

和平事業區森林永久樣區調查 與分析 CO₂ 吸存效應

高裕閔 王兆桓*

國立宜蘭大學森林暨自然資源學系

摘要

為瞭解和平事業區之碳貯存量，利用林務局羅東林區管理處所設置之永久樣區資料來進行分析，而樣區資料自 2001 年新設後，於 2006 年及 2011 年進行 2 次複查工作，取得了 3 次調查資料，可知道整個事業區蓄積總量、碳及二氧化碳(CO₂)貯存總量之間的變化，以謀森林經營上之施政方針。

本研究利用 3 次調查資料，並分析 101 個永久樣區分為 15 種林型，為使數據更精確，利用第 1 次複查時所得的實測樹高資料以迴歸式得樹高曲線，並回推新設及第 2 次複查之樹高，再換算成材積後得蓄積量。在 10 年期間蓄積量變化上，除了樟樹造林有稍降外(-0.26 m³/ha/yr)，餘均呈現上升的趨勢，其中以人工針葉樹混淆林生長情形最好(15.13 m³/ha/yr)。

以 2011 年永久樣區資料，藉由碳貯存量推估模式進行推估，其碳與 CO₂ 貯存量以天然針闊葉混淆林所得之量為最高(碳為 237.21 ton/ha，CO₂ 為 869.75 ton/ha)；而從 2001 年至 2011 年間的碳與 CO₂ 貯存之增加量則是以人工針葉樹混淆林最大(碳為 48.79 ton/ha，CO₂ 為 178.88 ton/ha)。為得和平事業區的碳與 CO₂ 貯存總量，將原 15 種林型合併成 10 種，以第 2 次複查資料為依據，經分層取樣計算結果，碳貯存總量約為 6,602,000 至 10,411,184 公噸範圍間，而 CO₂ 貯存總量範圍大約在 24.2~38.2 百萬公噸之間。

關鍵詞：永久樣區、材積蓄積量、二氧化碳吸存量、樹高曲線

*通訊作者。E-mail: chwang@niu.edu.tw

Forest Permanent Plots Survey and Analysis for CO₂ Sequestration in Hepping Working Circle

Yu-Min Kao Chao-Huan Wang*

Department of Forestry and Natural Resources, National Ilan University

Abstract

To understand the carbon storage at the Heping Working Circle, this study conducted an analysis with the data of the permanent plots established by Luodong Forest District Office of Taiwan Forestry Bureau. These plots were installed in 2001, and then reinvestigated in 2006 and 2011. This data set was analyzed for monitoring the forest dynamics on the total amount of volume, carbon and CO₂ storage that can offer important information for making administrative policies in forest management.

This study analyzed a total of 101 permanent plots with three investigations and stratified the plots into 15 forest types. For better accuracy, we obtained a height-diameter curve using regression equation based on the measured tree heights recorded at the first reinvestigation, and estimated the tree heights at the other two investigations, and then acquired the volume stock. Regarding volume stock changed over the 10-year period, all forests had increasing volume stock, except for the camphor tree forest with decreasing volume stock(-0.26 m³/ha/yr). In particular, the man-made mixed-conifer forest had the best performance in the periodic annual increment (15.13 m³/ha/yr).

The result of the estimated carbon storage in 2011 based on the permanent plots data showed that the natural mixed conifer-hardwood forest had the largest amount of carbon and CO₂ storage(i.e. 237.21 C ton/ha and 869.75 CO₂ ton/ha). From 2001 to 2011, the man-made mixed conifer forest had the largest increase in carbon and CO₂ storage (i.e. 48.78 C ton/ha and 178.88 CO₂ ton/ha). In order to estimate the total carbon and CO₂ storage of the Heping Working Circle, we combined the original 15 forest types into 10 types. Based on the second reinvestigation data and calculated through stratified random sampling, the total carbon storage of the working circle is between 6,602,000 and 10,411,184 tons, and the total CO₂ storage is between 24.2 and 38.2 million tons.

Keywords: permanent plot, volume stock, CO₂ sequestration, height curve

*Corresponding author. E-mail: chwang@niu.edu.tw

前言

在 19 世紀末，工業革命時，人類因大量使用石化燃料及土地利用型態的改變，所耗損的碳資源，遠遠超出以往(19 世紀前)所使用量好幾十倍，甚至百倍；更隨著文明的發達，數十年的進步遠勝於以往數百年，所利用之碳原料資源猶為更甚，然最終造成的是碳排放於大氣之中成 CO₂，乃是溫室效應之主因。

這樣的問題逐漸受到全球專家學者及各國代表的關注，而為了具體解決以上的問題，於 1992 年通過「聯合國氣候變化綱要公約」(The United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)，並於第三次締約國會議通過了「京都議定書」(Kyoto Protocol, KP)，要求已開發國家減少溫室氣體排放量。我國雖非聯合國會員國，然而身為地球村之一員，為善盡保護地球環境之責任及防範國際政府或貿易之不利影響，向來均恪遵國際環境公約之規範(環保署，2002)，於 1992 年 5 月行政院成立跨部會之「全球環境變遷工作小組」，1994 年 8 月擴編及提升為「全球環境變遷政策指導小組」，而在 1997 年 8 月更進一步升格為「國家永續發展委員會」，由此可見我國政府因應「聯合國氣候變化綱要公約」之重視及推動之決心。

在地球，森林對碳的貯存就顯的特別重要，植物於行光合作用時，以水及 CO₂ 為養分，將碳固定於植物體之中，而成為明顯的根、莖、枝支持著本體，而陸地上植物每年約可固定 CO₂ 1.8 x 10¹¹ 公噸。其中，約 1.3 x 10¹¹ 公噸為森林所吸收，約佔地表植物貯存總量 70%(劉棠瑞、蘇鴻傑，1983)，而在台灣全島森林面積約 210 萬公頃，佔土地總面積約 58.5%，擁有過半面積覆蓋著森林，而林務局所掌管國有林班地，佔約土地總面積 44%(林務局，1995；譚運籌，2007)。由此可見，探討森林碳貯存量有助提供人類在經營森林上一個重要的依據，而本研究針對和平事業區，並利用政府單位所提供之永久樣區資料為基礎來做分析，內容包括有生長量、碳與 CO₂ 貯存量等，將來可提供於施政單位擬定政策時一個重要的參考依據。

