$ )、紙漿 ( $PULP$ ) 或回收紙 ( $RecP$ )

$f_R(i)$  原料係數

$R_P(i)$  第  $i$  年特定 HWP 原料商品類別的生產量 ( $m^3$  或  $t$ )

$R_{IM}(i)$  第  $i$  年特定 HWP 原料商品類別的進口量 ( $m^3$  或  $t$ )

$R_{EX}(i)$  第  $i$  年特定 HWP 原料商品類別的出口量 ( $m^3$  或  $t$ )

$$HWP_{DPl}(i) = HWP_{Pl}(i) * f_R(i) \quad (2)$$

$f_R(i) = f_{IRW}(i)$  .....適用於製材和木質人造板

$f_R(i) = (f_{IRW}(i) * (1 - q) * f_{PULP}(i)) + q * f_{RecP}(i)$  .....適用於紙和紙板

如果  $f_{IRW}(i) < 0$ ,  $f_{IRW}(i) = 0$

如果  $f_{PULP}(i) < 0$ ,  $f_{PULP}(i) = 0$

如果  $f_{RecP}(i) < 0$ ,  $f_{RecP}(i) = 0$

$HWP_{DPl}(i)$  第  $i$  年自國內採伐特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的生產量  
( $m^3$  或  $t$ )

$HWP_{Pl}(i)$  第  $i$  年特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的生產量 ( $m^3$  或  $t$ )

$q$  回收紙利用率

$$Inflow_l(i) = HWP_{DPl}(i) * c_{fl} \quad (3)$$

$$Inflow_{l\ average} = [\sum_{i=t_0}^{t_4} Inflow_l(i)] / 5 \quad (4)$$

$Inflow_l(i)$  第  $i$  年特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的碳流入量( $kt\ C/yr$ )

$c_{fl}$  特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的碳轉換係數

$$C_l(t_0) = \frac{Inflow_{l\ average}}{k} \quad (5)$$

$$C_l(i+1) = e^{-k} * C_l(i) + \left[ \frac{(1-e^{-k})}{k} \right] * Inflow_l(i) \quad (6)$$

$k$  FOD 的衰減常數  $k = \ln(2) / HL$  HL: 半衰期 (年)





$C_l(t_0)$  初始  $t_0$  年特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的碳儲存量 (kt C)

$C_l(i)$  第  $i$  年特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的碳儲存量 (kt C)

$C_l(i+1)$  第  $i+1$  年特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的碳儲存量 (kt C)

$\Delta C_l(i) = C_l(i+1) - C_l(i)$	(7)
$\Delta CO_{2\ TOTAL}(i) = -44/12 * \sum_{l=1}^n \Delta C_l(i)$	(8)

$\Delta C_l(i)$  第  $i$  年特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的碳儲存量變化 (kt C/yr)

$\Delta CO_{2\ TOTAL}(i)$  第  $i$  年碳儲量變化產生  $CO_2$  排放量和移除量 (kt  $CO_2$ /yr)

若將特定土地利用類別納入考量，則(3)式以(10)式替代。

$f_j(i) = \frac{harvest_j(i)}{harvest_{Total}(i)}$	(9)
$Inflow_{PA\ l}(i) = HWP_{DPl}(i) * cf_l * f_j(i)$	(10)

$f_j(i)$  第  $i$  年土地利用類別  $j$  的採伐分率

若考量出口 HWP 排放係數不確定性等因素，而僅估算國內消費 HWP 產生  $CO_2$  排放量和移除量，則(3)式以(12)替代。

$HWP_{DCI}(i) = HWP_{DPl}(i) - HWP_{EXI}(i) * f_R(i)$	(11)
---	------

如果  $HWP_{EXI}(i) * f_R(i) > HWP_{DPl}(i)$ ,  $HWP_{DCI}(i) = 0$

$HWP_{DCI}(i)$  第  $i$  年自國內採伐特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的國內消費量 ( $m^3$  或 t)

$Inflow_{PADCI}(i) = HWP_{DCI}(i) * cf_l$	(12)
---	------

$Inflow_{PADCI}(i)$  第  $i$  年自國內採伐特定半成品 HWP 商品類別  $l$  國內消費的碳流入量(kt C/yr)





## ● 儲量變化法

儲量變化法直接計算國內之生產與進口之 HWP，並排除出口至其他國家之 HWP，其公式如下：

$$Inflow_l(i) = HWP_{C_l}(i) \cdot cf_l \quad (1)$$

$Inflow_l(i)$  第  $i$  年特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的碳流入量 (kt C/yr)

$HWP_{C_l}(i)$  第  $i$  年度特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的國內消費量 (kt C/yr)

$cf_l$  特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的碳轉換係數

$$HWP_{C_l}(i) = HWP_{P_l}(i) + HWP_{IM_l}(i) - HWP_{EX_l}(i) \quad (2)$$

$HWP_{C_l}(i)$  第  $i$  年度特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的國內消費量 (kt C/yr)

$HWP_{P_l}(i)$  第  $i$  年度進特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的生產量 (kt C/yr)

$HWP_{IM_l}(i)$  第  $i$  年度進特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的進口量 (kt C/yr)

$HWP_{EX_l}(i)$  第  $i$  年度進特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的出口量 (kt C/yr)

如果  $HWP_{C_l}(i) < 0$  或  $HWP_{EX_l}(i) > HWP_{P_l}(i) + HWP_{IM_l}(i)$ ,

$$HWP_{C_l}(i) = 0$$

$$Inflow_{l\ average} = [\sum_{i=t_0}^{t_4} Inflow_l(i)] / 5 \quad (3)$$

$$C_l(t_0) = \frac{Inflow_{l\ average}}{k} \quad (4)$$

$k$  FOD 的衰減常數  $k = \ln(2) / HL$  HL：半衰期 (年)

$C_l(t_0)$  初始  $t_0$  年特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的碳儲存量 (kt C)

$$C_l(i+1) = e^{-k} * C_l(i) + \left[ \frac{(1-e^{-k})}{k} \right] * Inflow_l(i) \quad (5)$$

$C_l(i)$  第  $i$  年特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的碳儲存量 (kt C)





$C_l(i+1)$  第  $i+1$  年特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的碳儲存量 (kt C)

$$\Delta C_l(i) = C_l(i+1) - C_l(i) \quad (6)$$

$\Delta C_l(i)$  第  $i$  年特定半成品 HWP 商品類別  $l$  的碳儲存量變化 (kt C/yr)

$$\Delta CO_{2\text{ TOTAL}}(i) = -44/12 * \sum_{l=1}^n \Delta C_l(i) \quad (7)$$

$\Delta CO_{2\text{ TOTAL}}(i)$  第  $i$  年碳儲量變化產生  $CO_2$  排放量和移除量 (kt  $CO_2$ /yr)

### ● 大氣流動法

大氣流動法計算國內之進出大氣中的  $CO_2$ ，因此依據此法由使用木材產品之國家計算 HWP 的排放量與清除量，為了計算大氣流動法，除了木產品外，也需要更多其他活動數據，包含加工木材的原料及作木材燃料之碳量，其計算方式如下：

(1)-(4)如同前二之算法

$$Inflow_l(i) = HWP_{C_l}(i) * cf_l \quad (1)$$

$$C_l(t_0) = \frac{Inflow_l \text{ average}}{k} \quad (2)$$

$$C_l(i+1) = e^{-k} * C_l(i) + \left[ \frac{(1-e^{-k})}{k} \right] * Inflow_l(i) \quad (3)$$

$$\Delta CO_{2\text{ TOTAL}}(i) = -44/12 * \sum_{l=1}^n \Delta C_l(i) \quad (4)$$

$$RC_{TRADE_j}(i) = R_{TRADE_j}(i) * cf_j \quad (5)$$

$RC_{TRADE_j}(i)$  第  $i$  年 HWP 原料商品類別  $j$  (作為木質燃料和/或製造半成品 HWP 的原料) 的進口碳量或出口碳量 (kt C/yr)

$R_{TRADE_j}(i)$  第  $i$  年 HWP 原料商品類別  $j$  (作為木質燃料和/或製造半成品 HWP 的原料) 的進口量或出口量 ( $m^3$ /yr 或 t/yr)

$cf_j$  特定 HWP 原料商品類別  $j$  的碳轉換係數

$TRADE = IM, EX$





$$\Delta CO_{2AFA}(i) = -44/12 \cdot \left[ \sum_{l=1}^n \Delta C_{SCA_l}(i) + \sum_{j=1}^m RC_{EX_j}(i) - \sum_{j=1}^m RC_{IM_j}(i) \right] \quad (6)$$

$\Delta CO_{2AFA}(i)$	第 i 年度碳儲存量產生 CO <sub>2</sub> 排放量 (kt CO <sub>2</sub> /yr)
$\Delta C_{SCA_l}(i)$	第 i 年度特定半成品 HWP 商品類別 l 的碳儲量變化(kt C/yr)
n	製材、木質人造板、紙和紙板等半成品 HWP 的類別數量
m	納入 HWP 原料類別的數量
$RC_{EX_j}(i)$	第 i 年 HWP 原料商品類別 j (作為木質燃料和/或製造半成品 HWP 的原料) 的出口碳量 (kt C/yr)
$RC_{IM_j}(i)$	第 i 年 HWP 原料商品類別 j (作為木質燃料和/或製造半成品 HWP 的原料) 的進口碳量 (kt C/yr)

## (2) 排放係數

碳係數採用 2019R IPCC 準則 12.1 半成品的預設值，如下表：

表 11 估算 HWP 碳量之碳轉換係數預設值

	密度	碳含量	碳係數
製材	0.458	0.5	0.229
人造木質板	0.595	0.454	0.269
紙和紙板	0.9		0.386

註：製材與人造木質板之密度為絕乾重除以氣乾體積，單位為 Mg/m<sup>3</sup>，碳係數單位為 Mg C/m<sup>3</sup>，紙和紙板密度為絕乾重除以氣乾重，單位為 Mg/Mg，碳係數單位為 Mg C/Mg

表 12 2006 IPCC 準則表 12.4 和 2019R IPCC 準則表 12.2 木質燃料及製造 HWP 半成品原料的預設碳轉換係數。(IPCC, 2006, 2019a)

HWP 原料	2019R IPCC 準則 表 12.2	2006 IPCC 準則 表 12.4 溫帶樹種 熱帶樹種	
商品類別	[ Mg C / m <sup>3</sup> ]	[ Mg C / m <sup>3</sup> ]	
原木及其他工業原木		0.225	0.295
工業原木 (彙總)	0.229	0.225	0.295
木質燃料	0.229	0.225	0.295
木片和木質顆粒	0.229	0.225	0.295
木廢料	0.229	0.225	0.295
紙漿材		0.225	0.295





	[ Mg C / Mg ]	[ Mg C / Mg ]
木炭	0.765	- 0.765 -
木漿 (彙總)	0.417	- 0.450 -
機械木漿	0.447	
化學木漿,硫酸鹽,未漂白	0.422	
化學木漿,硫酸鹽,漂白	0.397	
化學木漿,亞硫酸鹽,未漂白	0.422	
化學木漿,亞硫酸鹽,漂白	0.398	
回收纖維紙漿		- 0.450 -
回收紙	0.386	- 0.450 -

表 13 HWP 商品類別層級 1 預設半衰期。(IPCC, 2019a)

HWP 商品類別	2019R IPCC 準則 (年)
紙和紙板	2
木質人造板	25
製材	35

### (3) 活動數據

HWP 不同估算法中，針對源自森林經營之 HWP，林產品之生產與進出口數據需始自 1961 年至當前年份；而為了納入來自數十年前，尚在使用中的 HWP，於當前年份的碳釋放量，則利用 IPCC 預設估算表之公式回推至 1900 年。

表 14 HWP 半成品與原料生產量的歷年活動數據。

年度	製材 <sup>1</sup> 生產量 m <sup>3</sup>	木質人造板 <sup>2</sup> 生產量 m <sup>3</sup>	紙和紙板 <sup>3</sup> 生產量 t	工業原木 <sup>4</sup> 生產量 m <sup>3</sup>	紙漿 <sup>5</sup> 生產量 t	回收紙 <sup>6</sup> 生產量 t
1961	608,700	64,805	120,382	897,978	21,868	-
1962	568,200	87,440	124,985	904,722	25,417	-
1963	672,100	152,064	132,423	879,026	31,852	-
1964	670,000	227,275	159,976	1,069,582	36,071	-
1965	647,900	249,942	189,716	1,116,915	38,194	-
1966	593,100	295,847	226,956	1,007,009	37,663	-
1967	617,200	299,600	284,336	1,060,462	44,403	-





1968	632,200	435,545	388,603	1,118,215	42,811	-
1969	620,600	608,842	362,657	1,063,563	45,451	-
1970	585,000	759,864	410,227	1,109,943	90,144	55,000
1971	1,089,105	878,694	476,345	1,217,791	101,629	60,000
1972	1,025,445	1,323,780	509,833	1,136,145	116,290	64,000
1973	985,788	1,342,283	626,814	1,099,186	117,965	112,000
1974	875,079	1,101,208	608,749	982,971	121,746	95,000
1975	1,258,518	1,042,338	735,891	854,731	120,142	131,000
1976	1,578,782	1,226,765	876,669	820,694	144,804	202,000
1977	1,500,720	1,272,062	966,052	689,435	168,139	223,000
1978	1,572,587	1,607,160	1,158,717	674,107	214,081	336,000
1979	1,319,655	1,450,907	1,336,277	653,529	258,804	600,000
1980	1,018,335	1,299,997	1,479,296	582,138	276,521	650,000
1981	1,134,297	1,369,997	1,498,079	529,684	350,094	890,000
1982	819,935	1,239,997	1,555,671	494,937	293,012	799,000
1983	694,638	1,249,997	1,720,347	616,070	299,634	900,000
1984	686,749	999,998	1,929,451	562,637	324,976	900,000
1985	792,800	849,998	2,017,589	474,584	349,846	901,000
1986	1,088,051	899,998	2,526,718	498,674	394,409	1,219,000
1987	880,053	949,998	2,737,032	422,644	415,942	1,140,000
1988	892,545	1,049,998	2,949,184	253,312	425,109	1,872,000
1989	857,404	1,249,923	3,041,848	157,289	437,010	1,724,000
1990	697,373	1,200,000	3,336,814	113,830	411,111	2,083,000
1991	757,833	1,230,000	3,745,734	74,190	412,117	1,858,000
1992	564,999	1,200,000	3,976,809	71,910	367,876	2,301,000
1993	398,796	850,000	3,905,352	46,924	315,353	2,286,000
1994	378,108	870,000	4,198,939	37,821	325,856	2,538,000
1995	328,537	826,500	4,243,267	35,603	364,617	2,607,000
1996	366,836	826,500	4,337,429	36,118	326,135	2,465,000
1997	278,747	826,500	4,506,972	32,778	346,457	2,789,000
1998	270,344	765,500	4,223,111	29,154	339,017	2,790,000
1999	271,862	642,294	4,349,217	23,332	368,393	2,814,000
2000	232,880	661,003	4,494,156	21,134	385,459	2,944,000
2001	214,399	612,026	4,210,647	26,401	370,201	2,723,000
2002	204,224	653,261	4,511,783	31,074	398,102	2,987,000
2003	199,547	634,123	4,657,608	26,098	403,714	3,036,000
2004	239,048	731,829	4,801,087	30,372	403,878	3,396,000
2005	180,992	686,909	4,661,033	31,389	368,597	3,425,000
2006	191,160	692,149	4,646,193	26,979	391,999	3,218,000
2007	135,334	629,414	4,706,595	26,441	390,108	3,158,000
2008	135,731	558,897	4,142,683	25,135	368,747	2,768,000
2009	73,641	534,120	3,988,478	25,176	294,236	2,865,000
2010	78,599	606,334	4,069,074	19,131	384,439	2,921,000
2011	81,017	559,260	4,138,505	23,273	368,203	2,941,000
2012	89,923	501,579	4,229,391	24,898	369,356	2,890,000
2013	88,732	584,700	4,155,831	26,785	351,013	2,970,000
2014	105,708	632,892	4,178,449	37,899	394,350	3,010,000
2015	90,296	640,482	3,857,639	29,870	379,383	2,930,000
2016	89,349	607,000	3,937,591	24,768	319,018	2,880,000
2017	79,590	647,000	4,024,251	20,591	264,820	2,410,000
2018	80,117	626,000	4,253,598	21,876	250,008	2,690,000
2019	81,155	620,000	4,248,510	30,143	230,077	2,720,000
2020	40,440	661,000	4,361,874	24,260	229,392	2,795,000







2021	25,875	665,000	4,482,317	29,452	259,194	2,886,000
2022	20,226	629,000	4,243,424	31,648	262,313	2,897,000

註：1.製材生產量 1961 - 1970 年取自 FAOSTAT。

1971 - 1981 年參考行政院農業委員會林業試驗所彙整資料。

1981 - 2022 年取自經濟部統計處工業產銷存動態調查。

2.木質人造板生產量：台灣區合板製造輸出業同業公會提供。

3.紙和紙板生產量：台灣區造紙工業同業公會提供。

4.工業原木生產量：林業保育署「林業統計年報」中「林產處分」下「林產品生產量值」的用料。

5.紙漿生產量：台灣區造紙工業同業公會提供。

6.回收紙收集量：1970 - 1988 年取自 FAOSTAT。

1989 - 2022 年取自台灣區造紙工業同業公會。

表 15 HWP 半成品進出口貿易量的歷年活動數據。

年度	製材		木質人造板		紙和紙板	
	進口 m <sup>3</sup>	出口 m <sup>3</sup>	進口 m <sup>3</sup>	出口 m <sup>3</sup>	進口 m <sup>3</sup>	出口 m <sup>3</sup>
1961	17	16,080	-	51,800	5,946	21,013
1962	0	37,220	-	72,500	3,900	21,500
1963	93	72,159	-	85,600	3,900	16,600
1964	34	85,435	-	208,400	4,900	18,600
1965	197	90,668	-	222,500	5,900	18,800
1966	46	83,555	-	262,600	4,913	36,975
1967	1,572	83,252	-	286,400	7,200	22,600
1968	2,721	96,829	-	399,400	5,400	24,700
1969	6,912	109,428	-	488,400	21,100	19,200
1970	4,453	106,176	-	580,000	32,900	14,100
1971	19,109	87,019	3	864,100	60,737	27,787
1972	6,335	17,714	185	1,115,280	58,776	49,652
1973	5,225	79,643	83	1,115,537	50,074	55,215
1974	25,316	36,320	74	803,858	771,153	33,210
1975	17,445	45,716	125	760,908	511,853	79,118
1976	22,110	41,736	8,868	862,203	68,661	103,806
1977	21,883	31,182	537	945,936	93,137	86,858
1978	49,318	71,422	563	1,240,058	103,955	95,781
1979	123,613	94,634	1,588	1,078,275	101,153	106,927
1980	168,715	73,389	3,386	864,234	89,445	154,347
1981	359,556	30,025	13,007	949,678	85,330	171,422
1982	259,651	27,757	20,494	822,458	104,246	168,129
1983	511,439	35,325	104,007	873,121	129,508	122,861
1984	570,441	27,712	272,156	610,428	154,185	96,548
1985	529,610	27,266	298,447	560,964	160,918	93,327
1986	801,731	30,546	450,384	515,420	192,800	148,898
1987	1,060,937	39,092	596,499	554,549	287,715	145,430
1988	995,322	33,326	786,895	508,828	352,422	247,324
1989	940,854	28,056	1,566,019	355,871	399,150	278,532
1990	703,875	32,718	1,306,349	267,041	489,586	542,083
1991	970,769	31,070	1,722,741	214,914	607,946	761,310





1992	1,473,905	28,979	2,455,152	172,447	760,551	726,833
1993	1,852,487	31,204	2,467,793	133,808	836,048	666,634
1994	1,514,326	36,383	3,291,798	158,631	1,019,069	737,278
1995	1,507,382	41,783	2,763,417	189,166	899,131	769,049
1996	1,218,991	38,865	2,363,435	177,321	816,060	968,729
1997	1,338,556	49,362	2,771,071	178,306	1,068,598	858,605
1998	1,093,244	40,437	2,637,293	100,394	1,033,893	752,081
1999	1,106,845	43,099	2,225,724	88,758	1,111,944	805,875
2000	1,171,150	45,268	2,350,436	90,510	1,067,983	881,869
2001	869,738	46,477	1,765,399	96,203	929,246	983,091
2002	1,002,676	48,400	1,487,001	88,969	1,032,186	1,146,727
2003	1,120,990	56,877	1,478,500	79,040	1,182,013	773,265
2004	1,196,134	70,253	1,726,724	83,249	1,338,332	1,440,917
2005	1,152,316	55,528	1,661,799	71,411	1,199,457	1,287,323
2006	1,141,510	47,358	1,708,524	74,703	1,131,026	1,351,165
2007	1,111,672	61,478	1,574,644	90,368	1,072,045	1,451,847
2008	1,057,601	37,227	1,354,693	78,759	1,143,191	1,125,111
2009	811,123	31,111	1,109,505	57,628	981,922	1,227,345
2010	1,148,689	29,370	1,503,115	56,467	1,181,287	1,061,428
2011	1,227,660	26,091	1,438,609	50,519	1,211,232	1,135,666
2012	1,112,691	26,238	1,381,568	48,257	1,208,603	1,288,780
2013	1,188,360	25,937	1,438,670	54,620	1,190,142	1,278,280
2014	1,283,883	22,534	1,512,598	45,933	1,207,386	1,243,403
2015	1,275,771	16,757	1,453,217	36,707	1,182,324	974,331
2016	1,121,190	16,935	1,324,388	27,872	1,160,464	1,148,404
2017	1,228,022	15,753	1,139,062	26,734	1,205,008	1,365,331
2018	1,330,323	12,847	1,102,453	25,959	1,181,982	1,394,802
2019	1,216,484	14,640	1,124,264	25,948	1,247,829	1,406,262
2020	1,207,734	14,538	1,225,116	15,233	1,120,832	1,379,312
2021	1,376,335	7,750	1,334,896	31,463	1,186,133	1,185,967
2022	1,248,876	8,106	1,118,561	28,870	1,099,282	1,406,676

註：製材、木質人造板及紙和紙板的進出口量參考林試所彙整資料。

表 16 HWP 半成品原料 (包括薪炭材) 進出口貿易量的歷年活動數據 (之一)。

年度	工業原木		木炭		木片和木質顆粒	
	進口 m <sup>3</sup>	出口 m <sup>3</sup>	進口 m <sup>3</sup>	出口 m <sup>3</sup>	進口 m <sup>3</sup>	出口 m <sup>3</sup>
1961	168,069	22,072	0	24	-	-
1962	277,478	27,630	0	42	-	-
1963	446,903	37,584	0	12	-	-
1964	565,574	93,828	0	12	-	-
1965	625,331	64,599	0	6	-	-
1966	693,121	67,252	0	18	-	-
1967	743,160	49,792	0	12	-	-
1968	1,093,975	31,103	0	9	-	-
1969	1,184,589	37,570	0	36	-	-
1970	1,493,109	37,197	1	17	-	-
1971	2,209,225	57,894	4	138	-	-
1972	3,581,145	46,154	0	162	-	-
1973	3,860,394	32,750	1	244	-	-
1974	3,553,609	7,932	0	469	-	-





1975	3,645,159	15,841	1	144	80,600	-
1976	3,944,835	14,041	3	192	192,200	-
1977	5,465,650	17,624	5	217	192,200	-
1978	6,642,944	15,241	1	215	192,200	-
1979	6,290,754	16,176	2	302	200,000	-
1980	4,968,330	12,524	104	199	200,000	-
1981	5,112,833	9,228	56	120	228,000	-
1982	4,104,771	12,857	616	244	239,300	-
1983	4,790,766	48,671	2,241	281	356,100	-
1984	4,106,375	78,884	3,205	204	336,700	-
1985	3,665,648	32,788	2,606	669	400,000	-
1986	3,676,381	6,197	1,937	691	687,900	-
1987	3,949,618	6,466	940	801	593,200	-
1988	4,202,389	7,481	14,172	509	839,200	-
1989	1,301,119	7,645	9,158	13	646,376	58,519
1990	836,494	4,458	15,111	97	1,262,279	50,261
1991	840,437	4,854	19,229	0	1,523,613	41,237
1992	633,372	8,102	24,276	101	1,614,295	67,668
1993	2,093,242	13,843	0	101	1,140,328	58,733
1994	2,068,113	7,692	28,400	84	1,555,756	70,010
1995	1,744,530	6,380	32,501	114	2,219,272	128,156
1996	1,734,394	11,745	28,559	153	301,672	213,267
1997	1,810,554	9,076	27,576	153	1,923,360	224,024
1998	1,205,543	6,577	31,501	93	1,697,071	122,672
1999	1,259,524	9,270	29,071	41	2,201,036	86,957
2000	1,165,068	13,363	30,803	54	2,079,036	10,435
2001	940,319	7,592	30,953	0	1,838,419	124,469
2002	888,674	11,549	32,018	50	2,022,812	47,246
2003	970,394	8,945	34,444	62	2,009,215	1,910
2004	1,071,267	15,602	34,085	116	1,841,773	105
2005	1,038,992	12,273	35,753	46	1,828,445	148
2006	839,948	13,681	33,882	48	1,296,966	53
2007	880,372	23,263	33,509	56	1,689,904	57
2008	730,092	18,034	33,900	31	2,037,579	50
2009	612,033	14,329	31,450	91	1,201,301	4
2010	778,697	9,655	31,939	87	2,016,589	10
2011	676,347	16,941	37,472	63	1,924,328	36
2012	716,058	16,969	35,640	64	1,664,012	12
2013	664,420	20,360	35,738	103	1,765,410	32
2014	728,528	11,143	38,123	166	1,754,668	8
2015	547,062	14,518	36,975	67	1,823,829	4
2016	521,133	10,022	37,442	449	1,374,019	1
2017	388,840	22,540	39,363	611	1,332,472	14
2018	521,304	7,158	34,674	144	1,198,522	8
2019	437,671	5,125	35,666	187	1,043,151	0
2020	417,422	3,925	32,925	54	1,138,176	37
2021	400,257	6,989	29,986	26	1,605,792	0
2022	374,406	2,793	31,187	47	1,314,897	0

註：工業原木及木片和木質顆粒的進出口量參考林試所彙整資料。

木炭進出口量參考海關進出口統計。





表 17 HWP 半成品原料 (包括薪炭材) 進出口貿易量的歷年活動數據 (之二)。

年度	木廢料		紙漿		回收紙	
	進口 m <sup>3</sup>	出口 m <sup>3</sup>	進口 t	出口 t	進口 t	出口 t
1961	-	-	100	-	-	-
1962	-	-	1,100	-	-	-
1963	-	-	-	-	-	-
1964	-	-	2,000	-	-	-
1965	-	-	400	-	-	-
1966	-	-	1,000	-	-	-
1967	-	-	100	-	-	-
1968	-	-	56,500	200	-	-
1969	-	-	55,400	3,000	-	-
1970	-	-	49,600	15,700	95,100	-
1971	-	-	61,427	26,834	106,863	-
1972	-	-	61,427	38,838	145,832	-
1973	-	-	58,593	21,439	179,136	-
1974	-	-	69,285	19,835	142,368	-
1975	-	-	36,362	26,448	180,761	-
1976	-	-	52,322	21,366	207,762	-
1977	-	-	80,014	24,393	222,573	-
1978	-	-	103,113	31,370	335,625	-
1979	-	-	112,740	31,100	425,721	-
1980	-	-	112,578	33,500	555,903	-
1981	-	-	111,559	86,952	547,799	-
1982	-	-	162,664	59,225	671,665	-
1983	-	-	227,895	58,091	809,778	-
1984	-	-	236,457	30,720	944,768	-
1985	-	-	327,640	56,683	959,352	-
1986	-	-	382,312	78,667	1,266,189	-
1987	-	-	436,739	80,776	1,242,896	-
1988	-	-	522,994	84,168	1,255,892	-
1989	18,056	74	492,871	77,185	1,356,896	30,502
1990	15,420	53	476,609	76,177	1,342,828	18,857
1991	11,219	575	683,192	74,336	1,879,149	1,311
1992	18,853	126	731,327	32,467	1,608,970	664
1993	14,933	174	836,544	10,229	1,514,327	658
1994	14,942	251	987,112	1,532	1,718,501	2,284
1995	11,790	423	903,528	11,378	1,290,214	3,164
1996	13,390	413	905,644	1,276	1,659,026	984
1997	10,788	297	1,019,897	3,438	1,320,137	1,775
1998	10,719	5,680	954,440	865	994,484	1,189
1999	11,078	17,034	1,009,729	14,804	1,097,129	1,091
2000	13,744	9,132	923,132	20,972	1,052,702	1,669
2001	8,386	7,972	924,605	20,711	1,012,078	4,445
2002	8,725	261	881,706	20,427	1,038,743	5,148
2003	7,465	144	909,973	21,019	1,121,455	15,197
2004	9,628	171	982,214	17,802	899,989	18,024
2005	11,096	388	983,804	18,166	674,997	29,380
2006	7,923	592	1,025,603	34,468	762,968	32,216
2007	9,530	337	966,027	28,811	982,715	40,369
2008	8,587	1,665	863,337	16,253	834,106	15,086





2009	10,577	1,547	841,707	9,093	562,601	44,007
2010	8,143	1,574	836,821	32,607	568,543	63,674
2011	10,912	1,731	853,247	13,026	596,029	65,511
2012	12,541	2,334	836,564	16,576	864,888	71,230
2013	15,180	2,810	825,263	17,625	790,486	65,786
2014	27,879	2,355	778,412	28,114	780,049	81,882
2015	44,101	1,310	767,469	58,813	586,005	106,435
2016	48,785	795	844,781	36,732	708,930	116,997
2017	3,041	3	1,018,049	12,172	1,105,863	135,163
2018	3,359	536	901,921	6,295	1,349,097	165,132
2019	2,449	3	798,571	93,685	1,369,240	121,469
2020	1,595	0	789,807	113,593	1,374,465	110,119
2021	2,498	9	705,095	146,637	1,551,307	173,870
2022	2,766	7	719,894	134,322	1,245,391	110,037

註：木廢料、紙漿及回收紙的進出口量參考林試所彙整資料。

#### (4) 碳移除/排放量

由於台灣工業用原木生產數據並無針對伐採地點進行說明，無法區分是收穫自植林還是森林經營，根據 COP19 說明則保守假設所有的 HWP 源自於森林經營，進行碳移除/排放量估算。

表 18 生產法估算 1990 - 2021 年 HWP 產生 CO<sub>2</sub> 排放量與移除量。

單位：kt CO<sub>2</sub> / yr

年度	製材 CO <sub>2</sub>	木質人造板 CO <sub>2</sub>	紙和紙板 CO <sub>2</sub>	PA_CO <sub>2</sub>
1990	215	-5	-792	-582
1991	230	39	-364	-95
1992	230	22	-790	-537
1993	264	116	-539	-160
1994	259	113	-640	-268
1995	254	109	-578	-215
1996	249	108	-239	119
1997	246	106	-557	-205
1998	240	100	-396	-57
1999	237	104	-308	33
2000	233	104	-373	-36
2001	226	93	0	320
2002	222	89	-316	-6
2003	218	89	-278	29
2004	214	88	-627	-325
2005	210	83	-478	-185
2006	206	82	-89	200





2007	204	88	16	308
2008	199	83	469	752
2009	196	77	219	492
2010	192	77	92	361
2011	188	77	43	308
2012	184	74	98	357
2013	181	72	-29	224
2014	175	54	-69	160
2015	173	57	50	280
2016	169	56	103	328
2017	168	74	662	905
2018	163	52	147	363
2019	158	35	50	242
2020	157	37	-60	134
2021	154	31	-119	66

表 19 儲量變化法估算 1990 - 2021 年 HWP 產生 CO<sub>2</sub> 排放量與移除量。

單位：kt CO<sub>2</sub> / yr

年度	製材 CO <sub>2</sub>	木質人造板 CO <sub>2</sub>	紙和紙板 CO <sub>2</sub>	SCA_CO <sub>2</sub>
1990	-455	-1,899	-721	-3,075
1991	-719	-2,332	-878	-3,930
1992	-965	-2,993	-1,121	-5,079
1993	-1,121	-2,621	-870	-4,611
1994	-796	-3,346	-1,100	-5,242
1995	-729	-2,669	-650	-4,047
1996	-509	-2,218	-234	-2,961
1997	-517	-2,553	-802	-3,871
1998	-303	-2,369	-313	-2,986
1999	-307	-1,796	-401	-2,505
2000	-321	-1,884	-314	-2,519
2001	-47	-1,211	404	-854
2002	-147	-954	-2	-1,102
2003	-231	-910	-802	-1,943
2004	-311	-1,218	-127	-1,656
2005	-233	-1,089	60	-1,262





2006	-234	-1,107	219	-1,123
2007	-147	-870	273	-744
2008	-119	-575	392	-303
2009	134	-317	777	594
2010	-154	-763	16	-901
2011	-222	-639	-19	-880
2012	-129	-512	64	-577
2013	-189	-629	143	-674
2014	-281	-739	12	-1,008
2015	-261	-677	100	-838
2016	-127	-509	210	-426
2017	-206	-355	174	-387
2018	-290	-290	-12	-592
2019	-189	-298	-67	-554
2020	-144	-438	-64	-645
2021	-275	-521	-498	-1294

表 20 大氣流動法估算 1990 - 2021 年 HWP 產生 CO<sub>2</sub> 排放量與移除量。

單位：kt CO<sub>2</sub> / yr

年度	SCA_CO <sub>2</sub>	(RC <sub>EX</sub> -RC <sub>IM</sub> )_CO <sub>2</sub>	AFA_CO <sub>2</sub>
1990	-3,075	4,257	1,183
1991	-3,930	5,598	1,668
1992	-5,079	5,252	173
1993	-4,611	6,072	1,461
1994	-5,242	7,005	1,763
1995	-4,047	6,501	2,454
1996	-2,961	5,341	2,380
1997	-3,871	6,445	2,574
1998	-2,986	5,285	2,299
1999	-2,505	5,974	3,469
2000	-2,519	5,661	3,142
2001	-854	5,118	4,264
2002	-1,102	5,272	4,169
2003	-1,943	5,520	3,577







2004	-1,656	5,259	3,603
2005	-1,262	4,897	3,635
2006	-1,123	4,434	3,311
2007	-744	5,007	4,263
2008	-303	4,864	4,561
2009	594	3,613	4,207
2010	-901	4,378	3,477
2011	-880	4,318	3,438
2012	-577	4,470	3,892
2013	-674	4,394	3,720
2014	-1,008	4,339	3,331
2015	-838	3,880	3,042
2016	-426	3,800	3,374
2017	-387	4,449	4,063
2018	-592	4,582	3,991
2019	-554	4,184	3,631
2020	-645	4,220	3,575
2021	-1294	4,568	3,274

註：(RC<sub>EX</sub>-RC<sub>IM</sub>)<sub>CO<sub>2</sub></sub> 表示作為木質燃料和製造半成品 HWP 原料的淨出口 CO<sub>2</sub> 轉移。

#### 4. 不確定性與時間序列的一致性

##### (1) 不確定性

HWP 之活動數據蒐集整理自不同來源，然皆無相關資訊估算其不確定性，故暫時忽略不計。排放係數則採用 IPCC 預設值，各別之不確定性如下：

表 21 收穫林產品各排放係數不確定性

排放係數	IPCC 提供之不確定性
產品體積轉重量因子	25%
烘乾產品重量與碳重量	10%
半衰期	50%

因各係數間為相乘之關係，故採用誤差傳遞法之乘法原則合併各係數之不確定性，合併結果，HWP 之不確定性為 56.79%。





## (2) 時間序列一致性

估算 HWP 各項林產品之生產與進出口數據需始自 1961 年至當前年份，因所要追溯的年代久遠，部分項目並無一個資料來源可以完整呈現 1961-2021 年的資料，因此採用不同來源的統計資料，但自 1989 年後各項林產品之生產與進出口數據可採自相同之資料來源，維持時間序列之一致性。

## 5. 特定排放源的重新計算

無

## 6. 討論

計算 HWP 之資料來源，台灣無統一資料庫可以參考，其數值些許是依推估方式計算而得，例如從經濟部統計處查詢而得的製材生產量，在今年度有更新數據，使 2012 年後的數據有些微更動。而林試所取得之資料，2017 年開始，使用是新的產品代碼，依新代碼查詢，有一類資料之進出口量和以往差距甚大，難以確定原因。

今年度生產法和以往計算的方法 COP19，不同於有計算回收紙，在 2019R IPCC 準則更新和補充生產法的估算方式中，將回收紙作為原料的一部份納入計算，使紙和紙板的碳庫估算更加準確，回收紙的數據也不容小覷，將其計入生產法中，使紙和紙板數據占比增加許多。

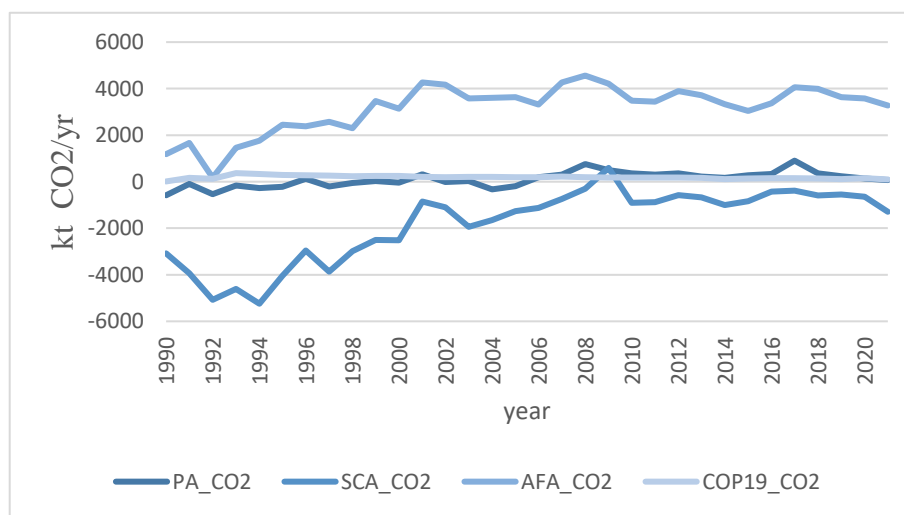


圖 2 估算 HWP 四種方法碳儲量變化圖

上圖 2 為此次三種方法和去年 COP19 方法的碳儲量趨勢圖，臺灣若採用儲量變化法呈碳移除，大氣流動呈碳排放，若用大部分國家使用的生產法，





碳匯變化量在 0 kt CO<sub>2</sub> 附近變動，但近年皆呈碳排放，和 COP19 比較，數據起伏變化也較大，較符合國際上多國使用之方法。

## 7. 建議

三種方法中，建議未來台灣使用生產法，因國際上多國在計算 HWP 是使用生產法，雖然生產法近年來我國是屬於碳排放狀態，而儲量變化法整體趨勢對我國較有利，但選擇上不該選擇對自身國家最有利的�方法，還須考慮到國際上的使用方法，各國使用不同方法，可能會造成重複計算或些排放未計算到等問題，故此建議使用生產法。

## 二、精進國家溫室氣體排放清冊報告之林業部門章節編製方式

### (一) 蒐集美國及日本最新版國家林業部門清冊報告，說明其引用數據及調查方式，提出改善林業部門森林碳匯計算模式規劃架構

收集諸如日本(Japan. 2023 National Inventory Report)及美國農業部門(United States Department of Agriculture, USDA)之林業清冊報告(Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks)，參考其中來自森林時間序列中的淨碳匯，並參考其規劃及架構。基本林業調查方法為：

- ① 確定森林樣區和取樣設計：在進行碳匯計算前，確定森林樣區的範圍，並進行取樣設計。
- ② 進行碳儲量測量：使用不同的測量方法測量碳儲量，例如地上生物量的測量、根系碳的測量等。根據測量數據，可以計算出不同生態系統的碳儲量。
- ③ 森林生長模型的應用：利用森林生長模型進行碳儲量估算。透過森林生長模型，預測森林未來的碳儲量和碳吸收量，並對森林碳儲量變化進行長期預測。

美國及日本林業部門森林碳匯計算的規劃架構主要包括碳盤查、碳儲量測量、碳交易市場等方面。森林碳盤查是碳匯計算的基礎，碳儲量測量是碳匯計算的核心，碳交易市場是碳匯計算的應用和推廣。

美國日本林業清冊調查的資料來源分別來自 FIA 數據庫的 NFI 樣區、NFRDB，其對於森林資源調查，美國是根據農業部門林務署(Forest Service)採用森林調查與分析(Forest Inventory and Analysis, FIA)方法，分成三個階段，第





一階段依據各州比例做分層取樣，第二階段選定 6,000 英畝的永久樣區，第三階段人工現地量測。日本林野廳（Forest Agency）制定之調查方法國家森林清查(national forest inventory, NFI)，採用已編制之森林登記冊和森林規劃圖進行調查或採用系統取樣的方式調查樣區。日本是有 2 獨立的森林資源調查系統。其中一個是基於《森林法》的森林規劃系統所要求的，該系統準備了森林登記和森林規劃地圖。另一個系統是森林資源監測調查，其中按照 4 公里格網間隔進行系統抽樣。美、日數據資料收集皆有國家自己固定的調查方式，雖然在幾十年來，數據收集上方式有一些改善變更，或是較久遠之前無數據資料，對此美國、日本皆會使用插值、建模推算等方法，完整數據資料，使整體資料來源較統一。

#### 1. 美國、日本碳儲量變化計算

美國(本土)、日本林業清冊皆使用儲存量差異法，美國阿拉斯加州使用增減法，美日二國在每一類別估算碳儲量，大多遵循 IPCC 的方法，或是依照自己國家研究方式進行更精確的估算。

- 儲存量差異法 Stock-difference 是將碳估算因子應用於不同時間段的年度森林調查，以獲得碳儲量，然後在年份之間相減以獲得碳儲量變化，只需計算碳移除之部分
- 增減法 gain and loss，生物量碳儲量變化是由每年生物量碳儲量增加和損失的部分相加得到的，故需計算碳移除和碳排放的數據

根據 IPCC 指南使用二種方法皆不會太過高估或低估，只是國家需依自己調查級別及森林狀況適合哪種方法，相較二種方法，儲存量差異法的不確定性較小。儲存量差異法較適合用於國家具有定期測量不同生物量儲量的國家清冊系統，因臺灣全面性森林資源調查時間間隔較長，目前並無完整長期監測數據，所以目前仍使用增減法。指南中指出增減法適用於所有層級，儲存量差異法適用於 Tier1、Tier2，儲存量差異法可為相對變化量較大的生物量，或在進行非常準確的森林調查時，提供更可靠的估算，但對於具有不同林型混合區或生物量變化與總生物量較小的情況下，儲存量差異法的調查誤差就可能超過預期變





化，除非定期調查估算死有機物的儲存量，除枯立木數據外，仍需其他死亡、損失數據，以估算轉化為有機物、已收成林產品和受干擾引起的排放，還需確保之後的調查在同一地點上，以此獲得可靠之結果。因此，在選擇使用儲存量差異法或增減法時，需考慮國家調查系統、數據可用性、生態調查的資料、活動數據轉換和擴展因子，以及成本效益分析。以下為臺灣、美國、日本清冊計算比較表