材料與方法

一、研究材料

(一)區域環境概述

和平事業區位於台灣東北部，地跨宜蘭縣南澳鄉及花蓮縣秀林鄉，以和平溪為界，計有 92 個林班，面積為 55,723 ha，海拔最高為南湖東峰(3,631 m)，最低為海岸山(421 m)，落差大。氣候主受地形、季風及颱風影響，致溫差及降雨量各有不同之差異，其年

均溫依海拔高度而不同，在 1,000 m 左右為 17.5°C，隨海拔上升至 2,000 m 年均溫下降至 12.5 度，再上升至 3,000 m 山區則年均溫為 7.7 度，年降雨量超過 2,500 mm，亦隨著海拔高度上升而降雨愈多(林務局，2005)。本區位在中央山脈之東側，主要岩層為變質雜岩，為台灣最古老之岩層，是由沉積岩與火成岩變質變形所成(林務局，1995)。

(二)樣區規劃原則及理論

1.台灣永久樣區調查的規劃方式

台灣永久樣區是以事業區為單位進行規劃，每個事業區為設置 100 個永久樣區為目標，然則每個事業區大小不一樣，故設置目標數需以事業區之面積大小、範圍及林相複雜度而定。就永久樣區數量及位置選定方法，依第三次台灣森林資源調查所產生林型圖與農林航空測量所之數值地形資料(王兆桓與陳子英，2007)，再配合邱祈榮(1997)建議之「直方圖等化法」所設計而求出事業區內特定樣區數值，以分析各種林相在特定海拔高內生長分布範圍之關係，並配合事業區交通路線及地形圖等資料而決定永久樣區之相關位置。

2.和平事業區森林永久樣區之設置分布及資料篩選

為確實了解本區林木生長量與枯死量及配合森林資源調查所不足之資料，已於 2001 年設置本區之永久樣區，新設樣區數計 107 個，以每 5 年一期，並分別於 2006 年及 2011 年進行複查工作，其調查項目有樹種名稱、胸高直徑、樹高、枝下高、樹冠級及枯死植株等(林務局，2006)，為利於長期監測工作與進行比對，於每顆樹上均掛鋁牌編號標註，若有脫落者，重新以原編號釘於原處。

由於第 1 次複查，因礦區開發、鐵纜架設及颱風災害等因素破壞 4 個樣區，因此找尋相似海拔之造林地與天然林補足並再新設樣區 5 個(王兆桓與陳子英，2007)，總計 108 個樣區；至第 2 次複查，又因新設 1 個樣區，共計完成 109 個永久樣區。為求數據之統一，以 2 次複查均無破壞者，併扣除樣區 1 及 3 為玉山圓柏純林(因於高海拔地帶之矮盤灌叢，其胸徑與樹高間的關係難以預測亦不成比例)，總計 101 樣區作為分析依據。樣區分布範圍如圖 1，樣區面積為 0.02 ha (17.9 m × 11.2 m，計 48 個)及 0.05 ha (28.4 m × 17.6 m，計 53 個)2 種。

本研究有關土地利用型(或稱林型、林相)部份，因與部份樣區內樹種不符，參考行政院農業委員會林務局羅東林區管理處提供之林相圖，進而比對及修正土地利用型；另樣區內樹種因從林務局網站提供下載之數據而產生資料漏登、損失、錯誤等部份，藉由林務局羅東處提供之原始數據進行修正及補登，以求資料之準確性。

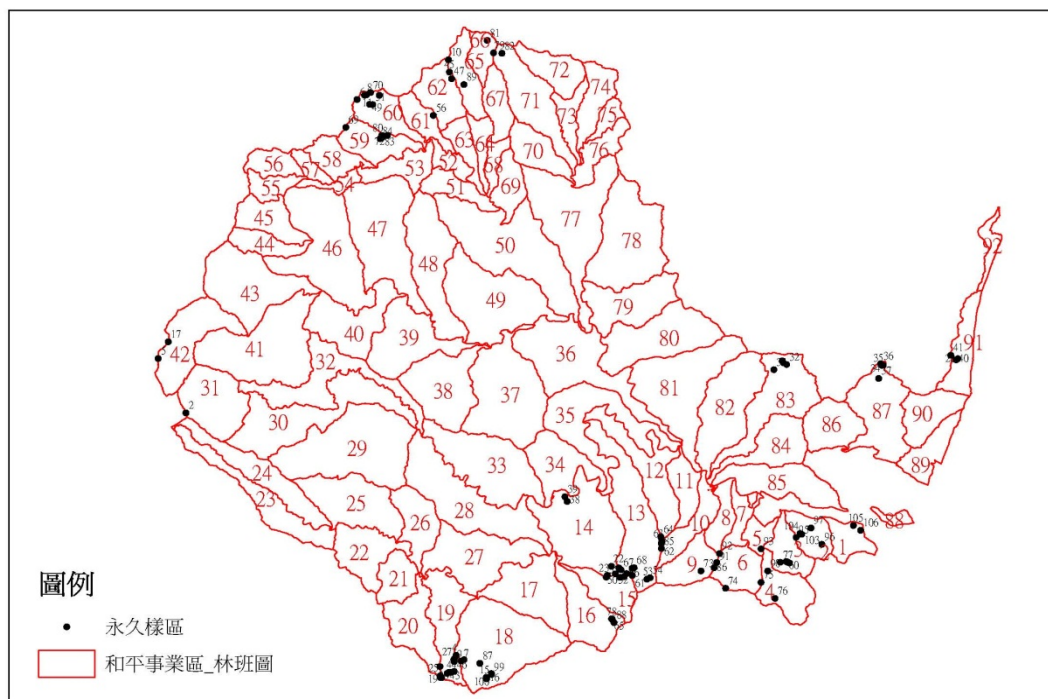


圖 1 和平事業區永久樣區分布範圍

二、研究方法

(一)樹高曲線

樹高曲線為表示樹高平均值隨胸高直徑而變化之曲線，一般於實地調查樹高是較為困難，為節省勞力及時間，擇其標準木或樣木測定其樹高，根據胸高直徑與樹高間關係而作成之曲線稱之(楊榮啓與林文亮，2003)，便以供推估各株林木樹高之用。