表 22 臺灣、美國、日本估算方法及運用資料整理

國家	臺灣	美國	日本
使用方法學	增減法	儲存量差異法(美國本土) 增減法(阿拉斯加州)	儲存量差異法
林型類別	1.天然針葉林 2.天然針闊葉混淆林 3.天然闊葉林 4.人工針葉林 5.人工針闊葉混淆林 6.人工闊葉林 7.木竹混淆林 8.竹林	無特別區分林型，只定義森林等土地利用類別	1.高強度管理森林 2.半自然森林 3.稀樹森林 4.林下竹林
生物量 轉換係數	轉換係數以林型為主，以第三、四次森林資源調查及林業報告統計，包含平均基本比重(D)、生物量轉換與擴展係數(BCEF)、根莖比(R)、乾物質碳含量比例(CF)、年生量(m <sup>3</sup> /ha)。	使用 component ratio method (CRM)進行估算，由體積、物種和直徑所組成的函數。	<ul style="list-style-type: none"> <li>轉換係數以樹種為主，使用特定生物量擴展係數(BEF)、基本比重(D)、根莖比(R)。</li> <li>乾物質碳含量比例(CF)，針葉林使用 0.51，闊葉林使用 0.48，稀樹森林使用平均值 0.50。</li> </ul>
計算公式	增減法 $\Delta C = \Delta C_G - \Delta C_L$ $\Delta C = \text{碳庫中每年碳儲存變化量(公噸碳/年)}$ $\Delta C_G = \text{生物量年碳增量(公噸碳/年)}$ $\Delta C_L = \text{生物量年碳損失量(公噸碳/年)}$	儲存量差異法 $\Delta C_{FF\_LB} = \Delta C_{F\_LB} - \Delta C_{LF\_LB}$ $\Delta C_{FF\_LB} = \text{仍為林地的林地生物量每年碳儲存變化量(公噸碳/年)}$ $\Delta C_{F\_LB} = \text{整個林地生物量年碳儲量的變化(公噸碳/年)}$ $\Delta C_{LF\_LB} = \text{轉變為林地的土地中生物量年碳儲量的年度變化(公噸碳/年)}$	儲存量差異法 $\Delta C_{FF\_LB} = \Delta C_{F\_LB} - \Delta C_{LF\_LB}$ $\Delta C_{FF\_LB} = \text{仍為林地的林地生物量每年碳儲存變化量(公噸碳/年)}$ $\Delta C_{F\_LB} = \text{整個林地生物量年碳儲量的變化(公噸碳/年)}$ $\Delta C_{LF\_LB} = \text{轉變為林地的土地中生物量年碳儲量的年度變化(公噸碳/年)}$





<p><b>死有機物質 碳貯存量變化 (<math>\Delta C_{DOM}</math>)</b></p>	<p>死有機物質對於碳庫中的碳貯存量變化並不明顯，其預設值可假設為 0，即投入與損失相抵，因此死有機質碳貯存量變化淨值為零。當國家於報告年間沒有經歷森林類型、林地擾動或經營體制的重大轉變，這是個安全的假設。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 枯立木採用 CRM 方法計算。</li> <li>• 枯倒木之生物量採用 FORCARB2 模型計算。</li> <li>• 枯落物採抽樣，採用建模方法，根據樣區/場地變量，用於預測缺乏枯落物訊息的樣區的碳密度。</li> </ul>	<p>高強度管理森林及半自然森林之死有機物質使用 CENTURY-jfos 模型計算，在不同森林經營類型下，兩個碳庫的單位面積碳排放/儲存量，與面積相乘後加總即可得到死有機物質的碳儲存年變化量。(IPCC 方法 3)</p>
<p><b>土壤 碳貯存量變化 (<math>\Delta C_{Soils}</math>)</b></p>	<p>國內較為全面的森林土壤調查資料為行政院農業委員會林業保育署與林業試驗所合作執行之「臺灣高山林地土壤調查」計畫，其計畫成果雖對森林土壤碳庫進行推估，但尚無探討土壤碳貯存年變化量之研究。另因報告年間沒有經歷森林類型、林地擾動或經營體制的重大轉變，假設土壤碳庫淨碳貯存變化量為 0。</p>	<p>礦物、有機土壤的總質量採用建模方法，從實際測量的 20cm 深度預測到 100cm 深度的礦物質和有機質(即未排水的有機質土壤)土壤碳及有機碳密度，使用包括與地點、林分和氣候相關之變量。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高強度管理森林及半自然森林之礦質土壤使用 CENTURY-jfos 模型計算，在不同森林經營類型下，兩個碳庫的單位面積碳排放/儲存量，與面積相乘後加總即可得到土壤的碳儲存年變化量。(IPCC 方法 3)。</li> <li>• 稀樹森林及竹林之礦物土壤以長期來看是相等的，所以設定為 0。</li> </ul>
<p><b>計算之碳庫</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 生物量(包含地上部及地下部，地下部以根莖比直接列入計算)</li> <li>2. 死有機質:假設為 0</li> <li>3. 土壤:假設為 0</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 生物量 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 地上部</li> <li>• 地下部</li> </ul> </li> <li>2. 死有機質 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 枯木</li> <li>• 枯落物</li> </ul> </li> <li>3. 土壤 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 礦質土壤</li> <li>• 有機質土壤</li> <li>• 乾燥有機土壤</li> </ul> </li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 生物量(包含地上部及地下部，地下部以根莖比直接列入計算)</li> <li>2. 死有機質 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 枯木</li> <li>• 枯落物</li> </ul> </li> <li>3. 土壤 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 礦質土壤</li> <li>• 有機土壤:假設為 0</li> </ul> </li> </ol>
<p><b>HWP</b></p>	<p>-</p>	<p>美國使用生產法</p>	<p>日本使用生產法</p>







不確定性	1. 清冊森林碳匯使用誤差傳播法 2. HWP 用誤差傳播法  臺灣使用 0.5 作為不確定性常數	1. 清冊森林碳匯使用誤差傳播法 2. HWP 用蒙地卡羅法	N/A(方法未特別註明)  • 清冊之不確定性常數使用 IPCC 2006 指南中的默認數值(林地為 5.9)或是田野調查結果、專家判斷等。  • 死有機物質、礦物土壤運用 CENTURY-jfos 模型輸出差異的變異數進行估算。
其他	未納入 HWP 之計算(歸類為伐採碳匯)	美國將以下幾點列入報告 1. 自森林火災的非 CO <sub>2</sub> 排放 2. NO <sub>2</sub> 排放 from N additions to forest soil 3. CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O 排放 from drained 有機土壤	

## 2.活動數據

美國在決定森林面積時會考量到整體 LULUCF 部門，在追蹤其土地管理與劃分 IPCC 土地分類主要採用 3 個資料庫之數據，分別為美國農業部（U.S. Department of Agriculture, USDA）的國家資源調查（National Resources Inventory, NRI）、美國農業部林業局（United States Forest Service, USFS）的森林資源調查與分析（Forest Inventory and Analysis, FIA），以及多解析土地特徵聯盟（Multi-Resolution Land Characteristics Consortium, MRLC）的國家土地覆蓋資料庫（National Land Cover Dataset, NLCD）。NRI 與 FIA 屬方法 2 的資料來源，即無法提供土地利用與土地利用轉換精確的空間資訊，主要以這兩個資料建置土地利用轉變矩陣；NLCD 則屬於方法 3 之數據，具有精確空間資訊的土地覆蓋資料，用來界定前兩個資料庫未涵蓋的範圍。

林地相關的類別以 FIA 為主要數據，並調整 NRI 與 NLCD 使其一致，調整的過程可分為 3 個步驟，首先調整土地轉變為林地類別，由於 FIA 僅提供土地轉變為林地的總面積，因此需透過 NRI 與 NLCD 針對各類型土地轉變為林地的面積比例來分配各類型土地轉變為林地的面積，並將差值修正至 NRI 與 NLCD 中土地維持原土地利用型的類別，以維持總面積不變。其次則為林





地轉變為其它土地利用類別，FIA 同樣僅提供此類別的總面積，並無細分轉變為何種土地利用類型，故需以 NRI 與 NLCD 的面積比例調整。最後則是林地維持林地類別，NRI 與 NLCD 對比 FIA 之間的面積差值，被視為是草地維持草地以及溼地維持溼地的誤差，因此以草地和溼地各自的面積比例進行調整（即草地面積比例高，則增加或減少的面積也比較多）。經上述調整後，以 NRI 作為美國及夏威夷非聯邦土地的數據來源，以 NLCD 作為聯邦土地的數據來源；阿拉斯加則全部採用 NLCD 資料。

日本以國家森林資源資料庫(National Forestry Resources Database, NFRDB)作為森林總面積的主要依據，該調查起始自 2005 年，每年調查約 1/5 的面積，2004 年以前使用森林狀況調查 (Forest Status Survey)，約 5 年調查一次，中間缺少的年度資料則以線性內插法推算。土地轉變為林地取自於造林與再造林面積，是透過 1989 年底拍攝的正攝影像與近期的衛星影像進行判釋，但此方法僅能提供 2005 年以後的數據，因此，前面的年度是利用 2005 年以後的造林與再造林面積，與栽培與種植面積統計 (Statistics of Cultivated and Planted Area) 中的具森林覆蓋的農地 (forested cropland) 面積，設定調整參數，而後將 1990 年以後之具森林覆蓋的農地面積乘上調整參數即可獲得土地轉變為林地面積，2006 年以後則直接使用造林與再造面積估算。最後再將過去 20 年各年度土地轉變為林地的面積進行加總。林地維持林地的面積則利用森林總面積扣除土地轉變為林地面積求得。

美國日本森林清冊數據詳細資料如附錄二

### 3.分析比較

計算碳匯的部分美國、日本皆以儲存量差異法計算，臺灣則是採用增減法。美國、日本皆有計算死有機物質及土壤的碳匯，臺灣則假設為不變動。美國整體數據資料較完整，在生物量部分將地上部、地下部分開計算，土壤部分變化不大，亦有將其列入清冊。日本以林型分類統整計算，但些許林型數值變化不大，是會忽略不計，將其計算為零，在有機土壤類別，清冊指出此類別土地較不會種植林木，並且不會對土壤進行排水處理，故此類排放報告為 NO。臺灣則在





死有機質、土壤部分，因變化不大或相關研究數據不完整，目前都將碳儲存變化量假設為零。轉換係數臺灣以林型為主，日本以樹種為主，美國則以 CRM 函數估算。美國、日本皆採用生產法計算 HWP，美國有將其納入清冊統計，HWP 臺灣目前無放入清冊之中，但因臺灣使用增減法，在估算碳匯時已將林木伐採計入損失部分。

#### 4.可改進及維持之建議

- (1) 臺灣過去全國森林資源調查時間間隔久，需縮短調查年限。
- (2) 過去全國森林資源調查樣區、永久樣區，每次調查樣區不同，並未固定，未來需固定調查之樣區，使每次調查樣區、樣木皆相同，也可建立長期監測系統，了解森林變化概況。
- (3) 若在永久樣區調查，可在樣木上做記號，可使每次調查資料來源一致，然而不能僅靠永久樣區資料代表全台林型數據，亦應找尋其他樣區做調查。
- (4) 土壤類別目前台灣研究不足，假設為 0，依美國清冊可看出土壤數據變化不大，所以臺灣目前仍可假設為零，若要研究土壤，可先從礦質土壤著手。
- (5) 死有機物類別，臺灣採用方法 1 計算，因碳儲量變化不明顯，將其假設為零，而美國、日本皆採用自己國家之模型計算，目前臺灣可再確認未來計算方法，並且確認數值是否變化不明顯，再評估是否將其列入清冊計算。
- (6) 國際清冊計算第十二章中有加入 HWP 的計算，雖然臺灣在計算碳匯時已將林木伐採納入清冊中，仍建議未來將 HWP 納入至清冊中，使我國更了解 HWP 概況，但其數據不計入全台碳匯之中，以避免重複計算。

#### (二) 評估清冊中土地利用面積之活動數據改善方式。

年度森林面積變動需要掌握林地維持林地與其他土地轉成林地兩部分：

##### 1. 林地維持林地 (FF)

可以從森林基線中扣除轉變成為非森林的區域，即為年度林地維持林地的區域。從森林基線中扣除轉變成為非森林的區域，基本上配合類似衛星影像於土地利用變異點的監測一般，可以透過植生變異分析方式，將原本植生區域因開發、崩塌、火燒、盜伐、濫墾、病蟲害等因素，轉變成為非





植生的區域偵測出來，再從森林基線區域中扣除，完成森林面積變遷分析，得到當年度林地維持林地（FF）的區域。

## 2. 其他土地轉成林地 (LF)

其他土地利用轉成林地應為年度新植造林的區域，因此只要每年新植造林的位置能夠提供 GIS 圖層，即能提供其他土地利用轉成林地資訊。

綜合 FF 與 LF 區域，將可得到年度森林區域的位置圖層，進一步將林地維持林地區域與森林基線的林型分布套疊，即可得出林地維持林地中的各種林型資訊，再與 LF 區域直接的新植造林林型合併，即可年度林型分布圖層，做為後續清冊計算依據。

清冊之「土地利用、土地利用變化及林業部門」章節中，土地利用類別依據 2006 IPCC 指南建議，歸納為林地、農地、草地、濕地、聚居地及其他等六大類別，IPCC 有提供以下三種土地利用面積轉換調查記錄的方式

方法一為記錄淨土地轉換，不確定各土地類別之間如何轉換，僅記錄土地類別在時間上的面積增減；方法二為明確記錄不同土地類別之間的轉換；方法三以方法二為基礎，並且記錄空間位置；若資料充足，建議採用方法三記錄，透過前後土地利用調查，經 GIS 圖層變遷分析後，可以得到林地面積變遷矩陣，提供個別林型面積及其變化，其中應包含 FF 與其 LF 的面積有多少。同時為配合後續林地蓄積量及碳儲存量估算，林地的調查應具有林型區劃的林型面積資料，以便後續利用。下表 23、表 24 為記錄方法一、方法二土地利用轉換面積之範例

表 23 土地利用數據調查方法一，紀錄之範例

土地類別	時間 1	時間 2	時間 1 至時間 2 之間的淨土地利用轉換
林地	18	19	+1
草原	84	82	-2
農地	31	29	-2
濕地	0	0	0
集居地	5	8	+3
其他土地	2	2	0
總和	140	140	0





表 24 土地利用數據調查方法二，紀錄之範例

	林地	草原	農地	濕地	集居地	其他土地	最終面積
林地	15	3	1				19
草原	2	80					82
農地			29				29
濕地				0			0
集居地	1	1	1		5		8
其他土地						2	2
初始面積	18	84	31	0	5	2	140
淨變化	1	-2	+2	0	+3	0	0

土地利用間之轉換之資料收集，不僅只靠全國森林資源現場調查，亦可藉由遙測資訊(航照或衛星影像等)輔助取得面積轉變之數據，參考日本、美國土地利用面積活動數據來源，整理出下表 25 日本、美國森林面積產製之方法

表 25 日本、美國森林面積產製方法

	調查資料	調查方法	FF、LF 面積	缺失資料年度的處理方式
日本	國家森林資源資料庫 NFRDB	1.全面統計調查 2.正攝影像與衛星影像判釋(提供 2005 年以後之數據)	<ul style="list-style-type: none"> <li>LF 取自造林與再造林面積</li> <li>FF 則為森林總面積扣除 LF 面積</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>線性內插法推算</li> <li>2005 年以前的面積，以造林與再造林面積和具森林覆蓋農地面積的比例推估</li> </ul>
美國	1.國家資源調查 NRI 2.森林資源調查與分析 FIA 3.多解析土地特徵聯盟 MRLC	遙測影像、現地調查森林面積以 FIA 為主，並搭配其他兩種來源修正	<ul style="list-style-type: none"> <li>LF、FL 皆由 FIA 數據為主，並透過 NRI、MRLC 補充各類型土地面積</li> <li>FF 將 NRI、MRCL 與 FIA 面積差值進行調整</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>線性內插法推算</li> </ul>

年度森林面積的活動數據是需借助衛星影像分析，衛星影像可由美國太空總署與 CSIRO(澳洲聯邦科學暨工業研究組織)與澳洲地球科學團隊(Australian Geoscience Data Cube, AGDC)，所發展出開放資料立方(Open Data Cube, ODC)的技術，以開放資料的形式，倉儲多種的衛星資料，並完成幾何校正、輻射校正與大氣校正的影像前處理，提供可直接下載備便分析(Analysis-Ready)的多元空間尺度與時間序列的衛星影像資料。依據 2018 年”建置森林長期監測調查資料整







合分析機制及國家林業溫室氣體清冊報告編製(2/2)” (宜蘭大學, 2018)計畫所發展的面積活動數據機制, 其資料分析流程如下: 年度衛星影像篩選、年度無雲衛星影像接合、年度 NDVI 影像產製、年度植生狀態圖產製。

2018 年度計畫產製的年度森林面積, 在影像的篩選方面, 考量夏秋森林面積受到颱風影響較大, 故以年底影像篩選為主, 選擇雲覆較少的影像, 經挑選影像如下:

2017/8/17、2017/12/23 與 2017/12/30 共 7 張影像:

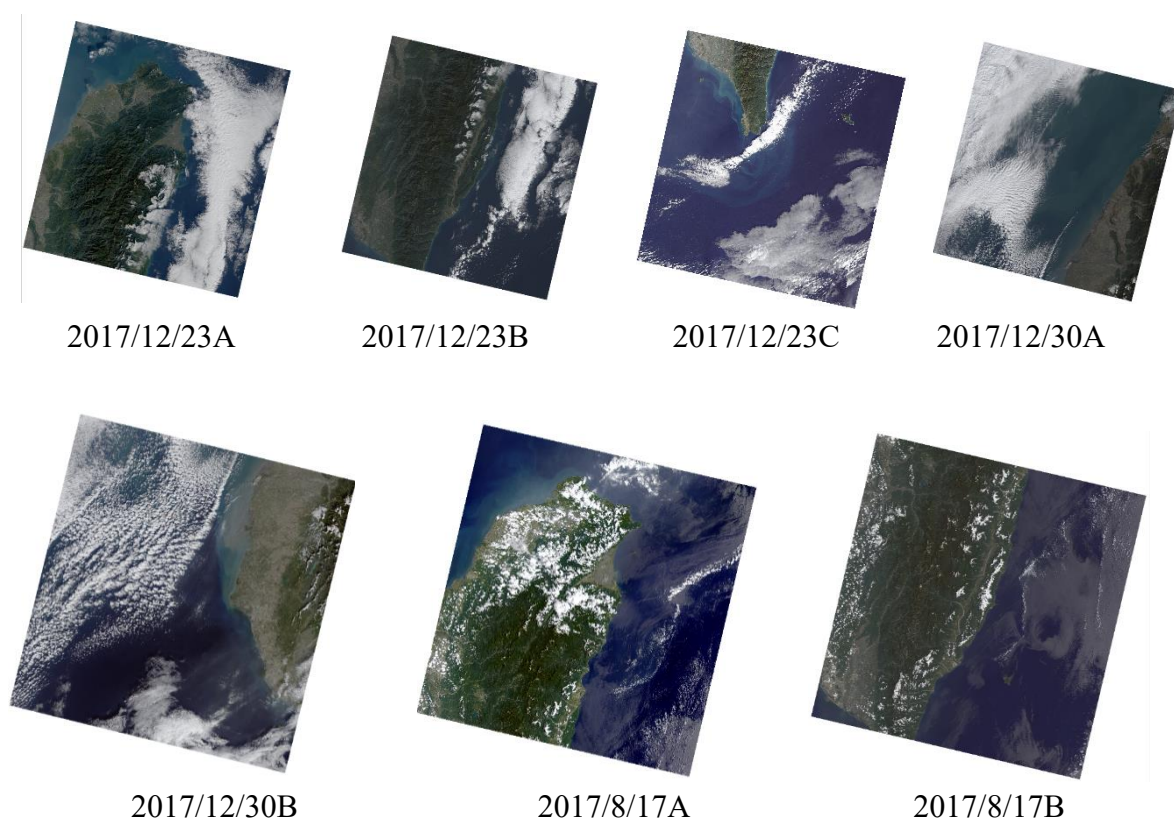


圖 3 2017 年 Landsat 台灣地區影像







由於不同時期的影像都有雲覆的情形，因此在影像套疊成全島影像時，需要選定雲覆較少的 2017/12/23 影像為基準，並以近紅外光反射值高於 6000 為門檻，將雲覆去除後，再疊合其他日期影像形成全島影像做為後續分析使用(圖 4)：

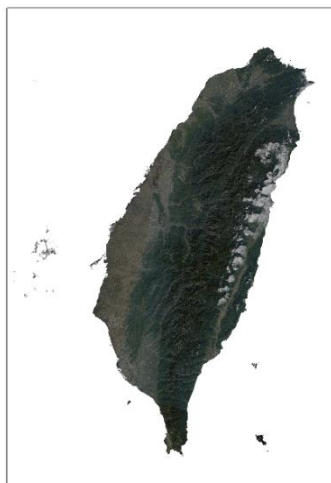


圖 4 2017 年台灣 Landsat 接合影像

接著以影像紅光與近紅外光計算常用在植生判斷的正規化植生指標：NDVI 值 $((\text{近紅外光}-\text{紅光})/(\text{紅光}+\text{近紅外光}))$ ，做為判斷是否為植生的依據。經計算後全島 NDVI 分布如下圖：

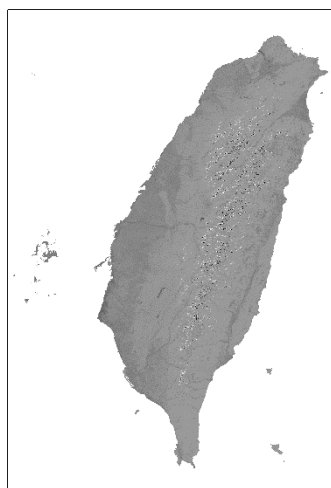


圖 5 2017 年 NDVI 圖

其中產製年度植生狀態圖係依據不同 NDVI 值來區分不同植生狀態。一般而言， $\text{NDVI} < 0$  為非植生，但經驗上及實務查看 NDVI 值情形，低 NDVI 值





也往往是屬於非植生類，因此本計畫以  $NDVI < 0.1$  為非植生區域，至少應該是沒有森林覆蓋的區域，另外森林覆蓋區域的  $NDVI$  值往往較高，部分稀疏或草生地區，其  $NDVI$  值較低，因此先暫以  $NDVI > 0.4$  為植生，介於 0.1-0.4 則定義為低度植生區域，做為後續分析討論：

表 26  $NDVI$  值植生代碼

$NDVI$ 值	植生代碼	植生狀態
-1-0.1	1	非植生
0.1-0.4	2	低度植生
0.4-1	3	植生

對應位於第四次森林資源調查森林覆蓋區域其中對應到目前  $NDVI$  計算區域有 1,839,218.63 公頃，2017 年植生狀態與第四次森林資源調查成果林型類型對應如下表：

表 27 植生狀態與第四次森林資源調查成果林型類型對應表(單位：公頃)

林型類型	非植生	低度植生	植生	合 計
天然濕地	0.63	-	2.26	2.89
竹林	66.30	665.75	96,550.66	97,282.71
竹針混淆林	0.27	1.76	663.43	665.46
竹針闊混淆林	0.02	0.67	229.52	230.20
竹闊混淆林	48.62	553.12	87,427.51	88,029.25
待成林地	214.48	971.41	22,759.53	23,945.41
針葉樹林型	1,583.52	2,428.15	235,259.73	239,271.40
針闊葉樹混淆林	1,110.79	3,599.80	139,144.32	143,854.92
闊葉樹林型	8,738.23	35,596.23	1,201,601.93	1,245,936.39
總 計	11,762.86	43,816.88	1,783,638.89	1,839,218.63

從上表可以清楚看出 2009 年第四次森林資源調查成果為森林覆蓋，其中有 11,762.86 公頃(0.64%)於 2017 年已轉變成非植生，至於低度植生部分也有 43,816.88 公頃(2.38%)，其他均位於植生區域，約佔 96.98%：





表 28 植生狀態與第四次森林資源調查成果林型類型百分比對應表(%)

林型類型	非植生	低度植生	植生	合 計
天然濕地	21.76	0.00	78.24	100
竹林	0.07	0.68	99.25	100
竹針混淆林	0.04	0.26	99.70	100
竹針闊混淆林	0.01	0.29	99.70	100
竹闊混淆林	0.06	0.63	99.32	100
待成林地	0.90	4.06	95.05	100
針葉樹林型	0.66	1.01	98.32	100
針闊葉樹混淆林	0.77	2.50	96.73	100
闊葉樹林型	0.70	2.86	96.44	100
總 計	0.64	2.38	96.98	100

整體而論，第四次森林資源調查成果各森林林型均有極高比例位於植生區域，若整併低度植生與植生區域應可產製出年度森林面積，顯示使用目前 NDVI 分級成不同植生狀態方式，確實能估算林地維持林地的年度森林面積。

透過 Open Data Cube 技術運用三期 Landsat 衛星影像拼合出台灣地區的完成影像後，應用 NDVI 指數，區分出非植生、低度植生與植生區域，再經合併後得以計算出 2017 年度森林面積，從上述結果，以衛星影像產改善年度森林面積活動數據是可行的方法，但衛星影像受雲層、解析度等影響，需靠後續資料處理或資料的疊合，以精進資料的完整。

未來林地維持林地年度森林面積建置建議依下列流程進行：

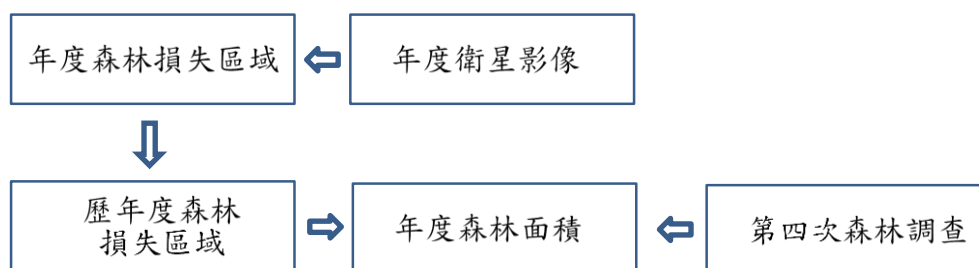


圖 6 年度森林面積

建議林地維持林地的森林覆蓋區域未來可透過衛星影像產製出年度損失區域，再將自 2009 年以來的年度裸露區域重疊套合成歷年度損失區域後，與第四次林資源調查成果森林覆蓋區域套疊扣除後，將可得到林地維持林地的森





林覆蓋區域，可做為當年度森林面積。

國際清冊報告中，各國大多會使用衛星影像等遙測資料收集土地利用面積，台灣可參考國際上使用之方法，並致力於將遙測應用至改善土地例用面積的活動數據，可使用台灣本身既有資料，例如國土測繪中心之國土利用現況調查成果圖，將資料數據化，加上運用衛星影像圖，只要每年確實收集造林或再造林之資料，再將遙測得到的全台森林面積減去造林部分，即可得到林地維持林地之面積數據。非林地轉為林地之資料，雖目前僅來自林業管理單位，但若有活動數據，可建立 GIS 圖資，以利後續追蹤分析，非林地轉為林地還需其他中央部會或民間團體之數據，此部分預計於 113 年 1 月中旬，邀請中央部會開會討論，請各單位提供造林數據及 GIS 圖資，以完整清冊資料，以下為開會預計邀請單位及討論事項(暫定)

#### 擬邀請單位

- 中央機關：經濟部水利署、農業部農村發展及水土保持署、財政部國有財產署、原住民委員會、交通部高速公路局港務公司、內政部國土管理署、國家公園保育署等

#### 預計討論事項

1. 國有地碳匯估算乘呈現方式
2. 國有地造林資料整合機制
3. 國有地碳匯結果呈現方式

### (三) 評估利用光達 (LiDAR) 技術改善森林蓄積推估模式，及發展長期生長監測與發展樣木材積式之可行性，於 112 年完成樣區篩選並說明空載光達及地面光達資料準備情形。

使用遙測技術監測與評估大尺度森林資源變化已成為國際的共識，也是現代化森林經營不可或缺的工具，在效率與變遷監測上彌補了地面調查的限制(宋承恩等，2022)。光達技術已有許多使用於林業的案例，例如藉由 3D 建模，將樹木材積利用模擬的方式估算出，對於計算碳匯提供一項新的技術。透過空載光達與地面光達的結合，可以量測包含樹高、胸徑、材積等重要數據，





來推估森林蓄積及建立長期生長監測機制與建構樣木材積式之可行性。執行規劃方面，將篩選適當大小的林分，光達技術可以提供高解析度的數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 和樹冠頂部的數值地形模型 (Digital Terrain Model, DTM)，藉此取得空載光達掃描林分高度資訊 (Canopy Height Model, CHM)，利用林分高度做為分層取樣依據，將估計出不同林分高度分層的面積，在各高度分層中篩選適當的地面樣區，配合樣區樣木調查結果，做為分層取樣調查後，不同高度分層的樣區蓄積，以推算出不同高度分層的分層總蓄積，再予以加總後可得林地蓄積量。此種分層取樣所推算的林分蓄積，將與過去簡單逢機取樣調查的林分蓄積加以比較，察知兩者差異，並分析其執行利弊，做為利用光達技術改善森林蓄積推估模式使用。在樣木調查方面，將利用地面光達掃描適當樣區，建構數位樣區資訊。運用數位樣區資訊，可以進行樹高與胸徑量測，做為日後生長監測比較之基準。此外，亦將透過數位樣區資訊量測全材材積，建構樣木材積式，做為樣區材積推估使用。總體而言，利用光達技術改善森林蓄積推估模式和發展長期生長監測以及樣木材積式具有很大的可行性和應用價值。

LiDAR 是 Light Detection And Ranging 的縮寫，和遙感探測一樣，是 利用光學照射目標物，透過光學感測器捕獲其反射光來測量距離的遙測方法。光達系統可依載台(platform)位置不同，發射雷射光波長、種類不同，應用面等不同目的而區分出許多不同的類別，依照不同接收點區分有單點出發回波接收方式 (Monostatic, Coaxial only) 與發射接收端位於分開的兩軸 (Bistatic, Biaxial only)。依雷射光種類而區分：脈衝波式 (Pulsed) 的與連續波式 (CW, Continuous-Wave)；依雷達光束 (LiDAR Beams) 區分為聚焦式的 (Focused) 和平行光束 (Collimated)；依據載台種類、拍攝位置可區分為，實驗室內使用 (Laboratory)、地面動態光達測量 (Ground-Mobile)、空載 (Airplane)、熱氣球 (Balloon)、船載測量海底資料 (Ship)、衛星載 (Spacecraft)；還可再依功能性分類，測量物體移動速度、方向的督卜勒式光達系統 (Doppler LiDAR)、非督卜勒式光達系統 (Non-doppler LiDAR) 以及測量大氣污染程度、空氣中物質濃度的差分吸收光達 (DIAL,





Differential Absorption LiDAR)、非差分吸收光達(Single Wavelength, Non-differential Absorption LiDAR)。

使用光達的優勢為可經由光達照射得到較高精度之高度、位置等資料，並且向各方向照射雷射，可捕獲大範圍資料。缺點限制為會受天氣狀況、其他之非偵測物件遮蔽影響數據精度，並且收集到的數據需經過處理才可使用。

林業相關之使用為空載光達(Airborne LiDAR)及地面光達(Ground-based LiDAR)，光達系統在林業上的應用主要分為地面生物量的估算以及林分垂直結構的模擬。地面生物量的估算主要涵蓋範圍有：葉面積指數、幹木及樣區材積、含碳量、枝葉重、幹部重、絕乾重等的估算，多以小樣區面積為單位估計。林分垂直結構的模擬之原理為以雷射光穿透林分結構後將垂直面投影出來，可初步區分為表面高、地面物高、地面高，並探討航帶間之垂直投影面結構與林分立體結構之關係。過去運算材積需砍伐木材，以測量整體木材之數據，後續亦有經人工進到林地進行測量 DBH、樹高，以估算材積、生長監測，現今光達技術可藉由非破壞性方式，達到調查及監測森林樣區之立木三度空間資料。以下為空載光達、地面光達在林業之應用：

#### 1. 空載光達

可藉由光達穿透至地表得到高精度三維座標的點雲資料，和樹冠的回波資訊等，也就是能經光達估算得到數值地形模型、數值高程模型、樹冠高度模型、葉面積指數(Leaf Area Index, LAI)，以上數值可表示真實地形特徵的空間分布、林木之大致形狀，除了可提供基本地形的測繪外，也可以運用於森林資源調查中，樹高、樹冠密度等空間資訊監測、林分疏密測定及災害監測等應用。







空載光達以飛行器由上而下進行掃描作業，可收集大範圍的資料，空載光達訊號具有多重反射回波特性，有全回波系統、非連續式回波(圖 7)，全回波系統可得到連續之反射值紀錄；非連續則會得到單次或多次的點反射值。

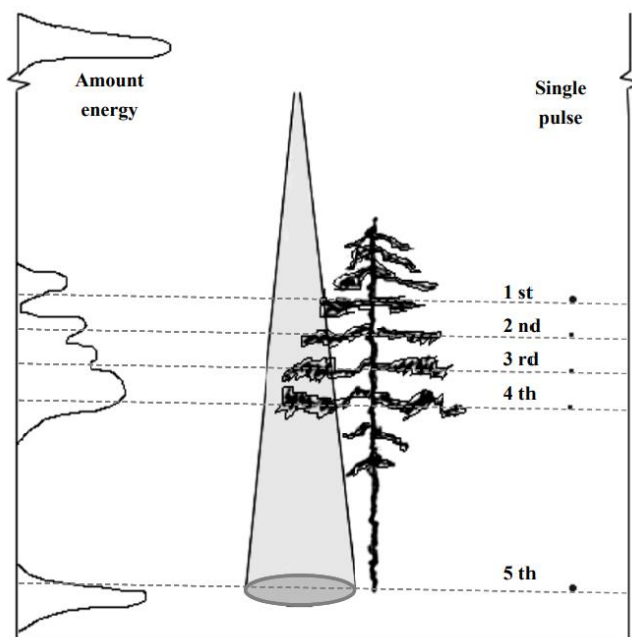


圖 7 空載光達全回波(左邊訊號)與非連續回波(右邊訊號)之反射

## 2. 地面光達

地面光達相較於空載光達，其作業範圍以地面小尺度範圍為主，能夠精確的記錄下環境中的三維形貌。地面光達亦可收集空間資料，只是得經多點位方式收集，並且收集上較空載光達範圍小，多應用於如胸高直徑、樹幹材積、林分密度、每木位置等介量的量測，但受限於掃描格式與林分之環境，地面光達之資料後處理往往需要耗費許多時間與人力來完成。



地面光達分為手持式與架站式兩種，架站式是以三角架或車輛等載具固定掃描進行掃描作業，而手持式是拿於手上進行連續性光達掃描。測量方法是由發射器發出雷射光之後經反射稜鏡以特定角度導出，而後接收到物體反射訊號以求得距離，搭配測定 GNSS 參考點及拼接軟體及水平、垂直兩個方向之角度，便可得到物體在三維空間中的相對座標位置。地面光達是除儀器正下方約一公尺範圍外皆可掃描，搭配掃描儀本體之轉動或是等速旋轉之稜鏡而獲得水平及垂直方向上的偵測能力，依掃描特性可分為二類縱掃式（定向式）掃描儀與橫掃式（本體旋轉式）掃描儀兩類(圖 8)，縱掃式掃描儀以儀器內部之水平及垂直兩個旋轉稜鏡引導雷射之方向，儀器本體不轉動，因此掃描之視野較窄，如果需要掃描較寬視野區可靠人工移動或是旋轉儀器方式來補足；橫向式掃描儀，本體有馬達驅動旋轉，儀器內垂直方向上有旋轉之稜鏡，可掃描視野較寬。

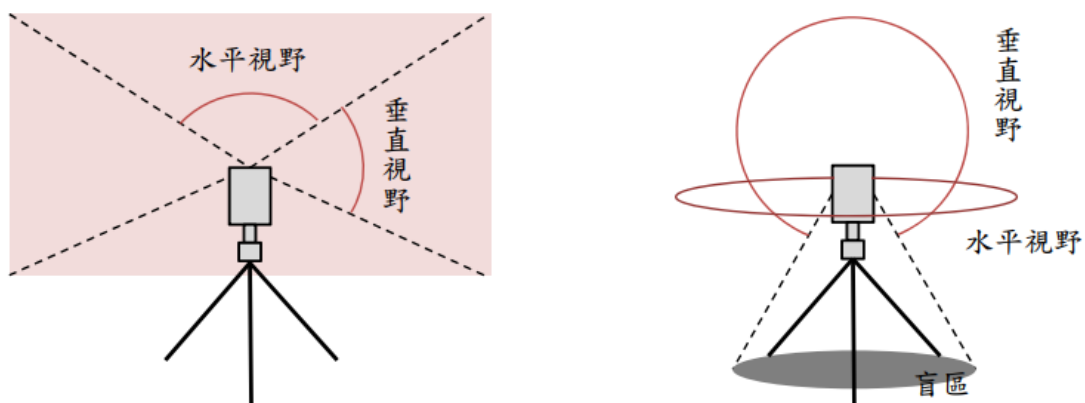


圖 8 縱掃式(左)與橫掃式(右)掃描視野

依上述可看出地面光達可掃描較小範圍之數據，可直接採用單站點掃描，若要掃描之目標範圍超過單一次掃描範圍，或遮蔽物會導致接收到資訊不足時，就可使用多站點掃描，以不同角度與位置掃描目標範圍內之情況，各位置掃描後的座標將以重疊區域或共軌進行連結，以得到目標三維資訊。

以下表為空載光達、地面光達運用優缺點比較表





表 29 不同種類光達優缺點比較

	優點	缺點
空載光達	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 適用於快速且大範圍的點雲資料收集</li> <li>• 無視地形阻礙進行光達掃描</li> <li>• 相較地面光達操作較簡易迅速</li> <li>• 單位面積的光達點雲數量成本較地面光達低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 只能掃描物體表面，無法掃描至遮蔽物下方的物體或表面</li> <li>• 需有空中飛行載體搭配才可進行光達掃描</li> <li>• 目前空載光達儀器本身成本相較於地面光達價格偏高</li> <li>• 空載光達執行光達掃描任務時風險較地面光達高(需考慮載體碰上天氣、碰撞、斷訊墜毀等因素)</li> <li>• 點雲資料量龐大且精準度不如地面光達</li> <li>• 點雲資料密度較地面光達低，需透過多次光達掃描或是加強光達掃描功率來彌補</li> <li>• 資料量較龐大，處理資料較花時間</li> </ul>
架站式 地面光達	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 儀器成本較空載光達低</li> <li>• 可以掃描遮蔽物下方之物體或表面</li> <li>• 透過連續測站達成大範圍光達掃描的效果</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 無法掃描位於頂層上方表面之點雲</li> <li>• 如欲進行大區域面積之光達掃描，需架設更多的站點，較為費時耗力</li> <li>• 大部分光達掃描後的點雲資料需要進行手動拼接</li> </ul>
手持式 地面光達	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 彌補測站式地面光達架設操作的複雜性，可連續進行大面積測量</li> <li>• 攜帶較為便利，只需依靠儀器本身就可進行測量，無需準備載體</li> <li>• 可藉由桿架抬升等方式，提升光達掃描的範圍</li> <li>• 點雲資料拼接在當場即可完成，後續僅需匯入軟體</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 光達掃描後資料僅能透過特定軟體解算</li> <li>• 點雲資料座標精度較差</li> <li>• 需進行閉合光達掃描(起期點至終點需在同一個位置)，存在一定的不便性</li> </ul>

森林調查中往往需要測量樹高及胸高直徑，尤其是材積難以快速量化，因此未來森林調查可採用光達點雲進行快速分析。透過空載光達技術可以建立高解析度的地表高程(DEM)和樹冠頂部的高程(DTM)，藉此取得空載光達掃描林分樹高的資訊(CHM)，利用林分高度分層取樣，可估計出不同林分高度分層的面積。接著利用地面光達建立樹木樹幹的點雲，可快速掌握胸高直徑及材積等資訊。





結合空載光達及地面光達，可實現量測樹高、胸高直徑、材積等樹木數據。隨著光達技術的進步，儀器所用的技術及光達掃描的效率都有得到提升，對未來林業調查具有前瞻性，可輔助傳統林業調查。因光達點雲具有保存樹木當下的型態，過去調查後因樹木後續生長而無法進行校驗，透過光達點雲可以進行樹木長期監測及追縱比對複查。

#### 應用範例

以 Better monitoring of forests according to FAO' s definitions through map integration: Significance and limitations in the context of global environmental goals 為光達應用範例，國家森林監測對於追蹤全球環境目標至關重要，然而首先要確立的是對森林的定義，各國定義不太一致會使全球難以追蹤我們所立的环境目標，聯合國糧食及農業組織 FAO 對森林的定義為面積大於 0.5 公頃，樹高 5 公尺以上，樹冠覆蓋率 10% 以上的土地，或於原生育地之林木成熟後符合前述條件，但不包括主要為供農作與都市使用之土地。以下為定義細項說明

- 包括林道、防火帶和其他小型空地；國家公園、自然保護區和其他保護區的森林，例如具有特定環境、科學、歷史、文化或精神利益的保護區。
- 包括面積 0.5ha 以上、寬度 20m 以上的防風林、防護林、林廊。
- 包括廢棄的輪耕地，並再生樹木，樹冠覆蓋率達到或預計達到 10%，樹高 5 m。
- 包括潮汐帶內有紅樹林的區域，不論該區域是否被歸類為陸地區域。
- 包括橡膠木、栓皮櫟和聖誕樹種植園。
- 包括有竹子和棕櫚樹的地區，前提是土地利用、高度和樹冠覆蓋標準得到滿足。
- 不包括農業生產系統中的林分，例如樹種植園、油棕種植園和農作物在樹木覆蓋下生長的農林業系統。註：一些農林業系統，例如僅在森林輪作的第一年種植農作物的「Taungya」系統，應歸類為森林」（FAO，2010）。

運用 PALSAR-2 森林/非森林地圖及 LULC 類別的國家地圖，發展一整合地圖方法，產生符合 FAO 森林定義的國家地圖。運用到 PALSAR-2 資料優勢，如對森林結構的敏感性和穿透雲層的能力，以及國家 LULC 地圖的優勢，如識別主要城市或農業土地利用的能力，將全球「PALSAR-2 森林/非森林地圖」的主題資訊與包含更詳細的 LULC 類別的國家地圖的主題資





訊合併，生成符合 FAO 森林、其他有樹木覆蓋的土地定義的整合地圖，此文獻以菲律賓為例，將國家 LULC 地圖(NAMRIA-2020)與 PALSAR-FNF 地圖整合，整合出的地圖識別出在該國官方 LULC 土地額外的  $5.937 \pm 0.217$  百萬公頃的“缺失森林”(FAO 定義為分布在灌木叢、草地、濕地/沼澤地區的小片森林)，也識別出  $4.294 \pm 0.258$  百萬公頃的“其他有樹木覆蓋的土地”(FAO 定義為以前未繪製在地圖上，指的是主要位於農業和城市土地上的樹木覆蓋區域)，根據確定的這些額外的「缺失森林」(估計為每年  $87,085 \pm 3,185 \text{ GgCO}_2$ ) 和「其他有樹木覆蓋的土地」(估計為每年  $58,395 \pm 3,512 \text{ GgCO}_2$ ) 的區域，估計有每年  $145,480 \text{ Gg CO}_2$  的額外碳匯。此方法具有足夠的普適性，有可能應用於其他國家，以進行更標準化的森林和生態系統服務監測。

關於 113 年將執行光達測試之樣區，目前規畫地點為大農大富平地森林園區，位處花蓮縣光復鄉，地處花東縱谷，兩側為中央山脈與海岸山脈，占地 1250 公頃，圖 9 為大農大富平地森林全區路線示意圖



圖 9 大農大富平地森林園區路線圖







### 三、建置人工林蓄積量預測模式及研提「森林碳匯調查手冊」初稿

#### (一) 建置人工林 5 個以上重要樹種林分的地位指數模式、枯死模式、樹高—直徑方程式

在森林生長模式的分類上可區分為林分模式、直徑級模式和單株模式(馮豐隆, 1992; Clutter et al., 1983; Davis and Johnson, 2005; Hasenauer, 2006; Avery and Burkhardt, 2008), 由於模式建構的出發點不同, 因此所需的資料結構形態亦有所不同, 各模式各有其優缺點, 無法由單一模式完全取代其他模式。森林生長收穫受到樹種(species)、林齡(age)、地位(site)及林分密度(stand density)等因子之綜合影響(Clutter et al., 1983), 因此在模式的建構上應對以上各因子加以考量。

本研究擬使用林業保育署永久樣區的調查資料, 發展林分模式或單木距離獨立模式, 並藉此估算不同期間的蓄積量。全林分模式, 常以材積量為因變數, 而以林齡、地位、林分密度等為自變數(馮豐隆, 1992; 楊榮啟和林文亮, 2003; Clutter et al., 1983; Avery and Burkhardt, 2008)。單株模式需要使用相同林木的複測資料, 依各別林木推估其枯死機率, 並推估留存林木的生長量(Hann et al., 2003; Avery and Burkhardt, 2008)。