有關本研究區域，由 2001 年新設樣區後經 2006 年及 2011 年複查，其所得樹高值尚有差異及疑義，係因 2001 年新設及 2011 年複查測量樹高時均採用目測法。然則 2006 年林務局羅東林區管理處委託王兆桓與陳子英(2007)團隊進行永久樣區複查工作，並以實測法量測樹高以求精實，故為使本研究準確且具科學性，將以 2006 年複查樹高資料為依據，並參考 Weiskittel *et al.* (2011)、林文亮等(2001)、陳朝圳(1985)及 Clutter *et al.* (1983)所用之各種樹高曲線模式(如表 1)，再以 SAS 統計軟體之線性迴歸與非線性迴歸程式，求各迴歸式之係數，並以此推算其他兩次樹高值。

(二)立木材積量之推估

各樣區之立木材積依樹種別不同而選定適當之材積式進行立木材積量計算，並依不同林型分別計算 2001 年、2006 年及 2011 年調查之每公頃平均蓄積量(m³/ha)與每公頃年平均生長量，本研究所定之立木材積式參考林務局(1995)第三次森林資源調查應用樹種

材積式(表 2)，對樣區每一樹種加以選定，做為推估樹木碳貯存潛力之重要參數。

表 1 常用之樹高曲線迴歸式

Equation form	No. of Equation
$H = 1.3 + b_0 \cdot \left(1 - e^{(-b_1 \cdot DBH)}\right)^{b_2}$	1
$H = 1.3 + b_0 \cdot e^{(-b_1 \cdot DBH^{b_2})}$	2
$H = 1.3 + b_0 \cdot \left(1 - e^{(-b_1 \cdot DBH^{b_2})}\right)$	3
$H = 1.3 + e^{\left(b_0 + \frac{b_1}{1 + DBH}\right)}$	4
$H = 1.3 + e^{(b_0 + b_1 \cdot DBH^{b_2})}$	5
$H = 1.3 + b_0 DBH^{b_1}$	6
$H = 1.3 + \left(\frac{DBH}{b_0 + b_1 DBH}\right)^2$	7

H：樹高，DBH：胸徑， $b_{(0,1,2)}$ ：模式參數

表 2 第三次森林資源調查應用於本研究之立木材積式

樹種別	材積式
檜木、台灣杉	$V = 0.0000944 \cdot D^{1.9947405} \cdot H^{0.659691}$
香杉、紅豆杉、鐵杉	$V = 0.0000728 \cdot D^{1.944924} \cdot H^{0.8002212}$
冷杉、雲杉	$V = 0.00001136 \cdot D^{1.71018} \cdot H^{0.97120}$
杉木	$V = 0.00008440 \cdot D^{1.6790} \cdot H^{1.06550}$
柳杉	$V = 0.00009015 \cdot D^{1.98858} \cdot H^{0.68785}$
松類、其他針葉樹	$V = 0.0000625 \cdot D^{1.77924} \cdot H^{1.05866}$
烏心石、台灣檫	$V = 0.000035555 \cdot H \cdot D \cdot D$
樟樹、楠木類	$V = 0.0000489823 \cdot D^{1.60450} \cdot H^{1.25502}$
槲櫟類、一般闊葉樹	$V = 0.00008626 \cdot D^{1.8742} \cdot H^{0.8671}$
鐵刀木等闊葉樹	$V = 0.0000464 \cdot D^{1.53573} \cdot H^{1.50657}$

*檜木為紅檜、扁柏之總稱

(三)森林碳貯存推估方法

本研究之碳貯存推估是採每公頃立木蓄積量及 IPCC 與國內調查之轉換係數值，並配合下述之模式進行碳貯存量之估算，就目前言之，森林碳貯存量計算最常用也是比較有效率之方法為蓄積量改變法或稱為蓄積量差異法，可以由森林資源調查所得蓄積量資料估算林分碳貯存量及其隨時期而變化(林務局，2010；劉知好與王兆桓，2008)。

以樹幹材積計算森林碳貯存量之公式：

$$C_s = A \cdot V \cdot BCEFs \cdot (1+R) \cdot CF$$

式中表示如下：

C_s：森林碳貯存量，Mg C/ha

A：森林面積，ha

V：樹幹材積，m³/ha

BCEFs：生物量轉換與擴展係數，將樹幹材積轉換為地上部生物量，ton/m³

R：地下部生物量與地上部生物量之比值

CF：碳轉換係數

上式之 BCEFs 亦可使用基礎密度(BD)和地上部生物量擴展係數(EFa)，公式如下：

$$BCEFs = BD \cdot EFa$$

式中表示如下：

BD：基礎密度(樹幹絕乾重量/樹幹生材體積)

EFa：地上部生物量擴展係數(地上部生物量與樹幹生物量之比值)

而本研究採用 BCEFs 值，係參考育林實務手冊(林務局，2010)及森林生長量與蓄積量分析系統操作手冊(王兆桓，2013)內鍵值如表 3；而(1+R)值亦參考育林實務手冊(林務局，2010)所載 IPCC 亞熱帶潮濕林係數值為 1.24。