林業保育署永久樣區具有單株林木的連續調查資料, 只是目前的調查次數仍然有限, 尚無法由單一個樣區即完成生長模式的建置。不過, 仍然可透過多個永久樣區之資料結構進行規劃, 以建立相關模式。首先依主要造林樹種別加以區分林型, 再計算其相關的性態值, 建立相關模式, 最後整合成森林生長模式進行預測。

##### A. 地位指數模式

使用主要樹種的林分高與林齡配製模式(汪大雄等, 2008; 汪大雄等, 2012; 黃凱洛等, 2011; 王兆桓等, 2012; Clutter, 1983; Pretzsch, 2009; Weiskittel et al., 2011; Lee, Choi, 2022)。本研究擬使用永久樣區具造林年度資料且至少經過兩次調查之樣區, 以個別樣區的各次調查時之樹高, 從林型主要目標樹種的優勢木與次優勢木中, 篩選合適的最高 6 株樣木為原則, 做為地位林







木(Site trees)，以其平均樹高做為林分高；但須注意現有樣區有時會含有造林前已有的林木遺留在樣區內，故篩選時應予排除；另外，有些幼齡林的樣木都被記錄成疏立木，應併入篩選對象。

本研究首先以 Richards 型態之曲線模式為基礎，配製樹高-林齡曲線，結果可以轉為地位指數曲線如下所示：

樹高-林齡曲線： $H_d = b_1 [1 - \exp(-b_2 A)]^{b_3}$

地位指數曲線： $SI = H_d [1 - \exp(-b_2 A_0) / 1 - \exp(-b_2 A)]^{b_3}$

式中：

SI：地位指數。

$H_d$ ：優勢木平均樹高。

A：林齡。

$A_0$ ：基準齡。

此地位指數的建構係以林齡為自變數，林分高為應變數，再以 Richards 模式配置樹高-林齡曲線進行參數推估，然後再選定基準齡，轉換成地位指數曲線。此模式所需要的資料為各期的林齡和林分高即可，因此可獲得的樣本數較多(如表 30)，其中以柳杉最多(677 筆)，肖楠最少(112 筆)。由於永久樣區已經有 5 輪調查，本研究將基準齡設為 25 年生，篩選樣區調查時序有跨過 25 年生者，以內差法求得基準齡的林分高，做為實測的地位指數，再將所有符合此條件的樣區之其他各期的林齡和林分高，整理成表 31 所示，此種方式可獲得的樣本數較少，其中以檜木最多(195 筆)、臺灣杉次之(144 筆)、杉木最少(47 筆)。前者資料雖然較多，但只能發展較簡單的模式；後者資料雖然較少，但可以發展較複雜的模式。

本研究配置的林分高-林齡曲線(或稱，林分高生長模式)共有 5 種(汪大雄等，2008；汪大雄等，2012；黃凱洛等，2011；王兆桓等，2012)，如表 32 所示，其中第 1 個較為簡單模式是使用前節表 30 的資料，其餘的 4 個較為複雜的模式是使用表 31 的資料。

本研究目前已完成了檜木、臺灣二葉松、杉木類、臺灣杉、柳杉、肖





楠等 6 種樹種之林分高生長模式，結果如表 33 至表 38 所示，各樹種的林分高生長模式皆以第 1 個模式最差，檜木以第 4 個模式最佳(RMSE=1.51)、臺灣二葉松以第 5 個模式最佳(RMSE=1.75)、杉木類以第 3 個模式最佳(RMSE=1.53)、臺灣杉以第 5 個模式最佳(RMSE=2.11)、柳杉以第 2 個模式最佳(RMSE=1.84)、肖楠以第 3 個模式最佳(RMSE=2.28)。

本研究亦提供地位指數模式如表 39 所示，表裡的模式皆是對應於表 32 的模式轉換而來，但第 1 個模式從缺。本研究使用表 31 的資料，完成了檜木、臺灣二葉松、杉木類、臺灣杉、柳杉、肖楠等 6 種樹種之地位指數模式，結果如表 40 至表 45 所示，其中檜木、臺灣杉、柳杉、肖楠等 4 種樹種皆以第 5 個模式最佳，而臺灣二葉松以第 4 個模式最佳(RMSE=1.95)、杉木類以第 3 個模式最佳(RMSE=1.48)。

雖然前述兩類模式常可以互相轉換，但是在實務應用上還是有些差別，如果要應用於林分高生長預測時，則採用林分高模式較佳；如果要用於評估林地生產力時，則採用地位指數模式較佳。

表 30 針葉樹各林型林齡(Age)及林分高(Hd)統計值

樹種	統計量	樣本數	平均值	最小值	最大值	標準差
檜木	Age	383	31.25	4.00	107.00	16.63
	Hd	383	13.48	3.00	30.20	4.41
臺灣二葉松	Age	351	34.48	3.00	86.00	11.97
	Hd	351	17.36	3.00	44.20	5.46
杉木	Age	257	37.58	5.00	107.00	16.83
	Hd	257	15.47	6.80	26.70	3.72
臺灣杉	Age	251	29.06	7.00	65.00	10.65
	Hd	251	16.82	4.00	32.20	5.32
柳杉	Age	677	44.83	5.00	108.00	16.51
	Hd	677	19.54	6.00	32.30	4.35
肖楠	Age	112	33.43	8.00	112.00	18.64
	Hd	112	12.45	4.00	26.80	5.27





表 31 針葉樹各林型林齡(Age)、林分高(Hd)及地位指數(S)統計值

樹種	統計量	樣本數	平均值	最小值	最大值	標準差
檜木	Age	195	27.3	7.0	50.0	8.57
	Hd	195	12.6	5.0	24.7	3.62
	S	195	12.2	6.2	21.2	2.84
臺灣二葉松	Age	80	27.7	12.0	45.0	8.10
	Hd	80	16.7	7.8	44.2	6.73
	S	80	15.6	8.5	42.5	6.73
杉木	Age	47	26.8	14.0	48.0	7.40
	Hd	47	14.7	9.5	19.0	2.33
	S	47	13.8	11.8	17.3	1.63
臺灣杉	Age	144	27.2	13.0	48.0	8.27
	Hd	144	16.3	4.0	27.3	4.54
	S	144	15.5	4.0	24.5	3.44
柳杉	Age	93	30.0	16.0	48.0	7.60
	Hd	93	18.3	6.0	30.8	4.09
	S	93	16.9	11.1	25.7	2.89
肖楠	Age	52	27.4	11.0	42.0	6.93
	Hd	52	11.0	5.8	26.0	4.16
	S	52	9.7	6.2	14.6	2.40

表 32 林分高生長模式及其公式

項次	模式	公式
1a	Richards(1959) 簡式	$Hd = a_1 * (1 - \exp(-a_2 * Age))^{**} a_3$
2a	Chapman-Richards (Richards 1959)	$Hd = SI * ((1 - \exp(-a_2 * Age)) / (1 - \exp(-a_2 * A_0)))^{**} a_3$
3a	Liu (1996)	$H = S * (A_0/A)^{**} b_1 * \exp(b_2 * (A_0 - A))$
4a	Payandeh and Wang (1994)	$H = b_1 * S^{**} b_2 * (1 - \exp(-b_3 * A))^{**} P;$ $P = \log(S / (b_1 * S^{**} b_2)) / \log(1 - \exp(-b_3 * A_0))$
5a	Payandeh and Wang (1995)	$H = S * (1 - \exp(-b_1 * A^{**} (b_2 * S^{**} b_3))) / (1 - \exp(-b_1 * A_0^{**} (b_2 * S^{**} b_3)))$

表 33 檜木造林的林分高生長模式之迴歸係數

模式	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	MSE (m <sup>2</sup> )	RMSE (m)	Rank
1a	54.2161	0.00247	0.5233	8.6996	2.95	5
2a	-	0.0280	0.8389	2.4992	1.58	3
3a	-0.8041	0.00888	-	2.4997	1.58	4
4a	8.8252	0.4270	0.0208	2.2725	1.51	1
5a	0.0306	0.4415	0.3491	2.2894	1.51	2





表 34 臺灣二葉松造林的林分高生長模式之迴歸係數

模式	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	MSE (m <sup>2</sup> )	RMSE (m)	Rank
1a	61.4699	0.000035	0.1865	28.3006	5.32	5
2a	-	0.00390	0.3257	7.4802	2.73	4
3a	-0.3310	0.000802	-	7.4800	2.73	3
4a	271338	-2.4505	0.000156	4.0680	2.02	2
5a	0.00573	0.1121	1.0235	3.0670	1.75	1

表 35 杉木類造林的林分高生長模式之迴歸係數

模式	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	MSE (m <sup>2</sup> )	RMSE (m)	Rank
1a	29.1554	2.826E-7	0.0548	13.6709	3.70	5
2a	-	-0.9076	0.0122	2.4276	1.56	2
3a	0.4369	-0.0258	-	2.3419	1.53	1
4a	4.414E-6	6.1508	0.000556	2.6183	1.62	3
5a	-1.3636	0.000430	2.1463	2.6457	1.63	4

表 36 臺灣杉造林的林分高生長模式之迴歸係數

模式	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	MSE (m <sup>2</sup> )	RMSE (m)	Rank
1a	49.0046	0.00353	0.4514	20.7907	4.56	5
2a	-	0.0305	0.7067	4.9010	2.21	4
3a	-0.7200	0.00956	-	4.8880	2.21	3
4a	12.9939	0.3365	0.0132	4.7143	2.17	2
5a	0.0556	0.0278	1.1765	4.4387	2.11	1

表 37 柳杉造林的林分高生長模式之迴歸係數

模式	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	MSE (m <sup>2</sup> )	RMSE (m)	Rank
1a	115.3	0.000037	0.2753	14.9500	3.87	5
2a	-	-0.7599	0.0190	3.3679	1.84	1
3a	0.1499	-0.0192	-	3.3941	1.84	2
4a	21238.5	-0.3465	4.474E-8	3.5518	1.88	3
5a	-0.8658	0.3566	-0.1861	3.5567	1.89	4





表 38 肖楠造林的林分高生長模式之迴歸係數

模式	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	MSE (m <sup>2</sup> )	RMSE (m)	Rank
1a	38.0902	0.00804	0.7454	12.2042	3.49	5
2a	-	-0.6854	0.0437	5.2791	2.30	2
3a	0.5968	-0.0498	-	5.1877	2.28	1
4a	6.577E8	-2.3955	4.02E-8	5.6449	2.38	4
5a	-0.3729	0.8436	-0.2762	5.5698	2.36	3

表 39 地位指數的模式及其公式

項次	模式	公式
1b	-	-
2b	Chapman-Richards (Richards 1959)	$SI = Hd * ((1 - \exp(-a_2 * A_0)) / (1 - \exp(-a_2 * Age)))^{**a_3}$
3b	Liu (1996)	$S = H * (A_0/A)^{**b_1} * \exp(b_2 * (A_0 - A))$
4b	Payandeh and Wang (1994)	$S = b_1 * H^{**b_2} * (1 - \exp(-b_3 * A_0))^{**P}$ ; $P = \log(H / (b_1 * H^{**b_2})) / \log(1 - \exp(-b_3 * A))$
5b	Payandeh and Wang (1995)	$S = H * (1 - \exp(-b_1 * A^{**b_2} * H^{**b_3})) / (1 - \exp(-b_1 * A_0^{**b_2} * H^{**b_3}))$

表 40 檜木造林地位指數模式之迴歸係數

模式	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	MSE (m <sup>2</sup> )	RMSE (m)	Rank
1b	-	-	-	-	-	-
2b	-	0.0105	0.6639	2.3986	1.55	3
3b	0.6602	-0.00315	-	2.3987	1.55	4
4b	756.4	-0.4928	0.000330	2.3130	1.52	2
5b	20.1014	-1.8213	-0.2515	2.2806	1.51	1

表 41 臺灣二葉松造林地位指數模式之迴歸係數

模式	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	MSE (m <sup>2</sup> )	RMSE (m)	Rank
1b	-	-	-	-	-	-
2b	-	-1.0330	0.0129	5.6884	2.39	3
3b	-0.0248	0.0142	-	5.7604	2.40	4
4b	3.2589	0.6929	0.0453	3.8019	1.95	1
5b	815.3	-2.8970	-0.1654	3.8212	1.95	2





表 42 杉木類造林地位指數模式之迴歸係數

模式	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	MSE (m <sup>2</sup> )	RMSE (m)	Rank
1b	-	-	-	-	-	-
2b	-	-0.9336	0.0101	2.6409	1.63	4
3b	-0.8190	0.0396	-	2.1894	1.48	1
4b	1.6757	0.8596	0.0527	2.5575	1.60	3
5b	1011.5	-3.5218	-0.2500	2.2146	1.49	2

表 43 臺灣杉造林地位指數模式之迴歸係數

模式	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	MSE (m <sup>2</sup> )	RMSE (m)	Rank
1b	-	-	-	-	-	-
2b	-	-0.0331	0.2940	4.7287	2.17	4
3b	0.2540	0.00711	-	4.7228	2.17	2
4b	19.7172	0.5468	0.000894	4.7272	2.17	3
5b	41.9181	-1.6075	-0.1545	4.6365	2.15	1

表 44 柳杉造林地位指數模式之迴歸係數

模式	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	MSE (m <sup>2</sup> )	RMSE (m)	Rank
1b	-	-	-	-	-	-
2b	-	-0.7887	0.0192	2.6267	1.62	3
3b	-0.1736	0.0208	-	2.6404	1.62	4
4b	0.000059	5.0282	0.000099	2.1674	1.47	2
5b	20.3008	-0.1497	0.5644	2.0962	1.45	1

表 45 肖楠造林地位指數模式之迴歸係數

模式	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	MSE (m <sup>2</sup> )	RMSE (m)	Rank
1b	-	-	-	-	-	-
2b	-	-0.9507	0.0338	2.8472	1.69	4
3b	-1.1283	0.0723	-	2.5306	1.59	3
4b	0.1277	2.1187	0.0170	1.6179	1.27	2
5b	0.8481	-0.0160	1.4668	1.4168	1.19	1







## B. 枯死模式

採用二分類 Logistic 函數發展單木的枯死模式，以地位指數(SI)或林分高(Hd)、胸徑(D)、樹冠比(CR)、大於目標林木的胸高斷面積合計值(SBAL)以及林分密度(Density)等 5 類自變數配製主要樹種的枯死模式(陳鈺惠等，2010；王兆桓等，2012；Hann and Wang，1990；Pretzsch，2009；Weiskittel et al.，2011)。

林木枯死模式常使用 Logistic 模式：

$$MR=1/(1+EXP(-Z))$$

$$Z=b_0+b_1X_1+b_2X_2+\dots+b_pX_p$$

式中：

MR：林木在未來 5 年中枯死的機率。

$X_1, X_2, \dots, X_p$ ：獨立變數，包括 D、CR、SI 或 Hd、SBAL、Density 等變數。

$b_1, b_2, \dots, b_p$ ：迴歸係數。

一般而言，較大的直徑(D)或樹冠比(CR)會增加存活的機率，較高的林分高(Hd)或地位指數(SI)會減少單木的存活機率，大於目標林木的胸高斷面積合計值越大(BAL)亦會減少單木的存活機率。

枯死模式是森林生長量與蓄積量分析系統中的重要組成部份之一，但至今國內的枯死模式仍是生長與收穫模式中研究最少的一部份。其主要原因是由於林木死亡的機率很小，一般的試驗難以收集到充足的數據進行分析。林業保育署國有林永久樣區迄今為止完成 5 輪調查，並正進行第 6 輪調查，而本研究發展枯死模式所使用的資料為其有連續兩次調查且無明顯受損或干擾的樣區資料。

Logistic 模式最常被用於發展林木枯死模式(Hamilton and Edwards 1976, Monserud 1976, Hamilton 1986, Hann and Wang 1990, Hann and Hanus 2001, 向瑋等 2008)，Hamilton(1986)指出此函數式的優點為：(1)此函數值域介於 0 和 1 之間，包括了預測枯死機率的潛在範圍；(2)選擇適當變數(或其轉換式)





的組合，Logistic 函數可用於描述大多數自然發生的枯死型式；(3)在非線性推估過程中，Logistic 函數的參數值可以有效率地求得，它並不會受到選定初始值的影響。

本研究採用二分類 Logistic 模式來預測單株林木的死亡機率，其形式為：

$$MR=1/(1+EXP(-Z))$$

$$Z=b_0+b_1X_1+b_2X_2+\dots+b_mX_m$$

式中：

MR：林木在未來 5 年中枯死的機率

$x_1, x_2, \dots, x_m$ ：獨立變數

$b_1, b_2, \dots, b_m$ ：迴歸係數

目前永久樣區是以 0.02ha 樣區佔最多數，且林木位置資料尚不完整，故本研究發展的是單木距離獨立模式。一般用於枯死模式的獨立變數可分為 5 類(Hann and Wang 1990, Hann and Hanus 2001)，本研究所使用的  $x$  變數包括胸高直徑(DBH)代表林木大小，地位指數(S)代表林分生產力，樹冠比(CR)代表林木活力，每公頃斷面積(SBA)代表林分密度，大於目標林木的胸高斷面積和(SBAL)代表林木在林分中的位置(亦即表示林木受競爭的壓力)。

其中地位指數是採用 25 年生的林分高(如前節所述)，此外，由於有許多個永久樣區資料中沒有求得地位指數，因而發展枯死模式時，將資料集分為兩種，一個是含有地位指數的資料，另一個是全部資料集(包括有地位指數和沒有地位指數的資料)。

本研究目前完成了檜木、臺灣二葉松、杉木類、臺灣杉、柳杉、肖楠等 6 種樹種之枯死模式，其林木資料基本統計值分別列於表 46 至表 51，有地位指數資料的樣木數，以檜木為最多(3,357 株)，最少的是杉木類(1,095 株)，而在全部資料的樣木數，以柳杉為最多(16,475 株)，最少的是(3,215 株)。

在篩選獨立變數過程中，主要是用兩種程序步驟，第一種是採用後退刪除，先將  $1/D$ ， $D$ ， $D^2$ ， $SI$ ， $Hd$ ， $CR$ ， $SBA$  和  $SBAL$  等自變數全部放入迴歸式中，接著採用後退刪除，逐步將最不顯著的迴歸係數的自變數移除，直至迴





歸式中的自變數的迴歸係數皆顯著為止。第二種是採用逐步迴歸方式選入各類的自變數。首先對胸高直徑分為 4 個迴歸式： $1/D$ ， $D$ ， $D^2$ ， $D$  及  $D^2$ ；選用前 4 個迴歸式中以自變數迴歸係數檢定為顯著者，AIC 值愈小愈好為準則，選為第 1 階最好模式，然後分別加入 SI 或 Hd，以卡方檢定結果和 AIC 值變小做為選入依據；當前述兩類變數決定後，再以逐步迴歸選入 CR、SBA、SBAL 等自變數，在後繼逐步迴歸過程中亦有可能將前面選入的自變數再予剔除。

針葉樹種枯死模式的結果如表 52 所示，在 6 樹種的有地位指數資料中，檜木、杉木類、臺灣杉與肖楠等 4 個樹種的地位指數具有顯著影響枯死率。當使用樹種的全部資料，以 Hd 取代 SI 配製枯死模式的結果顯示，只有檜木與臺灣杉等 2 個樹種的 Hd 迴歸係數為顯著的，各樹種的顯著自變數迴歸係數中，具有一致性正或負號者為  $1/D$ 、S、Hd、CR、SBA 與 SBAL； $1/D$  的迴歸係數為正號代表小徑木的枯死率高於大徑木，S 與 Hd 的迴歸係數為正號代表林地愈好其生長愈快而個體死亡率會增加，CR 的迴歸係數為負號代表林木活力愈高其死亡率會降低，SBAL 的迴歸係數為正號代表其受大徑木的競爭壓力較大，死亡率會上升，以上自變數的迴歸係數皆符合預期。





表 46 檜木枯死模式之獨立變數統計值

資料集	變數	單位	樣木數	平均值	最小值	最大值	標準差
有地位指數資料	MR		3357	0.1	0.0	1.0	0.31
	D	cm	3357	20.3	6.0	61.3	7.73
	SI	m	3357	12.0	6.2	21.2	2.32
	Hd	m	3357	11.9	6.2	24.7	2.93
	CR		3357	0.6	0.0	1.0	0.19
	SBA	m <sup>2</sup> /ha	3357	39.0	7.5	83.0	14.99
	SBAL	m <sup>2</sup> /ha	3357	24.6	0.0	81.2	15.02
全部資料	MR		7903	0.1	0.0	1.0	0.31
	D	cm	7903	20.9	2.5	214.0	10.82
	Hd	m	7903	12.9	0.0	25.3	4.26
	CR		7903	0.5	0.0	1.0	0.19
	SBA	m <sup>2</sup> /ha	7903	46.2	0.7	297.6	24.34
	SBAL	m <sup>2</sup> /ha	7903	29.5	0.0	236.5	21.76

表 47 臺灣二葉松枯死模式之獨立變數統計值

資料集	變數	單位	樣木數	平均值	最小值	最大值	標準差
有地位指數資料	MR		2139	0.1	0.0	1.0	0.27
	D	cm	2139	17.6	6.0	74.0	11.00
	SI	m	2139	14.7	8.5	42.5	6.87
	Hd	m	2139	15.2	7.8	44.2	7.01
	CR		2139	0.5	0.0	1.0	0.23
	SBA	m <sup>2</sup> /ha	2139	44.5	14.0	122.0	20.82
	SBAL	m <sup>2</sup> /ha	2139	27.9	0.0	115.4	18.95
全部資料	MR		8513	0.1	0.0	1.0	0.33
	D	cm	8513	22.2	1.0	74.0	10.41
	Hd	m	8513	16.1	0.0	44.2	5.68
	CR		8513	0.4	0.0	1.0	0.21
	SBA	m <sup>2</sup> /ha	8513	53.2	6.4	137.9	22.77
	SBAL	m <sup>2</sup> /ha	8513	32.8	0.0	136.2	21.81





表 48 杉木類枯死模式之獨立變數統計值

資料集	變數	單位	樣木數	平均值	最小值	最大值	標準差
有地位指數資料	MR		1095	0.1	0.0	1.0	0.31
	D	cm	1095	19.8	5.4	53.5	8.78
	SI	m	1095	13.7	11.8	17.3	1.24
	Hd	m	1095	13.7	9.5	19.0	1.99
	CR		1095	0.5	0.0	1.0	0.17
	SBA	m <sup>2</sup> /ha	1095	51.6	18.7	96.0	14.77
	SBAL	m <sup>2</sup> /ha	1095	33.5	0.0	94.8	17.35
全部資料	MR		8014	0.1	0.0	1.0	0.35
	D	cm	8014	20.6	4.9	110.0	9.02
	Hd	m	8014	15.1	0.0	26.7	3.68
	CR		8014	0.4	0.0	1.0	0.20
	SBA	m <sup>2</sup> /ha	8014	57.0	5.2	120.6	19.45
	SBAL	m <sup>2</sup> /ha	8014	36.8	0.0	118.0	21.41

表 49 臺灣杉枯死模式之獨立變數統計值

資料集	變數	單位	樣木數	平均值	最小值	最大值	標準差
有地位指數資料	MR		2697	0.1	0.0	1.0	0.30
	D	cm	2697	22.9	1.0	68.0	10.11
	SI	m	2697	15.8	4.0	24.5	3.55
	Hd	m	2697	15.7	4.0	27.3	4.29
	CR		2697	0.6	0.0	1.0	0.23
	SBA	m <sup>2</sup> /ha	2697	54.8	8.4	150.6	30.15
	SBAL	m <sup>2</sup> /ha	2697	33.9	0.0	166.9	25.84
全部資料	MR		5089	0.1	0.0	1.0	0.27
	D	cm	5089	23.6	1.0	69.0	10.38
	Hd	m	5089	16.3	0.0	31.8	5.34
	CR		5089	0.5	0.0	1.0	0.23
	SBA	m <sup>2</sup> /ha	5089	64.5	0.8	171.0	31.77
	SBAL	m <sup>2</sup> /ha	5089	41.0	0.0	168.6	29.44





表 50 柳杉枯死模式之獨立變數統計值

資料集	變數	單位	樣木數	平均值	最小值	最大值	標準差
有地位指數資料	MR		2151	0.1	0.0	1.0	0.24
	D	cm	2151	24.8	6.1	87.1	10.87
	SI	m	2151	17.2	11.1	25.7	2.91
	Hd	m	2151	17.9	6.0	30.8	3.86
	CR		2151	0.4	0.0	1.0	0.17
	SBA	m <sup>2</sup> /ha	2151	74.3	1.7	156.5	35.12
	SBAL	m <sup>2</sup> /ha	2151	46.5	0.0	154.5	32.85
全部資料	MR		16475	0.1	0.0	1.0	0.28
	D	cm	16475	27.2	5.3	89.0	11.37
	Hd	m	16475	18.3	6.0	32.3	4.39
	CR		16475	0.4	0.0	1.0	0.19
	SBA	m <sup>2</sup> /ha	16475	75.6	1.7	217.2	33.36
	SBAL	m <sup>2</sup> /ha	16475	46.9	0.0	217.1	31.73

表 51 肖楠枯死模式之獨立變數統計值

資料集	變數	單位	樣木數	平均值	最小值	最大值	標準差
有地位指數資料	MR		1358	0.1	0.0	1.0	0.29
	D	cm	1358	16.0	4.9	53.5	7.91
	SI	m	1358	10.0	6.2	14.6	2.60
	Hd	m	1358	9.2	0.0	21.8	4.31
	CR		1358	0.6	0.0	1.0	0.16
	SBA	m <sup>2</sup> /ha	1358	30.3	5.1	68.6	15.23
	SBAL	m <sup>2</sup> /ha	1358	19.1	0.0	68.0	13.54
全部資料	MR		3215	0.1	0.0	1.0	0.34
	D	cm	3215	17.9	3.2	82.8	10.86
	Hd	m	3215	11.9	0.0	26.8	6.16
	CR		3215	0.6	0.0	1.0	0.21
	SBA	m <sup>2</sup> /ha	3215	37.0	0.8	111.1	21.37
	SBAL	m <sup>2</sup> /ha	3215	23.8	0.0	100.7	17.60







表 52 以 Logistic 模式配製針葉樹人工林枯死模式

樹種	資料	樣本數	截距項 $b_0$	$1/D$ $b_1$	$D$ $b_2$	$D^2$ $b_3$	$S$ $b_4$	$Hd$ $b_5$	$CR$ $b_6$	$SBA$ $b_7$	$SBAL$ $b_8$	迴歸式 AIC 值	截距項 AIC 值
檜木	僅有造林年度	3357	-5.0547	15.7808	.	.	0.1248	.	.	.	0.0181	2235.461	2348.215
	全部	7903	-2.8980	10.2792	.	.	.	0.0266	.	-0.0291	0.0325	4991.012	5278.169
臺灣二 葉松	僅有造林年度	2139	-1.9995	.	.	.	.	.	-0.9687	-0.0480	0.0663	1093.412	1184.191
	全部	8513	-1.0114	.	.	.	.	.	-1.3759	-0.0488	0.0587	5851.288	6443.594
杉木類	僅有造林年度	1095	-9.2674	25.9401	0.1153	.	0.2880	.	.	-0.0519	0.0525	709.800	763.166
	全部	8014	-2.6613	12.5291	0.0533	.	.	.	-0.7109	-0.0369	0.0361	6324.219	6568.686
臺灣杉	僅有造林年度	2697	-3.3850	4.3300	.	-0.00093	0.0866	.	.	.	.	1653.942	1712.480
	全部	5089	-1.0678	.	-0.0852	0.000875	.	0.0468	-0.6250	-0.0150	0.0113	2779.641	2896.971
柳杉	僅有造林年度	2151	-0.6439	.	-0.0694	.	.	.	.	-0.0294	0.0267	887.713	972.572
	全部	16475	-0.5181	.	-0.0826	0.000918	.	.	-0.7561	-0.0172	0.0206	8962.861	9525.402
肖楠	僅有造林年度	1358	-0.8019	.	-0.1686	.	0.0775	.	.	.	.	767.973	845.608
	全部	3215	-0.3647	.	-0.1193	.	.	.	-0.7273	.	0.0247	2229.020	2479.042





### C. 樹高-直徑方程式(height-diameter equation)

又稱樹高方程式，以樹高為反應變數，以胸高直徑為解釋變數，也可以同時考慮加入其他變數，例如：林齡、地位指數或林分高，做為解釋變數（林文亮等，2001；王兆桓等，2012；林政融和顏添明，2021；林政融，2022；Pretzsch，2009；Weiskittel，2011；Ercanli，2020）。

在樹高方程式方面，常採用的模式如下：

$$1 \quad H=1.3 + b_1D + b_2D^2$$

$$2 \quad H=b_1D^{b_2}$$

$$3 \quad H=1.3 + b_1D^{b_2}$$

$$4 \quad H=(D/(b_1+b_2D))^2$$

$$5 \quad H=1.3 + (D/(b_1+b_2D))^2$$

$$6 \quad H=b_1 + b_2\log(D)$$

$$7 \quad H=1.3+(H_0-1.3)(1-\exp(-b_1D))/(1-\exp(-b_1D_0))$$

$$8 \quad H=(1.3^{b_1}+(H_0^{b_1}-1.3^{b_1})*(1-\exp(-b_2D))/(1-\exp(-b_2D_0)))^{(1/b_1)}$$

式中 H=樹高；D=胸高直徑；H<sub>0</sub>=林分高；D<sub>0</sub>=地位林木的平均胸徑；b<sub>1</sub>、b<sub>2</sub>=參數

上述樹高方程式的第 1 式至第 6 式，只需要以胸高直徑(D)為自變數，樹高(H)為應變數，因此樣本數較多，而樹高方程式的第 7 式與第 8 式則需要再增加林分高(H<sub>0</sub>)與地位林木的平均胸徑(D<sub>0</sub>)做為自變數，整理檜木、臺灣二葉松、杉木類、臺灣杉、柳杉、肖楠等 6 種樹種的樹高和胸高直徑之統計值如表 53 所示，其中以柳杉的樣本數最多(所有樣本 25,886 株，有林分高樣本 25,873 株)，檜木次之(所有樣本 12,467 株，有林分高樣本 12,398 株)，而以肖楠的樣本數最少(所有樣本 4,459 株，有林分高樣本 4,162 株)。各樹種的所有樣本與有林分高樣本間的差額株數相對上並不算多，主要原因為樣區內沒有主要目標樹種的優勢木與次優勢木，才會沒有林分高。

本研究目前完成了檜木、臺灣二葉松、杉木類、臺灣杉、柳杉、肖楠等 6 種樹種的樹高-直徑方程式，結果如表 54 至 59 顯示，檜木、臺灣二葉松、臺灣杉、柳杉、肖楠等 5 樹種的樹高-直徑方程式皆是以第 8 個模式為最佳，只





有杉木類是以第 7 個模式為最佳。整體而言，有林分高( $H_0$ )與地位林木( $D_0$ )的平均胸徑對於以林木胸徑( $D$ )預測其樹高( $H$ )有很大的幫助。

表 53 針葉樹造林的樹高和直徑之統計值

樹種	資料集	變數	單位	樣本數	平均值	最小值	最大值	標準差
檜木	所有樣本	H	m	12467	11.3	1.5	31.0	4.38
		D	cm	12467	21.2	2.0	215.0	11.10
	有林分高樣本	H	m	12398	11.2	1.5	31.0	4.35
		D	cm	12398	21.0	2.0	156.1	9.53
臺灣二葉松	所有樣本	H	m	11354	13.9	2.0	47.0	5.61
		D	cm	11354	23.2	1.0	136.0	10.86
	有林分高樣本	H	m	11318	13.9	2.0	47.0	5.60
		D	cm	11318	23.2	1.0	136.0	10.86
杉木	所有樣本	H	m	12081	12.3	2.0	65.7	4.27
		D	cm	12081	21.0	4.9	158.0	9.39
	有林分高樣本	H	m	12043	12.3	2.0	65.7	4.27
		D	cm	12043	21.0	4.9	158.0	9.39
臺灣杉	所有樣本	H	m	7726	13.9	2.0	33.0	5.70
		D	cm	7726	24.2	1.0	214.2	11.02
	有林分高樣本	H	m	7649	13.9	2.0	33.0	5.68
		D	cm	7649	24.3	1.0	214.2	10.98
柳杉	所有樣本	H	m	25886	16.1	1.8	116.0	4.92
		D	cm	25886	27.5	4.8	90.8	11.38
	有林分高樣本	H	m	25873	16.1	1.8	116.0	4.92
		D	cm	25873	27.5	4.8	90.8	11.39
肖楠	所有樣本	H	m	4459	10.9	1.5	27.0	5.30
		D	cm	4459	18.2	3.2	95.0	10.96
	有林分高樣本	H	m	4162	11.0	1.5	27.0	5.37
		D	cm	4162	18.4	3.2	95.0	11.19





表 54 檜木造林的樹高-直徑方程式

項次	模式	Parameters		MSE	RMSE	Rank
		b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>			
1	$H=1.3 + b_1D + b_2D^2$	0.5169	-0.00224	10.94	3.31	8
2	$H=b_1D^{b_2}$	2.2729	0.5345	10.28	3.21	6
3	$H=1.3 + b_1D^{b_2}$	1.7073	0.5885	10.38	3.22	7
4	$H=(D/(b_1+b_2D))^2$	1.7824	0.2041	10.17	3.19	5
5	$H=1.3 + (D/(b_1+b_2D))^2$	2.1832	0.2033	10.09	3.18	3
6	$H=b_1 + b_2\log(D)$	-7.4477	6.3627	10.13	3.18	4
7	$H=1.3+(H_0-1.3)(1-\exp(-b_1D))/(1-\exp(-b_1D_0))$	0.0567		3.10	1.76	2
8	$H=(1.3^{b_1}+(H_0^{b_1}-1.3^{b_1}) * (1-\exp(-b_2D))/(1-\exp(-b_2D_0)))^{(1/b_1)}$	1.1926	0.0472	3.09	1.76	1

表 55 臺灣二葉松造林的樹高-直徑方程式

項次	模式	Parameters		MSE	RMSE	Rank
		b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>			
1	$H=1.3 + b_1D + b_2D^2$	0.7007	-0.00594	21.21	4.61	8
2	$H=b_1D^{b_2}$	2.8628	0.5111	20.31	4.51	4
3	$H=1.3 + b_1D^{b_2}$	2.2194	0.5609	20.34	4.51	5
4	$H=(D/(b_1+b_2D))^2$	1.5052	0.1950	20.41	4.52	7
5	$H=1.3 + (D/(b_1+b_2D))^2$	1.7714	0.1964	20.36	4.51	6
6	$H=b_1 + b_2\log(D)$	-7.6039	7.0811	20.31	4.51	3
7	$H=1.3+(H_0-1.3)(1-\exp(-b_1D))/(1-\exp(-b_1D_0))$	0.0508		5.29	2.30	2
8	$H=(1.3^{b_1}+(H_0^{b_1}-1.3^{b_1}) * (1-\exp(-b_2D))/(1-\exp(-b_2D_0)))^{(1/b_1)}$	1.5153	0.0269	5.20	2.28	1

表 56 杉木類造林的樹高-直徑方程式

項次	模式	Parameters		MSE	RMSE	Rank
		b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>			
1	$H=1.3 + b_1D + b_2D^2$	0.6944	-0.00730	14.98	3.87	8
2	$H=b_1D^{b_2}$	3.7974	0.3949	13.42	3.66	6
3	$H=1.3 + b_1D^{b_2}$	2.9795	0.4384	13.44	3.67	7
4	$H=(D/(b_1+b_2D))^2$	1.1080	0.2246	13.26	3.64	4
5	$H=1.3 + (D/(b_1+b_2D))^2$	1.3217	0.2298	13.26	3.64	3
6	$H=b_1 + b_2\log(D)$	-2.4912	5.0320	13.28	3.64	5
7	$H=1.3+(H_0-1.3)(1-\exp(-b_1D))/(1-\exp(-b_1D_0))$	0.0376		7.71	2.78	1
8	$H=(1.3^{b_1}+(H_0^{b_1}-1.3^{b_1}) * (1-\exp(-b_2D))/(1-\exp(-b_2D_0)))^{(1/b_1)}$	1.0045	0.0374	7.71	2.78	2





表 57 臺灣杉造林的樹高-直徑方程式

項次	模式	Parameters		MSE	RMSE	Rank
		b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>			
1	$H=1.3 + b_1D + b_2D^2$	0.6170	-0.00361	17.02	4.12	8
2	$H=b_1D^{b_2}$	2.0841	0.6035	16.88	4.11	6
3	$H=1.3 + b_1D^{b_2}$	1.5859	0.6583	16.98	4.12	7
4	$H=(D/(b_1+b_2D))^2$	1.9687	0.1788	16.48	4.06	4
5	$H=1.3 + (D/(b_1+b_2D))^2$	2.3068	0.1780	16.42	4.05	3
6	$H=b_1 + b_2\log(D)$	-11.8143	8.3410	16.72	4.09	5
7	$H=1.3+(H_0-1.3)(1-\exp(-b_1D))/(1-\exp(-b_1D_0))$	0.0393		6.56	2.56	2
8	$H=(1.3^{b_1}+(H_0^{b_1}-1.3^{b_1})^*(1-\exp(-b_2D))/(1-\exp(-b_2D_0)))^{(1/b_1)}$	0.6657	0.0566	6.51	2.55	1

表 58 柳杉造林的樹高-直徑方程式

項次	模式	Parameters		MSE	RMSE	Rank
		b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>			
1	$H=1.3 + b_1D + b_2D^2$	0.7423	-0.00647	14.60	3.82	8
2	$H=b_1D^{b_2}$	3.4073	0.4757	13.93	3.73	6
3	$H=1.3 + b_1D^{b_2}$	2.7499	0.5152	13.96	3.74	7
4	$H=(D/(b_1+b_2D))^2$	1.5634	0.1861	13.91	3.73	5
5	$H=1.3 + (D/(b_1+b_2D))^2$	1.7917	0.1880	13.88	3.73	4
6	$H=b_1 + b_2\log(D)$	-8.8185	7.7268	13.83	3.72	3
7	$H=1.3+(H_0-1.3)(1-\exp(-b_1D))/(1-\exp(-b_1D_0))$	0.0513		5.05	2.25	2
8	$H=(1.3^{b_1}+(H_0^{b_1}-1.3^{b_1})^*(1-\exp(-b_2D))/(1-\exp(-b_2D_0)))^{(1/b_1)}$	1.4092	0.0341	5.01	2.24	1

表 59 肖楠造林的樹高-直徑方程式

項次	模式	Parameters		MSE	RMSE	Rank
		b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>			
1	$H=1.3 + b_1D + b_2D^2$	0.6324	-0.00438	11.37	3.37	4
2	$H=b_1D^{b_2}$	1.7312	0.6473	11.35	3.37	3
3	$H=1.3 + b_1D^{b_2}$	1.2371	0.7187	11.42	3.38	5
4	$H=(D/(b_1+b_2D))^2$	1.9386	0.1832	11.70	3.42	7
5	$H=1.3 + (D/(b_1+b_2D))^2$	2.3571	0.1798	11.49	3.39	6
6	$H=b_1 + b_2\log(D)$	-9.7512	7.5080	11.87	3.45	8
7	$H=1.3+(H_0-1.3)(1-\exp(-b_1D))/(1-\exp(-b_1D_0))$	0.0591		3.28	1.81	2
8	$H=(1.3^{b_1}+(H_0^{b_1}-1.3^{b_1})^*(1-\exp(-b_2D))/(1-\exp(-b_2D_0)))^{(1/b_1)}$	1.1850	0.0496	3.27	1.81	1





(二) 為溫室氣體盤查制度及森林碳匯專案計畫，建立森林碳匯調查標準作業流程，說明必要調查步驟、調查項目、取樣方法、測量方法、碳匯計算方法等。

### 1. 森林生態系碳匯組成碳儲存與碳吸存

森林碳匯以不同碳庫(Carbon Pool)形式來固定碳量，包括有：地上部生物量、枯死木與枯枝落葉、地下部生物量及土壤等森林生態系統的形式儲存碳量。另外，由於人類社會對於木製產品的需求，諸如薪炭材、家具、紙張等，於森林經營過程中會伐採樹木製成各式林產品，隨者木材的伐採轉製成木製產品，也讓原本固定於森林樹幹的碳，轉移至木製產品加以使用，形成所謂收穫林產品(Harvested Wood Products, HWP)碳庫形式。即使木製產品棄置分解時，亦非短時間可以分解，往往需要費時幾十年方能分解，因此 HWP 可分為使用中(in use)及分解中(in disposal)兩大類(邱祈榮、林俊成，2022)。

綜上所述，森林碳匯的完整框架應包含森林生態系統或稱森林碳庫(Carbon Pool)及收穫林產品兩大部分，其詳細內涵如圖 10 所示：

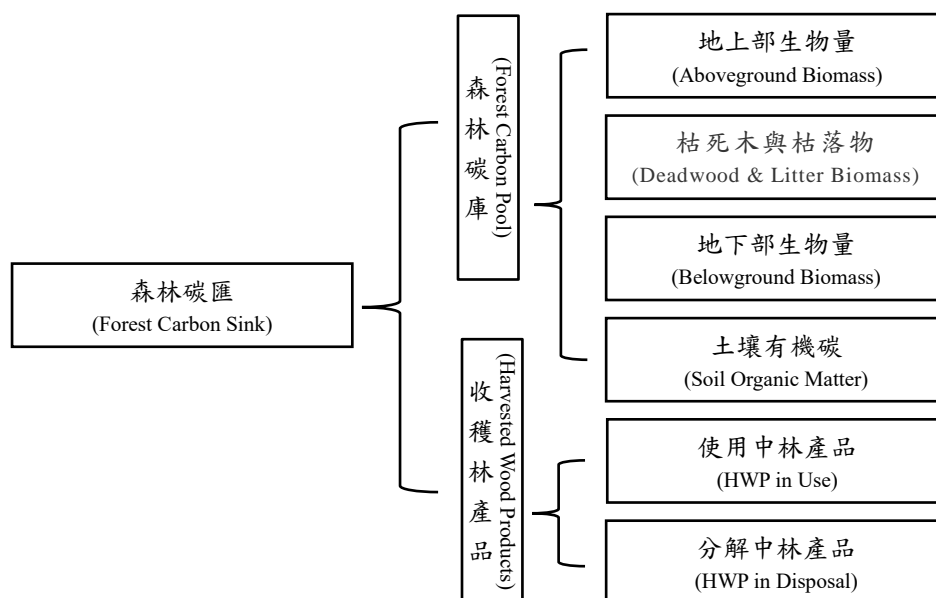


圖 10 森林碳匯內涵及碳庫形式(邱祈榮、林俊成，2022)







依照 IPCC2006 年清冊編撰指南 (IPCC, 2006)，森林碳庫 (Carbon Pool) 可區分為生物量 (Biomass) (包含地上部及地下部生物量)、死有機質 (Dead Organic Matter) (包含枯死木與枯落物)、土壤 (Soils) (包含土壤有機質) 等三大類。各類碳庫說明如表 60 所示 (邱祈榮、林俊成，2022)：

表 60 森林碳庫定義

碳庫		說明
生物量 (Biomass)	地上部生物量 (Aboveground Biomass)	土壤以上所有活的木本和草本之生物量，包括莖、殘幹 (Stump)、枝、樹皮、種子和葉。 註：如果森林下層植被占地上部生物量碳庫的比例較小時，可不列入計算，但在整個調查期間中應有一致性的處理。
	地下部生物量 (Belowground Biomass)	活根的全部生物量。由於僅憑經驗要將直徑低於 2 公釐的細根與土壤有機質或枯落物加以區分是相當困難的，因此建議直徑低於 2 公釐的細根不列入計算。
死有機質 (Dead Organic Matter)	枯死木 (Dead Wood)	除了枯落物外的所有非活的木質生物量，枯死木包括：直立的、橫躺在地面上的或者在土壤中直徑大於或等於 10 公分的枯倒木、死根和殘幹。
	枯落物 (Litter)	所有直徑大於 2 公釐 (因要與土壤有機物區分) 的非活的生物量及直徑小於枯死木所定義的最小直徑 (10 公分)、在礦質或有機質土壤上已經死亡的及各種程度的腐朽狀況的所有非活的生物量，包括：土壤類型所定義的枯落物層及在礦質或有機質土壤中的活細根 (最小直徑應低於地下部生物量所規定)。
土壤 (Soil)	土壤有機質 (Soil Organic Matter)	係指達到所選擇深度之礦質土壤的有機碳，包括：土壤中之活和死的細根與有機質、不能憑經驗區分而直徑小於 2 公釐 (建議值) 的根及死有機質。土壤深度預設值為 30 公分。