另外碳貯存量轉換係數(CF 值)根據 IPCC 統計分析，各國所使用的碳貯存量轉換係數位於 0.3~0.7 之間，而約 95%國家使用 0.5 為其碳貯存量轉換係數(Brown *et al.*, 1986; Marland and Schlamadinger, 1997)，本研究位於亞熱帶潮濕林則採用 0.49 為計算值(林務局，2010)。而 CO₂ 與碳轉換係數一般可利用分子量來決定，如 CO₂ 分子量 = 44 與碳分子量 C = 12，其二者間之轉換係數即 44/12，為 3.67。

表 3 碳貯存推估模式之生物量轉換與擴展係數(BCEFs)

樹種別	BCEFs	備註
檜木	0.5150	
肖楠	0.6540	
台灣二葉松	0.5170	
香杉、杉木	0.4230	
柳杉	0.4970	
台灣杉	0.4640	
其他針葉樹	0.5060	前 6 種針葉樹之中位數
烏心石	0.7120	
台灣櫟	1.4300	
大葉桃花心木	0.6150	BD : 0.500、EFa : 1.230
樟樹	0.6850	
相思樹	1.1660	
楓香	0.8550	
木油桐	0.5240	
光臘樹	1.0110	
其他闊葉樹	0.7835	前 8 種闊葉樹之中位數

(四)和平事業區森林碳貯存之推估

1. 建立土地利用型分布圖層

利用羅東林區管理處國有林事業區檢訂調查隊 2005 年調查資料針對和平事業區小班作為單位，記錄每小班林型、土地利用型作為地理資訊圖層基礎資料，並利用 GIS 計算各主要林型面積，以利分層取樣之進行。

2. 分層取樣

森林調查採分層取樣的目的，在於減少次級族群內之變異，即同林型加以分析，以增加族群推算值之精密度(楊榮啓與林文亮，2003；譚運籌，2007)。本研究對各林型進行分層，按分層取樣方法計算基礎值，以求出族群均數推估值、樣區碳貯存量均數之變異數、樣區碳貯存均數之 95%信賴區間計算式、誤差率及全區碳貯存總量之 95%信賴區間計算式，其演算式如下：

(1) 族群均數推估值

$$\bar{Y}_{st} = \sum_{h=1}^L W_h \bar{Y}_h$$

$$W_h = \frac{N_h}{N}$$

\bar{Y}_{st} = 族群均數推估值

\bar{Y}_h = 各分層之樣本均數

W_h = 各分層之權重

N_h = 各分層之族群大小

N = 所有族群總數

L = 總分層數

(2) 樣區碳貯存量均數之變異數

$$s^2_{\bar{y}_{st}} = \sum_{h=1}^L \left(W_h^2 \cdot \frac{s_h^2}{n_h} \cdot \frac{N_h - n_h}{N_h} \right) = \sum_{h=1}^L \frac{W_h^2 \cdot s_h^2}{n_h} - \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L W_h s_h^2$$

$s^2_{\bar{y}_{st}}$ = 樣區碳吸存量均數之變異數

n_h = 各分層之樣本大小

s_h^2 = 各分層之樣本變異數

(3) 樣區碳貯存量均數之信賴區間計算式

$$\bar{Y} \pm t_{\frac{\alpha}{2}, n-L} s_{\bar{y}_{st}}$$

$t_{\frac{\alpha}{2}}$ = 自由度 $n - L$ 之 t 值

(4) 誤差率

$$E\% = \frac{t_{\frac{\alpha}{2}, n-L} s_{\bar{y}_{st}}}{\bar{Y}_{st}} \times 100\%$$

(5) 全區碳貯存總量之信賴區間計算式

$$N \left(\bar{Y} \pm t_{\frac{\alpha}{2}, n-L} s_{\bar{y}_{st}} \right)$$

結果與討論

一、樹高曲線式之建立

藉由 2006 年第 1 次複查樣木資料配製樹高曲線模式，整合後之迴歸式以修正後決

定係數(Adj.R²)較大及誤差均方根(RMSE)較小為依據，來決定其最適合之模式如表 4 所示。

本研究樹高曲線式之樹種選擇方式係為配合材積換算，參考第 3 次森林資源調查應用樹種材積式一覽表而選擇代表性樹種以求迴歸式，並以此之各模式來推算各樹種之材積，以做為後續蓄積量換算之參據。

二、和平事業區永久樣區之蓄積量

為了瞭解 2001~2011 年間各林型之生長變化，利用表 2 所整理出之材積式計算 15 種林型每公頃之蓄積量及 10 年平均年生長量，其結果如表 5 所示。

本研究蓄積量及 10 年平均年生長量，除樟樹造林稍降外，均呈顯上升的趨勢，其中以人工針葉樹混淆林生長情形為最好，其次則為杉木類造林。

三、和平事業區永久樣區之森林碳貯存量

本研究就和平事業區 2001 年、2006 年及 2011 年永久樣區調查之結果，利用第三次森林資源調查所應用之材積式計算 3 個年份之蓄積量，再以蓄積量依 IPCC 與國內調查之碳轉換係數推估 15 種林型於 3 個年份之碳貯存量，並比較其變化趨勢，計算結果如表 6 所示。在表中，以 2011 年資料為依據，可知天然針闊葉混淆林碳貯存量及 CO₂ 貯存量最高，最低則是天然闊葉樹純林。

整體而言，天然林的碳及 CO₂ 貯存量高於人工林，針葉樹林高於闊葉樹林，惟獨天然冷杉針葉樹林略低，在這可判斷為該林型為生長於高海拔，其生長緩慢，蓄積量亦偏低所造成；而天然闊葉樹純林，係為台灣赤楊之純林，為先驅樹種，可能該林型樣區為曾經遭受干擾而生長，爰蓄積量低，造成碳貯存量亦低。而碳及 CO₂ 貯存量在針葉樹林高於闊葉樹林，這樣的結果與譚運籌(2007)研究南庄事業區永久樣區之森林碳貯存有情形不同，這可能為台灣東部與西部環境地形上的差異所造成。另外在針葉樹人工林部份，排除混淆林不說，以柳杉造林之碳貯存量最大，這與李國忠等(2004)推估台大實驗林森林生態系不同林分經營策略之碳貯存結果相似，惟該研究柳杉碳貯存量(52.48 ton/ha)遠低於本研究。

在碳及 CO₂ 貯存量的變化過程中，其增減量最大的是人工針葉樹混淆林，最後且成負值者為樟樹造林，針葉樹種為人工林高於天然林，闊葉樹種(排除掉樟樹可能因天然災害枯死，不適合該環境生長外)為人工林與天然林並無明顯的差異；又天然林中，針闊葉樹無明顯的差別，惟人工林，針葉樹遠大於闊葉樹。

表 4 和平事業區內各樹種之樹高曲線式

樹種別	Equation	Parameters			Adj. R ²	RMSE	No. of Equation
		b ₀	b ₁	b ₂			
扁柏	$H = 1.3 + b_0 \cdot \left(1 - e^{(-b_1 \cdot DBH^{b_2})}\right)$	19.2119	0.0238	1.0994	0.5755	2.7534	3
紅檜	$H = 1.3 + b_0 \cdot \left(1 - e^{(-b_1 \cdot DBH)}\right)^{b_2}$	33.4575	0.00934	0.7203	0.7075	2.3956	1
鐵杉	$H = 1.3 + \left(\frac{DBH}{b_0 + b_1 DBH}\right)^2$	2.2203	0.1999		0.5515	3.0477	7
冷杉	$H = 1.3 + b_0 DBH^{b_1}$	0.382	0.8896		0.5494	3.0724	6
柳杉	$H = 1.3 + b_0 \cdot e^{(-b_1 \cdot DBH^{b_2})}$	36.854	4.2534	-0.4288	0.3401	2.8350	2
台灣杉	$H = 1.3 + b_0 DBH^{b_1}$	1.8576	0.5434		0.5361	2.1579	6
楓香	$H = 1.3 + b_0 \cdot \left(1 - e^{(-b_1 \cdot DBH^{b_2})}\right)$	13.9642	0.00327	2.1786	0.5866	2.3110	3

續下頁

續表 4

樹種別	Equation	Parameters			Adj. R ²	RMSE	No. of Equation
		b ₀	b ₁	b ₂			
紅豆杉 香杉	$H = 1.3 + \left(\frac{DBH}{b_0 + b_1 DBH} \right)^2$	1.1793	0.2918		0.2832	2.0249	7
松類	$H = 1.3 + \left(\frac{DBH}{b_0 + b_1 DBH} \right)^2$	4.0967	0.1411		0.7942	3.6053	7
樟樹 檫樹	$H = 1.3 + \left(\frac{DBH}{b_0 + b_1 DBH} \right)^2$	1.8802	0.2009		0.4364	3.3189	7
楠木類	$H = 1.3 + b_0 \cdot e^{(-b_1 \cdot DBH^{b_2})}$	26.8509	4.0313	-0.4665	0.4999	2.0539	2
櫟類	$H = 1.3 + b_0 \cdot e^{(-b_1 \cdot DBH^{b_2})}$	21.4876	4.1064	-0.5747	0.4951	2.0338	2
一般闊	$H = 1.3 + b_0 \cdot e^{(-b_1 \cdot DBH^{b_2})}$	22.4759	4.1289	-0.5201	0.3976	1.9968	2
鐵刀木等闊	$H = 1.3 + b_0 DBH^{b_1}$	3.2957	0.36		0.3849	2.0947	6

*本研究樹高曲線樹種選定係參考第 3 次森林資源調查應用樹種材積式一覽表所設定樹種代碼(林務局, 1995)

表 5 和平事業區 2001~2011 年蓄積量之變化

林型	2001 年 蓄積量 (m ³ /ha)	2006 年 蓄積量 (m ³ /ha)	2011 年 蓄積量 (m ³ /ha)	蓄積量變化(m ³ /ha)		10 年平均 年生長量 (m ³ /ha/yr)
				2001 年 至 2006 年	2006 年 至 2011 年	
天然冷杉針葉樹林	298.81	305.13	318.15	6.32	13.02	1.93
天然鐵杉針葉樹林	615.94	625.47	653.61	9.53	28.14	3.77
天然檜木針葉樹林	406.32	461.76	493.45	55.44	31.69	8.71
天然針闊葉混淆林	645.00	669.90	686.90	24.90	16.99	4.19
天然闊葉樹純林	43.61	62.69	62.57	19.08	-0.11	1.90
天然闊葉樹混淆林	208.52	241.38	252.78	32.86	11.41	4.43
檜木類造林	134.54	199.07	245.36	64.52	46.30	11.08
杉木類造林	239.35	330.14	369.64	90.79	39.50	13.03
台灣杉造林	210.06	280.80	337.43	70.74	56.63	12.74
柳杉造林	392.50	462.24	499.78	69.74	37.55	10.73
人工針葉樹混淆林	333.60	411.63	484.89	78.03	73.26	15.13
楓香造林	133.86	163.50	168.81	29.64	5.31	3.50
樟樹造林	209.89	196.23	207.31	-13.65	11.08	-0.26
人工闊葉樹混淆林	164.98	185.56	200.20	20.58	14.64	3.52
人工針闊竹混淆林	73.16	105.73	140.08	32.57	34.35	6.69