資料來源：IPCC, 2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventory





不同碳庫的流動關係如下圖所示：

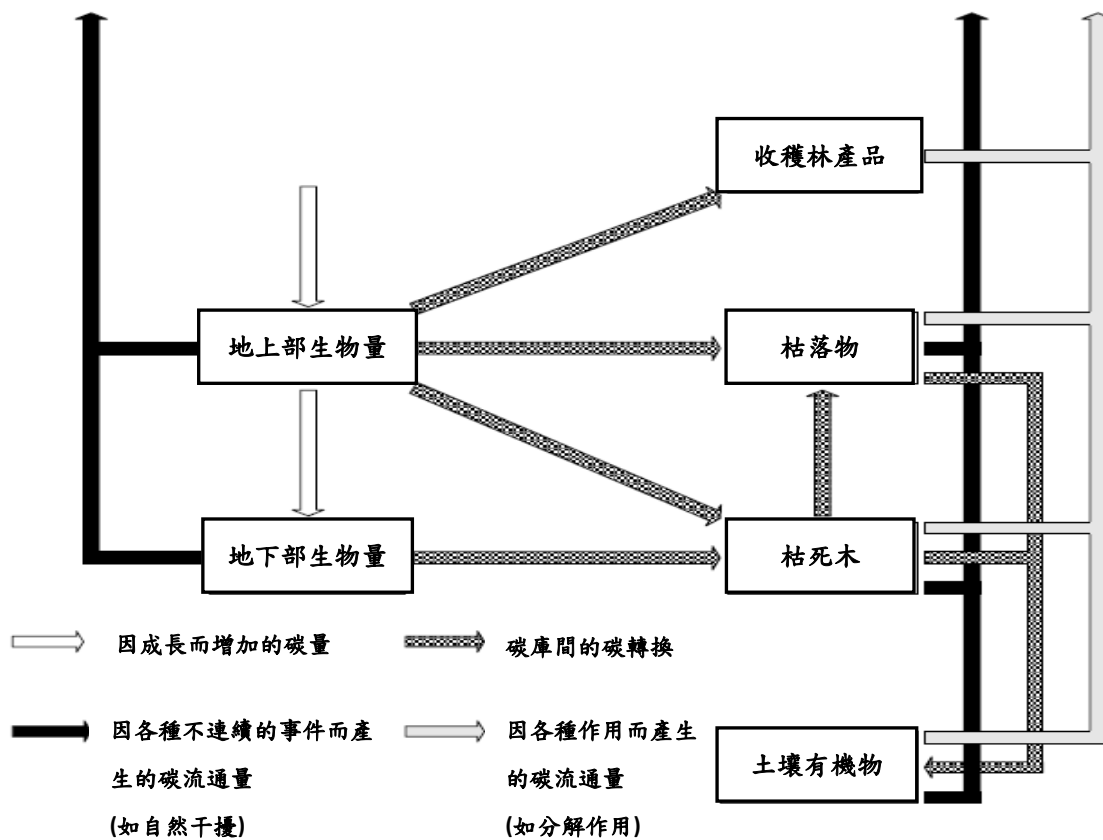


圖 11 碳量在生態系與碳庫間的流動關係（環保署，2022）



圖 12 地上部與地下部示意圖





由於森林碳匯能將碳固定於森林生態系統或收穫林產品，也就是暫時將碳自大氣移除出來固定於森林碳匯內。由於此種固碳特性，讓森林碳匯成為碳中和過程中重要的負碳方式。由於樹木到處可見且為社會大眾所認知，因此成為許多負碳方式中最受重視的方式。

從時間軸向而言，碳匯可分為碳儲存量與碳吸存量兩種概念：林木自小生長以來，所累積固定的碳量稱為碳儲存量；在特定期間內，所增加的生長量固定的碳量，稱為碳吸存量，若以一年為計算週期，稱為年度碳吸存量。事實上，傳統森林測計方面，早就具有此種總量與流量的概念；森林蓄積量為森林碳儲存量；森林生長量為森林碳吸存量。對於碳匯應用方面，著重於碳吸存量的多寡，即使碳儲存量再多，年度碳吸存量不高，代表其生長量低，對於森林固碳效益不如生長量高來得好（邱祈榮、林俊成，2022）。

## 2. 森林碳庫碳匯估算

森林碳匯估算可分為生物量與土壤碳匯兩部分：生物量碳匯估算又可分為單木及林分兩各層級；土壤碳匯一般僅在林分層級加以估算。至於國家層級的碳匯估算，則依國際上 IPCC 估算指南加以估算。以下僅就單木生物量碳匯、林分生物量與林分土壤碳匯估算予以說明：

### (1) 單木生物量碳匯估算

單木生物量碳匯估算基本上乃依循傳統森林測計學量測方式，需要先估算出單木樹幹材積。依照 IPCC 方法，估算樹幹材積方式：

$$\text{Vol} = \text{FF} * (\text{DBH} / 2 / 100)^2 * \pi * H$$

Vol：樹幹材積

FF：胸高形數（針葉樹 0.40-0.55；闊葉樹 0.40-0.53；一般通用取 0.45）

DBH：胸高直徑（cm）

H：樹高（m）





樹幹材積轉換成生物量有兩種方式：基礎木材密度配合生物量擴展係數或生物量轉換與擴展係數換算，亦即直接以生物量轉換與擴展係數換算取代基礎木材密度與生物量擴展係數：

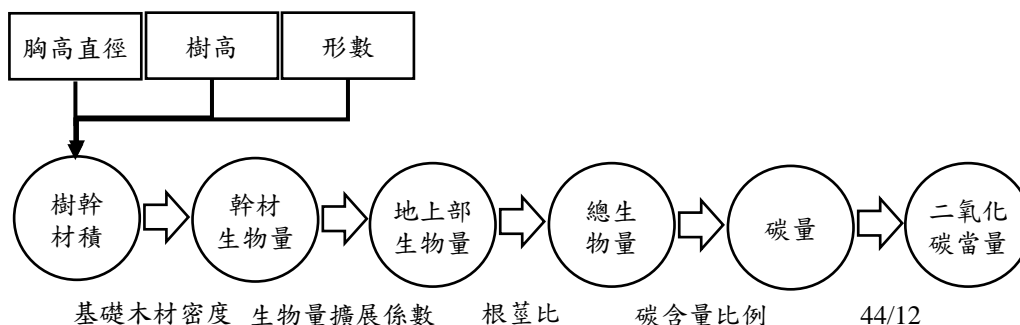


圖 13 單木碳匯估算流程

單木碳匯估算在地上部生物量估算方面常見的有：生物量擴展係數及地上部生物量法兩種。一般森林調查所得結果為樹幹材積，乘上基礎木材密度，即得幹材生物量。但因林木生物量還包含枝及葉部的地上部生物量，及根部的地下部生物量，因此需要再配合生物量擴展係數，或直接採用生物量轉換與擴展係數，得到地上部生物量，稱為生物量擴展係數方法。一般幹材材積依照 IPCC 估算方式：

$$V = FF * (DBH/2/100)^2 * \pi * H$$

$$AGB = V * D * BEF$$

V：樹幹材積

FF：胸高形數（一般取 0.45）

DBH：胸高直徑（cm）

H：樹高（m）

AGB：地上部生物量

D：木材密度（g/cm<sup>3</sup>）

BEF：生物量擴展係數（從幹材生物量擴展到地上部生物量）

另外在地上部生物量估算方面，若透過基礎木材密度及生物量擴展係數的間接推估，但這兩項係數常常因不易獲得或個體差異大，不如直接透過公式加以估算





地上部估公式直接估算，稱為地上部生物量估方法，如 Chave *et al.* (2014) 提出之地上部生物量 (AGB) 估公式：

$$AGB = 0.0673 \times (D \times (DBH^2) \times H)^{0.976}$$

AGB：地上部生物量

D：木材密度 (g/cm<sup>3</sup>)

DBH：胸高直徑 (cm)

H：樹高 (m)

當估算出地上部生物量後，再以根莖比係數 (R)，估算出含地下部生物量的總生物量，再乘以碳含量比例係數 (CF)，即可以轉算成單木碳量，若乘以 44/12 可轉算成單木二氧化碳當量碳匯量：

$$C = AGB * (1+R) * CF$$

C：單木儲存碳量 (ton)

AGB：地上部生物量

R：根莖比

CF：碳含量比例

計算過程所需的相關參數，可參考國家溫室氣體清冊報告第六章所附的係數值如下表（環保署，2022）：

表 61 國家溫室氣體排放清冊報告相關係數表

林型	D	BEF	BCEF	R	CF
天然針葉林	0.41	1.27	0.51	0.22	0.4821
天然針闊葉混淆林	0.49	1.34	0.72	0.23	0.4756
天然闊葉林	0.56	1.40	0.92	0.24	0.4691
人工針葉林	0.41	12.70	0.51	0.22	0.4821
人工針闊葉混淆林	0.49	1.34	0.72	0.23	0.4756
人工闊葉林	0.56	1.40	0.92	0.24	0.4691
木竹混（林木部分）	0.49	1.34	0.72	0.23	0.4756
竹林（竹類部分）*	0.62	1.40		0.46	0.4732





至於個別樹種的基礎木材密度與碳含量比例，則可以「水土保持樹種固碳能力與儲碳潛力計算資料庫之建置」（趙國容，2019）所附的水土保持樹種木材密度及碳含量資料。

## (2) 林分生物量碳匯估算

林分生物量碳匯調查除非樹木數量不多，可採取每木調查外，一般採取樣區調查法，設置適當數量碳匯樣區，進行樣區碳匯調查，再依平均樣區碳匯配合樣區大小換算成單位面積碳匯量，最後再乘以林分面積即得該林分碳匯量。

在實際估算時，分成調查項目分成生物量碳匯與土壤碳匯兩項：  
生物量碳匯調查一般僅進行樣區林木、地被與死有機質碳匯調查，至於地下部生物量並不調查，僅以根莖比加以推算。

### A. 林木碳匯調查

依樣區大小調查樣區內的林木，若以森林蓄積量調查觀點，當林木胸徑小於 5 公分時不予調查，因材積太小。因此，若樣區內林木株數過多時，可以設置最小調查門檻，低於門檻值則不予調查。另外，樣區大小方面，若在人工林可以使用較小樣區，如 10\*10 公尺，至於在次生林時，建議應採用較大樣區，樣區大小至少 20\*20 公尺以上。考量未來生長監測所需，在碳匯樣區調查過程，應標示每木調查位置，方便日後追蹤調查，獲得生長量資料，據以估算碳吸存量。所有調查林木資訊，比照單木碳匯估算方式，加總成樣區林木碳匯量後，再平均樣區林木碳匯換算成單位面積林木碳匯量，最後乘以林分面積即可得林分林木碳匯總量。

### B. 地被碳匯估算

地被生物量部分，於林分碳匯樣區，除調查林木外，亦將隨機選取數個面積 1 m×1 m 的區域，利用收割方式（harvest method）收割區域內除林木外所有植體，秤取區域內所有植體濕重或鮮重（ $W$ , kg），再將收割的植體混勻後，取部分植體秤其濕重或鮮重（ $W_w$ , kg）後帶回實驗室，經 70°C 烘乾後再測植體乾重（ $W_d$ , kg）。透過取樣植體的乾濕重關係，可以推算出所有植體的乾重，即為地被生物量，再透過含碳比例轉算成為含碳量。接著可以依照平均樣區地







被碳匯逐步換算成單位面積地被碳匯與林分地被碳匯量。

#### C. 灌木碳匯調查

灌木生物量作為灌木群落和生態系統研究的重要指標，它不僅是灌木與喬木幼苗競爭能力的反映，而且反映了灌叢生態系統對周圍環境的適應。利用收割方式(harvest method)採取數株樣木估測灌木的生物量進行調查估算碳儲存量。方法惟：

- a. 收割完整單株灌木
- b. 依不同部位分別秤取植栽濕重(果、葉、枝條、大枝、根)
- c. 帶回實驗室，經 70°C 烘乾後再測植體乾重（即為該植體生物量）
- d. 透過含碳比例轉算成為含碳量

#### D. 死有機質碳匯調查

分為木質殘材（woodydebris, WD）以及枯枝落葉層（forestlitter）。木質殘材如枯立木碳量的計算方式與立木相似，不過枯立木的枝葉較早腐朽，故直接以材積量乘上木材密度與林木含碳比例求得。地表枝葉層採樣與碳量分析方面，利用 0.5 m × 0.5 m 大小方框進行地表枝葉層（litter layer）採樣，地表枝葉層包括可辨識未分解落葉、直徑小於 2.5 cm 枝條與經分解後植體碎屑等，低海拔樣區由於枯落物分解快速，地表枝葉層組成主要以未分解落葉與枝條為主。樣品採樣收集後，攜回實驗室以 70 °C 烘乾 48 hrs 後秤重（ $W_d$ , Kg），秤重後樣品再取少量樣本，經球磨機（MM200, Retsch, Haan, Germany）細磨後，以元素分析儀測定樣品碳含量比例（Perkin Elma 2400, Boston, USA）。

地表枝葉層碳量計算公式如下式：

$$C_{\text{Litter}} = (W_d / 0.25) \times CF \times 10$$

$C_{\text{Litter}}$ ：為地表枝葉層碳量（ton C ha<sup>-1</sup>）

$W_d$ ：為烘乾後乾重（kg）

CF：為元素分析儀得到碳量濃度（%）

10：為單位轉換係數

推算出樣本乾重與含碳比例，可以估算樣區的死有機質碳匯量，再推算出





單位面積的碳匯與林分死有機質碳匯量。

#### E. 林分土壤碳匯估算

土壤採樣係依據不同土壤深度進行分層採樣，採集土壤深度依據 FAO 準則 (FAO, 2020)，分別進行 0–10 cm、10–20 cm、20–30 cm、30–50 cm 與 50–100 cm 等不同深度之土壤樣本採樣。不過，部分樣區土壤深度並不足 100 cm，下層土壤以實測深度進行紀錄與採樣。利用土壤剖面挖掘方式 ( $n = 3$ ，每個監測樣區三個剖面)，進行表層 0–30 cm 土壤採樣，深度超過 30 cm 土壤則利用土鑽進行樣品採集。在土壤剖面中，以小鏟子將各分層土壤收集至塑膠袋，並利用體積  $100 \text{ cm}^3$  不銹鋼土環，以不破壞土壤構造方式，採集不同土層之土壤以進行土壤總體密度 (bulk density, BD) 分析。採樣過程中，並依孟氏色帖所附含石率表格，估算各土層野外之含石率 (stone content, %)。土壤樣品帶回實驗室後，先經風乾，再以 2 mm 網目篩網進行磨土過篩與樣品儲存，少部分土壤樣品則以球磨機 (MM200, Retsch, Haan, Germany) 細磨，磨粉後土壤樣品利用元素分析儀測定土壤有機碳濃度 (Soil organic carbon, C %)。測定土壤總體密度之土環樣品，則以  $105^\circ\text{C}$  烘箱烘乾 24 小時秤取重量，土壤烘乾種除上土環體積即為該土層之土壤總體密度 ( $\text{g cm}^{-3}$ )。單位面積土壤有機碳量 ( $C_{\text{Soil}}$ ) 為土壤有機碳濃度、土壤密度及深度，並扣除含石率後的乘積，估算公式如下式：

$$C_{\text{Soil}(i)} = BD_i \times C_i \times d_i \times (1 - \text{含石率}\%) \times 100$$

$C_{\text{Soil}(i)}$ ：第*i*層土壤有機碳量 ( $\text{ton C ha}^{-1}$ )

$BD_i$ ：第*i*層之土壤總體密度 ( $\text{g cm}^{-3}$ )

$C_i$ ：第*i*層土壤有機碳濃度

$d_i$ ：第*i*層土壤採樣深度範圍 (cm)

100：單位轉換係數

各土壤分層從表層累加至下層，即該土壤之土壤有機碳量。平均樣區土壤碳匯量後，可推算出單位面積土壤碳匯量與林分土壤碳匯總量。





### (3) 收穫林產品（Harvested Wooden Products）碳匯估算

收穫林產品碳匯若單指個別林產品碳匯量估算較為單純，可以從林產品體積或重量來加以估算。體積法計算公式如下：

$$C = V \times D \times CF \times (44/12)$$

C：林產品碳匯量（g）

V：體積（cm<sup>3</sup>）

D：密度（g/cm<sup>3</sup>）

CF：碳含量比例

44/12：每克碳分子轉換成 44/12 克二氧化碳

至於重量法係由林產品重量，扣除含水率來加以估算。由於林產品木材伐採後或絕乾材，置於大氣之中，木材中之水分會漸漸流失而達到與大氣濕度平衡之狀態，即達到木材之氣乾，此時的水分含量通常以平衡含水率表示，也是木材氣乾狀態下的氣乾含水率，在台灣地區的環境多在 12~15% 左右。因此，當量得林產品的重量時，可扣除其含水率即得其乾重量，進而換算成碳匯量。

### 3. 規劃森林碳匯調查標準作業流程

為建立森林碳匯調查標準作業流程，說明必要調查步驟、調查項目、取樣方法、測量方法、碳匯計算方法，植栽樣區調查規劃上共有單木、林分、灌木及地被四大類，將分別建立標準化調查流程並進行其碳匯估算，以下表 62 依據四類尺度分類，建立未來各情境中需使用的調查方法：

表 62 不同調查尺度說明

調查尺度	調查方式	調查項目	對象
單木尺度	利用胸徑定位桿法進行年度碳匯吸存量調查，以利日後可以在同樣調查位置進行複測。	樹種、胸高直徑、樹高、單木位置	造林地、公園樹木、行道樹





林分尺度	規劃監測樣區，依照標準化的設立方式，標示樣區範圍、林木位置及胸徑調查。置，完成林木調查。	面積、樹種、胸高直徑、樹高	林地
灌木尺度	採取整株常見灌木之樣木。	地上部、地下部 植栽生物量	林地、公園、行道樹
地被尺度	採取樣方全部地被，估算植被。	地上部、地下部 植栽生物量	林地、公園、行道樹

以下為說明調查步驟、調查項目、取樣方法、測量方法、碳匯計算方法，詳細「森林碳匯調查手冊」之初稿請參考附錄三

A. 調查步驟：進行森林碳匯調查可以分成事前規劃、進行調查、碳匯估算以及調查品質評估等四大步驟。

a. 事前規劃：

- 資料蒐集：事先蒐集目的地之地形、地貌與天候資訊，以利現地調查作業及人員安全。並對照樣點分佈圖、詢問相關人員以瞭解林班、林地狀況，進而確認林班現況與林區像片基本圖和航照圖等相關資料有無出入或不符之處。
- 行程規劃：透過網路(例如:Google map、Google earth、Windy)、地圖等，研擬規劃路線與交通工具，並掌握沿途路況、紮營地點、以及水源地等資訊。外業行程中應以指北針配合地圖判讀隨時掌握自身位置及行進方向，必要時以 GPS 輔助定位。電子導航係於抵達樣區附近後，確認樣區所在地點。人員編組、相關儀器設備準備檢查，應有接受過訓練以及熟習地形之人員配組進行調查，裝備部分應檢查妥當，尤其是 GPS 之備用電池、界樁、鋁牌及鋼釘等皆應多準備一至兩組以備不時之需。
- 人員編組與裝備檢查：應有接受過訓練及熟悉地形之人員配組進行調查，為 2 人以上之調查團隊，視情況需求增加調查人數，裝備部分應檢查妥當，尤其是 GPS 之備用電池、界樁、鋁牌及鋼釘等皆應多準備一至兩組以備不時之需。





表 63 調查工作所需設備

工作項目	所需設備、器材
定樁、樣木標示	塑膠樁、尼龍繩、噴漆、標誌鋁牌、鋼釘
胸高直徑量測	1.3m 桿、直徑捲尺
樹高量測	雷射測距儀、測高桿
GPS 定位	GPS 衛星接收儀
記錄	紀錄表、紀錄板

b. 進行調查:

- 設立樣區: 參考林業保育署森林永久樣區現場調查手冊，設立起點(S.P)，確定 S.P 至樣區中心之測定，及確認樣區，樣區設置完成後，方可開始調查。

- 樣點規畫與設置:

樣區大小: 樣區形狀為矩形樣區，其樣區面積大小依林型、林木密度及林木之胸徑大小等決定，其大小及選擇標準如下

表 64 森林永久樣區設置面積規格

樣 區 面 積	長 × 寬
1/10 (0.1公頃)	40公尺×25公尺
1/20 (0.05公頃)	28.4公尺×17.6公尺
1/50 (0.02公頃)	17.9公尺×11.2公尺

註1.天然林採用0.1及0.05公頃兩種，其考慮因素為：

- ①樣區內之樣木株數（超過40株以上者可採用0.05公頃）
- ②主要林木之平均胸徑（平均胸徑超過30公分以上者採用0.1公頃）

註2.造林地採用0.05及0.02公頃兩種，其考慮因素為：

- ①樣區內之樣木株數（超過25株以上時可採用0.02公頃）
- ②主要林木之平均胸徑（平均胸徑超過 20 公分以上則採 0.05 公頃）

- 實施量測: 調查時需有進度掌控，實際執行時，應回報與掌握每日調查進度，發現調查速度有異狀時，如太快或太慢，應該深入瞭解其原因，並盡可能排除人為因素影響。

- c. 碳匯估算、調查品質評估: 在調查結束後，將資料整理成電子檔，方便查閱及計算，將所有數據帶入估算算式中，即可得出碳匯量。此次收集調查之資料，作為下次樣區複查之對比。





- B. 調查項目：分成林分與林木碳匯調查兩大部分，林分調查部分參考林業保育署永久樣區調查手冊的樣區紀錄，包含樣區大小、樣區座標、樣區坡度與方位、樣區植生狀態與調查日期與調查人員等基本資訊。至於樣木調查則聚焦於樹種、林木胸徑與林木高度等基本調查項目即可。下表 65 為森林碳匯調查最基本紀錄表，可藉由此些資料估算出碳匯，而林業保育署有其他正式用之表格，需紀錄更詳細資料，請調查人員依照林業保育署規定紀錄之。

表 65 調查簡易紀錄表

樣木編號	樹種	胸高直徑	樹高	備註(如分支、樹種狀態)

- C. 取樣方法：樣區設置方式，一般對於林相複雜的林分，可依林木密度、林分高度或林木植被類型進行分層取樣，再依林分面積分層大小進行樣區數量配置，再隨機放置至林分內。

取樣上分為隨機取樣(Random sampling)、系統取樣(Regular or systematic sampling)、分層取樣(Stratified sampling)等，依據成本、形態及植群之植群狀況加以設計。在實務上，建議可以隨機取樣法(Random sampling)為取樣方法首選，使用隨機取樣法在調查的事前規劃上較為簡單且快速，也較容易操作。再依前面樣點規劃與設置裡的規定，設置樣區大小，並依現地情形、樣區代表性以及樣區的樹木多寡，以隨機取樣挑選 10~20 個樣區進行每木調查。

- D. 測量方法：將說明林木胸徑 DBH 與林木高度依照不同調查工具及精度要求，詳加說明林木胸徑與林木高度測量方法。

#### a. 胸高直徑 DBH

胸高直徑係指林木胸高部位(1.3 公尺)之帶皮直徑，在永久樣區範圍內，低於 5.0 公分視為幼木不予調查，5.0 公分以上之生立木皆需要測計。若判斷為枯立木，則參照枯立木的作業方式。量測 DBH 一般常用有胸高直徑卷尺，以公分(cm)為量測單位，量測並紀錄至小數點後 1 位。測定時需維持相同的作業方式，例如量測位置、量測前必需清除附生植物等。並注意因為地形、樹







勢生長方向、分岔、膨大等影響量測胸徑的位置。

複查作業時，為了能有效地長期觀測紀錄樹木的生長變化，仍然測量原先鋁牌釘置或噴漆之胸高直徑，並以 1.3 公尺處為基礎，備註於紀錄胸徑測量位置向上或向下之移動距離。



圖 14 胸高直徑位置示意圖

- 量測工具、使用方式

操作時，以 1.3m 之胸高定位桿，找到樹幹上量測胸高直徑之位置（可利用胸高定位桿之羅盤固定每棵樹的量測方位，建議皆為朝正北的方位）後，將捲尺拉出環繞樹幹進行量測。



圖 15 左：直徑捲尺、右二：1.3m DBH 定位桿，上面備有水平儀與指北針

- 胸高直徑量測位置測定

由樹根向上 1.3 公尺為測定位置。為求每次測量皆在同一高度上，可固定判斷的方位(例如:由北方向南方)。若 1.3 公尺處以下遇到分岔，則測量每個分枝的值，並紀錄為主幹、分枝 1、分枝 2.....。由於樹木離地 130 公分高





處的定義不甚明確，或是該處有些因素會造成測量失準，若遇到以下狀況，可按照下圖中 1.3m 處的那一側進行正確位置的量測。

單木尺度測量建議以樹木正北方向為測量的統一位置，建議準備一支 1.3m 長的桿子（胸高定位桿），並在桿端配有 15cm 的橫向短桿，桿子上配有羅盤及水平儀，方便在測量時輔助尋找方向。

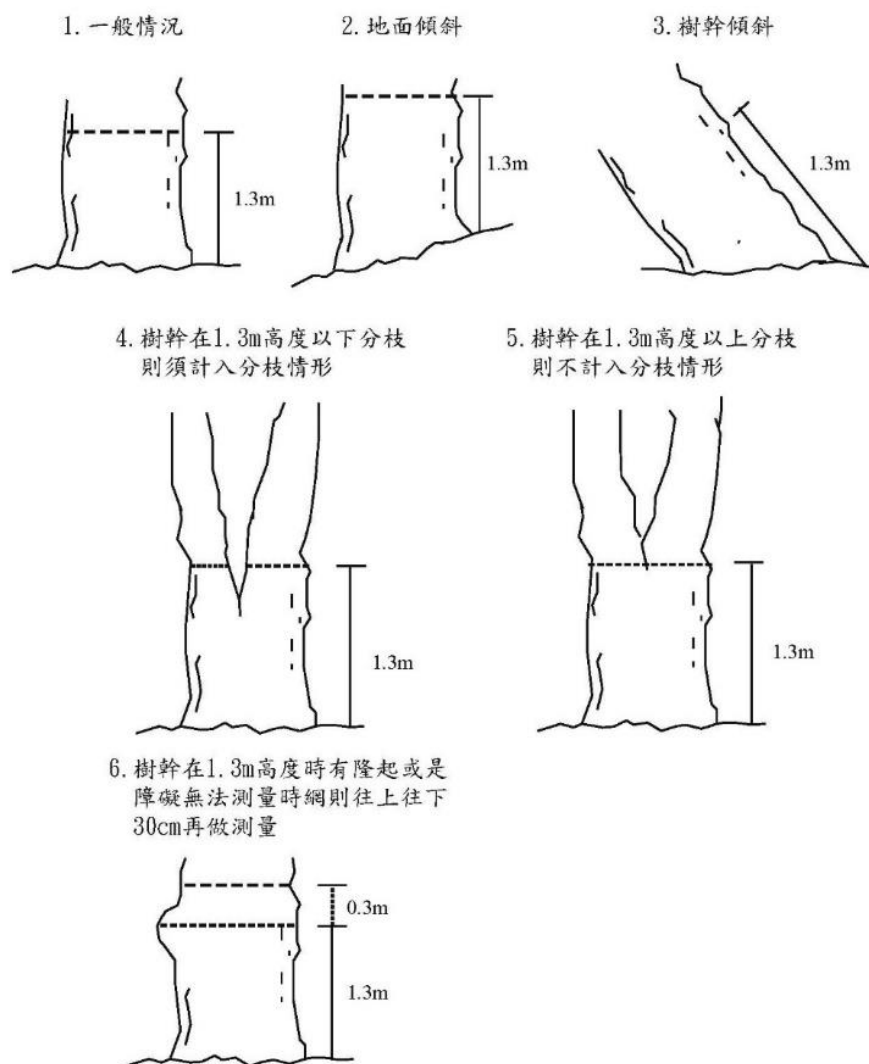


圖 16 胸高直徑量測位置判定圖

#### b. 樹高

樹高為樹木之主幹樹梢最高點之高度，記錄單位為公尺(m)，記錄至小數點後 2 位。

樹高量測有兩種方法分別為測高桿法及雷射測距儀法，測高桿為一玻璃



纖維製之伸縮式測高專用測桿，測高桿總長可以伸長至 15m，利用與樹高等高度的方法進行樹高之直接測定；雷射測距儀利用雷射對樹木進行角度及距離計算的樹高間接測定。

- 量測工具、使用方式

- ① 測高桿

將測高桿由最頂端一節往上拉，由另一人在遠處看測高桿的頂端是否與樹高一樣高。待測高桿高度與樹高相同時，讀取測高桿數值（測高桿刻度單位為公分，紀錄者須將單位轉換為公尺）。此數值即為樹高。若樹高比測高桿還高，可量測樹高的一半，再將數值乘以二。

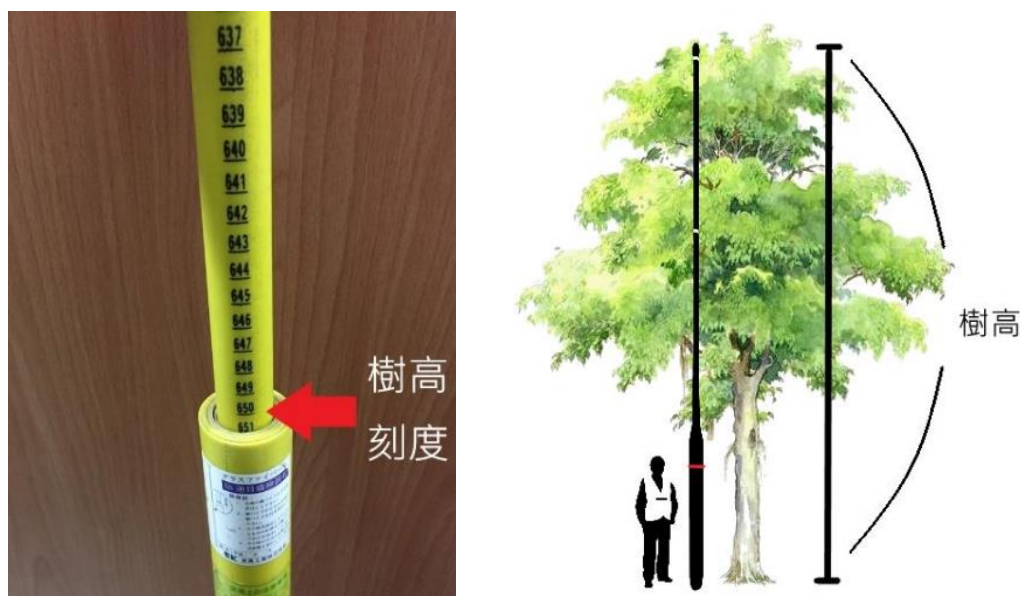


圖 17 左：測高桿、右：測高桿使用示意圖

- ② 雷射測距儀

使用雷射測距儀發出雷射光對準立木基部與樹梢頂端分別打點記錄，透過三角函數由儀器內計算即可以得到樹高數值。使用上容易遭其他樹冠遮蔽，因此在林分密度較低區域較適宜使用此法。在操作上只需一人即可完成量測及判釋樹梢頂端位置工作，以下為使用步驟





表 66 雷射測距儀使用步驟

步驟一	<p>尋找樹木最佳之觀測方位，此時位置應可同時看見樹之最頂梢及樹之基部，以雷射測距儀發出雷射光對準樹木基部</p>  
步驟二	按下紀錄鍵，記錄雷射測距儀與樹基之距離及此線與水平線之夾角 $\theta_2$
步驟三	以雷射測距儀發出雷射光對準樹木樹梢頂端位置
步驟四	按下雷射測距儀之記錄鍵，記錄此線與水平線的夾角 $\theta_1$
步驟五	由儀器運算後自動產生樹高結果，如果結果不太理想，則重複前述操作，並將結果平均。在不同面向時可能會有不同的樹高，如果差距過大，宜用測高桿做量測。
步驟六	<p>雷射測距儀量測完畢後顯示結果，將其記錄之</p> 

#### E. 碳匯估算

依照前述森林碳庫碳匯估算，計算林分及單木碳匯估算算式計算，將所有調查林木資訊，比照單木碳匯估算方式，加總成樣區林木碳匯量後，再平均樣區林木碳匯換算成單位面積林木碳匯量，最後乘以林分面積即可得林分林木碳匯總量。





森林碳匯手冊為來在 113 年度會完成撰寫，手冊內容會更詳細描述如何量測，以及會增加 QA/QC 部分。

#### 四、研析國際最新氣候變化減緩及調適之林業相關議題資料

##### (一) 研析自然為本解方 (Nature-based Solutions) 國際趨勢及氣候變遷調適實際範例分析。

NbS 自 2008 年被提及以來，越來越備受重視，為何以自然為本解方如此之重要，因現今在氣候變遷減緩與調適、維持生物多樣性以及 TNFD，其實都要建立在 NbS 基礎之上，才能真正有效的達到各個目標。International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN) 對於 NbS 的定義為：「採取行動保護、永續地管理和恢復自然或改善生態系統，以有效和調適應性的方式應對社會挑戰，同時提供人類福祉和生物多樣性利益。」(Cohen-Shacham, *et al.*, 2016)。NbS 能解決生物多樣性喪失危機、氣候變遷的衝擊，因有好的自然生態，就能提供的生態服務，亦能抵禦氣候變遷。生態系服務分四類型，供給服務、支持服務、調節服務和文化服務，使生態更具韌性、永續性，降低人類對氣候變遷的脆弱度，來達到支持氣候變遷調適(圖 18)。

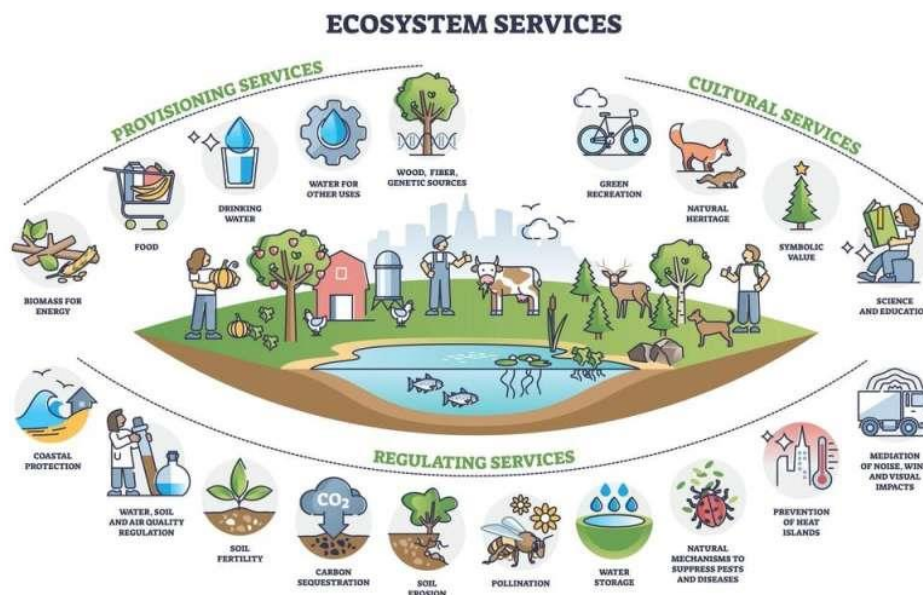


圖 18 生態系服務

從 2000 年開始關於森林、環境方面議題，就陸續提出許多不同的主張與





議題：例如生態復育、森林地景復育、生態系方法等，但觀察基於自然的解決方案演進歷程，可以清楚看出整個發展有其一貫性。這些被使用的類似概念或名詞，大致上可以歸類成五大類(Cohen-Shacham, *et al.*, 2016)：

- Restorative 復育(Ecological restoration, Forest landscape restoration, Ecological engineering);
- Issue-specific 議題 (Ecosystem-based adaptation; Ecosystem-based mitigation; Ecosystem-based disaster risk reduction; Climate adaptation services);
- Infrastructure 基盤(Natural infrastructure; Green infrastructure);
- Management 經營(Integrated coastal zone management; Integrated water resources management);
- Protection 保護(Area-based conservation approaches, including protected area management and other effective area-based conservation measures).

換言之，NbS 為上述的各項與以生態系統為基礎的自然相關保育或復育工作，應思考讓人類福祉與生物多樣性保育能夠兼顧的各種方案，都能納在廣義的基於自然的解決方案架構。

NbS 發展歷史從世界銀行於 2008 年首次提到（世界銀行，2008 年），日漸受到重視，因此許多大型國際組織在不同的報告中提到自然解方概念(圖 19)。2021 年在英國的格拉斯哥第 26 屆聯合國締約方氣候峰會(COP26)的《格拉斯哥氣候盟約》(Glasgow Climate Pact) 再次強調以自然為本的解方是回復自然的重要手段。NbS 的措施包含生態保護、生態復育及改善土地管理，透過與自然協作達成共榮。



圖 19 關注自然解方概念的開創性著作的出版時程表

([https://agrifood.se/Files/AgriFood\\_Fokus2021.pdf](https://agrifood.se/Files/AgriFood_Fokus2021.pdf), 2021)





自然解方內涵，於IUCN2020年出版的自然解方國際標準指出，自然解方主要用於解決七項社會挑戰，其中六項是來自於Cohen-Shacham等人於2016年IUCN報告：氣候變遷減緩與調適、減少災害風險、經濟與社會發展、人類健康、糧食安全、水資源稀少性。在IUCN國際標準中新增加環境退化與生物多樣性損失。(圖20)



圖 20 自然解方用於解決七項挑戰

因應各種方法需求，在2016年IUCN出版報告指出，自然解方有八項核心原則，做為推動自然解方的基本原則：

- (1) 自然保護規範（和原則）
- (2) 可以單獨實施，也可以與其他解決社會挑戰的解決方案（例如技術和工程解決方案）集成實施
- (3) 由特定地點的自然和文化背景決定，包括傳統、地方和科學知識
- (4) 以公平的方式，促進透明度和廣泛參與的方式產生社會利益
- (5) 保持生物和文化多樣性以及生態系統隨時間因應的能力
- (6) 應用於地景尺度
- (7) 承認並解決經濟利益發展與提供生態系統服務選項間的權衡
- (8) 是整合政策設計與行動評量，以應對特定挑戰

另外，IUCN於2020年出版自然解方國際標準，提出用於自然解方驗證、設計及擴大尺度的參考8項準則及28項指標：





表 67 8 項準則及 28 項指標

準則	指標
NbS 有效應對社會挑戰	1.1 優先重視權利持有人和受益人面臨的最緊迫的社會挑戰 1.2 所針對的社會挑戰被清楚地理解和記錄下來 1.3 由 NbS 引起的人類福祉結果被識別、基準化和定期評估
NbS 的設計取決於尺度規模	2.1 NbS 的設計承認並回應了經濟、社會和生態系統之間的相互作用 2.2 NbS 的設計與其他補充介入措施相結合，並尋求跨部門的協同作用 2.3 NbS 的設計將風險識別和風險管理納入了介入地點之外
NbS 導致生物多樣性和生態系統完整性的淨效益	3.1 NbS 行動直接回應對生態系統現狀、退化和喪失主要驅動因素的循證評估 3.2 確定、基準和定期評估明確和可衡量的生物多樣性保護成果 3.3 監測包括定期評估 NbS 對自然界產生的意外不利影響 3.4 查明加強生態系統完整性和連通性的機會，並將其納入 NbS 戰略
NbS 在經濟上是可行的	4.1 與 NbS 有關的直接和間接惠益和成本，誰支付和誰受益，被識別和記錄 4.2 提供成本效益研究，以支援 NBS 的選擇，包括任何相關法規和補貼可能產生的影響 4.3 考慮到任何相關的外部因素，NbS 設計的有效性與現有的替代解決方案相比是合理的 4.4 NbS 設計考慮了一系列資源選擇，例如基於市場的、公共部門的自願承諾和支援遵守法規的行動
NbS 基於包容、透明和賦權的治理流程	5.1 在啟動 NbS 介入之前，所有利益攸關方都可以獲得明確且完全商定的反饋和申訴解決機制 5.2 參與的基礎是相互尊重和平等，不論性別、年齡或社會地位如何，並維護原住民獲得自由事先知情同意的權利 5.3 確定並參與 NBS 介入的所有過程，這些利益相關者直接和間接受到 NBS 影響 5.4 決策過程記錄 並回應所有參與和受影響的利益攸關方的權利和利益 5.5 如果 NbS 的規模超出管轄範疇，則建立機制，使受影響管轄區的利益相關者能夠共同決策
NbS 公平地平衡實現其主要目標和繼續提供多種效益之間的權衡	6.1 明確承認 NbS 介入的相關權衡的潛在成本和收益，並為保障措施和任何適當的糾正措施提供資訊 6.2 土地和資源的權利、使用和獲取，以及不同利益有關者的責任，都得到承認和尊重 6.3 定期審查既定的保障措施，以確保相互商定的權衡限制得到尊重，並且不會破壞整個 NbS 的穩定
根據證據對 NbS 進行調適性管理	7.1 建立 NbS 策略，並將其做為定期監測和評估干預措施的基礎 7.2 在整個介入措施生命週期內制定和實施監測和評估計劃 7.3 在整個介入措施生命週期中應用了能夠進行適應性管理的反覆運算學習框架
NbS 是永續的，並在適當的管轄範圍內主流化	8.1 NbS 的設計、實施和經驗教訓被分享，以引發轉型改變 8.2 NbS 為促進政策和監管框架提供資訊並加強便利，以支援其接納和主流化 8.3 在相關情況下，國家生物多樣性戰略有助於實現人類福祉、氣候變化、生物多樣性和人權方面的國家和全球目標，包括《聯合國原住民權利宣言》 Indigenous Peoples (UNDRIP)





## 1. 國際上 NbS 案例

加拿大安大略森林 5000 萬棵樹計畫，此計畫由安大略森林局和專業植樹組職共同合作，但其植樹土地是由私人等自願向安大略省森林局申請，並且土地種植空間至少須能容納 500 棵樹，若土地符合資格，會有專業人士評估該地適合種植甚麼樹種，此計畫一直強調在適地適木，以下為土地要求資格

- **植樹造林：**在以前沒有任何樹木覆蓋的土地上（例如廢棄/邊際土地）種植樹木，以增加森林覆蓋率，增強與鄰近林地的連通性，創造野生動物棲息地和娛樂機會。
- **河岸緩衝區：**沿水道和/或水景（例如濕地、池塘、河流、小溪、季節性溪流等）種植樹木，以幫助穩定河岸、海岸線，減少水土流失並改善水質。
- **防風林：**沿著土地邊界種植成排的樹木，以提供擋風和/或雪堆的庇護所，提高農田生產力，並為鳥類和野生動物創造棲息地和旅行走廊。
- **森林恢復：**在遭受壓力或損害（例如風暴或冰暴損害、野火、害蟲、入侵物種等）的現有林地的林下或開放區域種植樹木，以改善森林健康並增強物種多樣性。

計畫種子來源通過和種子收集者合作，收集未來種植所需之優質種子，在條件好的狀況下一天可以收集數 10 萬顆種子，同時會留下足夠讓松鼠度過冬季的食物量，不會迫害到動物生存。收集種子者會到處去篩選種子，當鎖定目標後會做種子測試，像是切割測試種子質量，計算種子的數量，確保它的活力。種子會送到薩默維爾苗圃，此處負責監督數千顆苗木之移植。此計畫將重點放在監測和對其種植的樹進行生存評估，從種植的質量評估到長達 5 年的質量評估，在整個植樹過程中，從種子、苗木到土地，都經過層層監管、篩選，以確保種植出優質的樹。圖 21 為次計畫從種子挑選，到育苗至種植，以及種植後的監管流程。（資料來源：  
<https://implementers.decadeonrestoration.org/implementers/18/forests-ontario-50-million-tree-program>)





圖 21 安大略省 5000 萬棵樹計畫整體監管流程

此計畫有助於：

- 減少水土流失，改善水質，穩定河岸。淨化周圍水系統，保護海岸線
- 提供野生動物棲息地
- 擴大與鄰近林地的連通性，並提供避風的庇護所。
- 增加土地價值，豐富娛樂活動，改善當地社區的健康和福祉。

## 2. CIX 案例分析

NbS 不只可以帶來生物、環境、社會之效益，目前國際趨勢上 NbS 也陸續成為企業投資的標的，新加坡推出以 NbS 為碳權的碳權交易所 Climate Impact X(CIX)，透過此交易所可以購買 NbS 之碳權，使企業能參與自願性碳市場實現企業永續目標及環境倫理。台灣奇美、華邦電皆加入此全球碳權交易平台，並皆購入了自然方式減量專案的碳權。

CIX 案例分析以 Delta Blue Carbon Project – 1 (DBC – 1)為例，位於巴基斯坦信德省東南沿海 350,000 公頃的潮汐濕地，由 Indus Delta Capital Private Limited 與信德省政府聯手啟動了 Delta 藍碳項目。該倡議的目標是保護和增強這些沿海紅樹林的重要供應、調節、支持和文化服務。其計畫制定是：

- 保護印度河三角洲潮汐濕地免受人類干擾。





- 恢復退化的紅樹林，並確保通過與當地社區的有效管理協議對其進行可持續管理。
- 實施支持可持續發展並儘量減少森林砍伐和生態系統服務損失的部門政策和戰略。
- 通過提高認識和能力建設，為當地社區和其他利益相關者提供支持。

該案例之紅樹林恢復有 100% 存活率，對於這難以達到的結果有給出解釋，當然不可能最初所種植的植株皆存活下來，但他們會立即用相同物種、同齡、同大小的植物替換，此外還有一些自然幼苗、植物也會在該區塊內，所以植株數量會較原本多。通過在項目生命週期（60 年）內進行干預，提供高質量的藍碳信用。該項目保護現有 102,000 公頃紅樹林，並正在恢復另外 226,000 公頃退化和植被喪失的紅樹林土地。

2020 年發放的 Delta Blue Carbon 項目產生的碳清除額度的需求超出了可用供應量的 50% 以上，交易所表示，超過 60% 的成功競標量的定價超過 30 美元/噸，有些競標價甚至高達 50 美元/噸。然而，所有的額度都以 29.72 美元/噸的價格出售。2021 年發行的同一專案在之前的拍賣中的價格為每噸 27.80 美元。

### 3. 台灣 NbS 現況

目前台灣國家政府方面在 NbS 發展現況，在國家氣候變遷調適行動方案 (112-116 年) 有將其納入調適計畫之中，預計建立 NbS 諮詢窗口，並由林業保育署擔任窗口，建立跨域平台整合資源，和相關機關、民間團體共學，將 NbS 納入以下計畫中

- 能源供給及產業領域：建構能源業氣候變遷調適管理機制及推動計畫
- 土地利用：推動鄉村地區整體規劃強化氣候變遷調適計畫
- 海岸及海洋領域：防止外傘頂洲沙灘流失整體防護計畫
- 農業生產及生物多樣性領域：強化自然生態系統調適

在 2022 年環保署的國家氣候變遷調適行動方案年度成果報告摘要中也有運用其概念，例如內政部核定鳥松、菜園及援中港重要濕地 3 處保育利用計







畫，依濕地保育法推動，確保濕地天然滯洪功能、維護生物多樣性、促進濕地生態保育。

在減緩調適氣候變遷，NbS 愈來愈重要，各企業、組織紛紛開始響應，但 NbS 有被誤用，甚至成為漂綠工具，自然解方作為碳“抵換”，我們同時繼續使用化石燃料，NbS 是否變向成為鼓勵持續甚至增加化石燃料消耗，從而導致總體排放量增加，並分散對系統性變革和向自然經濟轉型的需求的注意力。以下為誤用、不當使用 NbS 之方式

#### (1) NbS 設計不當，負面影響自然生態

- 例如在天然草原和泥炭地上不當植樹，可能會使更多碳釋放至大氣之中，因富碳土壤受到干擾，同時也干擾此棲地的生物多樣性。
- 法國道達爾 (Total) 能源集團在剛果種植生長快速的金合歡，選用非本土樹種，在執行 NbS 時，要了解該地生態系統，選擇樹種時要符合適地適木，才不會使更多溫室氣體釋放到大氣之中，亦不會破會生態系統。

#### (2) 不當的基於自然的“抵換”，可能侵犯人權

- 專案的實施沒有考慮當地人民的合法或習慣土地使用權，當這種情況發生時，碳抵換會將減少排放的負擔從對碳排放最大方轉移到排放最小地區。不與當地人共同實施是無法帶來社會效益的，並且項目不太可能維持長久。

#### (3) 以 NbS 宣傳

- 石油公司殼牌 (Shell) 計畫中有使用到 NbS，以此為宣傳，讓消費者買下殼牌燃料，讓消費者有「彌補」化石燃料排放的錯覺，間接助長此高碳排放事業。

### 4. 結果討論與建議

目前國內對於自然解方於氣候變遷調適方面，在 2022 年已有進展，研議納入新的國家調適行動方案，由各部會於 2023-2027 年開始積極推動。目前重點應在於推動過程：是否真正理解自然解方意涵？如何結合過去施政作為？如何有效納入社會參與？如何評估自然解方實施成效(包括生態服務、社會效







益與經濟效益)？等。想達成成效是需要時間，但若急於看見成果，就易流於表面，容易誤導自然解方的運用，NbS 就可能會淪為漂綠工具。因此，呼籲在推動過程中，應該先進行觀念培訓、操作，尤其在於檢視各項推動工作是否符合自然解方原則，並用標準的準則與指標來檢視執行過程與成效，讓自然解方能夠真正有助於調適行動工作。台灣目前企業、外界團體較少推動 NbS 原因可能為對生態、成本與效益不定的風險、法規監管複雜、利害關係人認知不足等了解不深，可由新的國家調適行動方案向外推廣，期許也能像安大略案例一樣，能在更多地方施行 NbS 計畫。

## (二) 蒐集「聯合國氣候變化綱要公約」第 27 屆締約國會議重點議題

2022 年 11 月於埃及沙姆沙伊赫舉行第 27 屆聯合國氣候變遷大會(COP27)，此次在非洲國家舉辦，會議被國際稱為 African COP(非洲 COP)，因非洲國家和已開發國家相比較，歷史排放量低，但現今卻面臨非常嚴重的氣候危機。在 COP27 會場分為藍區、綠區，藍區由聯合國管理，與會者包含締約國代表、觀察員國、觀察員組織、媒體與其他氣候代表等；綠區由主辦國埃及政府管理，各地青年團體、學術界、藝術家和企業可在此區舉辦各式活動。近年熱浪、洪水、旱災極端事件頻傳，尤其是非洲、小島，其又缺乏基礎建設，在此次會議首次同意設立一個損失與損害基金，期望因氣候災難而經歷嚴重經濟損失的開發中國家，能夠獲得合理的協助。締約方通過了兩項總體性決定——沙姆沙伊赫實施計劃，這兩項決定都涉及科學、能源、緩解、適應、損失和損害、金融以及公正過渡的途徑。

COP27 的標語 Together for Implementation，其 Hashtag 是 #Just\_And\_Ambitious，正視「氣候正義」之重要性，此次會議依目標和願景分為四部分進行落實，減緩、調適、融資、合作





表 68 COP27 目標、願景

減緩 Mitigation	全球升溫控制在攝氏 2°C 內，並努力維持在 1.5°C 內。
調適 Adaptation	熱浪、洪水、森林火災等極端天氣事件發生非常頻繁，為了減少衝擊，需擬定事前預防、即時因應的調適策略。
融資 Finance	讓發展中國家特別是非洲、最不發達國家和小島嶼發展中國家等擁有充足資金，以進行氣候變遷減緩、調適工作。
合作 Collaboration	夥伴關係和協作的進步將有助於實現此四個目標，並確保世界採用更具彈性和可持續的經濟模式。並且讓格拉斯哥成果轉化為行動，並開始實施。

#### 沙姆沙伊赫實施計畫

沙姆沙伊赫實施計畫由兩項總體(COP27、CMA4)決策組成，各國代表分別表示決策須側重於加強、擴大實施，以及針對已做出的承諾建立強有力的問責機制、建議加強對復原力、能源獲取等意見。而此計畫還呼籲了人權部分，期許各締約方在採取行動時，應考慮到相關方面問題。

#### 此次會後的五大要點

##### 1. 建立專門的損失和損害基金

極端氣候已造成許多國家重大損失，而排放量較低的開發中國家被迫害得更為嚴重，並且他們沒有資金使國家恢復到受災害前的狀況，因此在 COP27 會議後，達成突破性協議，為遭受洪水、乾旱和其他氣候災害嚴重打擊的脆弱國家提供資金。此筆資金從哪裡來，以及哪些國家將受益等細項，還待討論。

##### 2. 將全球升溫控制在 1.5°C 以內

世界目前偏離了保持 1.5°C 可及的軌道，若要將溫度控制在這之內，全球經濟必須“減緩”發展，也就是必須減少或阻止溫室氣體的排放，才能達到此目標。據此，COP27 建立一個減緩工作方案，旨在緊急擴大減緩力度和執行工作。

##### 3. 讓企業和機構承擔責任

對企業機構提出的承諾施行問責制。聯合國氣候變化有一個公共平台，被用於登記承諾、發布過渡計劃和跟踪年度實施報告，但仍需要擴大規模。

##### 4. 為發展中國家動員更多資金支持執行





因應氣候變遷所做的減緩、適應、損失和損害、氣候技術等，都需要足夠的資金才能正常運行而達到預期結果，藉由已開發國家資金協助，使開發中國家以應對氣候變遷。

#### 5. 落實執行

若不將氣候承諾從紙上付諸實踐並轉化為具體行動，那就毫無作用，所以此次會議強調了執行，旨在加強各國減少溫室氣體排放、適應氣候變化的行動，並加大資金、技術和技術的支持，發展中國家需要的能力建設。

沙姆沙伊赫實施計劃中第十四項是關於森林的行動，確保包括森林、海洋和冰凍圈內的所有生態系統的完整性，致力於減慢、制止森林喪失和碳流失，以及保護生物多樣性。應對氣候變化採取行動時，需保持「氣候公正」，使用基於自然的解決方案或基於生態系統的辦法，以採取減緩和適應行動，同時確保相關的社會和環境的保障。巴西、印尼、剛果民主共和國承諾共同保護森林生態系統，其中巴西新總統承諾將重新推出亞馬遜雨林計畫，致力於在 2030 年達成「零毀林」之目標。此外 COP27 上還啟動了 The Forest and Climate Leader's Partnership(FCLP)，旨在實現 COP26 多位國家領導人發表的有關森林及土地利用宣言，FCLP 將採取行動措施以實現“到 2030 年制止、扭轉森林喪失及土地退化”的承諾，在 FCLP 的成員國至少推動六項中的一項 FCLP 行動領域，以下為 6 項行動領域：

- 可持續土地利用經濟和供應鏈的國際合作
- 動員公共、捐助資金以支持實施
- 轉變私人金融體系
- 賦予森林守護者力量-支持原住民和當地社區主導的倡議
- 加強、擴大森林碳市場
- 建立國際夥伴關係和激勵措施，以保護高完整性森林

此次會議向後拉的力量太多，在一些承諾上好不容易守住，像是有些許國家提出將溫度升溫限制控制提高至 2°C 以下，而不是目前 1.5°C 的承諾，但幸好經過多方堅持後，此目標沒有被修改。在此次會議也著重在落實，每年會議提





出許多目標，但各國施行情況不佳，像是在 COP26 時檢視各國國家自主貢獻 (NDC)，要將全球暖化控制在  $1.5^{\circ}\text{C}$  內，目前是幾乎是不可能，因此在 COP27 前各國要重新繳交 NDC，也呼籲各國能確實執行，以達成目標。此次最令外界失望的是原本提議逐步減少化石燃料，最終成逐步減少煤炭，和去年相同，代表多國仍不想放棄較煤炭排放少的天然氣、石油等的化石燃料。而此次突破性進步為設立損失與損害基金，期望未來能盡快討論出完善細節並妥善施行。





## 肆、113 年度工作項目及內容

### 一、完成 113 年國家溫室氣體排放清冊報告之林業部門章節編製工作

#### (一) 分析歷年森林樣區複查資料，更新年度森林生長量活動數據

1. 再整理林業保育署農曆年前新給的森林永久樣區及系統樣區複查資料，逐一估算各樣區之蓄積量與碳儲存量。另外，前輪資料如有更新修正者亦一併處理。
2. 分析林業保育署地面樣區複查資料，更新年度森林生長量活動數據，可供估算國家林業溫室氣體清冊報告之生長量數據。

如果第二次調查所抽取的樣本為前次樣本之一部分，即第二次調查時僅就第一次調查之一部分取樣單位實施再度測定。第一次調查之均數推算值，為根據  $n_1$  個單位資料算出，而第二次調查是僅就其中之  $n_2$  個單位施加測定。再就第一次與第二次調查之  $n_2$  個單位的測定值求出關係式。第二次調查之均數值，為使用  $n_1$  個單位資料由前述的關係式求得(楊榮啟和林文亮，2003)。

#### (二) 依照林業碳匯估算標準流程，配合本局林業統計數據以及前項工作成果之森林生長量活動數據，進行 1990 至 2022 年之林業活動碳匯計算，並依據行政院環境保護署所提「國家溫室氣體清冊報告(NIR)格式與內容規劃」及不確定性分析表單，撰擬林業部門溫室氣體排放清冊報告

本項目做為例行性工作，將比照 112 年工作方法依據我國行政院環境保護署所提「國家溫室氣體清冊報告(NIR)格式與內容規劃」，完成撰擬 1990-2022 年我國林業溫室氣體清冊報告草案。

#### (三) 蒐集國內進出口資料，包含非林業用地木材生產數量，完成 1990 至 2022 年國內收穫林產品(HWP)排放量之計算及說明

本項目做為例行性工作，將比照 112 年工作方法辦理。運用 HWP 三個方法，分別進行計算並加以比較。資料方面將收集國內進出口資料，包含非林業用地木材生產數量，完成 1990-2022 年國內收穫林產品 HWP 計算過程及說明。





## 二、精進國家溫室氣體排放清冊報告之林業部門編製方式

### (一) 參考國際林業部門清冊計算流程，以 MRV 原則檢討我國林業部門清冊使用之活動數據來源及蒐集方式，提出我國林業部門改善建議

#### 1. 建立各部會及地方政府造林資訊蒐集模式

目前清冊估算過程，非林地轉林地活動數據僅來自林業管理單位，欠缺其他中央部會及其他地方政府相關的活動數據。本計畫預計透過問卷、訪談及座談等方式，先盤點國內相關機關有經常性造林的推動，再建構出如何收集造林資料，以便納入清冊估算活動數據來源。

#### 2. 與內政部營建署檢討國家清冊之「土地利用、土地利用變化及林業部門」章節中六大土地利用類型下林地面積

營建署將土地利用類型分為農業、森林、交通、水利、建築、公共、遊憩、鹽礦、其他土地利用類型，「土地利用、土地利用變化及林業部門」(Agriculture, Forestry and Other Land Use, AFOLU)分為林地、農地、牧草地、濕地、聚居地、其他土地等六大類型，其中林地維持林地的部分未能與國家公園、國土保育地區、農業發展地區、城鄉發展地區整合，因此有必要釐清現有的林地維持林地面積。

### (二) 評估清冊中土地利用面積之活動數據改善方式

延續前一年度的工作事項，利用遙測資料，如國土測繪中心「國土利用現況調查成果圖」或衛星影像，試算林業部門清冊報告，並提出不同來源活動數據之優缺點。

### (三) 完成評估利用光達 (LiDAR) 技術改善森林資源調查模式，及發展長期生長監測與發展樣木材積式之可行性

經由 112 年度之發展，在樣木調查方面，利用地面光達掃描適當樣區，建構數位樣區資訊後，若可以用來作為胸高直徑及樹高之調查，則接著用於評估木材積式之可行性。為建立樣木材積式，可採用使用不同因子的材積式以作為比較，下表常用之材積式 (楊榮啟、林文亮，2003)。

表 69 材積式表

直徑-材積式	$V = aD^b$
固定形數式	$V = a(D^2H)^b$
Schumacher 式	$V = aD^bH^c$

V：材積、D：胸高直徑、H：樹高、abc：常數。







經由 112 年度運用數位樣區資訊，進行樹高與胸徑量測，做為日後生長監測比較之基準之研究。長期生長監測須持續性複查監測樣區，為使長期生長監測能更有效的實施，將採用光達進行試驗，評估森林長期調查之可行性。

### 三、建置人工林蓄積量預測模式及研提「森林碳匯調查手冊」完稿

#### (一) 建置預測人工林至少 8 個重要樹種林分蓄積量之林分模式或單木模式

本計畫於 112 年完成建置人工林至少 5 個重要樹種林分的地位指數模式、枯死模式、樹高-直徑方程式方面，至 113 年累計至少完成 8 個；以利於 113 年完成建置預測人工林至少 8 個重要樹種林分蓄積量之林分模式或單木模式。

歐盟會員國在 2000 年代所發展森林生長模式的經驗裡，仍然建議應維持多元的模式，不要採用單一的生長模式(Hasenauer, 2006)。主要是因為各模式各有其優缺點，無法由單一模式完全取代其他模式。本研究擬使用林業保育署永久樣區的調查資料，發展林分模式或單木距離獨立模式，並藉此估算不同期間的蓄積量。

#### 1. 建置林分模式

在林分模式建立方面，以林分材積為反應變數，以林齡、地位指數、林分密度為解釋變數，本研究先以線性模式篩選出顯著之解釋變數，必要時會再以非線性模式建構收穫式(王兆桓等，2012；Pretzsch，2009；

Weiskittel，2011；Lee, Choi，2022)。

$$\ln(V) = b_0 + b_1 f(A) + b_2 g(SI) + b_3 h(\text{Density})$$

式中：

V 為林分材積。

A 為林齡。

SI 為地位指數。

Density 為林分密度。

f, g, h 為函數，代表可能是相關變數的轉換變數。

#### 2. 建置單木模式

整合地位模式、枯死模式、樹高-直徑方程式、胸徑生長模式等進行生長模





擬分析測試。在生長模式或枯死模式中各別表現最佳的模式，不一定能夠在整體表現為最佳，而測試的過程當中，應注意排除突然快速生長與快速死亡之異常現象，求得最佳模式的組合(王兆桓等，2012；Pretzsch，2009；Weiskittel，2011)。本研究進行模擬分析測試的輸入與輸出資料檔案會採用 csv 格式，一般人使用 Windows 的記事本和 Excel 都可以打開檔案。

本研究整合了人工林主要造林樹種的胸徑生長模式、林木枯死模式、樹高方程式、地位指數模式於生長模擬中，如下所示：

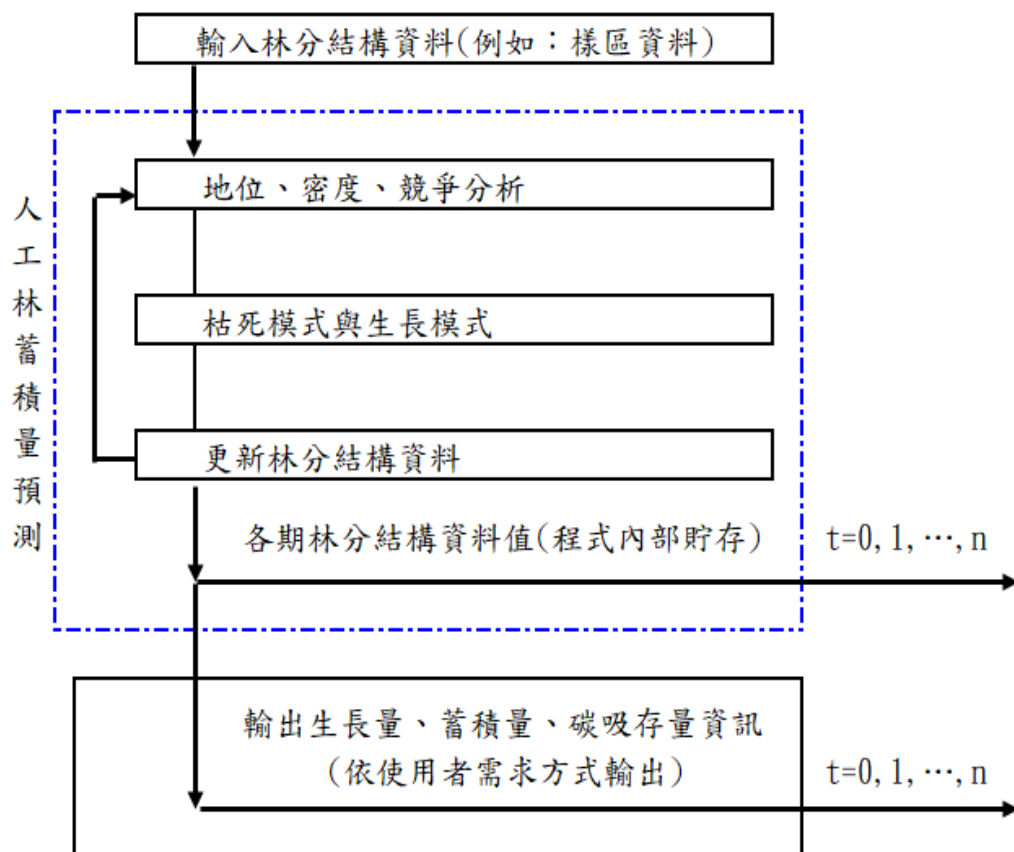


圖 22 人工林蓄積量預測模擬示意圖





(二) 為溫室氣體盤查制度及森林碳匯專案計畫，建立森林碳匯調查標準作業流程，說明必要調查步驟、調查項目、取樣方法、測量方法、碳匯計算方法等，並提供示範案例至少 1 例

本年度針對單木調查進一步分析與建立調查方法，單木生物量碳匯估算基本上乃依循傳統森林測計學量測方式，需要先估算出單木樹幹材積。

預期針對溫室氣體盤查制度及森林碳匯專案計畫，以 112 年度調查內容規劃為基礎，規劃森林碳匯調查標準作業流程，必要調查步驟、調查項目、取樣方法、測量方法、碳匯計算方法等，發展「森林碳匯調查手冊」，規劃手冊內容如下：

- 森林碳匯調查標準作業流程：以圖示方式呈現森林碳匯調查作業流程，讓閱讀者能夠清楚瞭解應如何著手規劃以及進行森林碳匯調查。
- 調查步驟：進行森林碳匯調查可以分成事前規劃、進行調查、碳匯估算以及調查品質評估等四大步驟。將針對這四項步驟予以說明重要工作內涵。
- 調查項目：分成林分與林木碳匯調查兩大部分，林分調查部分將參考林業保育署永久樣區調查手冊的樣區紀錄：包含樣區大小、樣區座標、樣區坡度與方位、樣區植生狀態與調查日期與調查人員等基本資訊。至於樣木調查則聚焦於樹種、林木胸徑與林木高度等基本調查項目即可。
- 取樣方法：說明樣區設置方式，一般對於林相複雜的林分，可以林木密度、林分高度或林木植被類型進行分層取樣，再依林分面積分層大小進行樣區數量配置，再隨機放置至林分內。
- 測量方法：將說明林木胸徑與林木高度依照不同調查工具及精度要求，詳加說明林木胸徑與林木高度測量方法。
- 碳匯計算方法：將依照上述的碳匯估算方法進行碳匯估算，並比較不同方法估算結果。
- 編制報告：將調查和計算結果編制成報告，以提供未來複查及核對。





#### 四、研析國際最新氣候變化減緩及調適之林業相關議題資料

##### (一) 研析巴黎協定第 6 條規則書之新版碳交易機制。

2021 年在英國的格拉斯哥第 26 屆聯合國締約方氣候峰會(COP26)將巴黎協定第 6 條規則拍板定案，巴黎協定第 6 條主要規範各締約國之間的碳排放交易機制，巴黎協定第 6 條延續「京都機制」(Kyoto Mechanism)的理念，除以「合作方法」(Cooperative Approaches)及國際可轉換減碳成果(Internationally Transferred Mitigation Outcomes, ITMOs)為核心之市場機制外，並擴大及調適(adaptation)所賴「永續發展機制」(Sustainable Development Mechanisms, SDM)等政策導向之「非市場方法」(Non-Market Approaches, NMAs)，用以填補所謂排放落差之問題，俾利於落實 2050 年之淨零碳排(范建得、連振安，2021)。

巴黎協定第 6 條主要定義減量合作機制，其重點有三，其中兩個與碳市場有關：

##### • 第 6.2 條 合作減量

為國際合作提供了一個核算框架，例如將兩個或多個國家的排放交易計畫聯繫起來（例如，將歐盟的限額與交易計畫與瑞士的減排轉移聯繫起來）。它還允許在國家之間進行減量額度的國際轉移。其重點在於締約方得於自願參與的合作方法中，將所獲國際轉讓的減緩成果(ITMOs)用於「國家自定減碳貢獻」、促進永續發展並確保環境品質(environmental integrity)和透明度(transparency)；此外，在治理方面，並應採用健全的核算方式，避免雙重核算(double counting)(范建得、連振安，2021)。

##### • 第 6.4 條

建立有助於減少溫室氣體排放和支援永續發展機制，用於交易通過特定項目產生的減排量的信用。例如，A 國可以為 B 國支付建設風電場而不是燃煤電廠的費用。排放量減少，B 國受益於清潔能源，A 國因減排而受益。就實務操作來看《巴黎協定》第 6.4 條則提出一項創新的設計，讓締約方得藉由促進減排來支持永續發展；但相對於二款之機制為雙邊的去中心化，可持續發展機制(Sustainable Development Mechanism, SDM)則透過永續發展機制，接受指定機構監督之集中管制；其重點在於對應下列之新需求：1. 在促進減緩排放之同時也能促進永續發展；2. 提供誘因給參與減緩活動之公私實體(public and private entities)；3. 促進地主國家(host country)減少排放，並因此受益，同時提供給其他締約方用來履行其國家自定貢獻義務；4. 實現《巴黎協定》以集體方式(collectively)來「減緩全球總排碳量」(Overall Mitigation in Global Emissions, OMGE)之目標。具體言之，SDM 有若「京都機制」下「清潔發展機制」(Clean Development Mechanism, CDM)的間接版(范建得、連振安，2021)。





• 第 6.8 條

為非市場方法制定工作計畫，供締約方自願使用，以促進減緩溫室氣體排放，同時促進永續發展，且促進公私實體參與減緩溫室氣體排放。巴黎協定第六條第八款特別加入了所謂的非市場機制，允許由一締約方提供資金、技術、能力建構予其他國家，協助該國進行減緩或調適活動，其因此產生之減量額度，則可被用於履行受援助國家 NDC 義務，抑或成為該國投入 ITMOs 交易市場之額度。與前述市場機制不同之處在於，提供資金、技術、能力建構的投資方，並不能直接取得或掌握減碳成果，僅能獲得技術擴散、產業發展與國際合作之效益。就此，其立意雖佳，然目前有部分開發中國家正呼籲此種計畫之執行應採用全球生命週期方法（global lifecycle approach）來實施，以避免有些國家將停止使用的設備再轉售給開發中國家（范建得、連振安，2021）。

通過至少第 6 條規則手冊實現以下原則：

- A. 確保環境完整性並實現最大程度的減排雄心
- B. 提供總體減排，超越零和抵消方法，以加速全球溫室氣體減排
- C. 禁止使用 2020 年前的碳權單位，「京都議定書」的單位和配額，以及其他潛在會減損「巴黎協定」和其他國際目標的方式
- D. 確保避免重複計算，並確保為實現國際氣候目標而使用碳市場的所有行為都應進行相應的調整。
- E. 避免鎖定與實現「巴黎協定」的長期溫度目標不符的排放、技術或碳密集型作法的水準。
- F. 應用分配方法和基準方法來支持國內 NDC 的實現並有助於實現「巴黎協定」的長期目標
- G. 在排放和清除的報告和核算中使用二氧化碳當量，充分應用透明性、準確性、一致性、可比較性和完整性的原則
- H. 使用集中和公開可及的基礎設施和系統來收集、追蹤和共享可靠而透明的會計的資訊
- I. 確保激勵進步並支持所有締約方朝著整個經濟體的排放目標邁進
- J. 為特別容易受到氣候變遷不利影響的發展中締約方國家使用的可量化和可預測的財務資源作出貢獻，以支付調適成本
- K. 認識到進行能力建設的重要性，以使締約方能夠根據第 6 條盡可能廣泛地參與

（參考資料：[https://km.twenergy.org.tw/Data/db\\_more?id=3719](https://km.twenergy.org.tw/Data/db_more?id=3719)）

全球新碳交易的市場隨著第 6 條確定而形成，避免過去重複計算的問題，本計畫擬研析巴黎協定第 6 條規則書之新版碳交易機制，針對第 6.2、6.4、6.8 條做探討。







COP27 擴大《巴黎協定》第 6.2 條規定合作方式提供操作指導及促進第 6.4 條市場機制全面運作，確定《巴黎協定》第 6.8 條框架中非市場方法的工作計畫模式，同時繼續在全球盤點下進行技術性對話。因此本計畫也參考 COP27 所提出之內容進行討論。

## (二) 研析企業永續發展對於自然相關財務揭露林業相關議題。

本計畫針對 2023 年 9 月推出正式版自然相關財務揭露 (Task Force on Nature-related Financial Disclosures, TNFD) 之指南進行後續分析，林業本身與自然及生物多樣性相關，也受到氣候因子影響，財務揭露對於阻止自然損失的市場基礎解決方案至關重要，為求永續發展長期經營，林業加入自然相關財務揭露的框架是遲早的事，因此本計畫擬林業對於自然相關財務揭露之議題探討，尋求永續發展之契機。

TNFD 是關於企業與自然相關的資訊揭露框架，提供企業與投資人瞭解財務風險。生物多樣性衰減有關風險可能直接損害財務報酬，如果能夠在投資流程中考慮生物多樣性相關因素，則至為重要。具體做法可以是確保企業正式作出保護生物多樣性的承諾，並在營運中持續付諸實踐。

### Timeline of TNFD

2020 年：公佈計劃

2021 年：正式成立「自然相關財務揭露工作小組」

2023 年：產出一個架構，讓組織用以報告並影響逐步形成的自然相關風險，以改變全球的資金流，讓資金遠離自然負面結果 (nature-negative outcomes) 而流向自然正面結果 (nature-positive outcomes)。

TNFD 的總體目標：為企業和金融機構，提供一套鑑別、管理和呈報與自然相關之財務風險的框架，將全球資金從極有可能的負面結果，導向積極正面的績效。

宗旨：對自然體系相關風險採取積極的行動、確保資金不對自然環境造成負面影響。

生態與金融專家們認為，氣候相關財務揭露(Task Force on Climate-related Financial Disclosures, TCFD)僅關注氣候變遷，未將其他重要的生物多樣性風險因子納入。僅憑藉 TCFD 框架，將無法彰現企業所面臨的全面性與自然相關的風險。在生物多樣性逐漸受到嚴重威脅，以及自然資源逐漸稀缺的情況下，企業會需要一套比 TCFD 更簡單、更廣泛的鑑別指南，以鑑別這類風險，提早轉移資金避免損失。而這正就是 TNFD 建立準則，尋求與 TCFD 共同運作的原因。2023 年 TNFD 上路後，企業將會被要求揭露其商業行為和投資活動對自然生態有什麼樣的影響，以及自然環境（如極端氣候等）如何影響組織的直接財務績效，並依此提出降低影響的手段措施。







## 五、說明 114 年預定辦理之初步工作項目、內容及預算分析，以取得續約之權利

114 年預定辦理工作項目，將分成延續性例行工作及新增工作兩部分：延續例行性工作事項：完成國家溫室氣體排放清冊報告之林業部門章節編製工作、國內收穫林產品（HWP）排放量之計算及說明等工作內容，將依實際工作需求內容，提供預算分析。至於新增工作，將視本計畫整體執行成果，因應發展趨勢及明年度政府臨時性需求，將提前於 113 年 7 月左右與林業保育署進行商議，以便能夠提出 114 年預定辦理的新增工作項目，做為期末建議事項，爭取續約權利。

### 伍、預定進度

#### 一、112 年度

重要工作項目	工作 比重 %	預定 進度	112 年		備 註
			6-7 月	8-12 月	
1. 完成 112 年國家溫室氣體排放清冊報告之林業部門章節編製工作	30	工作量 或內容	資料收集	清冊撰寫	
		累計 百分比	30	100	
2. 精進國家溫室氣體排放清冊報告之林業部門章節編製方式	20	工作量 或內容	資料收集	清冊撰寫	
		累計 百分比	30	100	
3. 建置人工林蓄積量預測模式及研提「森林碳匯調查手冊」初稿	20	工作量 或內容	資料收集	資料分析	
		累計 百分比	30	100	
4. 研析國際最新氣候變化減緩及調適之林業相關議題資料	20	工作量 或內容	資料收集	資料分析	
		累計 百分比	30	100	
5. 第 1 期及第 2 期報告撰寫	10	工作量 或內容	第 1 期報告撰寫	第 2 期報告撰寫	
		累計 百分比	30	70	
累計總進度					
查核項目 (農管計畫毋需填查核項目)	百分比 100		30	100	





## 二、113 年度

重要工作項目	工作 比重 %	預定 進度	113 年				備 註
			1 月	2-5 月	6-7 月	8-11 月	
1. 完成 113 年國家溫室氣體排放清冊報告之林業部門章節編製工作	30	工作量 或內容	資料收集	清冊撰寫	資料收集	清冊撰寫	
		累計 百分比	10	40	70	100	
2. 精進國家溫室氣體排放清冊報告之林業部門編製方式	20	工作量 或內容	資料收集	清冊撰寫	清冊撰寫	清冊撰寫	
		累計 百分比	10	40	70	100	
3. 建置人工林蓄積量預測模式及研提「森林碳匯調查手冊」完稿	20	工作量 或內容	資料收集	資料分析	資料分析	資料分析	
		累計 百分比	10	40	70	100	
4. 研析國際最新氣候變化減緩及調適之林業相關議題資料	10	工作量 或內容	資料收集	資料分析	資料分析	資料分析	
		累計 百分比	10	40	70	100	
5. 說明 114 年預定辦理之初步工作項目、內容及預算分析，以取得續約之權利	10	工作量 或內容	資料收集	資料分析	研討	研討	
		累計 百分比	10	40	70	100	
6. 第 3 期及期末報告撰寫	10	工作量 或內容	準備 撰寫	第 3 期報 告撰寫	報告撰寫	期末報告 撰寫	
		累計 百分比	10	40	70	100	
累計總進度							
查核項目 (農管計畫毋需填查核項目)	百分比 100		10	40	70	100	





## 陸、審查標準

1. 第1期報告審查標準：（決標日次日起一個月）  
詳述計畫之辦理工作項目及預計實施方法。
2. 第2期報告審查標準：（112年12月31日前）
  - (1) 完成112年國家溫室氣體排放清冊報告之林業部門章節。
  - (2) 提出改善林業部門森林碳匯編制方式規劃架構。
  - (3) 建置人工林5個以上重要樹種林分的地位指數模式、枯死模式、樹高—直徑方程式及提出「森林碳匯調查手冊」初稿。
  - (4) 研析自然為本解方（Nature-based Solutions）國際趨勢及氣候變遷調適實際範例分析，以及「聯合國氣候變化綱要公約」第27屆締約國會議重點議題。
3. 第3期報告審查標準：（113年5月31日前）
  - (1) 提出113年國家溫室氣體排放清冊報告之林業部門章節初稿。
  - (2) 提出建置預測人工林5個以上重要樹種林分蓄積量的林分模式或單木模式的初稿。
  - (3) 完成結合空載光達與地面光達資料，發展地面樣區蓄積量估算模式。
  - (4) 完成聯合國氣候變化綱要公約第28屆締約國會議結論重點評估報告。
4. 第4期報告審查標準：（113年11月30日前）
  - (1) 完成113年國家溫室氣體排放清冊報告之林業部門章節。
  - (2) 完成改善林業部門森林碳匯計算模式。
  - (3) 完成評估結合空載光達與地面光達資料，發展長期生長監測與發展樣木材積式的可行性。
  - (4) 建置預測人工林8個以上重要樹種林分蓄積量之林分模式或單木模式，以及完成「森林碳匯調查手冊」。
  - (5) 提出國際林業碳匯議題分析及林業部門因應建議報告。





## 柒、參考文獻

1. 王兆桓、馮豐隆、林世宗、邱祈榮、王義仲、顏江河、劉瓊霏、詹明勳、林金樹、鍾玉龍(2008) 森林蓄積量與生物量轉換模式之建立 (3/3)。行政院農業委員會林務局委託研究報告。
2. 王兆桓、馮豐隆、邱祈榮、王義仲、顏添明、王亞男、林金樹、陳朝圳 (2012) 建置森林生長量與蓄積量分析系統暨改善碳吸存估計之研究(4/4)。行政院農業委員會林務局委託研究報告。
3. 王兆桓、劉知妤 (2006) 森林蓄積量與生物量轉換模式之建立。2006 森林碳吸存研討會論文集：200-215。臺北。行政院農業委員會林業試驗所。
4. 王義仲 (2006) 竹林生物量調查回顧與展望。2006 森林碳吸存研討會論文集：167-188。臺北。行政院農業委員會林業試驗所。
5. 王義仲 (2009) 孟宗竹及桂竹地上部生物量與碳蓄積。華岡農科學報 24：49-68。
6. 王義仲、陳周宏 (1995) 臺灣產竹種工藝利用價值之評估 (I)。林產工業 14(1)：82-94。
7. 行政院環境保護署 (2022) 中華民國國家溫室氣體排放清冊報告(2022 年版)。
8. 呂錦明、陳財輝 (1992) 桂竹之林分構造及生物量—桶頭—桂竹林分之例。林業試驗所研究報告季刊 7(1)：1-13。
9. 李明仁、何坤益、陳右農 (2010) 育林實務手冊。行政院農委會林務局。
10. 汪大雄、湯適謙、謝漢欽、鍾智昕 (2008) 六龜地區台灣杉人工林地位指數模式之建立。台灣林業科學 23(4)：339-53。
11. 宋承恩、王韻皓、林國聖、王培蓉、詹進發、陳毅青、王素芬 (2022) 用空載高光譜及光達資料建立森林覆蓋分類判釋模型。臺灣林業科學 37(2)：121-143。
12. 林俊成、鄭美如、劉淑芬、李國忠 (2002) 全民造林運動二氧化碳吸存潛力之經濟效益評估。臺灣林業科學 17(3)：311-321。
13. 林政融、顏添明 (2021) 應用不同結構樹高曲線式模擬臺灣杉人工林之效果評估。台灣林業科學 36(2)：111-25。
14. 林務局 (1973) 臺灣各主要樹種主木材積表。臺灣省林務局編印。
15. 林務局 (1995) 第三次臺灣森林資源及土地利用調查。行政院農業委員會林務局。
16. 林務局 (2016) 森林資源調查暨國有林事業區檢訂土地覆蓋型及航照樣點圖資更新作業手冊。行政院農業委員會林務局。
17. 林國銓、何淑玲 (2005) 由生物量推估臺灣不同林分之碳儲存量。森林經營對二氧化碳吸存之貢獻研討會論文集：97-108。臺北。行政院農業委員會林業試驗所。
18. 林國銓、杜清澤、黃菊美 (2007) 苗栗地區相思樹和木油桐人工林碳和氮累積量及生產量之估算。中華林學季刊 40(2)：201-218。
19. 林國銓、杜清澤、黃菊美 (2009) 臺東地區相思樹與楓香兩人工林碳累積量。林業研究季刊 31(3)：55-68。





20. 林國銓、杜清澤、黃菊美 (2010) 光蠟樹人工林碳儲存量和吸存量之估算。中華林學季刊 43(2)：261-276。
21. 林國銓、杜清澤、黃菊美、王巧萍 (2006) 亞熱帶闊葉林林木粗根生物量和養分含量之估算。臺灣林業科學 21(2)：155-166。
22. 林國銓、洪富文、游漢明、馬復京 (1994) 福山試驗林闊葉林生態系生物量與葉面積指數的累積與分布。林業試驗所研究報告季刊 9(4)：299-315。
23. 林國銓、黃菊美、杜清澤 (2008) 檳木人工林造林木碳貯存量和吸存量之估算。國家公園學報 18(2)：45-58。
24. 林裕仁、王秋嫻、Sara Wu (2011) 四種臺灣竹材碳轉換係數之分析。臺灣林業科學 26(4)：341-355。
25. 林裕仁、劉瓊霏、林俊成 (2002) 臺灣地區主要用材比重與碳含量測定。臺灣林業科學 17(3)：291-299。
26. 邱祈榮、王楷勛 (2017) 金門森林風損評估之研究-以莫蘭蒂颱風為例。第十二屆環境保護林經營管理研討會論文集：91-98。臺北。行政院農業委員會林業試驗所。
27. 邱祈榮、莊媛卉 (2016) 國家溫室氣體排放清冊林業部門實務說明。台灣林業 42(4)：18-30。
28. 邱祈榮、林俊成 (2022) 森林碳匯與抵換機制。洪葉文化事業有限公司。
29. 柯淑惠 (2006) 臺灣檳木人工林生物量及碳儲存量之研究。國立中興大學森林學系碩士論文。
30. 范建得、連振安(2021) 巴黎協定第 6 條機制於國際發展合作計畫之意義。國際開發援助現場季刊，第六期。
31. 許原瑞 (2008) 桉樹類的生物量與碳蓄積量。97 年度森林碳管理研討會論文集：17-29。臺北。行政院農業委員會林業試驗所。
32. 許原瑞、洪昆源、王巧萍、吳孟鈴、邱祈榮 (2006) 海岸林分生物量調查規劃。2006 年森林碳吸存研討會論文集：217-235。臺北，行政院農業委員會林業試驗所。
33. 陳松藩 (1972) 臺灣產殼斗樹種材積表及形數表之編製研究。臺灣林業試驗所報告第 224 號。
34. 陳財輝、呂錦明 (1988) 苗栗海岸砂丘木麻黃人工林之生長及林分生物量。林業試驗所研究報告季刊 3(1)：333-343。
35. 陳財輝、汪大雄、鍾欣芸 (2012) 麻竹林經營方式對生長與竹筍生產的影響。林業研究季刊 34(4)：297-304。
36. 陳財輝、許博行、張峻德 (1998) 四湖木麻黃林分生物量及養分量聚集。臺灣林業科學 13(4)：325-349。
37. 陳瑞惠 (2019) COP24 巴黎協定規則書談判結果研析。經濟部節能減碳推動辦公室專題。
38. 陳鈺惠、楊銘鑫、王兆桓 (2010) 紅檜和台灣杉人工林單木直徑生長與枯死模式之研究。宜蘭大學生物資源學刊 6(1):71-77。
39. 馮豐隆、鄭美如 (1992) 臺灣主要樹種生長收穫模式庫彙集。國立中興大學森林學系。
40. 黃凱洛、王兆桓、顏添明 (2011) 臺灣主要四種針葉樹人工林地位指數建立之研究。中華林學季刊 44(4)：553-566。







41. 楊榮啟、林文亮 (2003) 森林測計學。國立編譯館。
42. 趙國容 (2019) 水土保持樹種固碳能力與儲碳潛力計算資料庫之建置，行政院農業委員會水土保持局。
43. 劉慎孝、林子玉 (1970) 臺灣北部琉球松林分收穫表及材積表。臺灣省立中興大學農學院森林學系。
44. 羅紹麟、馮豐隆 (1987) 生物量調查及分析方法在樟樹資源調查之應用。興大實驗林研究報告 8：67-87。
45. Australian Government (2016) National Inventory Report 2014 (revised). Retrieved on February 6, 2017, from [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/9492.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php)
46. CJC CONSULTING (2014) Assessing the cost-effectiveness of woodlands in the abatement of carbon dioxide emissions. Report to the Forestry Commission. CJC Consulting Ltd,
47. Clutter, J.L., J.C. Fortson, L.V. Pienaar, G.H. Brister and R.L. Bailey (1983) Timber management a quantitative approach. Wiley.
48. Cochran, W. G. (1977) Sampling techniques. 3rd ed. Wiley, New York.
49. Chave, J., M. Réjou-Méchain, A. Búrques, E. Chidumayo, M.S. Colgan, W.B.C. Delitti, A. Duque, T. Eid, P.M. Rearnside, R.C. Goodman, M. Henry, A. Martínez-Yrizar, W.A. Mugasha, H.C. Muller-Landau, M. Mencuccini, B.W. Nelson, A. Ngomanda, E.M. Nogueira, E. Ortiz-Malavassi, R. Pélissier, P. Ploton, C.M. Ryan, J.G. Saldarriaga, G. Vieilledent (2014) Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology* 12629.
50. Cohen-Shacham, E., Janzen, C., Maginnis, S., Walters, G. (2016) Nature-based solutions to address global societal challenges. IUCN.
51. Condés S. and R. E. McRoberts (2017) Updating national forest inventory estimates of growing stock volume using hybrid inference. *Forest ecology and management*. 400, 48-57.
52. DeVries, P. G. (1986) Sampling theory for forest inventory. Springer-Verlag, New York.
53. Environment and Climate Change Canada (2016) National Inventory Report 1990-2014: Greenhouse Gas Sources and Sinks in Canada. Retrieved on February 6, 2017, from [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/9492.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php)
54. Eory, V., MacLeod, M., Topp, C.F.E., Rees, R.M., Webb, J., McVittie, A., Wall, E., Borthwick, F., Watson, C., Waterhouse, A., Wiltshire, J., Bell, H., Moran, D. and Dewhurst, R. (2015) Review and update the UK Agriculture Marginal Abatement Cost Curve to assess the greenhouse gas abatement potential for the 5th carbon budget period and to 2050. Final Report to the Committee on Climate Change. SRUC / Ricardo-AEA, Edinburgh. FORESTRY COMMISSION (2015). Oxford.
55. Ercanli (2020) Artificial intelligence with deep learning algorithms to model relationships between total height and diameter at breast height. *Forest Systems*, Volume 29, Issue 2, e014.
56. Federal Environment Agency (2016) National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990-2014. Retrieved on February 6, 2017, from







- [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/9492.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php)
57. Greenhouse Gas Inventory Office of Japan(GIO) (2016) National Greenhouse Gas Inventory Report of JAPAN. Retrieved on February 6, 2017, from [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/9492.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php)
  58. Grossi, G., Vitali, A., Bernabucci, U., Lacetera, N., & Nardone, A. (2021) Greenhouse Gas Emissions and Carbon Sinks of an Italian Natural Park [Original Research]. *Frontiers in Environmental Science*, 9.
  59. IPCC (2006) 2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventory. IPCC/IGES. Hayama. Japan.
  60. IPCC (2019) Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
  61. IUCN (2020) Guidance for using the IUCN Global Standard for Nature-based Solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of Nature-based Solutions. First edition. Gland, Switzerland: IUCN.
  62. Lam, T.Y., Guan, B.T. (2020) Modeling stand basal area growth of *Cryptomeria japonica* D. Don under different planting densities in Taiwan. *Journal of Forest Research*, DOI: 10.1080/13416979.2020.1733171.
  63. Lee, D., Choi, J. (2022) Development of Variable-Density Yield Models with Site Index Estimation for Korean Pines and Japanese Larch. *Forests* 13, 1150.
  64. Ministry of the Environment, Japan (2018) National Greenhouse Gas Inventory Report of JAPAN.
  65. U.S. Environmental Protection Agency (2016) Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2014. Retrieved on February 6, 2017, from [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/9492.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php)
  66. US EPA (2018) Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990-2016, US EPA
  67. USDA Forest Service. 2004. <http://fia.fs.fed.us/library.htm>.
  68. Valatin, G (2019) Comparing the cost-effectiveness of forestry options for climate change mitigation. Forestry Commission Report number: FCRN038
  69. Wang C.-H., S.-Z. Lin, C.-R. Chiou, Y.-C. Wang, F.-L. Feng, C.-H. Yen, C.-P. Liu, C.-S. Lin, Y.-L. Chung, M.-H. Chan (2008) Biomass conversion and expansion factors of the major conifer plantations in Taiwan. In Proc. Program of symposium on carbon management in Forest and Forest Products. October 17, 2008, National Taiwan University, Taipei, Taiwan.