表 6 和平事業區 2001~2011 年碳貯存量之變化

林型	碳貯存量(ton/ha)			2001 年至 2011 年碳貯 存量變化 (ton/ha)	10 年期間平 均年碳吸存 量(ton/ha/yr)	CO ₂ 貯存量(ton/ha)			2001 年至 2011 年 CO ₂ 貯存量變化 (ton/ha)	10 年期間平 均年 CO ₂ 吸 存量 (ton/ha/yr)
	2001 年	2006 年	2011 年			2001 年	2006 年	2011 年		
天然冷杉針葉樹林	91.95	93.93	97.93	5.98	0.60	337.13	344.41	359.09	21.96	2.20
天然鐵杉針葉樹林	196.50	198.48	206.74	10.24	1.02	720.51	727.77	758.04	37.53	3.75
天然檜木針葉樹林	132.97	150.67	161.11	28.14	2.81	487.57	552.47	590.72	103.15	10.32
天然針闊葉混淆林	222.27	232.01	237.21	14.94	1.49	815.00	850.72	869.75	54.75	5.48
天然闊葉樹純林	20.76	27.05	26.60	5.84	0.58	76.12	99.17	97.53	21.41	2.14
天然闊葉樹混淆林	97.97	113.21	118.80	20.83	2.08	359.21	415.09	435.60	76.39	7.64
檜木類造林	44.24	65.62	81.08	36.84	3.68	162.22	240.60	297.28	135.06	13.51
杉木類造林	70.54	96.40	107.99	37.45	3.75	258.64	353.45	395.96	137.32	13.73
台灣杉造林	70.27	95.02	116.20	45.93	4.59	257.67	348.41	426.06	168.39	16.84
柳杉造林	119.70	140.90	152.59	32.89	3.29	438.91	516.63	559.50	120.59	12.06
人工針葉樹混淆林	104.78	129.51	153.56	48.78	4.88	384.18	474.89	563.06	178.88	17.89
楓香造林	68.25	83.32	86.25	18	1.80	250.25	305.52	316.24	65.99	6.60
樟樹造林	90.61	85.24	90.05	-0.56	-0.06	332.25	312.55	330.19	-2.06	-0.21
人工闊葉樹混淆林	76.19	85.59	92.14	15.95	1.60	279.38	313.81	337.86	58.48	5.85
人工針闊竹混淆林	27.30	36.65	48.97	21.67	2.17	100.10	134.39	179.55	79.45	7.95

綜上而言，無論是碳或 CO₂ 之貯存量變化及增減量，均為人工針葉樹林較高，而扣除掉混淆林外，其貯存量較高者為柳杉造林，然則增量最大則為台灣杉造林。由此大可判斷柳杉造林年度應較台灣杉造林年度為早，爰此，其柳杉造林蓄積量、碳或 CO₂ 貯存量雖相較大於台灣杉造林或其他人工針葉樹林型，但造林年度或林齡卻稍長，在相對應之下，這可能造成 2001~2011 年間蓄積量、碳或 CO₂ 之吸存量低於台灣杉造林或其他人工針葉樹林型的原因。

四、和平事業區之森林碳貯存量

(一)建立林型分布圖

為獲得整個和平事業區森林的碳貯存量總量，本研究參考林務局(2005)羅東林區管理處和平事業區檢訂調查報告書，即國有林事業區檢訂隊所調查之資料，依據每一小班所記錄之林型建立和平事業區之主要分布圖，如圖 2 所示為 29 種林相，面積約為 55,723 ha。然因永久樣區設置時，無法顧及所有林型皆設置取樣，對於未設置樣區、面積比例低或非林之林型加以經合併、刪除及整理。其永久樣區中的天然冷杉針葉樹林歸類於天然針葉樹純林；天然鐵杉及檜木針葉樹林歸類於天然針葉樹混淆林；人工檜木類、杉木類、台灣杉、柳杉等造林歸類為人工針葉樹純林；楓香及樟樹造林歸為人工闊葉樹純林，另以檢訂隊所調查小班記錄資料之 29 種林相再配合永久樣區之合併歸類後，製做成新的 10 種林型分布圖(圖 3)，其天然林者有針葉樹純林、針葉樹混淆林(含針葉樹散生林)、針闊葉樹混淆林(含針闊葉樹散生林)、闊葉樹純林、闊葉樹混淆林(含闊葉樹散生林)；人工林者有針葉樹純林、針葉樹混淆林、針闊竹混淆林(即針闊葉混淆林)、闊葉樹純林、闊葉樹混淆林(含竹類闊葉樹混淆林)及其他土地利用型(刪除)。每一林型之面積統計結果如表 7 所示。

(二)和平事業區之碳貯存總量

為推估和平事業區 10 種林型之碳貯存總量，因此需將 2011 年永久樣區(第 2 次複查)資料加以合併及整合。本研究因永久樣區面積之不同，為求換算，該調查永久樣區所得資料除以樣區面積即得每公頃應有的資料；如前所述，以人工針葉樹純林為例，是依據檜木類、杉木類、台灣杉及柳杉造林等 4 種林型永久樣區資料而來，當時事業區於設置永久樣區時，係因按林型面積比例來分配樣區，爰此各林型所設置之樣區數量多寡將有落差，而以樣區數在整合成林型時為權重，在藉 4 種林型之永久樣區所得每公頃碳貯存量各別乘上權重後，再除以 4 種林型權重之加總，即得人工針葉樹純林之每公頃碳貯存量，其各分層之樣本取樣結果如表 8 所示。