## 第六章 土地利用、土地利用變化及林業部門(CRF Sector 4)

### 6.1 部門敘述

聯合國政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 以下簡稱 IPCC) 於 1997 年將土地利用、土地利用變化及林業 (Land use, land-use change and forestry, 以下簡稱 LULUCF) 納入國家溫室氣體清冊指南 (Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories; IPCC 1996 Guidelines, 以下簡稱 1996 IPCC 指南), 對於土地利用改變造成的碳排放量 (Carbon emission), 以及林業部門碳移除量 (Carbon removal) 等估算方法提出具體建議, 之後 IPCC 於 2003 年再公布 LULUCF 的良好作法指南 (Good Practice Guidance for Land use, land-use change and forestry, 以下簡稱 LULUCF GPG)。

目前最新的版本為 IPCC 於 2006 年所公布國家溫室氣體清冊指南 (2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 以下簡稱 2006 IPCC 指南), 其內容係結合 1996 IPCC 指南及 2003 年 LULUCF GPG 的主要精神與內容。在 2006 IPCC 指南架構下共區分為五大部門, 其中與森林有關的部門為「農業、林業和其他土地使用 (Agriculture, Forestry and Other Land Use, AFOLU)」部分之 3.B.1 林地

(含林地維持為林地及林地與其他土地使用類型的轉換) 及 3.D.1 「收穫林產品 (Harvested Wood Product, 以下簡稱 HWP)」等部分。

我國林業部門溫室氣體排放源範疇, 如表 6.1.1 所示, 統計 4.A「林地」, 另依據 IPCC 針對各方法學所提出之方法學使用層級, 可分為 Tier 1、Tier 2 及 Tier 3 三類, 相關採用原則如表 6.1.2 所示。

有關 1990 年至 2022 年林業部門碳移除量及其不確定性如表 6.1.3 所列, 碳移除之變化量於 19,388 至 23,546 千公噸二氧化碳當量之間, 不確定性為 7.50% 至 8.80% 之間。





表 6.1.1 土地利用、土地利用變化及林業部門排放源分類

土地類型	範疇定義	納入計算之 移除/排放氣體
4.A 林地	符合國家溫室氣體清冊林地閾值（如面積大於 0.5 公頃）的木本植被的所有土地，其植被結構當前在減少，但在原地可能達到國家定義林地類別的閾值之土地。	二氧化碳
4.B 農地	農業用地，含稻田和植被結構低於林地類閾值的農林系統。	無
4.C 牧草地	不被視為農田的牧場和牧草地。閾值低於林地類閾值的木本植被和其他無草植被系統，諸如草本和灌木。所有由荒地改造成用於消遣的草地以及符合國家定義的農業和森林牧場系統。	無
4.D 濕地	泥炭採掘地區和全年或部分時間被水覆蓋或充滿水的土地（如泥炭地），但不屬於林地、農田、草地或聚居地類別。作為管理子類的水庫和作為未管理子類的天然河流和湖泊。	無
4.E 聚居地	所有已開發的土地，如交通基礎設施和任何規模的人類聚居地，除非它們已經列入其他類別。這應當與國家定義一致。	無
4.F 其他土地	裸土、岩石、冰川和不屬於其他五個類別任意一種的所有土地面積。這一類別在可以獲得資料時，允許經過確定的土地總面積與國家面積相一致。如果能夠獲得資料，應按上文所述的土地利用類別對未管理土地進行分類（如分為未管理林地、未管理草地和未管理濕地）；這將提高透明性和加強追蹤土地利用從特定未管理土地類別轉化為上述類別的能力。	無
4.G 收穫林產品	收穫林產品包含所有搬離自林地之木質材料，其中亦包含樹皮；其所貯存的碳量，會隨林產品的使用在人類社會中流動、延遲其釋放至大氣中的時間。	無

表 6.1.2 土地利用、土地利用變化及林業部門所使用方法學

溫室氣體排放源 與移除源分類	二氧化碳		甲烷		氧化亞氮	
	方法學	排放係數	方法學	排放係數	方法學	排放係數
4.A 林地	T2	CS	NE	NE	NE	NE
4.B 農地	NE	NE	NE	NE	NE	NE
4.C 牧草地	NE	NE	NE	NE	NE	NE
4.D 濕地	NE	NE	NE	NE	NE	NE
4.E 聚居地	NE	NE	NE	NE	NE	NE
4.F 其他土地	NE	NE	NE	NE	NE	NE
4.G 收穫林產品	NE	NE				

備註：T2(IPCC Tier2), CS(Country Specific Method/EF), NE(未調查估計該分類項目), 灰底(2006 IPCC 指南未建議該氣體納入統計)。





表 6.1.3 1990 至 2022 年林業部門溫室氣體移除量與不確定性

年份	溫室氣體排放量/移除量			不確定性		
	4.A 林地		林業 部門 合計	4.A 林地		林業 部門 合計
	4.A.1 林地 維持林地	4.A.2 其他土地 轉變為林地		4.A.1 林地 維持林地	4.A.2 其他土地 轉變為林地	
	(單位：千公噸二氧化碳當量)			(單位：%)		
1990	-23,295.18	-90.75	-23,385.93	7.95	14.68	7.92
1991	-21,399.48	-90.75	-21,490.23	7.54	14.68	7.50
1992	-23,407.84	-135.99	-23,543.83	8.04	13.64	8.00
1993	-23,363.75	-182.45	-23,546.20	8.10	13.00	8.03
1994	-23,228.40	-230.49	-23,458.89	8.12	12.74	8.04
1995	-23,054.69	-285.11	-23,339.80	8.14	13.22	8.04
1996	-22,535.92	-315.06	-22,850.98	8.05	13.75	7.94
1997	-22,667.60	-392.42	-23,060.02	8.18	14.55	8.04
1998	-22,446.34	-440.18	-22,886.52	8.20	14.92	8.05
1999	-22,210.31	-553.38	-22,763.69	8.22	15.68	8.03
2000	-22,060.72	-656.02	-22,716.74	8.28	15.78	8.05
2001	-21,176.23	-673.30	-21,849.53	8.12	15.80	7.88
2002	-21,960.03	-747.38	-22,707.41	8.49	15.95	8.22
2003	-21,738.13	-886.17	-22,624.30	8.54	16.17	8.23
2004	-21,560.37	-981.32	-22,541.69	8.61	16.30	8.27
2005	-21,273.74	-1,016.10	-22,289.84	8.65	16.23	8.29
2006	-21,230.08	-1,029.21	-22,259.29	8.79	16.26	8.42
2007	-21,011.84	-1,061.97	-22,073.81	8.87	16.30	8.48
2008	-20,959.23	-1,122.50	-22,081.73	9.03	16.37	8.61
2009	-18,243.10	-1,144.81	-19,387.91	8.40	16.42	7.96
2010	-20,671.34	-1,217.68	-21,889.02	9.13	16.52	8.67
2011	-20,766.20	-1,180.62	-21,946.82	9.15	16.62	8.71
2012	-20,787.08	-1,172.56	-21,959.64	9.14	16.71	8.69
2013	-20,834.48	-1,139.44	-21,973.92	9.12	16.82	8.69
2014	-20,806.86	-1,078.79	-21,885.65	9.08	16.88	8.67
2015	-20,851.34	-1,049.03	-21,900.37	9.07	16.94	8.68
2016	-20,915.10	-1,010.79	-21,925.89	9.08	16.96	8.70
2017	-20,998.02	-963.25	-21,961.27	9.09	17.00	8.72
2018	-21,065.34	-918.18	-21,983.52	9.09	17.13	8.74
2019	-21,086.17	-830.67	-21,916.84	9.06	17.19	8.74
2020	-21,181.07	-723.94	-21,905.01	9.06	17.24	8.78
2021	-21,318.06	-653.59	-21,850.46	9.03	17.28	8.78
2022	-21,245.03	-589.01	-21,834.04	9.03	17.30	8.80





## 6.2 林地 (4.A)

由於我國區域計畫法、森林法對於林業用地變更以及森林伐採均已訂有相關規範，且根據臺灣森林經營管理方案第八條，1990 年代起即實施禁伐天然林政策，同時林地變更為其他使用之情形極少，因此藉由行政院農業委員會林業保育署（以下簡稱林業保育署）第三次與第四次全國森林資源調查成果之林型面積為基礎，配合林業保育署每年估算維持覆蓋之林型面積以及林業統計每年新植造林、伐

採、薪材收穫及干擾等相關活動數據，據以估算我國林業部門年碳移除量。

各年度碳移除量估算結果詳如表 6.2.1，其歷年趨勢如圖 6.2.1，2022 年林業部門碳移除量約為 21,835 千公噸二氧化碳當量，其不確定性為 8.80%，其中「林地維持林地」碳移除量占 97.30%，「其他土地轉變為林地」碳移除量占 2.70%，如圖 6.2.2。

表 6.2.1 1990 至 2022 年林地碳移除量變化

（單位：千公噸二氧化碳當量）

年份	4.A 林地			總二氧化碳 碳移除量 $\Delta\text{CO}_2$	不確定性 (%)
	4.A.1 林地維持林地		4.A.2 其他土地 轉變為林地		
	生物量 碳移除量 $\Delta\text{CO}_2\text{G}$	生物量 碳排放量 $\Delta\text{CO}_2\text{L}$	生物量 碳移除量 $\Delta\text{CO}_2\text{G}$		
1990	-23,902.42	607.25	-90.76	-23,385.93	7.92
1991	-23,902.42	2,502.94 <sup>1</sup>	-90.76	-21,490.24	7.50
1992	-23,740.99	333.15	-135.99	-23,543.83	8.00
1993	-23,579.55	215.80	-182.45	-23,546.20	8.03
1994	-23,418.11	189.72	-230.49	-23,458.88	8.04
1995	-23,256.68	201.99	-285.11	-23,339.80	8.04
1996	-23,095.24	559.32	-315.07	-22,850.99	7.94
1997	-22,933.80	266.20	-392.43	-23,060.03	8.04
1998	-22,772.36	326.03	-440.18	-22,886.51	8.05
1999	-22,610.93	400.62	-553.38	-22,763.69	8.03
2000	-22,449.49	388.77	-656.02	-22,716.74	8.05
2001	-22,288.05	1,111.82 <sup>2</sup>	-673.30	-21,849.53	7.88
2002	-22,126.62	166.59	-747.38	-22,707.41	8.22
2003	-21,965.18	227.05	-886.16	-22,624.29	8.23
2004	-21,803.74	243.37	-981.32	-22,541.69	8.27
2005	-21,642.31	368.56	-1,016.11	-22,289.86	8.29
2006	-21,480.87	250.78	-1,029.21	-22,259.30	8.42
2007	-21,319.43	307.59	-1,061.96	-22,073.80	8.48
2008	-21,157.99	198.76	-1,122.50	-22,081.73	8.61
2009	-20,996.56	2,753.45 <sup>3</sup>	-1,144.82	-19,387.93	7.96
2010	-20,889.44	218.09	-1,217.68	-21,889.03	8.67
2011	-20,906.55	140.35	-1,180.62	-21,946.82	8.71
2012	-20,932.22	145.14	-1,172.56	-21,959.64	8.69
2013	-20,969.81	135.33	-1,139.44	-21,973.92	8.69 <sup>4</sup>
2014	-21,003.81	196.95	-1,078.79	-21,885.65	







年份	4.A 林地			總二氧化碳 碳移除量 $\Delta\text{CO}_2$	不確定性 (%)
	4.A.1 林地維持林地		4.A.2 其他土地 轉變為林地		
	生物量 碳移除量 $\Delta\text{CO}_2\text{ G}$	生物量 碳排放量 $\Delta\text{CO}_2\text{ L}$	生物量 碳移除量 $\Delta\text{CO}_2\text{ G}$		
2015	-21,040.14	188.79	-1,049.03	-21,900.38	8.68
2016	-21,068.11	153.01	-1,010.79	-21,925.89	8.70
2017	-21,105.16	107.14	-963.25	-21,961.27	8.72
2018	-21,148.04	82.69	-918.17	-21,983.52	8.74
2019	-21,201.90	115.73	-830.67	-21,916.84	8.74
2020	-21,271.30	90.23	-723.94	-21,905.01	8.78
2021	-21,318.06	121.19	-653.59	-21,850.46	8.78
2022	-21,358.53	113.50	-589.01	-21,835.04	8.80

備註：

- 1991 年其他災害包括颱風災害次數共 7 次，面積共 295.74 公頃，被害材積 1,348,998.61 $\text{m}^3$ ，損失材積 1,348,992.06  $\text{m}^3$ 。
- 2001 年除丹大、梨山、雪山東峰及陽明山國家公園所發生之五次森林大火外，尚發生 59 次小火警，火災受損面積廣達 395 公頃，森林資源損失慘重。
- 2009 年莫拉克風災對我國中、南部造成嚴重災害，尤其在高雄、屏東部分地區 3 天內降下超過 2,500 毫米的雨量，產生約 125 萬公噸漂流木，致林木損失材積量大。

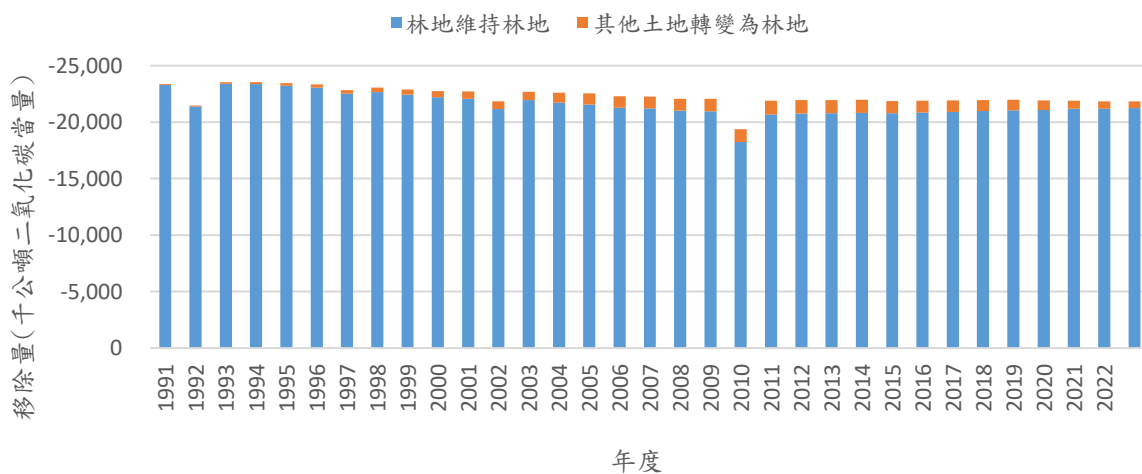


圖 6.2.1 1990 至 2022 年林地碳移除量變化趨勢

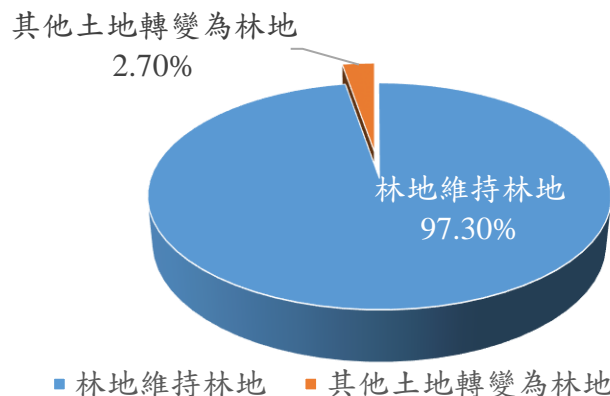


圖 6.2.2 2022 年林地碳移除量各項目占比







## 6.2.1 林地維持林地(4.A.1)

### 1. 排放源及匯分類的敘述

森林所儲存之碳庫(Carbon Pool)可區分為生物量(Biomass) (包含地上部及地下部生物量)、死有機質(Dead Organic Matter)(包含枯死木與枯落物)、土壤(Soils)(包含土壤有機質)等三大類。各類碳庫說明如表 6.2.2 所示。

### 2. 方法學議題

#### (1).計算方法

在林地中之碳貯存量變化，主要為各碳庫變化的總和(公式 6.2.1)。

### 公式6.2.1

$$\Delta C_{FL} = \Delta C_B + \Delta C_{DOM} + \Delta C_{Soils}$$

$\Delta C_{FL}$ =林地中之碳貯存年變化量(公噸碳/年)；

$\Delta C_B$ =生物量的碳貯存年變化量(公噸碳/年)；

$\Delta C_{DOM}$ =死有機物質(包括枯死木和枯落物)的碳貯存年變化量(公噸碳/年)；

$\Delta C_{Soils}$ =土壤碳貯存年變化量(公噸碳/年)

公式 6.2.1 中  $\Delta C_B$ 、 $\Delta C_{DOM}$ 、 $\Delta C_{Soils}$  之估算分述如下：

表 6.2.2 碳庫定義

碳庫		說明
生物量 (Biomass)	地上部生物量 (Aboveground Biomass)	土壤以上所有活的木本和草本之生物量，包括莖、殘幹(Stump)、枝、樹皮、種子和葉。 註：如果森林下層植被占地上部生物量碳庫的比例較小時，可不列入計算，但在整個調查期間中應有一致性的處理。
	地下部生物量 (Belowground Biomass)	活根的全部生物量。由於僅憑經驗要將直徑低於 2 公釐的細根與土壤有機質或枯落物加以區分是相當困難的，因此建議直徑低於 2 公釐的細根不列入計算。
死有機質 (Dead Organic Matter)	枯死木 (Dead Wood)	除枯落物外的所有非活的木質生物量，枯死木包括：直立的、橫躺在地面上的或者在土壤中直徑大於或等於 10 公分的枯倒木、死根和殘幹。
	枯落物 (Litter)	所有直徑大於 2 公釐（因要與土壤有機物區分）的非活的生物量及直徑小於枯死木所定義的最小直徑（10 公分）、在礦質或有機質土壤上已經死亡的及各種程度的腐朽狀況的所有非活的生物量，包括：土壤類型所定義的枯落物層及在礦質或有機質土壤中的活細根（最小直徑應低於地下部生物量所規定）。
土壤 (Soils)	土壤有機質 (Soil Organic Matter)	係指達到所選擇深度之礦質土壤的有機碳，包括：土壤中之活和死的細根與有機質、不能憑經驗區分而直徑小於 2 公釐（建議值）的根及死有機質。土壤深度預設值為 30 公分。

資料來源：IPCC, 2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, 2006.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa K., Ngara, T., and Tanabe, K.(eds). Published: IGES, Japan.





## A. $\Delta C_B$ 生物量(Biomass)碳貯存量的變化

在每年生物量所增加的碳貯存量，主要為生物量每年因生長所增加的碳貯存量扣除因生物量損失所減少的碳貯存量，即為碳移除量（公式 6.2.2）。

### 公式 6.2.2

$$\Delta C_B = \Delta C_G - \Delta C_L$$

$\Delta C_B$ =生物量的碳貯存年變化量（公噸碳/年）；

$\Delta C_G$ =生物量生長之碳貯存年增加量（公噸碳/年）；

$\Delta C_L$ =生物量損失之碳貯存年減少量（公噸碳/年）。

而生物量生長之年碳貯存增加量，依林分的地理區位、平均年生長量及面積而異（公式 6.2.3）。

### 公式 6.2.3

$$\Delta C_G = \sum_{i,j} (A_{i,j} \times G_{Total,i,j} \times CF_{i,j})$$

$\Delta C_G$ =生物量生長之碳貯存年增加量（公噸碳/年）；

$A_{i,j}$ =i 生態區，j 氣候型之面積（公頃）；

$G_{Total}$ =平均年生物量生長量（公噸乾物質/公頃/年）；

i=生態區（i=1 至 n）；

j=氣候型（j=1 至 m）；

$CF_{i,j}$  =i 生態區，j 氣候型之乾物質碳含量比例（公噸碳/公噸乾

物質）

平均年生物量生長量，在方法 1(Tier 1)的情況時，可依林分地上部的平均年生物量增加量乘上根莖比可得出（公式 6.2.4）。在方法 2 及 3(Tier 2 及 3)，林分地上部的平均年生物量增加量可由特定林分（植被）的年平均材積生長量乘上其轉換生物量和擴展係數可得出（公式 6.2.5）。

### 公式 6.2.4

$$G_{Total} = \Sigma[G_W \times (1+R)]$$

（方法 1）

$G_{Total}$ =平均年生物量累積量（公噸乾物質/公頃/年）；

$G_W$ =在特定林分（植被）類型地上部生物量的平均年生長量（公噸乾物質/公頃/年）；

R=根莖比。

### 公式 6.2.5

$$G_{Total} = \Sigma[I_V \times BCEF_I \times (1+R)]$$

（方法 2、3）

$I_V$ =特定林分（植被）類型的年平均材積生長量（立方公尺/公頃/年）；

$BCEF_I$ =特定林分（植被）類型之轉換生物量和擴展係數，將材積（包括樹皮）轉換為地上部生物量。





如  $BCEF_I$  無法直接得知，則可使用生物量擴展係數( $BEF_I$ )與基本比重( $D$ )值相乘得出 (公式 6.2.6)。

#### 公式 6.2.6

$$BCEF_I = BEF_I \times D$$

生物量損失之年碳貯存減少量為木材伐採、薪材收穫與干擾等因素所引起的年碳貯存減少量 (公式 6.2.7)。

#### 公式 6.2.7

$$\Delta C_L = L_{\text{Wood-Removals}} + L_{\text{Fuelwood}} + L_{\text{Disturbance}}$$

$\Delta C_L$  = 生物量損失之碳貯存年減少量(公噸碳/年)；

$L_{\text{Wood-Removals}}$  = 木材伐採所引起的碳貯存年減少量(公噸碳/年)；

$L_{\text{Fuelwood}}$  = 薪材收穫所引起的碳貯存年減少量(公噸碳/年)；

$L_{\text{Disturbance}}$  = 干擾等其他因素所引起的碳貯存年減少量(公噸碳/年)

木材伐採所引起的年碳貯存減少量，主要受每年伐採量所影響 (公式 6.2.8)。

#### 公式 6.2.8

$$L_{\text{Wood-Removals}} = [H \times BCEF_R \times (1+R) \times CF]$$

$L_{\text{Wood-Removals}}$  = 木材伐採所引起的碳貯存年減少量 (公噸碳/年)；

$H$  = 每年採伐量 (立方公尺/年)；

$R$  = 根莖比；

$CF$  = 乾物質碳含量比例 (公噸碳/公噸乾物質)；

$BCEF_R$  = 將木材伐採材積換算為地上部總生物量(含樹皮)的生物量擴展係數。

如  $BCEF_R$  無法直接得知，則可使用伐採生物量擴展係數( $BEF_R$ )與基本比重( $D$ )值相乘得出 (公式 6.2.9)。

#### 公式 6.2.9

$$BCEF_R = BEF_R \times D$$

薪材收穫所引起的碳貯存年減少量，主要受每年收穫薪材的全株與林木材積而異 (公式 6.2.10)。

#### 公式 6.2.10

$$L_{\text{Fuelwood}} = [FG \times BCEF_R \times (1+R)] \times CF$$

$L_{\text{Fuelwood}}$  = 薪材收穫所引起的碳貯存年減少量 (公噸碳/年)；

$FG$  = 每年收穫薪材材積 (立方公尺/年)；

$R$  = 根莖比；

$CF$  = 乾物質碳含量比例 (公噸碳/公噸乾物質)；

$BCEF_R$  = 將木材伐採材積換算為地上部總生物量(含樹皮)的生物量擴展係數。





干擾等其他因素所引起的碳貯存年減少量，依干擾面積及該地區原先的生物量及所造成的生物量損失程度而異（公式 6.2.11）。

#### 公式 6.2.11

$$L_{\text{Disturbance}} = [A_{\text{Disturbance}} \times B_W \times (1+R) \times CF \times fd]$$

如因干擾所損失的生物量可以計算，則可將上式加以修正為：

#### 公式 6.2.12

$$L_{\text{Disturbance}} = [DV \times BCEF_1 \times (1+R) \times CF \times fd]$$

$L_{\text{Disturbance}}$  = 干擾等其他因素所引起的碳貯存年減少量(公噸碳/年)；

$A_{\text{Disturbance}}$  = 受干擾影響的森林面積(公頃/年)；

$B_W$  = 受干擾影響地區的平均地上部生物量(公噸/公頃)；

$R$  = 根莖比；

$CF$  = 乾物質碳含量比例(公噸碳/公噸乾物質)；

$fd$  = 干擾造成該地生物量損失程度(如由於干擾造成林分生物量全部損失，則  $fd=1$ ，如因病蟲害干擾而僅造成部分生物量的損失，則  $0 < fd < 1$ )；

$DV$  = 受干擾所損失的材積量(立方

公尺)；

$BCEF_1$  = 特定林分(植被)類型之轉換生物量和擴展係數，將材積(包括樹皮)轉換為地上部生物量。

### B. $\Delta C_{\text{DOM}}$ 死有機物質(Dead Organic Matter)碳貯存量變化

採用方法 1，對於碳庫中的碳貯存量變化並不明顯，其預設值可假設為零，即增加與損失相抵，因此死有機質年碳貯存量變化量為零。當國家於報告年間沒有經歷森林類型、林地擾動或經營制度的重大轉變，這是個安全的假設。

### C. $\Delta C_{\text{Soils}}$ 土壤(Soils)碳貯存量變化

國內較為全面的森林土壤調查資料為林業保育署與林業試驗所合作執行之「臺灣高山林地土壤調查」計畫，其計畫成果雖對森林土壤碳庫進行推估，但尚無探討土壤碳貯存年變化量之研究。另因報告年間沒有經歷森林類型、林地擾動或經營制度的重大轉變，假設土壤碳庫年碳貯存變化量為零。

### (2).轉換係數

基本比重(D)：針葉樹林型採用王兆桓(2008)<sup>2</sup>對 6 種針葉樹種研究數據，依各樹種第四次森林資源調查之面積加權計算平均，其值為 0.41。闊葉樹則將林裕仁等(2002)<sup>3</sup>對 15 種闊葉樹種研究之結果進行

<sup>2</sup> 王兆桓 2008，《森林蓄積量與生物量轉換模式之建立(3/3)》，臺北，臺灣：行政院農業委員會林務局。

<sup>3</sup> 林裕仁、劉瓊霏與林俊成 2002，「臺灣地區主要用

材比重與碳含量測定」，《臺灣林業科學》，17(3)，291-299。







平均，為 0.56。針闊葉混淆林為針葉樹與闊葉樹之平均值 0.49。

生物量擴展係數( $BEF_I$ 、 $BEF_R$ )：相關係數係依據專家諮詢會議，決議相關係數以文獻係數平均值為原則，但若相關文獻數量不多且文獻係數差異過大時，建議採取中位數為宜。針葉樹數值取自王兆桓(2008)各針葉樹種之平均值 1.27。闊葉樹採用各文獻之中位數 1.40，共有王兆桓與劉知妤(2006)<sup>4</sup>、王兆桓(2008)、李宣德與馮豐隆(2010)<sup>5</sup>、林國銓等(1994)<sup>6</sup>與林國銓與何淑玲(2005)<sup>7</sup>等五篇文獻。針闊葉混淆林為針葉樹與闊葉樹之平均值 1.34。

生物量轉換與擴展係數( $BCEF_I$ 、 $BCEF_R$ )：於針葉樹部分同樣採用王兆桓(2008)，取其平均值 0.51。闊葉樹則取王兆桓(2008)、林國銓等

(2007)<sup>8</sup>、林國銓等(2008)<sup>9</sup>、林國銓等(2009)<sup>10</sup>、林國銓與何淑玲(2005)、許原瑞等(2006)<sup>11</sup>與許原瑞(2008)<sup>12</sup>等七篇文獻之中位數 0.92 為代表。針闊葉混淆林為針葉樹與闊葉樹之平均值 0.72。

根莖比(R)：因國內針葉樹研究報告缺乏，故採用 2006 IPCC 指南對亞熱帶濕潤林的預設值之平均 0.22 作為針葉樹的 R 值。闊葉樹則採用李宣德與馮豐隆(2008)<sup>13</sup>、林國銓等(2006)<sup>14</sup>、林國銓等(2007)、林國銓等(2008)、林國銓等(2009)、林國銓等(2010)<sup>15</sup>、林國銓與何淑玲(2005)、柯淑惠(2006)<sup>16</sup>、陳財輝等(1998)<sup>17</sup>及陳財輝與呂錦明(1988)<sup>18</sup>共十篇文獻，7 種樹種，取其之中位數 0.24 為代表。針闊葉混淆林為針葉樹與闊葉樹之平均值 0.23。

<sup>4</sup> 王兆桓、劉知妤 2006，「森林蓄積量與生物量轉換模式之建立」，《2006 森林碳吸存研討會論文集》，200-215，臺北，臺灣：行政院農業委員會林業試驗所。

<sup>5</sup> 李宣德、馮豐隆 2010，「臺灣地區樟樹生物量擴展係數之建立」，《林業研究季刊》，32(3)，45-54。

<sup>6</sup> 林國銓、洪富文、游漢明與馬復京 1994，「福山試驗林闊葉林生態系生物量與葉面積指數的累積與分布」，《林業試驗所研究報告季刊》，9(4)，299-315。

<sup>7</sup> 林國銓、何淑玲 2005，「由生物量推估臺灣不同林分之碳儲存量」，《森林經營對二氧化碳吸存之貢獻研討會論文集》，97-108，臺北，臺灣：行政院農業委員會林業試驗所。

<sup>8</sup> 林國銓、杜清澤與黃菊美 2007，「苗栗地區相思樹和木油桐人工林碳和氮累積量及生產量之估算」，《中華林學季刊》，40(2)，201-218。

<sup>9</sup> 林國銓、黃菊美與杜清澤 2008，「檳木人工林造林木碳貯存量和吸存量之估算」，《國家公園學報》，18(2)，45-58。

<sup>10</sup> 林國銓、杜清澤與黃菊美 2009，「臺東地區相思樹與楓香兩人工林碳累積量」，《林業研究季刊》，31(3)，55-68。

<sup>11</sup> 許原瑞、洪昆源、王巧萍、吳孟鈴與邱祈榮 2006，「海岸林分生物量調查規劃」，《2006 年森林碳

吸存研討會論文集》，217-235，臺北，臺灣：行政院農業委員會林業試驗所。

<sup>12</sup> 許原瑞 2008，「桉樹類的生物量與碳蓄積量」，《97 年度森林碳管理研討會論文集》，17-29，臺北，臺灣：行政院農業委員會林業試驗所。

<sup>13</sup> 李宣德、馮豐隆 2008，「森林碳吸存資源調查推估模式系統—以臺灣樟樹為例」，《臺灣林業科學》，23(Supplement)，11-22。

<sup>14</sup> 林國銓、杜清澤與黃菊美、王巧萍 2006，「亞熱帶闊葉林林木粗根生物量和養分含量之估算」，《臺灣林業科學》，21(2)，155-166。

<sup>15</sup> 林國銓、杜清澤與黃菊美 2010，「光蠟樹人工林碳貯存量和吸存量之估算」，《中華林學季刊》，43(2)，261-276。

<sup>16</sup> 柯淑惠 2006，「臺灣檳木人工林生物量及碳儲存量之研究」，《國立中興大學森林學系碩士論文》，臺中，臺灣：國立中興大學。

<sup>17</sup> 陳財輝、許博行與張峻德 1998，「四湖木麻黃林分生物量及養分量聚集」，《臺灣林業科學》，13(4)，325-349。

<sup>18</sup> 陳財輝、呂錦明 1988，「苗栗海岸砂丘木麻黃人工林之生長及林分生物量」，《林業試驗所研究報告季刊》，3(1)，333-343。





乾物質碳含量比例(CF)：根據林裕仁等(2002)對臺灣 24 種主要用材的研究，分別使用針葉樹種與闊葉樹種進行實驗，結果顯示針葉樹與闊葉樹碳含量平均比例值分別為 0.4821 與 0.4691；針闊葉混淆林為針葉樹與闊葉樹之平均值為 0.4756。

竹林之基本比重採用王義仲與陳周宏(1995)<sup>19</sup>、王義仲(2006)<sup>20</sup>及林裕仁等(2011)<sup>21</sup>等三篇研究，共六種竹種，取其中位數為 0.62。生物量擴展係數與根莖比皆以呂錦明與陳財輝(1992)<sup>22</sup>對桂竹林分生物量的研究結果，其數值分別為 1.40 與 0.46。乾物質碳含量比例則以林裕仁等(2011)對孟宗竹、桂竹、麻竹及刺竹之碳轉換係數的研究，以四種竹材的平均值為 0.4732。

年生長量：採用第三次及第四次全國森林資源調查成果之各林型單位面積材積差值，除上二次調查之間隔年數，推算各林型年生長量。

惟因森林資源調查針對竹林僅估算單位面積支數，爰竹林生長量則依王義仲(2006)研究結果，每公頃 5 年生孟宗竹的竹稈生物量為 105.1 公噸，每公頃 5 年生桂竹的竹稈生物量為 33.3 公噸，將兩種竹類所得結果加以平均再除以 5 年，求得竹稈年平均生長量為 13.84 公噸/

公頃。

各項轉換係數及年生長量羅列如表 6.2.3。

### (3).活動數據

以目前國內可取得及歸納之資料進行分類計算。

#### A. 林地維持林地面積

林地面積以全國森林資源調查之成果為主，林業保育署已完成四次全國性森林資源調查。第三次全國森林資源調查之成果顯示全臺林地面積為 2,102,400 公頃，其調查時間為 1990 年 3 月至 1993 年 9 月，故假設以中間值 1991 年為基準年；第四次全國森林資源調查面積為 2,185,425 公頃，扣除待成林地後的面積為 2,155,140 公頃，航照影像主要取自 2008 年至 2010 年，故採用 2009 年為基準年。本年度因應林業保育署執行「森林資源調查暨國有林事業區檢訂土地覆蓋型及航照樣點圖資更新作業」完成二輪調查資料之統計分析，針對「林地維持林地面積」進行調整，將 1991 年及 2009 年數值分別以第三次及第四次全國森林資源調查成果（2,102,400 公頃及 2,155,140 公頃）為基準值，1991 年至 2009 年間的各林型面積利用二次調查

<sup>19</sup> 王義仲、陳周宏 1995，「臺灣產竹種工藝利用價值之評估 (I)」，《林產工業》，14(1)，82-94。

<sup>20</sup> 王義仲 2006，「竹林生物量調查回顧與展望」，《2006 森林碳吸存研討會論文集》，167-188，臺北，臺灣：行政院農業委員會林業試驗所。

<sup>21</sup> 林裕仁、王秋嫻與 Sara Wu 2011，「四種臺灣竹材

碳轉換係數之分析」，《臺灣林業科學》，26(4)，341-355。

<sup>22</sup> 呂錦明、陳財輝 1992，「桂竹之林分構造及生物量一桶頭一桂竹林分之例」，《林業試驗所研究報告季刊》，7(1)，1-13。







成果、採內插法推得。第四次全國森林資源調查與第三次全國森林資源調查比較，森林面積增加約 5 萬多公頃，主要增加區位在國有林事業區外之山坡地與平地。

考量崩塌及風災為改變林地覆蓋之主因，2009 年後以歷年因崩塌或風災減少森林覆蓋面積推算「林地維持林地」之面積。所使用數據包含林業保育署委託國立成功大學執行「運用衛星影像於全島崩塌地判釋與災害分析」研究成果（2010 年至 2016 年），以及林業保育署執行「森林資源調查暨國有林事業區檢訂土地覆蓋型及航照樣點圖資更新作業」之成果（2013 年至 2021 年）。後者係林業保育署於 2013 年完成第四次全國森林資源調查後，為掌握森林面積之動態，建立長期森林資源監測體系，以持續性、逐年辦理更新的方式，取代以往專案性的調查，比照國際上聯合國糧農組織(FAO)或美、日等國家作法，每 5 年發布一次全國暨各林區森林資源狀況報告。

估算方法係將前開二計畫成果之各年度崩塌地圖層以空間聯

集的方式累加，用以運算天然針葉林、天然針闊葉混淆林、天然闊葉林、人工針葉林、人工針闊葉混淆林、人工闊葉林、木竹混淆林和竹林等八種林型之崩塌或風災面積（如表 6.2.4）。2009 年以後各年度「林地維持林地」面積須扣除表中崩塌或風災面積。

此外，「其他土地轉變為林地」經過 20 年之過渡期後，計算時改納入林地維持林地的面積估算，如 1990 年之造林面積，至 2011 年時加總至林地維持林地之面積中。

經上述資料與步驟整理，各年度林地維持林地之面積如下表 6.2.5。

#### **B. 每年伐採量(H)、每年收穫薪材材積(FG)**

根據歷年林業保育署之林業統計加以整理（如表 6.2.6）。

#### **C. 受干擾影響的森林面積(A<sub>Disturbance</sub>)與損失材積量(DV)**

根據歷年林業保育署之林業統計加以整理（表 6.2.7），其中受干擾影響之來源包括盜伐、火災、火警、濫墾及其他；幼齡木、幼苗、竹叢、副產物之損失未列入。





表 6.2.3 相關轉換係數及年生長量

林型\係數	基本 比重 (D)	生物量 擴展係數 (BEF)	生物量轉 換與擴展 係數 (BCEF)	根莖 比 (R)	碳含量 比例 (CF)	年生長量 (立方公 尺/公頃)
天然針葉林	0.41	1.27	0.51	0.22	0.4821	4.14
天然針闊葉混淆林	0.49	1.34	0.72	0.23	0.4756	10.05
天然闊葉林	0.56	1.40	0.92	0.24	0.4691	3.58
人工針葉林	0.41	1.27	0.51	0.22	0.4821	8.11
人工針闊葉混淆林	0.49	1.34	0.72	0.23	0.4756	10.37
人工闊葉林	0.56	1.40	0.92	0.24	0.4691	4.34
木竹混淆林	0.49	1.34	0.72	0.23	0.4756	3.31
竹林	0.62	1.40	-	0.46	0.4732	13.84*

備註：竹林年生長量單位為噸/公頃。

表 6.2.4 2010 至 2022 年因崩塌或風災減少森林覆蓋面積

林型 (公頃)	天然 針葉林	天然 針闊葉 混淆林	天然 闊葉林	人工 針葉林	人工 針闊葉 混淆林	人工 闊葉林	木竹 混淆林	竹林	總計
2010	1,184	835	7,775	253	232	913	561	357	12,110
2011	447	207	1,755	74	49	150	87	53	2,822
2012	545	263	2,041	83	48	157	37	24	3,198
2013	192	148	1,496	60	47	75	41	45	2,104
2014	341	241	1,578	50	45	97	35	21	2,408
2015	127	94	757	18	13	39	22	10	1,080
2016	94	62	574	19	20	34	15	17	835
2017	162	144	1,002	79	27	60	13	11	1,500
2018	66	93	604	5	12	21	1	2	804
2019	128	57	682	374	172	109	0	0	1,521
2020	62	55	708	2	2	40	9	11	890
2021	7	10	89	1	3	6	3	0	120
2022	34	37	358	6	63	15	8	5	524
累計 減少 面積	3,389	2,246	19,418	1,024	733	1,716	832	555	29,913
累計 減少 比例	11%	8%	65%	3%	2%	6%	3%	2%	100%

備註：

1. 2010 年至 2016 年資料參考林業保育署委託國立成功大學辦理「運用衛星影像於全島崩塌地判釋與災害分析」計畫之崩塌地資料。
2. 2017 年至 2021 年資料取自林業保育署「森林資源調查暨國有林事業區檢訂土地覆蓋型及航照樣點圖資更新作業」計畫成果坡地崩塌區域。





表 6.2.5 1990 至 2022 年林地維持林地面積

(單位：公頃)