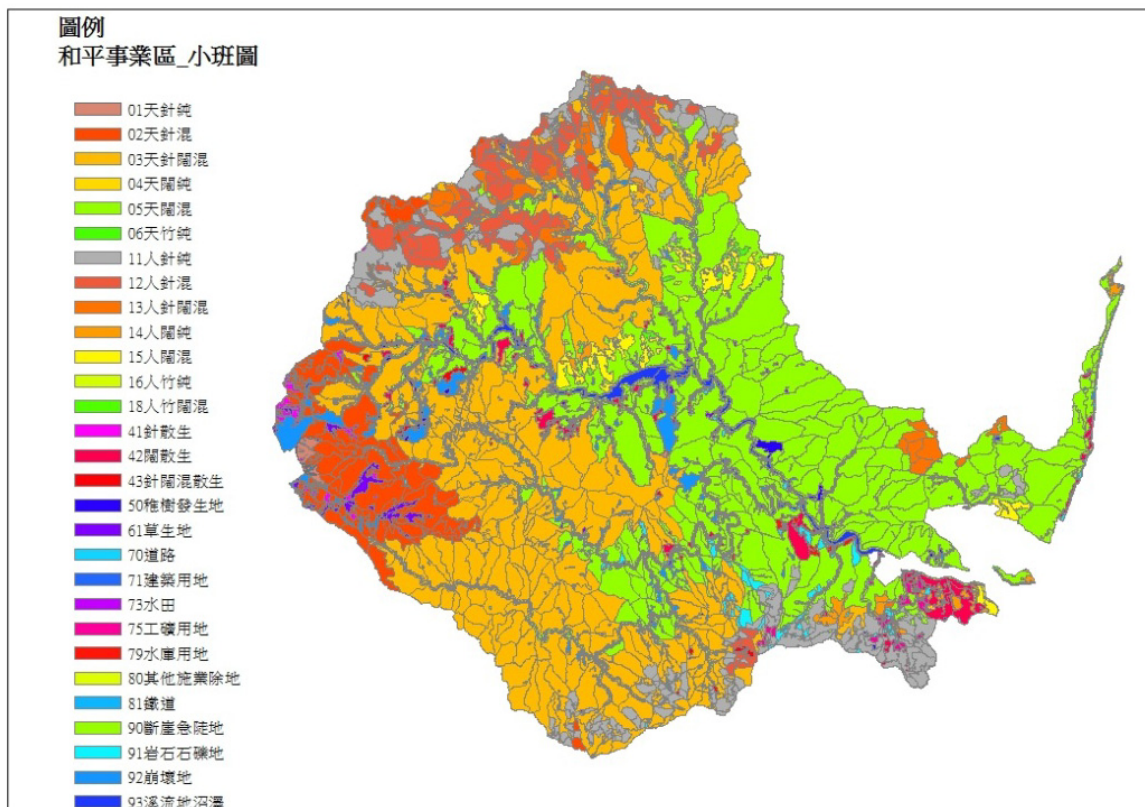


圖 2 和平事業區 29 種土地利用型(林相圖)分布圖

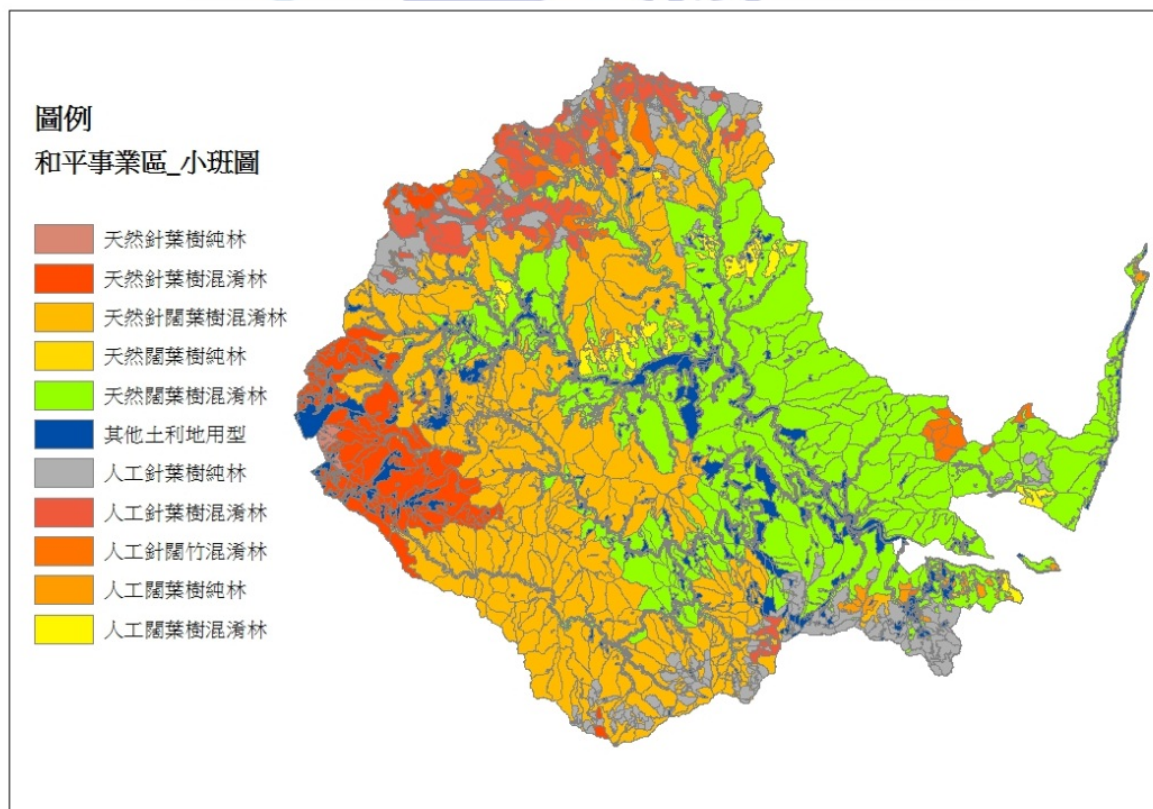


圖 3 和平事業區簡化之 10 種林型分布

表 7 和平事業區各林型面積統計

林型	面積(ha)	備註
天然林	42,674.12	
針葉樹純林	108.03	
針葉樹混淆林	3,476.45	
針闊葉樹混淆林	18,971.71	
闊葉樹純林	11.95	
闊葉樹混淆林	20,105.98	
人工林	8,549.92	
針葉樹純林	3,624.42	
針葉樹混淆林	2,448.05	
針闊竹混淆林	1,210.08	
闊葉樹純林	370.22	
闊葉樹混淆林	897.15	
小計	51,224.04	本研究範圍面積
其他土地利用型	4,498.60	不列入範圍
合計	55,722.64	本事業區總面積