林型 年份	天然 針葉林	天然 針闊葉 混淆林	天然 闊葉林	人工 針葉林	人工 針闊葉 混淆林	人工 闊葉林	木竹 混淆林	竹林	總計
1990	220,100	286,376	975,800	218,400	37,287	144,600	67,537	152,300	2,102,400
1991	220,100	286,376	975,800	218,400	37,287	144,600	67,537	152,300	2,102,400
1992	219,324	277,044	995,550	211,415	38,155	143,578	70,171	150,093	2,105,330
1993	218,548	267,713	1,015,300	204,430	39,023	142,556	72,805	147,886	2,108,261
1994	217,772	258,381	1,035,050	197,445	39,891	141,534	75,438	145,679	2,111,190
1995	216,996	249,050	1,054,800	190,460	40,759	140,512	78,072	143,472	2,114,121
1996	216,220	239,718	1,074,550	183,475	41,627	139,490	80,706	141,264	2,117,050
1997	215,445	230,386	1,094,300	176,490	42,495	138,467	83,339	139,057	2,119,979
1998	214,669	221,055	1,114,050	169,505	43,364	137,445	85,973	136,850	2,122,911
1999	213,893	211,723	1,133,800	162,520	44,232	136,423	88,607	134,643	2,125,841
2000	213,117	202,392	1,153,550	155,535	45,100	135,401	91,240	132,436	2,128,771
2001	212,341	193,060	1,173,299	148,550	45,968	134,379	93,874	130,229	2,131,700
2002	211,565	183,729	1,193,049	141,565	46,836	133,357	96,508	128,022	2,134,631
2003	210,789	174,397	1,212,799	134,580	47,704	132,335	99,141	125,815	2,137,560
2004	210,013	165,066	1,232,549	127,595	48,572	131,313	101,775	123,608	2,140,491
2005	209,237	155,734	1,252,299	120,610	49,440	130,291	104,409	121,400	2,143,420
2006	208,461	146,403	1,272,049	113,625	50,308	129,269	107,042	119,193	2,146,350
2007	207,685	137,071	1,291,799	106,640	51,176	128,246	109,676	116,986	2,149,279
2008	206,909	127,740	1,311,549	99,655	52,044	127,224	112,310	114,779	2,152,210
2009	206,134	118,408	1,331,299	92,670	52,913	126,202	114,943	112,572	2,155,141
2010	204,950	117,573	1,323,524	92,417	52,681	125,289	114,382	112,215	2,143,031
2011	204,503	117,366	1,321,770	93,302	52,699	127,835	114,296	112,323	2,144,094
2012	203,957	117,103	1,319,728	94,569	52,703	130,681	114,259	112,551	2,145,551
2013	203,765	116,955	1,318,232	96,289	52,703	133,580	114,218	112,785	2,148,527
2014	203,424	116,714	1,316,654	97,720	52,659	136,482	114,183	113,067	2,150,903
2015	203,297	116,620	1,315,897	98,707	52,645	139,931	114,161	113,187	2,154,445
2016	203,203	116,559	1,315,323	99,301	52,626	142,729	114,146	113,282	2,157,169
2017	203,041	116,415	1,314,321	100,443	52,598	146,569	114,133	113,378	2,160,898
2018	202,975	116,322	1,313,717	102,148	52,586	149,986	114,132	113,476	2,165,342
2019	202,848	116,265	1,313,035	103,215	52,414	155,855	114,132	113,546	2,171,310
2020	202,785	116,210	1,312,327	104,729	52,414	162,467	114,122	113,664	2,178,718
2021	202,778	116,199	1,312,239	105,759	52,411	166,586	114,119	113,734	2,183,825
2022	202,745	116,162	1,311,881	106,549	52,348	170,639	114,112	113,800	2,188,236

備註：2010 年起扣除崩塌或風災面積；2011 年起納入「其他土地轉變為林地」滿 20 年之面積。





表 6.2.6 臺灣地區森林主產物伐採量

年份	面積(ha)			林木材積(m <sup>3</sup> )						竹類(支)
	林地	竹林	總計	天然 針葉林	天然 闊葉林	人工 針葉林	人工 闊葉林	新材	總計	
1990	1,917	1,479	3,396	6,292	54,207	85,517	17,481	39,715	203,212	5,795,941
1991	1,046	1,683	2,729	4,191	26,244	64,436	7,885	23,303	126,059	4,318,917
1992	1,036	781	1,817	5,428	13,662	69,813	7,361	22,059	118,323	3,312,710
1993	575	675	1,250	4,457	2,724	50,683	5,245	8,625	71,734	2,176,352
1994	439	532	971	3,182	3,735	36,679	6,396	6,136	56,128	1,907,854
1995	625	587	1,212	5,536	349	35,440	4,876	16,976	63,177	2,161,413
1996	500	293	793	4,515	328	38,665	3,154	9,700	56,362	2,323,761
1997	448	184	632	4,597	309	32,831	3,071	11,365	52,173	1,232,119
1998	458	260	718	5,679	197	27,349	3,262	13,042	49,529	1,508,053
1999	393	493	886	3,177	964	22,267	6,540	9,997	42,945	1,841,708
2000	632	383	1,015	0	3,507	22,500	4,039	5,134	35,180	1,716,292
2001	405	124	529	0	7,414	21,171	11,741	7,533	47,859	558,927
2002	624	390	1,014	0	3,642	26,019	24,010	7,388	61,059	1,268,416
2003	739	455	1,194	128	771	56,764	9,597	18,282	85,542	2,174,351
2004	705	333	1,038	0	128	37,968	20,616	12,089	70,801	1,572,353
2005	500	342	842	2	533	35,393	16,649	7,481	60,058	1,694,291
2006	587	622	1,209	72	252	35,214	17,127	10,931	63,596	3,046,946
2007	326	339	665	1	145	40,253	15,182	11,638	67,219	2,864,482
2008	180	465	645	2	30	36,596	7,140	7,340	51,108	2,509,139
2009	158	438	596	0	760	32,058	7,774	3,690	44,282	3,266,805
2010	159	562	721	6	1,432	19,115	11,933	313	32,799	3,326,833
2011	142	370	512	117	131	27,674	8,217	774	36,913	1,875,466
2012	151	378	529	70	194	37,189	5,971	2,808	46,232	1,772,876
2013	170	285	455	25	400	26,461	7,516	7,817	42,219	1,532,111
2014	155	394	549	11	337	51,350	6,325	4,247	62,270	2,427,516
2015	189	488	677	3	314	37,399	5,822	8,071	51,609	2,431,258
2016	124	287	411	64	495	26,124	7,488	7,873	42,044	1,803,786
2017	87	181	268	34	213	23,308	6,030	4,379	33,964	1,229,043
2018	101	131	232	1	129	26,549	6,064	5,562	38,305	609,969
2019	93	192	285	4	191	34,347	7,109	5,264	46,915	1,067,344
2020	104	250	354	52	155	29,008	4,167	6,561	39,943	737,486
2021	102	136	238	10	63	35,361	3,717	6,110	45,261	730,163
2022	107	146	253	114	327	33,501	6,295	4,615	44,852	526,817

資料來源：林業保育署之林業統計

備註：1.表列林木採伐面積，均係皆伐面積；竹之採伐面積，係含皆、擇伐面積。

2.天然林之林木材積係統計天然林地倒木之材積。





表 6.2.7 受干擾影響的森林面積與損失材積

年份	次數	面積(公頃)	林木材積(立方公尺)	竹類(支)
1990	352	4,031	3,395	0
1991	362	1,125	1,357,423 <sup>1</sup>	163,220
1992	292	401	2,235	20,154
1993	359	1,251	9,944	24,196
1994	441	3,860	5,246	264,490
1995	336	546	1,873	105,600
1996	511	7,519	43,984	6,255,093
1997	305	2,969	14,572	2,330,329
1998	252	1,642	20,233	3,131,407
1999	429	2,440	75,991	2,692,378
2000	272	4,353	103,385	1,966,948
2001	263	1,621	645,328 <sup>2</sup>	252,545
2002	347	742	3,670	35,657
2003	491	800	624	27,448
2004	251	1,006	26,764	394,651
2005	219	3,133	65,112	2,013,673
2006	210	158	2,017	99,200
2007	231	1,049	37,751	257,027
2008	317	284	4,182	26,962
2009	455	5,834	1,563,005 <sup>3</sup>	2,486,573
2010	419	97	5,202	1,608
2011	476	33	297	731
2012	445	10	109	0
2013	413	15	411	750
2014	380	30	494	0
2015	435	64	842	180
2016	381	6,160	2,269 <sup>4</sup>	34,869
2017	391	25	458	625
2018	338	42	401	1,699
2019	390	29	592	7,540
2020	342	47	404	7,200
2021	341	100	16,998 <sup>5</sup>	21,554
2022	269	45	18,618	1,134

資料來源：林業保育署之林業統計

備註：

1. 1991 年其他災害包括颱風災害次數共 7 次，面積共 295.74 公頃，被害材積 1,348,998.61m<sup>3</sup>，損失材積 1,348,992.06 m<sup>3</sup>。
2. 2001 年除丹大、梨山、雪山東峰及陽明山國家公園所發生之五次森林火災外，尚發生 59 次小火警，火災受損面積廣達 395 公頃，森林資源損失慘重。
3. 2009 年莫拉克風災對我國中、南部造成嚴重災害，尤其在高雄、屏東部分地區 3 天內降下超過 2,500 毫米的雨量，產生約 125 萬噸漂流木，致林木損失材積量大。
4. 2016 年莫蘭蒂風災對金門造成 5,996.98 公頃之受損面積，惟依林業統計報表未具材積數據，然「金門森林風損評估之研究-以莫蘭蒂颱風為例」<sup>23</sup>報告顯示風倒材積量達 289,600 m<sup>3</sup>，依京都議定書決議文，LULUCF 部門各國應提交之每年天然干擾訊息可排除森林干擾釋放量超過背景值者，故該次風災損失材積不計入估算。
5. 2021 年 5 月玉山國家公園森林火災，林木材積損失達 16,724m<sup>3</sup>，致使年度林木材積損失達 16,998m<sup>3</sup>。

<sup>23</sup> 邱祈榮與王楷勛 2017，「金門森林風損評估之研究-以莫蘭蒂颱風為例」，《第十二屆環境保護林經營管理研討會論文集》，91-98，臺北，臺灣：行政院農業委員會林業試驗所。







#### (4).碳移除量

1990 年至 2022 年「林地維持林地」碳移除量變化估算結果如表 6.2.8，每年大致呈現穩定狀態，主要係由於我國區域計畫法、森林法對於林業用地變更以及森林伐採均訂有相關規範，且自 1992 年起即實

施禁伐天然林政策，至林地變更為其他使用之情形極少，因此變動幅度小。惟其中 1991 年、2001 年及 2009 年，因森林大火與颱風等重大災害，致使當年度生物量碳排放量 ( $\Delta C_L$ ) 較高，進而導致碳移除量較低，其餘各年均維持穩定狀態。

表 6.2.8 1990 至 2022 年林地維持林地碳移除量變化

(單位：千公噸二氧化碳當量)

年份	生物量生長 碳移除量 $\Delta CO_2G$	生物量年碳排放量 $\Delta CO_2L$			總碳移除量 $\Delta CO_2$
		木材伐採 碳排放量 $L_{Wood-Removals}$	薪材收穫 碳排放量 $L_{Fuelwood}$	干擾等其他因素 碳排放量 $L_{Disturbance}$	
1990	-23,902.42	524.07	77.93	5.24	-23,295.18
1991	-23,902.42	352.90	45.73	2,104.32	-21,399.47
1992	-23,740.99	285.43	43.28	4.43	-23,407.85
1993	-23,579.55	182.33	16.92	16.54	-23,363.76
1994	-23,418.11	156.69	12.04	20.99	-23,228.39
1995	-23,256.68	160.64	33.31	8.04	-23,054.69
1996	-23,095.24	167.56	19.03	372.73	-22,535.92
1997	-22,933.80	107.84	22.30	136.06	-22,667.60
1998	-22,772.36	116.60	25.59	183.84	-22,446.33
1999	-22,610.93	132.45	19.62	248.55	-22,210.31
2000	-22,449.49	123.19	10.07	255.51	-22,060.72
2001	-22,288.05	88.11	14.78	1,008.93	-21,176.23
2002	-22,126.62	144.69	14.50	7.41	-21,960.02
2003	-21,965.18	188.87	35.87	2.30	-21,738.14
2004	-21,803.74	159.08	23.72	60.56	-21,560.38
2005	-21,642.31	155.20	14.68	198.68	-21,273.75
2006	-21,480.87	221.38	21.45	7.95	-21,230.09
2007	-21,319.43	213.93	22.84	70.83	-21,011.83
2008	-21,157.99	176.59	14.40	7.77	-20,959.23
2009	-20,996.56	211.19	7.24	2,535.02	-18,243.11
2010	-20,889.44	209.37	0.61	8.11	-20,671.35
2011	-20,906.55	138.34	1.52	0.49	-20,766.20
2012	-20,932.22	139.46	5.51	0.17	-20,787.08
2013	-20,969.81	119.32	15.34	0.67	-20,834.48
2014	-21,003.81	187.85	8.33	0.76	-20,806.87
2015	-21,040.14	171.65	15.84	1.31	-20,851.34
2016	-21,068.11	132.36	15.45	5.20	-20,915.10
2017	-21,105.16	97.81	8.59	0.74	-20,998.02
2018	-21,148.04	71.08	10.91	0.70	-21,065.35
2019	-21,201.90	104.12	10.33	1.28	-21,086.17
2020	-21,271.30	76.38	12.87	0.98	-21,181.07
2021	-21,318.06	81.90	11.99	27.30	-21,196.87
2022	-21,358.53	75.64	9.06	28.81	-21,245.03

備註： $\Delta CO_2 = \Delta CO_2G + (L_{Wood-Removals} + L_{Fuelwood} + L_{Disturbance})$







### 3. 不確定性與時間序列的一致性

#### (1).不確定性

因蒙地卡羅法進行估算時在數據的應用上較為複雜且須統計軟體的協助，而誤差傳播法即可符合目前國內資料處理的需求，因此採用「誤差傳播法」推算我國「林地維持林地」碳移除量之不確定性。

林地碳移除量的不確定性討論對象包含林業活動數據（如土地使用面積）與轉換係數（如各種碳轉換係數）二大項目。其中因林業活動數據取自全國森林資源調查，第四次全國森林資源調查係以航照圖判釋，繪製土地利用型圖，無法以統計之方式估算不確定性，且其為國家統計資料，因此依 2006 IPCC 指南設定不確定性為 5%。

進行不確定性分析有四個主要步驟。首先，整理碳轉換係數文獻中的研究成果與標準差或標準誤差，不確定性是由平均值和標準差所推估（95%信賴區間），以下列公式 6.2.13 與公式 6.2.14 計算每篇文獻各樹種之不確定性；第二步則視取平均與中位數的過程為不同變量相加，採用誤差傳播法的加法規則（公式 6.2.15）計算出各係數之不確定性；因估算林地碳量時，活動數據與各個轉換係數為相乘的關係，依據誤差傳播法乘法規則（公式 6.2.16）來合併其不確定性。最後，林業部門溫室氣體清冊是將各林型碳排放/碳移除的數量相加，因此再以加法

規則合併各林型不確定性，再合併林地維持林地與土地轉變為林地兩部分之不確定，詳如表 6.2.9。

#### 公式 6.2.13

$$SD = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

SD：標準差

$x_i$ ：第  $i$  筆 CF 數值

$\bar{x}$ ：文獻收集之 CF 平均值

$n$ ：CF 數據筆數

#### 公式 6.2.14

$$U = \frac{SD \times 1.96}{\bar{x}} \times 100\%$$

U：不確定性

SD：標準差

$\bar{x}$ ：文獻收集之 CF 平均值

#### 公式 6.2.15

$$U_{total} = \frac{\sqrt{(U_1 \times E_1)^2 + \dots + (U_n \times E_n)^2}}{E_1 + E_2 + \dots + E_n}$$

$U_{total}$ ：不確定性之總和(加法規則)

$U_1, U_2, U_n$ ：不同變量的不確定性

$E_1, E_2, E_n$ ：不同變量

#### 公式 6.2.16

$$U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$$

$U_{total}$ ：不確定性之總和(乘法規則)

$U_1, U_2, U_n$ ：不同變量的不確定性



各林型中以天然針葉林與人工針葉林之合併不確定性最高，主要是因為針葉樹之 R 值採用 IPCC 預設值，有較高之不確定性；又以天然闊葉林之不確定性最低。竹林則因為大多數係數採用的文獻並未註明標準差或標準誤差，無法估算不確定性，暫時忽略不計，因而促使不確定性低。

計算林地維持林地碳量變化時，是將各林型之碳量相加，因此計算不確定性分析時，先以誤差傳播法之加法規則，合併各林型係數之不確定性，再合併生物量碳移除量、伐採碳排放量、薪材收穫碳排放量與干擾損失碳排放量之不確定性。計算結果如下表所示，各年度林地維持林地碳移除量之不確定性介於 7.54 %至 9.15 %之間，如表 6.2.10 所示。

## (2).時間序列一致性

森林面積活動數據主要採自全國森林資源調查數據，然全國森林資源調查並非每年進行調查，為符合時間序列的一致性，參考 IPCC 2006 指南，兩次調查間的年度以內插法推得各林型之相關數據。又因第三次與第四次全國森林資源調查相隔久遠（約 18 年），考量到調查技術之提升，以外推法可能會有高估變動之情形，故第四次全國森林資源調查（2009 年）以後，使用替代數據—崩塌地圖層，來排除崩塌地區域，以估算林地維持林地面積。崩塌地圖資來源分別為「運用衛星

影像於全島崩塌地判釋與災害分析」計畫 2010 年至 2016 年成果、「森林資源調查暨國有林事業區檢訂土地覆蓋型及航照樣點圖資更新作業」計畫所產出 2013 年至 2022 年坡地崩塌區域，以兩者聯集做為 2022 年排除生長量區域面積。

## 4.林業部門碳移除量的 QA/QC 及查證

查證的定義：「查證指在清冊規劃、發展及完成後，收集可能有助於建立可信度的活動資料和程序步驟，以供清冊的查證程序使用」。換言之，「查證(Verification)」是對清冊報告中的排放/移除量作定期審查，以建立清冊可信度。查證過程應做為品質保證(QA)和品質控制(QC)程序的一部分，以促進發展國家溫室氣體清冊的透明度、一致性、可比較性、完整性和準確性。

目前已規劃建立地面樣區調查結果 QA/QC 程序，未來將導入實務作業、落實推動，以確保調查品質。

## 5.林業部門碳移除量的重新計算

估算方式與相關轉換係數沿用以往計算方式及引用原則，本年度清冊報告尚無修正，僅更新至 2022 年度資料。

## 6.林業部門碳移除量的改善計畫

- (1).有關各林型或土地利用型圖之活動數據，為土地使用變遷的依據，亦為林業部門碳移除量的估算基礎，2017 年起引用「森





林資源調查暨國有林事業區檢訂土地覆蓋型及航照樣點圖資更新作業」計畫成果，依調查資料及林地覆蓋型更新情形，並搭配衛星影像監測或國土利用調查成果，產製森林面積活動數據。

- (2). 目前僅以崩塌地為主扣除森林覆蓋面積方式，將逐步視年度圖資供應情形，考慮納入其他森林覆蓋移除的情形；同時研議建立適當機制妥善處理崩塌地復育後碳移除量的估算方式。

- (3). 針對碳轉換係數及各林型年生長量，研議辦理精進及更新，以提升清冊數據品質。

- (4). 為完善品質保證(QA)和品質控制(QC)程序，建立並持續推動從樣區調查、林型判釋、年度森林面積產製過程建立活動數據收集的 QA/QC 程序，促進發展國家溫室氣體清冊的透明度、一致性、可比較性、完整性和準確性。

表 6.2.9 林業活動數據與轉換係數各項不確定性分析結果

林型 \ 係數	活動數據不確定性 (%)	基本比重 (D)	不確定性 (%)	生物量轉換與擴展係數 (BCEF)	不確定性 (%)	根莖比 (R)	不確定性 (%)	碳含量比例 (CF)	不確定性 (%)	年生長量 (立方公尺/公頃)	不確定性 (%)	合併之不確定性 (%)
天然針葉林	5.00	0.41	9.30	0.51	2.18	0.22	32.30	0.4821	2.89	4.14	12.19	35.07
天然針闊葉混淆林	5.00	0.49	9.30	0.72	7.62	0.23	16.88	0.4756	1.80	10.05	15.83	24.92
天然闊葉林	5.00	0.56	-	0.92	11.79	0.24	13.06	0.4691	2.13	3.58	15.80	18.84
人工針葉林	5.00	0.41	9.30	0.51	2.18	0.22	32.30	0.4821	2.89	8.11	13.13	34.82
人工針闊葉混淆林	5.00	0.49	9.30	0.72	7.62	0.23	16.88	0.4756	1.80	10.37	4.01	25.97
人工闊葉林	5.00	0.56	-	0.92	11.79	0.24	13.06	0.4691	2.13	4.34	24.93	27.93
木竹混淆林	5.00	0.49		0.72	7.62	0.23	16.88	0.4756	1.80	3.31	11.45	22.83
竹林	5.00	0.62	15.68	-	-	0.46	-	0.4732	2.15	13.84 <sup>註</sup>	-	5.44

備註：竹林年生長量之單位為公噸/公頃。





表 6.2.10 1990 至 2022 年林地維持林地不確定性

(單位：%)

年份	生物量 碳移除量 $\Delta C_G$	生物量年碳排放量 $\Delta C_L$			合計
		木材伐採 碳排放量 $L_{Wood-Removals}$	薪材收穫 碳排放量 <sup>註</sup> $L_{Fuelwood}$	干擾等其他因素 碳排放量 $L_{Disturbanc}$	
1990	8.15	7.68	18.41	19.27	7.95
1991	8.15	7.89	18.41	19.20	7.54
1992	8.16	9.60	18.41	15.05	8.04
1993	8.17	10.64	18.41	17.90	8.10
1994	8.19	9.25	18.41	8.15	8.12
1995	8.21	8.90	18.41	7.76	8.14
1996	8.24	9.20	18.41	5.67	8.05
1997	8.27	11.57	18.41	5.55	8.18
1998	8.32	9.37	18.41	5.58	8.20
1999	8.36	7.39	18.41	9.54	8.22
2000	8.42	7.73	18.41	12.21	8.28
2001	8.48	10.53	18.41	19.03	8.12
2002	8.55	9.19	18.41	14.80	8.49
2003	8.63	11.44	18.41	8.67	8.54
2004	8.71	10.16	18.41	13.26	8.61
2005	8.80	9.56	18.41	10.12	8.65
2006	8.90	7.36	18.41	8.25	8.79
2007	9.00	8.09	18.41	15.89	8.87
2008	9.11	8.52	18.41	16.04	9.03
2009	9.23	6.98	18.41	18.35	8.40
2010	9.23	5.74	18.41	19.08	9.13
2011	9.21	8.36	18.41	17.88	9.15
2012	9.20	10.33	18.41	19.27	9.14
2013	9.18	9.01	18.41	18.22	9.12
2014	9.17	10.53	18.41	19.27	9.08
2015	9.15	8.82	18.41	19.14	9.07
2016	9.15	8.26	18.41	13.10	9.08
2017	9.13	9.51	18.41	18.47	9.09
2018	9.12	14.03	18.41	17.01	9.09
2019	9.11	12.48	18.41	13.83	9.06
2020	9.09	14.11	18.41	12.49	9.06
2021	9.09	15.88	18.41	18.53	9.03
2022	9.08	16.40	18.41	19.23	9.03

備註：各年度「薪材收穫」之統計值均源自人工闊葉林，故其不確定性以人工闊葉樹林型之 18.41 為值。







## 6.2.2 其他土地轉變為林地(4.A.2)

### 1. 排放源及匯分類的敘述

土地轉變為森林之碳庫(Carbon Pool)與林地維持林地相同，區分為生物量(Biomass) (包含地上部及地下部生物量)、死有機質(Dead Organic Matter) (包含枯死木與枯落物)、土壤(Soils) (包含土壤有機質)等三大類。各類碳庫說明如表 6.2.2 所示。

### 2. 方法論議題

#### (1). 計算方法

##### A. $\Delta C_B$ 生物量(Biomass)碳貯存量的變化

有關生物量碳貯量變化，採用 6.2.1 章節整理公式 6.2.1 至公式 6.2.12 計算。

##### B. $\Delta C_{DOM}$ 死有機物質 (Dead Organic Matter)碳貯存量變化

採用方法 1，對於這些碳庫中的碳貯存量變化並不明顯，因此其預設值可假設為零，即投入與損失相抵，因此死有機質碳貯存量變化淨值為零。當國家於報告年間沒有經歷森林類型、擾動或經營體制的重大轉變，這是個安全的假設。

##### C. $\Delta C_{Soils}$ 土壤(Soils)碳貯存量變化

上述假設可同樣應用於土壤碳庫，淨碳貯存變化量為零。

#### (2). 轉換係數

碳轉換係數方面，基本比重(D)、生物量擴展係數(BEF<sub>I</sub>、BEF<sub>R</sub>)、生物量轉換與擴展係數(BCEF)、根莖比(R)及乾物質碳含量比例(CF)採用與林地維持林地相同之數值，如表 6.2.3 所示。

材積生長量則依林俊成等人(2002)<sup>24</sup>對全民造林運動碳吸存潛力之評估結果，以樟樹、臺灣櫟、相思樹、光臘樹等四種樹種之平均生長量做為闊葉林造林材積計算基準，而以肖楠、柳杉、杉木等三種樹種之平均生長量做為針葉林造林材積計算基準，針闊葉混淆林平均生長量則為針葉林及闊葉林之平均值。竹林的平均生長量則依林裕仁等(2011)的研究結果，平均每公頃竹稈年生長量為 13.84 公噸。

#### (3). 活動數據

各年度土地轉變為林地之面積採用林業統計的造林面積，如表 6.2.11 所示。

#### (4). 碳移除量

1990 年至 2022 年「其他土地轉變為林地」碳移除量變化結果如表 6.2.12，主要隨著新植造林面積的累積，碳移除量逐年增加，然自 2017 年起造林面積由 938 公頃減少為 565 公頃 (表 6.2.11)，進而影響生

<sup>24</sup> 林俊成、鄭美如、劉淑芬與李國忠 2002，「全民造林運動二氧化碳吸存潛力之經濟效益評估」，《臺灣

林業科學》，17(3)，311-321。





物量碳移除量，2022 年碳移除量為 589 千公噸二氧化碳當量。

### 3.不確定性與時間序列的一致性

#### (1).不確定性

有關土地轉變為林地之不確定性分析，採用 6.2.1 章節之公式 6.2.13 至公式 6.2.16 計算。

以誤差傳播法之加法原則，將各林型轉換係數之不確定性依排放量進行合併，估算各年度土地轉變為林地之不確定性如表 6.2.13，介於 12.71 %至 17.30%之間。

#### (2).時間序列一致性

土地轉變為森林碳移除量變化活動數據主要來自於林業統計的造林面積，2022 年度並未改變。

### 4.林業部門碳移除量的 QA/QC 及查證

查證的定義：「查證指在清冊規劃、發展及完成後，收集可能有助於建立可信度的活動資料和程序步驟，以供清冊的查證程序使用」。換言之，「查證(Verification)」是對清冊報告中的排放/移除量作定期審查，以建立清冊可信度。查證過程應做為品質保證(QA)和品質控制(QC)程序的一部分，以促進發展國家溫室氣體清冊的透明度、一致性、可比較性、完整性和準確性。

目前已規劃建立地面樣區調查結果 QA/QC 程序，未來將導入實務作業、落實推動，以確保調查品質。

### 5.林業部門碳移除量的改善計畫

其他土地轉變為林地資料目前缺乏 GIS 圖資，對於造林地後續管理及現況更新較為不易，後續研議建立造林地相關 GIS 圖資提供機制以利後續管理。







表 6.2.11 1990 至 2022 年土地轉變為林地面積

(單位：公頃)

年份	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	竹林	合計
1990	959	67	2,696	161	3,883
1991	1,350	52	3,002	252	4,656
1992	1,780	48	2,975	279	5,082
1993	1,481	0	2,999	303	4,783
1994	1,005	0	3,487	129	4,621
1995	614	0	2,832	112	3,558
1996	1,222	0	3,901	108	5,231
1997	1,709	0	3,438	100	5,247
1998	1,441	0	5,978	70	7,489
1999	1,516	2	6,653	129	8,300
2000	1,032	0	4,125	70	5,227
2001	796	0	4,068	70	4,934
2002	853	4	6,556	71	7,484
2003	492	31	6,717	45	7,285
2004	638	4	4,092	134	4,868
2005	62	0	1,477 <sup>1</sup>	57	1,596
2006	59	0	345	5	409
2007	313	0	818	5	1,136
2008	87	0	426	5	518
2009	671	0	2,595	1	3,267
2010	250	0	2,580	0	2,830
2011 <sup>2</sup>	144	0	3,399	1	3,544
2012	150	0	3,044	0	3,194
2013	226	0	1,179	0	1,405
2014	155	0	1,098	0	1,253
2015	139	0	993	0	1,132
2016	112	0	826	0	938
2017	68	0	497	0	565
2018	73	0	492	0	565
2019	102	0	406	0	508
2020	140	0	354	0	494
2021	128	0	363	0	491
2022	87	0	214	0	301

資料來源：林業保育署之林業統計

備註：

1. 因 2005 年起停止全民造林政策致造林面積減少。
2. 林業統計面積取自林業保育署林業統計表之造林面積表、一般造林面積表(按樹種分)；2011 年後相關造林計畫造林面積依新增之相關造林計畫造林面積表(按機關分)扣除營造複層林及其他造林部分。





表 6.2.12 1990 至 2022 年土地轉變為林地碳移除量變化

(單位：千公噸二氧化碳當量)

年份	生物量碳移除量 $\Delta\text{CO}_2\text{G}$				總碳移除量 $\Delta\text{CO}_2$
	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	竹林	
1990	-13.12	-1.31	-68.41	-7.92	-90.76
1991	-13.12	-1.31	-68.41	-7.92	-90.76
1992	-21.14	-1.32	-93.24	-20.29	-135.99
1993	-31.60	-1.54	-115.35	-33.96	-182.45
1994	-33.97	-0.97	-146.73	-48.82	-230.49
1995	-33.94	-1.15	-194.84	-55.18	-285.11
1996	-34.15	-1.37	-226.77	-52.78	-315.07
1997	-46.93	-1.49	-298.32	-45.69	-392.43
1998	-63.73	-1.77	-337.76	-36.92	-440.18
1999	-73.51	-1.94	-452.44	-25.49	-553.38
2000	-89.38	-2.14	-539.05	-25.45	-656.02
2001	-96.41	-2.13	-551.40	-23.36	-673.30
2002	-103.39	-2.12	-620.34	-21.53	-747.38
2003	-111.59	-2.17	-752.30	-20.10	-886.16
2004	-116.36	-2.68	-843.39	-18.89	-981.32
2005	-128.80	-2.26	-865.90	-19.15	-1,016.11
2006	-129.39	-2.31	-878.98	-18.53	-1,029.21
2007	-136.47	-2.32	-907.83	-15.34	-1,061.96
2008	-143.99	-2.30	-964.11	-12.10	-1,122.50
2009	-144.26	-2.27	-988.14	-10.15	-1,144.82
2010	-155.07	-2.22	-1,056.76	-3.63	-1,217.68
2011	-144.22	-1.58	-1,033.99	-0.83	-1,180.62
2012	-134.16	-1.02	-1,036.79	-0.59	-1,172.56
2013	-119.46	-0.51	-1,019.11	-0.36	-1,139.44
2014	-108.39	-0.52	-969.78	-0.10	-1,078.79
2015	-100.34	-0.51	-948.15	-0.03	-1,049.03
2016	-95.06	-0.49	-915.21	-0.03	-1,010.79
2017	-87.44	-0.49	-875.32	0.00	-963.25
2018	-73.95	-0.49	-843.73	0.00	-918.17
2019	-62.94	-0.51	-767.22	0.00	-830.67
2020	-51.76	-0.45	-671.73	0.00	-723.94
2021	-45.22	-0.43	-607.94	0.00	-653.59
2022	-39.51	-0.43	-549.08	0.00	-589.01





表 6.2.13 1990 至 2022 年土地轉變為林地碳移除量不確定性

(單位：%)

年份	生物量碳移除量 $\Delta C_G$	年份	生物量碳移除量 $\Delta C_G$
1990	14.68	2007	16.30
1991	14.68	2008	16.37
1992	13.64	2009	16.42
1993	13.00	2010	16.52
1994	12.74	2011	16.62
1995	13.22	2012	16.71
1996	13.75	2013	16.82
1997	14.55	2014	16.88
1998	14.92	2015	16.94
1999	15.68	2016	16.96
2000	15.78	2017	17.00
2001	15.80	2018	17.13
2002	15.95	2019	17.19
2003	16.17	2020	17.24
2004	16.30	2021	17.28
2005	16.23	2022	17.30
2006	16.26		





## 附錄二、美國、日本清冊數據

**Table A-193: Net CO<sub>2</sub> Flux from Forest Pools in Forest Land Remaining Forest Land and Harvested Wood Pools (MMT CO<sub>2</sub> Eq.)**

Carbon Pool	1990	1995	2000	2005	2010	2017	2018	2019	2020	2021
<b>Forest</b>	<b>(697.7)</b>	<b>(690.4)</b>	<b>(664.9)</b>	<b>(608.2)</b>	<b>(628.3)</b>	<b>(610.4)</b>	<b>(610.5)</b>	<b>(559.8)</b>	<b>(610.8)</b>	<b>(592.5)</b>
Aboveground Biomass	(499.1)	(485.0)	(468.7)	(443.8)	(440.8)	(425.9)	(428.0)	(410.8)	(419.0)	(409.1)
Belowground Biomass	(101.8)	(98.6)	(95.1)	(89.8)	(88.6)	(84.5)	(85.1)	(81.6)	(83.1)	(81.1)
Dead Wood	(100.8)	(101.8)	(101.1)	(97.9)	(101.1)	(100.0)	(102.7)	(98.2)	(102.3)	(101.1)
Litter	0.9	(7.7)	(1.9)	22.5	2.6	(2.0)	1.6	30.4	(1.9)	1.9
Soil (Mineral)	3.2	2.7	1.8	0.5	(0.9)	(0.1)	0.6	0.7	(5.4)	(4.0)
Soil (Organic)	(0.8)	(0.7)	(0.6)	(0.4)	(0.2)	1.4	2.3	(1.1)	0.1	0.1
Drained Organic Soil <sup>a</sup>	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
<b>Harvested Wood</b>	<b>(123.8)</b>	<b>(112.2)</b>	<b>(93.4)</b>	<b>(106.0)</b>	<b>(69.1)</b>	<b>(100.3)</b>	<b>(94.0)</b>	<b>(89.6)</b>	<b>(96.6)</b>	<b>(102.8)</b>
Products in Use	(54.8)	(51.7)	(31.9)	(42.6)	(7.4)	(34.9)	(28.9)	(25.1)	(32.0)	(37.8)
SWDS	(69.0)	(60.5)	(61.5)	(63.4)	(61.7)	(65.3)	(65.1)	(64.5)	(64.6)	(65.1)
<b>Total Net Flux</b>	<b>(821.4)</b>	<b>(802.6)</b>	<b>(758.3)</b>	<b>(714.2)</b>	<b>(697.3)</b>	<b>(710.7)</b>	<b>(704.4)</b>	<b>(649.3)</b>	<b>(707.4)</b>	<b>(695.4)</b>

<sup>a</sup> These estimates include C stock changes from drained organic soils from both Forest Land Remaining Forest Land and Land Converted to Forest Land.

Note: Parentheses indicate negative values.

**Table A-194: Net C Flux from Forest Pools in Forest Land Remaining Forest Land and Harvested Wood Pools (MMT C)**

Carbon Pool	1990	1995	2000	2005	2010	2017	2018	2019	2020	2021
<b>Forest</b>	<b>(190.3)</b>	<b>(188.3)</b>	<b>(181.3)</b>	<b>(165.9)</b>	<b>(171.3)</b>	<b>(166.5)</b>	<b>(166.5)</b>	<b>(152.7)</b>	<b>(166.6)</b>	<b>(161.6)</b>
Aboveground Biomass	(136.1)	(132.3)	(127.8)	(121.0)	(120.2)	(116.1)	(116.7)	(112.0)	(114.3)	(111.6)
Belowground Biomass	(27.8)	(26.9)	(25.9)	(24.5)	(24.2)	(23.0)	(23.2)	(22.3)	(22.7)	(22.1)
Dead Wood	(27.5)	(27.8)	(27.6)	(26.7)	(27.6)	(27.3)	(28.0)	(26.8)	(27.9)	(27.6)
Litter	0.2	(2.1)	(0.5)	6.1	0.7	(0.6)	0.4	8.3	(0.5)	0.5
Soil (Mineral)	0.9	0.7	0.5	0.1	(0.2)	(0.0)	0.2	0.2	(1.5)	(1.1)
Soil (Organic)	(0.2)	(0.2)	(0.2)	(0.1)	(0.1)	0.4	0.6	(0.3)	0.0	0.0
Drained Organic Soil <sup>a</sup>	0.21	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
<b>Harvested Wood</b>	<b>(33.8)</b>	<b>(30.6)</b>	<b>(25.5)</b>	<b>(28.9)</b>	<b>(18.8)</b>	<b>(27.3)</b>	<b>(25.6)</b>	<b>(24.4)</b>	<b>(26.3)</b>	<b>(28.0)</b>
Products in Use	(14.9)	(14.1)	(8.7)	(11.6)	(2.0)	(9.5)	(7.9)	(6.8)	(8.7)	(10.3)
SWDS	(18.8)	(16.5)	(16.8)	(17.3)	(16.8)	(17.8)	(17.8)	(17.6)	(17.6)	(17.7)
<b>Total Net Flux</b>	<b>(224.0)</b>	<b>(218.9)</b>	<b>(206.8)</b>	<b>(194.8)</b>	<b>(190.2)</b>	<b>(193.8)</b>	<b>(192.1)</b>	<b>(177.1)</b>	<b>(192.9)</b>	<b>(189.6)</b>

<sup>a</sup> These estimates include C stock changes from drained organic soils from both Forest Land Remaining Forest Land and Land Converted to Forest Land.

Note: Parentheses indicate negative values.

圖 美國林地維持林地淨碳、淨 CO<sub>2</sub> 通量數據

**Table 6-18 Emissions and removals in forest land resulting from carbon stock changes**

Category	Carbon pool	Unit	1990	1995	2000	2005	2010	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
4.A. Forest land	Total	kt-CO <sub>2</sub>	-86,265	-95,436	-97,953	-99,808	-82,608	-84,056	-76,311	-73,363	-66,884	-62,341	-64,398	-62,890	-58,686	-60,357	-58,343
	Living biomass	kt-CO <sub>2</sub>	-79,912	-87,199	-90,624	-94,576	-80,325	-82,859	-75,437	-72,667	-66,279	-61,779	-63,797	-62,204	-57,968	-59,579	-57,613
	Dead wood	kt-CO <sub>2</sub>	-3,017	-4,026	-2,930	-958	1,123	1,898	2,081	2,131	2,119	2,057	1,935	1,756	1,604	1,460	1,406
	Litter	kt-CO <sub>2</sub>	-2,936	-2,570	-1,938	-1,174	-583	-462	-423	-393	-380	-363	-357	-336	-298	-273	-237
	Mineral soil	kt-CO <sub>2</sub>	-400	-1,641	-2,461	-3,101	-2,823	-2,633	-2,532	-2,434	-2,343	-2,256	-2,179	-2,106	-2,023	-1,965	-1,899
	Organic soil	kt-CO <sub>2</sub>	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
4.A.1. Forest land remaining Forest land	Total	kt-CO <sub>2</sub>	-76,686	-91,253	-95,254	-97,824	-81,192	-82,709	-75,007	-72,120	-65,709	-61,229	-63,351	-61,918	-57,791	-59,540	-57,604
	Living biomass	kt-CO <sub>2</sub>	-73,836	-84,529	-88,891	-93,303	-79,394	-81,971	-74,569	-71,838	-65,494	-61,033	-63,088	-61,544	-57,357	-59,018	-57,101
	Dead wood	kt-CO <sub>2</sub>	-2,687	-3,881	-2,836	-887	1,175	1,948	2,128	2,177	2,162	2,098	1,973	1,792	1,637	1,490	1,434
	Litter	kt-CO <sub>2</sub>	-2,259	-2,272	-1,744	-1,029	-476	-360	-326	-300	-291	-279	-278	-263	-230	-210	-180
	Mineral soil	kt-CO <sub>2</sub>	2,096	-571	-1,784	-2,605	-2,497	-2,326	-2,240	-2,159	-2,086	-2,016	-1,958	-1,904	-1,841	-1,802	-1,757
	Organic soil	kt-CO <sub>2</sub>	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
4.A.2. Land converted to Forest land	Total	kt-CO <sub>2</sub>	-9,579	-4,183	-2,699	-1,984	-1,416	-1,346	-1,304	-1,243	-1,175	-1,112	-1,048	-972	-894	-817	-739
	Living biomass	kt-CO <sub>2</sub>	-6,076	-2,670	-1,733	-1,272	-932	-888	-868	-829	-786	-746	-709	-660	-611	-561	-512
	Dead wood	kt-CO <sub>2</sub>	-330	-145	-94	-71	-52	-50	-48	-45	-43	-41	-38	-36	-33	-30	-28
	Litter	kt-CO <sub>2</sub>	-677	-298	-194	-145	-106	-102	-98	-93	-89	-84	-79	-74	-68	-63	-57
	Mineral soil	kt-CO <sub>2</sub>	-2,496	-1,070	-677	-496	-326	-307	-291	-275	-258	-241	-221	-202	-183	-163	-142
	Organic soil	kt-CO <sub>2</sub>	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO

圖 日本森林碳儲存量變化數據





Table 6-20 Parameters for estimations of Living Biomass for each tree species

		BEF [-]		R [-]	D [t-d.m./m <sup>3</sup> ]	CF [t-C/t-d.m.]	Note
		≤ 20	> 20				
Forests with standing trees (Conifer trees)	Japanese cedar	1.57	1.23	0.25	0.314	0.51	
	Hinoki cypress	1.55	1.24	0.26	0.407		
	Sawara cypress	1.55	1.24	0.26	0.287		
	Japanese red pine	1.63	1.23	0.26	0.451		
	Japanese black pine	1.39	1.36	0.34	0.464		
	Hiba arborvitae	2.38	1.41	0.20	0.412		
	Japanese larch	1.50	1.15	0.29	0.404		
	Momi fir	1.40	1.40	0.40	0.423		
	Sakhalin fir	1.88	1.38	0.21	0.318		
	Japanese hemlock	1.40	1.40	0.40	0.464		
	Yezo spruce	2.18	1.48	0.23	0.357		
	Sakhalin spruce	2.17	1.67	0.21	0.362		
	Japanese umbrella pine	1.39	1.23	0.20	0.455		
	Japanese yew	1.39	1.23	0.20	0.454		
	Ginkgo	1.50	1.15	0.20	0.450		
	Exotic conifer trees	1.41	1.41	0.17	0.320		
	Other conifer trees	2.55	1.32	0.34	0.352		Applied to Hokkaido, Aomori, Iwate, Miyagi, Akita, Yamagata, Fukushima, Tochigi, Gunma, Saitama, Niigata, Toyama, Yamanashi, Nagano, Gifu and Shizuoka prefectures
		1.39	1.36	0.34	0.464		Applied to Okinawa prefecture
		1.40	1.40	0.40	0.423		Applied to prefectures other than above
Forests with standing trees (Broad leaf trees)	Japanese beech	1.58	1.32	0.26	0.573	0.48	
	Oak (evergreen tree)	1.52	1.33	0.26	0.646		
	Japanese chestnut	1.33	1.18	0.26	0.419		
	Japanese chestnut oak	1.36	1.32	0.26	0.668		
	Oak (deciduous tree)	1.40	1.26	0.26	0.624		
	Japanese poplar	1.33	1.18	0.26	0.291		
	Alder	1.33	1.25	0.26	0.454		
	Japanese elm	1.33	1.18	0.26	0.494		
	Japanese zelkova	1.58	1.28	0.26	0.611		
	Cercidiphyllum	1.33	1.18	0.26	0.454		
	Japanese big-leaf magnolia	1.33	1.18	0.26	0.386		
	Maple tree	1.33	1.18	0.26	0.519		
	Amur cork	1.33	1.18	0.26	0.344		
	Linden	1.33	1.18	0.26	0.369		
	Kalopanax	1.33	1.18	0.26	0.398		
	Paulownia	1.33	1.18	0.26	0.234		
	Exotic broad leaf trees	1.41	1.41	0.16	0.660		
	Japanese birch	1.31	1.20	0.26	0.468		
	Other broad leaf trees	1.37	1.37	0.26	0.469		Applied to Chiba, Tokyo, Kochi, Fukuoka, Nagasaki, Kagoshima, and Okinawa prefectures
		1.52	1.33	0.26	0.646		Applied to Mie, Wakayama, Oita, Kumamoto, Miyazaki, and Saga prefectures
		1.40	1.26	0.26	0.624		Applied to prefectures other than above
Forests with less standing trees	Private forests	1.27		0.26	0.48	0.50	
	National forests	1.30		0.26	0.47		

Note: BEF: Biomass expansion factor (20 = forest age); R: Root-to-shoot ratio; D: Wood density; CF: Carbon Fraction

圖 日本使用之參數表





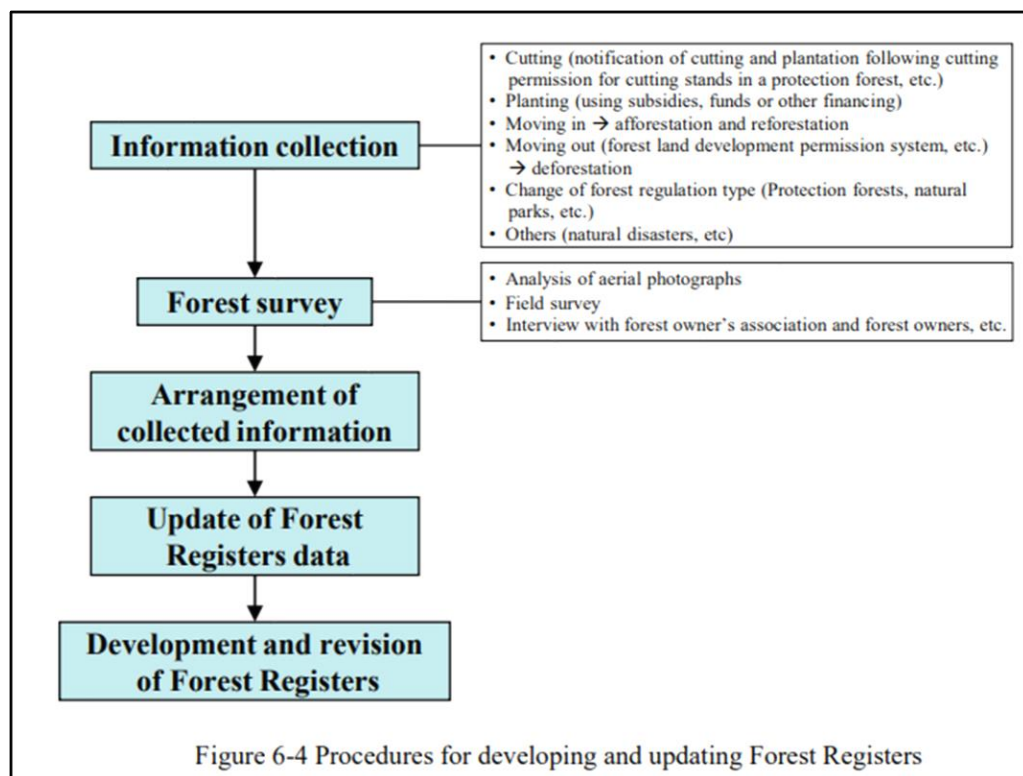


圖 日本更新森林清冊之流程圖

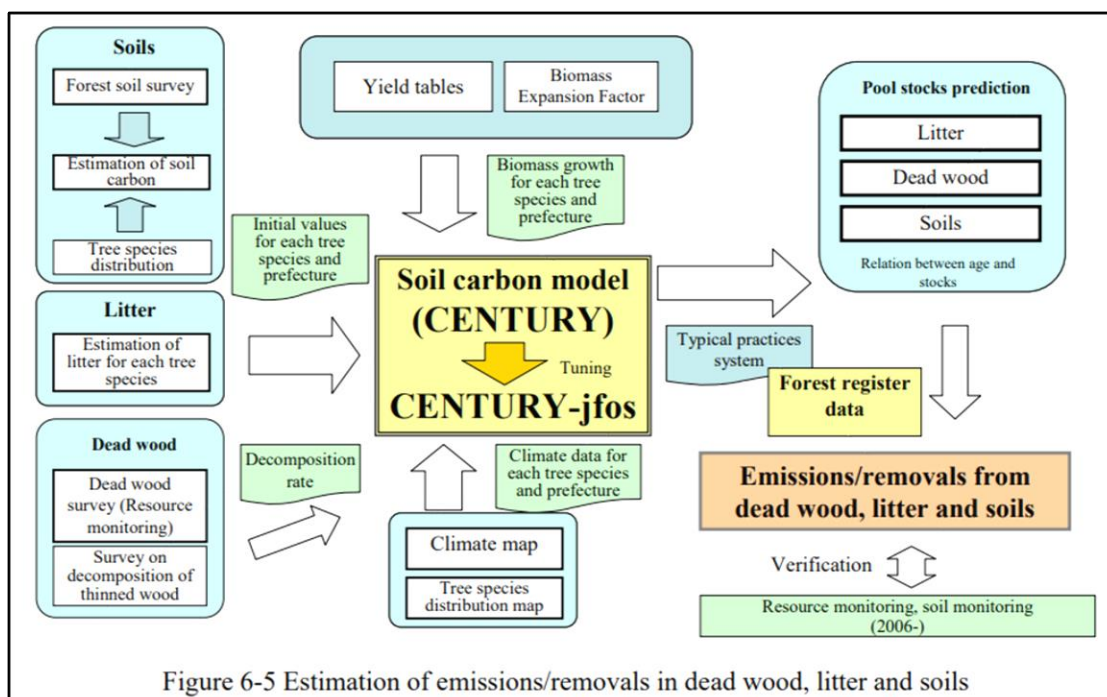


圖 日本估算枯木、枯落物、土壤的碳排放/移除







### 附錄三、森林碳匯手冊初稿

## 森林碳匯調查手冊

第一章、森林碳匯估算原理及方法學.....	149
一、森林生態系碳循環及固碳原理.....	149
二、森林生態系碳匯組成碳儲存與碳吸存.....	150
三、森林碳庫碳匯估算 .....	154
1. 單木生物量碳匯估算 .....	154
2. 林分生物量碳匯估算 .....	157
3. 收穫林產品碳匯估算 .....	160
第二章、森林碳匯調查標準流程—調查步驟、調查項目、取樣方法、測量方法、碳匯計 算方法.....	161
一、調查步驟.....	161
二、調查項目 .....	162
三、取樣方法.....	163
四、量測方法.....	163
五、碳匯估算.....	167





## 第一章、森林碳匯估算原理及方法學

### 一、森林生態系碳循環及固碳原理

地球透過不同機制來維持地球不斷運行，其中最重要的有物質循環，例如水循環、氮循環與碳循環等，乃透過水、氮及碳的循環，帶來地球能量的流轉，形成地球生生不息的運行。其中，碳是生物化合物的主要成分，也是生產者，例如植物能夠將水與二氧化碳，透過葉綠素進行光合作用，轉化成氧氣及碳水化合物。事實上，植物光合作用就是一種能量轉換過程，將光能轉化成碳水化合物固定於植物體內，形成有機碳。碳水化合物即為一種化學能量形式，再藉由不同層級消費者的消費，讓碳水化合物所含能量在不同消費者間流轉，最終因死亡而分解釋出碳，完成生物圈的碳循環。當然，森林生態系的碳循環並非僅有植物體本身，透過植物體根系死亡、枯枝落葉與腐植質等，土壤中亦含有大量的有機碳，也是整個生物圈碳循環中重要的碳儲存庫，為碳循環過程重要的環節。

植物生物體內的碳，則在植物存活階段，經由光合作用累積碳水化合物，雖有維持植物生命運行的呼吸作用，當光合作用生產的碳水化合物多於呼吸作用消耗的碳水化合物時，多餘的碳水化合物將累積於植物體，讓植物體逐漸增大，可以暫時將碳固定於植物體內。最終當植物不再進行光合作用時，將藉由呼吸作用及分解者之分解，讓碳水化合物再形成二氧化碳，回歸於大氣，完成碳在植物體的循環。此種暫時藉由光合作用轉化成碳水化合物，而將碳固定於植物體的過程，亦即為最為我們熟悉的樹木固碳原理。

如上所述，森林是樹木的集合體，亦是生物圈最有效率的碳循環環節，當森林植物體固定儲存許多碳的時候，若是需要森林能夠固定更多的碳，則需要將樹木樹幹伐採移除，形成各種木質材料製造成各式林產品，形成森林碳循環過程的另一種儲存方式來延長樹木固碳成果，同時亦可讓伐採後的林地重新生長出新的樹木。因此，森林碳循環除本身森林生態系的碳循環之外，亦應納入木質產品的循環路徑，擴大碳循環的數量，也增加森林固碳的效益（圖 1）。



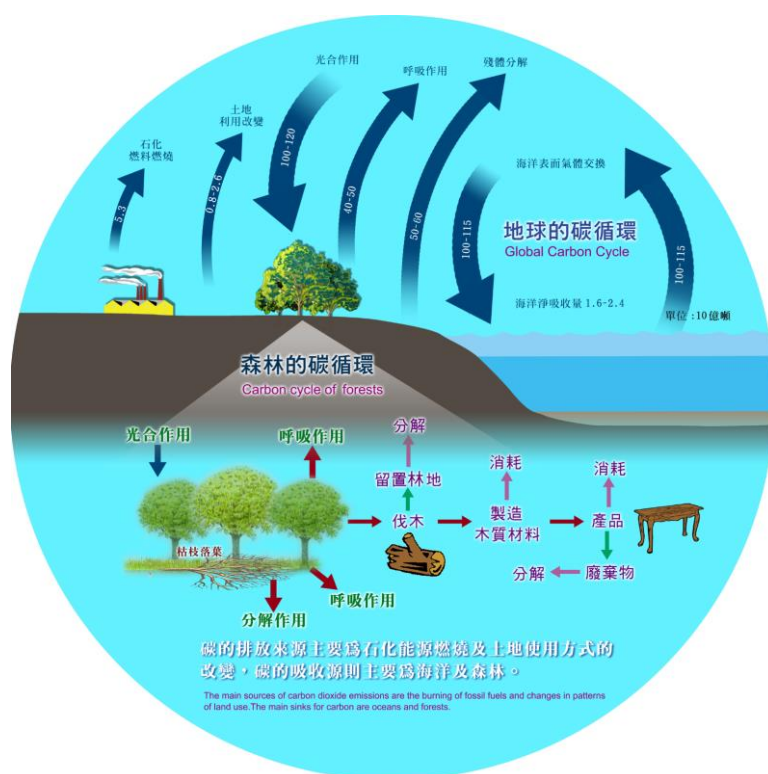


圖 1 森林碳循環示意圖（邱祈榮、林裕仁，2017）

## 二、 森林生態系碳匯組成碳儲存與碳吸存

森林碳匯以不同碳庫(Carbon Pool)形式來固定碳量，包括有：地上部生物量、枯死木與枯枝落葉、地下部生物量及土壤等森林生態系統的形式儲存碳量。另外，由於人類社會對於木製產品的需求，諸如薪炭材、家具、紙張等，於森林經營過程中會伐採樹木製成各式林產品，隨者木材的伐採轉製成木製產品，也讓原本固定於森林樹幹的碳，轉移至木製產品加以使用，形成所謂收穫林產品(Harvested Wood Products, HWP)碳庫形式。即使木製產品棄置分解時，亦非短時間可以分解，往往需要費時幾十年方能分解，因此 HWP 可分為使用中(in use)及分解中(in disposal)兩大類（邱祈榮，2022）。





綜上所述，森林碳匯的完整框架應包含森林生態系統或稱森林碳庫（Carbon Pool）及收穫林產品兩大部分，其詳細內涵如圖 2 所示：

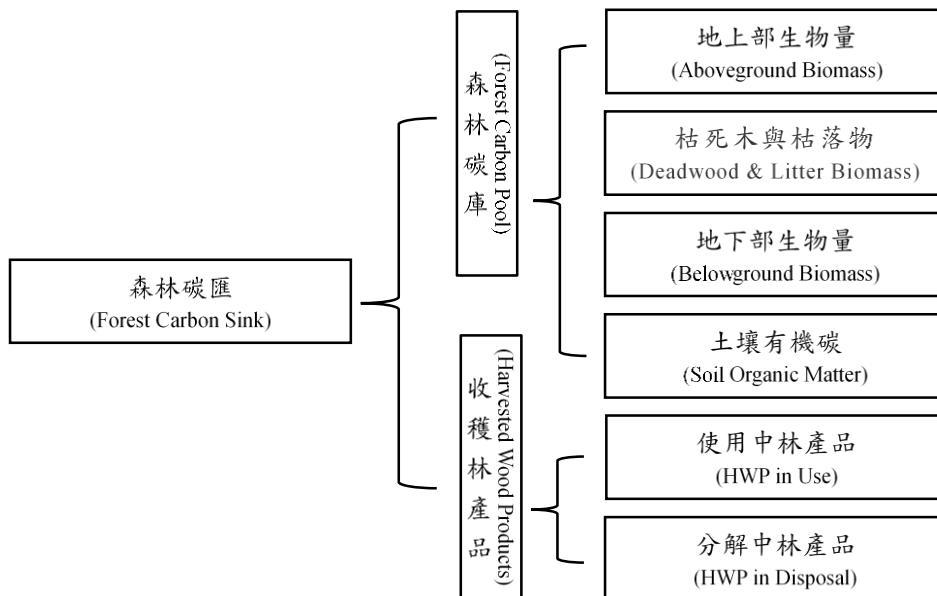


圖 2 森林碳匯內涵及碳庫形式（邱祈榮，2022）

依照 IPCC2006 年清冊編撰指南（IPCC, 2006），森林碳庫（Carbon Pool）可區分為生物量（Biomass）（包含地上部及地下部生物量）、死有機質（Dead Organic Matter）（包含枯死木與枯落物）、土壤（Soils）（包含土壤有機質）等三大類。各類碳庫說明如表 1 所示（邱祈榮、林俊成，2023）：





表 1 森林碳庫定義

碳庫		說明
生物量 (Biomass)	地上部生物量 (Aboveground Biomass)	土壤以上所有活的木本和草本之生物量，包括莖、殘幹（Stump）、枝、樹皮、種子和葉。 註：如果森林下層植被占地上部生物量碳庫的比例較小時，可不列入計算，但在整個調查期間中應有一致性的處理。
	地下部生物量 (Belowground Biomass)	活根的全部生物量。由於僅憑經驗要將直徑低於 2 公釐的細根與土壤有機質或枯落物加以區分是相當困難的，因此建議直徑低於 2 公釐的細根不列入計算。
死有機質 (Dead Organic Matter)	枯死木 (Dead Wood)	除了枯落物外的所有非活的木質生物量，枯死木包括：直立的、橫躺在地面上的或者在土壤中直徑大於或等於 10 公分的枯倒木、死根和殘幹。
	枯落物 (Litter)	所有直徑大於 2 公釐（因要與土壤有機物區分）的非活的生物量及直徑小於枯死木所定義的最小直徑（10 公分）、在礦質或有機質土壤上已經死亡的及各種程度的腐朽狀況的所有非活的生物量，包括：土壤類型所定義的枯落物層及在礦質或有機質土壤中的活細根（最小直徑應低於地下部生物量所規定）。
土壤 (Soil)	土壤有機質 (Soil Organic Matter)	係指達到所選擇深度之礦質土壤的有機碳，包括：土壤中之活和死的細根與有機質、不能憑經驗區分而直徑小於 2 公釐（建議值）的根及死有機質。土壤深度預設值為 30 公分。

資料來源：IPCC, 2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventory







不同碳庫的流動關係如圖 3 所示：

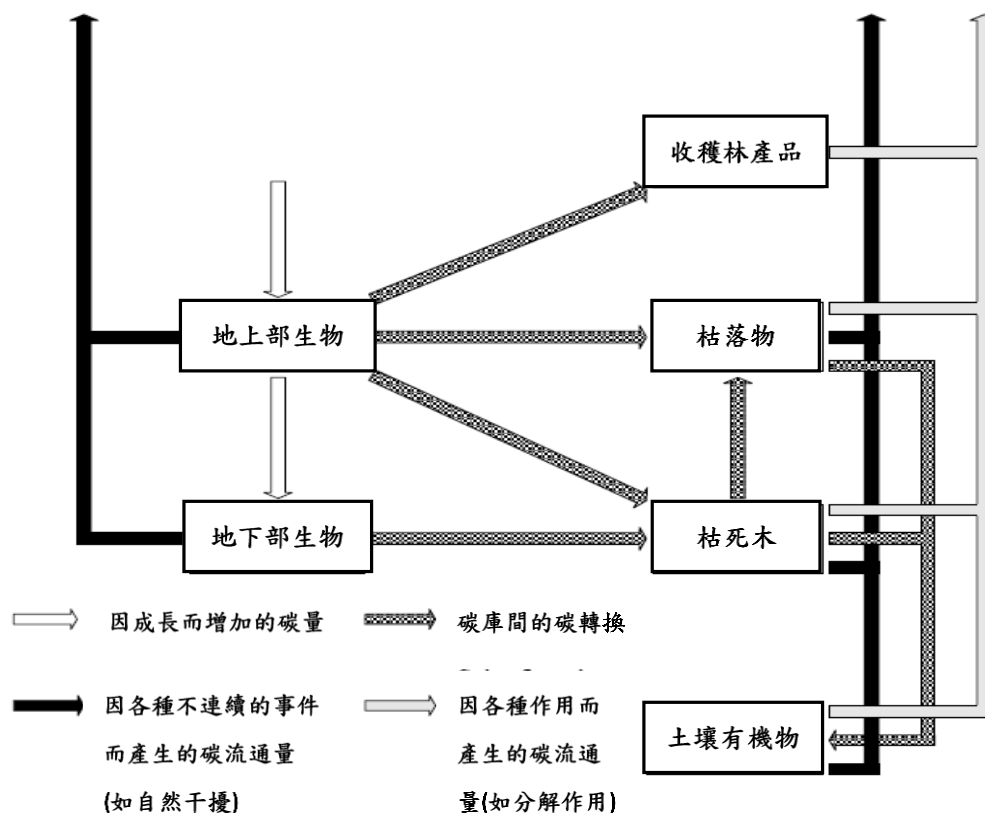


圖 3 碳量在生態系與碳庫間的流動關係（環保署，2022a）

由於森林碳匯能將碳固定於森林生態系統或收穫林產品，也就是暫時將碳自大氣移除出來固定於森林碳匯內。由於此種固碳特性，讓森林碳匯成為碳中和過程中重要的負碳方式。由於樹木到處可見且為社會大眾所認知，因此成為許多負碳方式中最受重視的方式。

從時間軸向而言，碳匯可分為碳儲存量與碳吸存量兩種概念：林木自小生長以來，所累積固定的碳量稱為碳儲存量；在特定期間內，所增加的生長量固定的碳量，稱為碳吸存量，若以一年為計算週期，稱為年度碳吸存量。事實上，傳統森林測計方面，早就具有此種總量與流量的概念；森林蓄積量為森林碳儲存量；森林生長量為森林碳吸存量。對於碳匯應用方面，著重於碳吸存量的多寡，即使碳儲存量再多，





年度碳吸存量不高，代表其生長量低，對於森林固碳效益不如生長量高來得好（邱祈榮，2022）。

### 三、 森林碳庫碳匯估算

森林碳匯估算可分為生物量與土壤碳匯兩部分：生物量碳匯估算又可分為單木及林分兩各層級；土壤碳匯一般僅在林分層級加以估算。至於國家層級的碳匯估算，則依國際上 IPCC 估算指南加以估算。以下僅就單木生物量碳匯、林分生物量與林分土壤碳匯估算予以說明：

#### 1. 單木生物量碳匯估算

單木生物量碳匯估算基本上乃依循傳統森林測計學量測方式，需要先估算出單木樹幹材積。依照 IPCC 方法，估算樹幹材積方式：

$$\text{Vol} = \text{FF} * (\text{DBH} / 2 / 100)^2 * \pi * H$$

Vol 樹幹材積

FF 胸高形數（針葉樹 0.40-0.55；闊葉樹 0.40-0.53；一般通用取 0.45）

DBH 胸高直徑（cm）

H 樹高（m）

樹幹材積轉換成生物量有兩種方式：基礎木材密度配合生物量擴展係數或生物量轉換與擴展係數換算，亦即直接以生物量轉換與擴展係數換算取代基礎木材密度與生物量擴展係數：

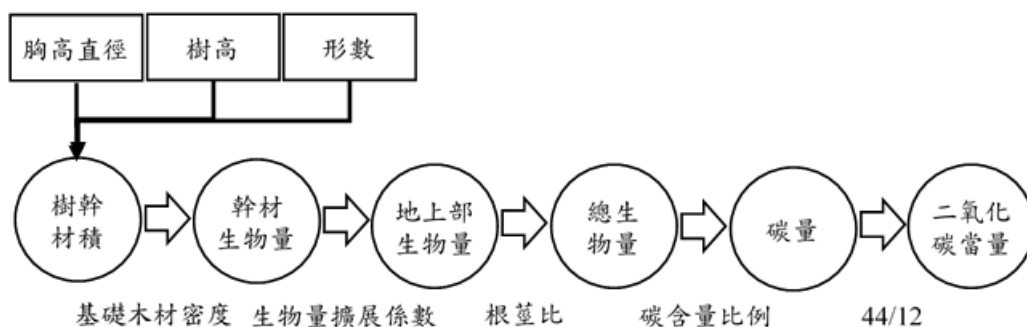


圖 4 單木碳匯估算流程





單木碳匯估算在地上部生物量估算方面常見的有：生物量擴展係數及地上部生物量法兩種。一般森林調查所得結果為樹幹材積，乘上基礎木材密度，即得幹材生物量。但因林木生物量還包含枝及葉部的地上部生物量，及根部的地下部生物量，因此需要再配合生物量擴展係數，或直接採用生物量轉換與擴展係數，得到地上部生物量，稱為生物量擴展係數方法。一般幹材材積依照 IPCC 估算方式：

$$V = FF * \left( \frac{DBH}{100} \right)^2 * \pi * H$$

$$AGB = V * D * BEF$$

V	樹幹材積
FF	胸高形數（一般取 0.45）
DBH	胸高直徑（cm）
H	樹高（m）
AGB	地上部生物量
D	木材密度（g/cm <sup>3</sup> ）
BEF	生物量擴展係數（從幹材生物量擴展到地上部生物量）

另外在地上部生物量估算方面，若透過基礎木材密度及生物量擴展係數的間接推估，但這兩項係數常常因不易獲得或個體差異大，不如直接透過公式加以估算地上部估算公式直接估算，稱為地上部生物量估算方法，如 Chave *et al.*（2014）提出之地上部生物量（AGB）估算公式：

$$AGB = 0.0673 \times (D \times (DBH^2) \times H)^{0.976}$$

AGB	地上部生物量
D	木材密度（g/cm <sup>3</sup> ）
DBH	胸高直徑（cm）
H	樹高（m）





當估算出地上部生物量後，再以根莖比係數（R），估算出含地下部生物量的總生物量，再乘以碳含量比例係數（CF），即可以轉算成單木碳量，若乘以44/12可轉算成單木二氧化碳當量碳匯量：

$$C = AGB * (1+R) * CF$$

C 單木儲存碳量（ton）

AGB 地上部生物量

R 根莖比

CF 碳含量比例

計算過程所需的相關參數，可參考國家溫室氣體清冊報告第六章所附的係數值（環保署，2022）：

表 2 國家溫室氣體排放清冊報告相關係數表

林型	D	BEF	BCEF	R	CF
天然針葉林	0.41	1.27	0.51	0.22	0.4821
天然針闊葉混淆林	0.49	1.34	0.72	0.23	0.4756
天然闊葉林	0.56	1.40	0.92	0.24	0.4691
人工針葉林	0.41	12.70	0.51	0.22	0.4821
人工針闊葉混淆林	0.49	1.34	0.72	0.23	0.4756
人工闊葉林	0.56	1.40	0.92	0.24	0.4691
木竹混（林木部分）	0.49	1.34	0.72	0.23	0.4756
竹林（竹類部分）*	0.62	1.40		0.46	0.4732

至於個別樹種的基礎木材密度與碳含量比例，則可以「水土保持樹種固碳能力與儲碳潛力計算資料庫之建置」（趙國容，2019）所附的水土保持樹種木材密度及碳含量資料。





## 2. 林分生物量碳匯估算

林分生物量碳匯調查除非樹木數量不多，可採取每木調查外，一般採取樣區調查法，設置適當數量碳匯樣區，進行樣區碳匯調查，再依平均樣區碳匯配合樣區大小換算成單位面積碳匯量，最後再乘以林分面積即得該林分碳匯量。

在實際估算時，分成調查項目分成生物量碳匯與土壤碳匯兩項：生物量碳匯調查一般僅進行樣區林木、地被與死有機質碳匯調查，至於地下部生物量並不做調查，僅以根莖比加以推算。

### 2.1 林木碳匯調查

依樣區大小調查樣區內的林木，若以森林蓄積量調查觀點，當林木胸徑小於 5 公分時不予調查，因材積太小。因此，若樣區內林木株數過多時，可以設置最小調查門檻，低於門檻值則不予調查。另外，樣區大小方面，若在人工林可以使用較小樣區，如 10\*10 公尺，至於在次生林時，建議應採用較大樣區，樣區大小至少 20\*20 公尺以上。考量未來生長監測所需，在碳匯樣區調查過程，應標示每木調查位置，方便日後追蹤調查，獲得生長量資料，據以估算碳吸存量。所有調查林木資訊，比照單木碳匯估算方式，加總成樣區林木碳匯量後，再平均樣區林木碳匯換算成單位面積林木碳匯量，最後乘以林分面積即可得林分林木碳匯總量。

### 2.2 地被碳匯調查

地被生物量部分，於林分碳匯樣區，除調查林木外，亦將隨機選取數個面積 1 m × 1 m 的區域，利用收割方式 (harvest method) 收割區域內除林木外所有植體，秤取區域內所有植體濕重或鮮重 ( $W$ , kg)，再將收割的植體混勻後，取部分植體秤其濕重或鮮重 ( $W_w$ , kg) 後帶回實驗室，經 70°C 烘乾後再測植體乾重 ( $W_d$ , kg)。透過取樣植體的乾濕重關係，可以推算出所有植體的乾重，即為地被生物量，再透過含碳比例轉算成為含碳量。接著可以依照平均樣區地被碳匯逐步換算成單位面積地被碳匯與林分地被碳匯量。





## 2.3 灌木碳匯調查

灌木生物量作為灌木群落和生態系統研究的重要指標，它不僅是灌木與喬木幼苗競爭能力的反映，而且反映了灌叢生態系統對周圍環境的適應。利用收割方式 (harvest method) 採取數株樣木估測灌木的生物量進行調查估算碳儲存量。方法惟：

- (1) 收割完整單株灌木
- (2) 依不同部位分別秤取植栽濕重(果、葉、枝條、大枝、根)
- (3) 帶回實驗室，經 70°C 烘乾後再測植體乾重（即為該植體生物量）
- (4) 透過含碳比例轉算成為含碳量

## 2.4 死有機質碳匯調查

分為木質殘材 (woodydebris, WD) 以及枯枝落葉層 (forest litter)。木質殘材如枯立木碳量的計算方式與立木相似，不過枯立木的枝葉較早腐朽，故直接以材積量乘上木材密度與林木含碳比例求得。地表枝葉層採樣與碳量分析方面，利用 0.5 m × 0.5 m 大小方框進行地表枝葉層 (litter layer) 採樣，地表枝葉層包括可辨識未分解落葉、直徑小於 2.5 cm 枝條與經分解後植體碎屑等，低海拔樣區由於枯落物分解快速，地表枝葉層組成主要以未分解落葉與枝條為主。樣品採樣收集後，攜回實驗室以 70 °C 烘乾 48 hrs 後秤重 ( $W_d$ , Kg)，秤重後樣品再取少量樣本，經球磨機 (MM200, Retsch, Haan, Germany) 細磨後，以元素分析儀測定樣品碳含量比例 (Perkin Elma 2400, Boston, USA)。

地表枝葉層碳量計算公式如下式：

$$C_{\text{Litter}} = (W_d / 0.25) \times CF \times 10$$

$C_{\text{Litter}}$	地表枝葉層碳量 (ton C ha <sup>-1</sup> )
$W_d$	烘乾後乾重 (kg)
CF	元素分析儀得到碳量濃度 (%)
10	單位轉換係數







推算出樣本乾重與含碳比例，可以估算樣區的死有機質碳匯量，再推算出單位面積的碳匯與林分死有機質碳匯量。

## 2.5 林分土壤碳匯估算

土壤採樣係依據不同土壤深度進行分層採樣，採集土壤深度依據 FAO 準則 (FAO, 2020)，分別進行 0–10 cm、10–20 cm、20–30 cm、30–50 cm 與 50–100 cm 等不同深度之土壤樣本採樣。不過，部分樣區土壤深度並不足 100 cm，下層土壤以實測深度進行紀錄與採樣。利用土壤剖面挖掘方式 (n=3，每個監測樣區三個剖面)，進行表層 0–30 cm 土壤採樣，深度超過 30 cm 土壤則利用土鑽進行樣品採集。在土壤剖面中，以小鏟子將各分層土壤收集至塑膠袋，並利用體積 100 cm<sup>3</sup> 不銹鋼土環，以不破壞土壤構造方式，採集不同土層之土壤以進行土壤總體密度 (bulk density, BD) 分析。採樣過程中，並依孟氏色帖所附含石率表格，估算各土層野外之含石率 (stone content, %)。土壤樣品帶回實驗室後，先經風乾，再以 2 mm 網目篩網進行磨土過篩與樣品儲存，少部分土壤樣品則以球磨機 (MM200, Retsch, Haan, Germany) 細磨，磨粉後土壤樣品利用元素分析儀測定土壤有機碳濃度 (Soil organic carbon, C %)。測定土壤總體密度之土環樣品，則以 105°C 烘箱烘乾 24 小時秤取重量，土壤烘乾種除上土環體積即為該土層之土壤總體密度 (g cm<sup>-3</sup>)。單位面積土壤有機碳量 (C<sub>Soil</sub>) 為土壤有機碳濃度、土壤密度及深度，並扣除含石率後的乘積，估算公式如下式：

$$C_{\text{Soil}(i)} = BD_i \times C_i \times d_i \times (1 - \text{含石率}\%) \times 100$$

C <sub>Soil (i)</sub>	第i層土壤有機碳量 (ton C ha <sup>-1</sup> )
BD <sub>i</sub>	第i層之土壤總體密度 (g cm <sup>-3</sup> )
C <sub>i</sub>	第i層土壤有機碳濃度
d <sub>i</sub>	第i層土壤採樣深度範圍 (cm)
100	單位轉換係數





各土壤分層從表層累加至下層，即該土壤之土壤有機碳量。平均樣區土壤碳匯量後，可推算出單位面積土壤碳匯量與林分土壤碳匯總量。

### 3. 收穫林產品碳匯估算

收穫林產品碳匯若單指個別林產品碳匯量估算較為單純，可以從林產品體積或重量來加以估算。體積法計算公式如下：

$$C = V \times D \times CF \times (44/12)$$

C 林產品碳匯量 (g)

V 體積 (cm<sup>3</sup>)

D 密度 (g/cm<sup>3</sup>)

CF 碳含量比例

44/12 每克碳分子轉換成 44/12 克二氧化碳

至於重量法係由林產品重量，扣除含水率來加以估算。由於林產品木材伐採後或絕乾材，置於大氣之中，木材中之水分會漸漸流失而達到與大氣濕度平衡之狀態，即達到木材之氣乾，此時的水分含量通常以平衡含水率表示，也是木材氣乾狀態下的氣乾含水率，在台灣地區的環境多在 12~15% 左右。因此，當量得林產品的重量時，可扣除其含水率即得其乾重量，進而換算成碳匯量。





## 第二章、森林碳匯調查標準流程—調查步驟、調查項目、取樣方法、測量方法、碳匯計算方法

### 一、調查步驟

進行森林碳匯調查可以分成事前規劃、進行調查、碳匯估算以及調查品質評估等四大步驟。

#### a. 事前規劃:

- 資料蒐集: 事先蒐集目的地之地形、地貌與天候資訊, 以利現地調查作業及人員安全。並對照樣點分佈圖、詢問相關人員以瞭解林班、林地狀況, 進而確認林班現況與林區像片基本圖和航照圖等相關資料有無出入或不符之處。
- 行程規劃: 透過網路(例如:Google map、Google earth、Windy)、地圖等, 研擬規劃路線與交通工具, 並掌握沿途路況、紮營地點、以及水源地等資訊。外業行程中應以指北針配合地圖判讀隨時掌握自身位置及行進方向, 必要時以 GPS 輔助定位。電子導航係於抵達樣區附近後, 確認樣區所在地點。
- 人員編組與裝備檢查: 應有接受過訓練以及熟習地形之人員配組進行調查, 為 2 人以上之調查團隊, 視情況需求增加調查人數。裝備部分應檢查妥當, 尤其是 GPS 之備用電池、界樁、銘牌及鋼釘等皆應多準備一至兩組以備不時之需。

工作項目	所需設備、器材
定樁、樣木標示	塑膠樁、尼龍繩、噴漆、標誌銘牌、鋼釘
胸高直徑量測	1.3m 桿、輪尺 or 胸徑捲尺
樹高量測	雷射測距儀、測高桿
GPS 定位	GPS 衛星接收儀
記錄	紀錄表、紀錄板

#### b. 進行調查:

- 設立樣區: 參考林業保育署森林永久樣區現場調查手冊, 設立起點(S.P),





確定 S.P 至樣區中心之測定，及確認樣區，樣區設置完成後，方可開始調查。

- 樣點規劃與設置

樣區大小：樣區形狀為矩形樣區，其樣區面積大小依林型、林木密度及林木之胸徑大小等決定，其大小及選擇標準如下

表3 森林永久樣區設置面積規格

樣 區 面 積	長 × 寬
1/10 (0.1公頃)	40公尺×25公尺
1/20 (0.05公頃)	28.4公尺×17.6公尺
1/50 (0.02公頃)	17.9公尺×11.2公尺

註1.天然林採用0.1及0.05公頃兩種，其考慮因素為：

- ①樣區內之樣木株數（超過40株以上者可採用0.05公頃）
- ②主要林木之平均胸徑（平均胸徑超過30公分以上者採用0.1公頃）

註2.造林地採用0.05及0.02公頃兩種，其考慮因素為：

- ①樣區內之樣木株數（超過25株以上時可採用0.02公頃）
- ②主要林木之平均胸徑（平均胸徑超過20公分以上則採0.05公頃）

- 實施量測：調查時需有進度掌控，實際執行時，應回報與掌握每日調查進度，發現調查速度有異狀時，如太快或太慢，應該深入瞭解其原因，並盡可能排除人為因素影響。

- c. 碳匯估算、調查品質評估

在調查結束後，將資料整理成電子檔，方便查閱及計算，將所有數據帶入估算算式中，即可得出碳匯量。此次收集調查之資料，作為下次樣區複查之對比。

## 二、調查項目

分成林分與林木碳匯調查兩大部分

1. 林分調查部分參考林業保育署永久樣區調查手冊的樣區紀錄，包含樣區大小、樣區座標、樣區坡度與方位、樣區植生狀態與調查日期與調查人員等





基本資訊。

2. 樣木調查則聚焦於樹種、林木胸徑與林木高度等基本調查項目即可，以下表為森林碳匯調查最基本紀錄表，可藉由此些資料估算出碳匯，而林業保育署有其他正式用之表格，需紀錄更詳細資料，請調查人員依照林業保育署規定紀錄之。

樣木編號	樹種	胸高直徑	樹高	備註(如分支、樹種狀態)

### 三、取樣方法

樣區設置方式，一般對於林相複雜的林分，可依林木密度、林分高度或林木植被類型進行分層取樣，再依林分面積分層大小進行樣區數量配置，再隨機放置至林分內。

取樣上分為隨機取樣(Random sampling)、系統取樣(Regular or systematic sampling)、分層取樣(Stratified sampling)等，依據成本、形態及植群狀況加以設計。在實務上，建議可以隨機取樣法(Random sampling)為取樣方法首選，使用隨機取樣法在調查的事前規劃上較為簡單且快速，也較容易操作。再依前面樣點規劃與設置裡的規定，設置樣區大小，並依現地情形、樣區代表性以及樣區的樹木多寡，以隨機取樣挑選 10~20 個樣區進行每木調查。

### 四、量測方法

將說明林木胸徑 DBH 與林木高度依照不同調查工具及精度要求，詳加說明林木胸徑與林木高度測量方法。

#### 1. 胸高直徑 DBH

胸高直徑係指林木胸高部位(1.3 公尺)之帶皮直徑，在永久樣區範圍內，





低於 5.0 公分視為幼木不予調查，5.0 公分以上之生立木皆需要測計。若判斷為枯立木，則參照枯立木的作業方式。量測 DBH 一般常用有胸高直徑卷尺及輪尺法，以公分(cm)為量測單位，量測並紀錄至小數點後 1 位。測定時需維持相同的作業方式，例如量測位置、量測前必需清除附生植物等。並注意因為地形、樹勢生長方向、分岔、膨大等影響量測胸徑的位置。

複查作業時，為了能有效地長期觀測紀錄樹木的生長變化，仍然測量原先鋁牌釘置或噴漆之胸高直徑，並以 1.3 公尺處為基礎，備註於紀錄胸徑測量位置向上或向下之移動距離。



圖 5 胸高直徑位置示意圖

- 量測工具、使用方式

操作時，以 1.3m 之胸高定位桿，找到樹幹上量測胸高直徑之位置（可利用胸高定位桿之羅盤固定每棵樹的量測方位，建議皆為朝正北的方位）後，將捲尺拉出環繞樹幹進行量測。







圖 6 左：直徑捲尺、右二：1.3m DBH 定位桿，上面備有水平儀與指北針

- 胸高直徑量測位置測定

由樹根向上 1.3 公尺為測定位置。為求每次測量皆在同一高度上，可固定判斷的方位(例如:由北方向南方)。若 1.3 公尺處以下遇到分岔，則測量每個分枝的值，並紀錄為主幹、分枝 1、分枝 2.....。由於樹木離地 130 公分高處的定義不甚明確，或是該處有些因素會造成測量失準，若遇到以下狀況，可按照下圖中 1.3m 處的那一側進行正確位置的量測。

單木尺度測量建議以樹木正北方向為測量的統一位置，建議準備一支 1.3m 長的桿子（胸高定位桿），並在桿端配有 15cm 的橫向短桿，桿子上配有羅盤及水平儀，方便在測量時輔助尋找方向。

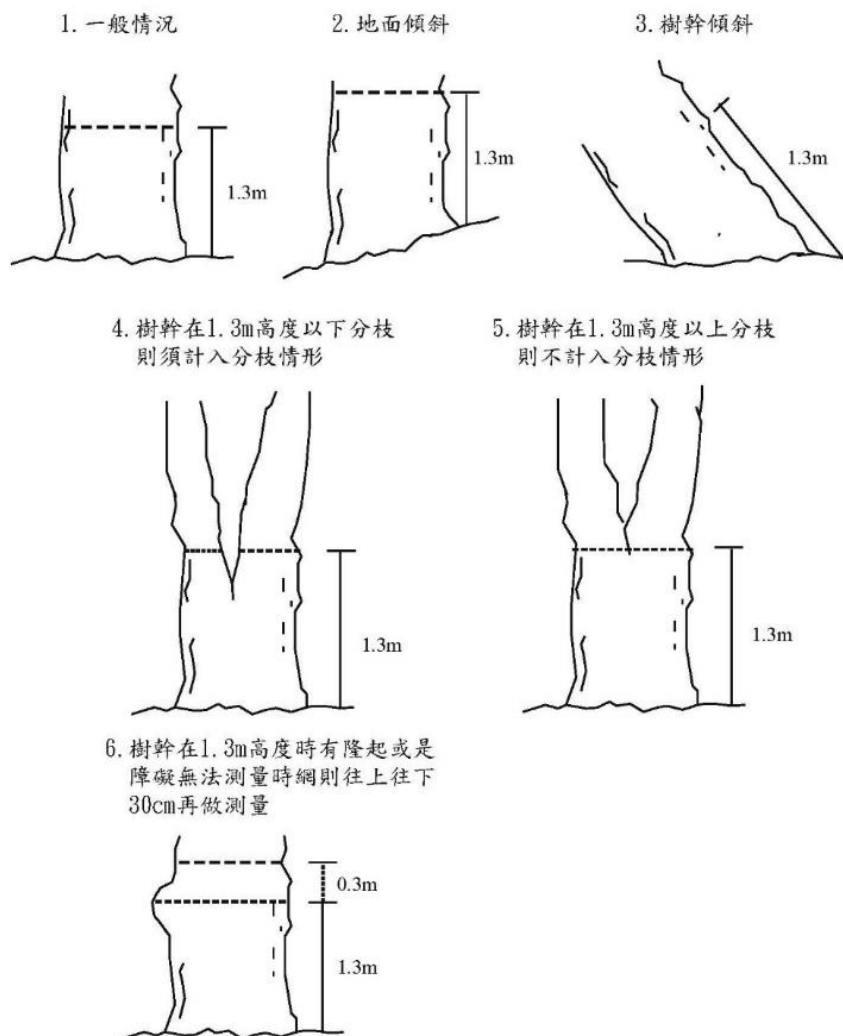




圖 7 胸高直徑量測位置判定圖

## 2. 樹高

樹高為樹木之主幹樹梢最高點之高度，記錄單位為公尺(m)，記錄至小數點後 2 位。

樹高量測有兩種方法分別為測高桿法及雷射測距儀法：測高桿為一玻璃纖維製之伸縮式測高專用測桿，測高桿總長可以伸長至 15m，利用與樹高等高度的方法進行樹高之直接測定；雷射測距儀利用雷射對樹木進行角度及距離計算的樹高間接測定。

### • 量測工具、使用方式

#### (1) 測高桿

將測高桿由最頂端一節往上拉，由另一人在遠處看測高桿的頂端是否與樹高一樣高。待測高桿高度與樹高相同時，讀取測高桿數值（測高桿刻度單位為公分，紀錄者須將單位轉換為公尺）。此數值即為樹高。若樹高比測高桿還高，可量測樹高的一半，再將數值乘以二。



圖 8 左：測高桿、右：測高桿使用示意圖

#### (2) 雷射測距儀

使用雷射測距儀發出雷射光對準立木基部與樹梢頂端分別打點記錄，透過三





角函數由儀器內計算即可以得到樹高數值。使用上容易遭其他樹冠遮蔽，因此在林分密度較低區域較適宜使用此法。在操作上只需一人即可完成量測及判釋樹梢頂端位置工作，以下為使用步驟

步驟一	尋找樹木最佳之觀測方位，此時位置應可同時看見樹之最頂梢及樹之基部，以雷射測距儀發出雷射光對準樹木基部
	
步驟二	按下紀錄鍵，記錄雷射測距儀與樹基之距離及此線與水平線之夾角 $\theta_2$
步驟三	以雷射測距儀發出雷射光對準樹木樹梢頂端位置
步驟四	按下雷射測距儀之記錄鍵，記錄此線與水平線的夾角 $\theta_1$
步驟五	由儀器運算後自動產生樹高結果，如果結果不太理想，則重複前述操作，並將結果平均。在不同面向時可能會有不同的樹高，如果差距過大宜用測高桿做量測。
步驟六	 雷射測距儀量測完畢後顯示結果，將其記錄之

## 五、碳匯估算

依照第一章內林分及單木碳匯估算算式計算，將所有調查林木資訊，比照單木碳匯估算方式，加總成樣區林木碳匯量後，再平均樣區林木碳匯換算成單位面積林木碳匯量，最後乘以林分面積即可得林分林木碳匯總量。