表 8 各林型樣區碳貯存量之分層取樣結果

林型	樣區數	合計碳量 (ton/ha)	平均碳量 (ton/ha)	標準差
天然林				
針葉樹純林	2	195.87	97.93	92.50
冷杉林				
針葉樹混淆林	12	2,252.70	187.73	68.8
鐵杉林				
檜木林				
針闊葉樹混淆林	12	2,846.47	237.21	165.06
闊葉樹純林	3	79.80	26.60	16.12
闊葉樹混淆林	12	1,425.60	118.80	48.53

續下頁

續表 8

林型	樣區數	合計碳量 (ton/ha)	平均碳量 (ton/ha)	標準差
人工林				
針葉樹純林* ¹	35	3,899.40	111.41	55.17
檜木林				
杉木類				
台灣杉				
柳杉				
針葉樹混淆林	7	1,074.93	153.56	72.92
針闊竹混淆林	3	146.91	48.97	15.61
闊葉樹純林	6	528.90	88.15	45.81
楓香林				
樟樹林				
闊葉樹混淆林	9	829.29	92.14	58.97
合計	101			

*1：人工針葉樹純林合計碳量 = ((檜木林碳量 81.08 ton/ha * 權重 15) + (杉木類碳量 107.99 ton/ha * 權重 5) + (台灣杉碳量 116.20 ton/ha * 權重 4) + (柳杉碳量 152.59 ton/ha * 權重 11)) 而來；平均碳量 = 合計碳量 / (權重 15 + 權重 5 + 權重 4 + 權重 11) 而來；其權重所指為樣區數量。另天然針葉樹混淆林碳貯存量及 CO₂ 貯量算法亦同。

除前面所敘明之計算方式外，再套用分層取樣演算式，分別獲得族群均數推估值、樣區碳貯存量均數變異數、樣區碳貯存量均數 95%信賴區間(自由度為 101 - 10 = 91, $\alpha = 0.05$ ，一般 t 值在取樣技術教科書上多數設為 2)、誤差率及全區碳、CO₂ 貯存總量及 95%信賴區間，其中各分層林型面積大小即指各分層族群大小，各分層樣區數量即是各分層之樣本大小，而合計碳量便是由該分層各樣區取得的碳量資料之總和，平均碳量則為合計碳量除以取樣面積所得之值合計而來，計算結果如表 9 所示，和平事業區之森林碳貯存總量約在 6,602,000 至 10,411,184 公噸範圍間。而 CO₂ 貯存總量則利用與碳之轉換係數(約 3.67)關係來換算所得，其範圍大約在 24,229,340 至 38,209,046 公噸之間。

表 9 第 2 次複查數據經分層取樣推估和平事業區之 CO₂ 貯存總量結果

演算式	計算結果
族群均數推估值(ton/ha)	166.07
樣區碳貯存量均數變異數	345.62
樣區碳貯存量均數信賴區間(ton/ha)	166.07 ± 37.18
誤差率(%)	22.39
全區碳貯存總量及信賴區間(ton)	8,506,592 ± 1,904,592
CO ₂ 與碳轉換系數	3.67
全區 CO ₂ 貯存總量及信賴區間(ton)	31,219,193 ± 6,989,853

結 論

森林的存在其蓄積對碳貯存有很大的貢獻，而本研究系彙整行政院農業委員會林務局羅東林區管理處所設立之和平事業區永久樣區，包括 2001 年新設、2006 年及 2011 年複查的資料，並對 15 種林型分別探討其森林調查成果、樹高與胸徑間之關係(樹高曲線式)、森林動態，進而建構碳貯存推估模式，用以推估研究區域之森林碳貯存的貢獻量。

樹高曲線藉由 2006 年第 1 次複查樣木資料配製模式，並以迴歸式的修正後決定係數 (Adj.R²)較大及誤差均方根(RMSE)較小，決定其最適合之模式，並以此來回推新設樣區及推算第 2 次複查之樹高值，以做為較精確的推算蓄積量依據。

2001 年至 2011 年間各林型蓄積量及 10 年平均年生長量計算結果發現，其變化上，除了樟樹造林有稍降外(蓄積量減少至 207.31 m³/ha，10 年平均年生長量-0.26 m³/ha/yr)，餘均呈現上升的趨勢，其中以人工針葉樹混淆林(15.13 m³/ha/yr)生長情形最好，其次為杉木類造林(13.03 m³/ha/yr)，而樟樹造林之所以負成長，可能是因天然災害使樟樹枯死而不適應該環境生長所造成。

藉由碳貯存量推估模式所推估 15 種林型碳與 CO₂，其結果以天然針闊葉混淆林貯存量最高(碳為 237.21 ton/ha，CO₂ 為 869.75 ton/ha)，其次為天然鐵杉針葉樹林(碳為 206.74 ton/ha，CO₂ 為 758.04 ton/ha)，整體而言，天然林的貯存量高於人工林，針葉樹林高於闊葉樹林，惟獨天然冷杉針葉樹林略低，在這可判斷為該林型為生長於高海拔，其生長緩慢，蓄積量亦偏低所造成；而天然闊葉樹純林，係為台灣赤楊之純林，為先驅樹種，可能該林型樣區為曾經遭受干擾而生長，爰蓄積量低，而碳貯存量亦低之情形。

在觀察 2001 年至 2011 年間之碳與 CO₂ 貯存量變化或增減量，15 個林型中僅樟樹造林於 10 年間呈負值，經查核比對樣區資料，本林型調查之初，林內除了樟樹外，尚有其他多數的闊葉樹種混雜，可能因天然災害使樟樹枯死，不適合該環境生長，因此第 1 次複查時，其碳貯存量明顯減少，而於第 2 次複查時，漸被其他樹種所取代，爰該林型尚需幾次複查後，方可決定往後的林型演替樣態。

其餘 14 種林型碳與 CO₂ 貯存量呈現增加的情形，增加量最大的是人工針葉樹混淆林(碳為 48.79 ton/ha，CO₂ 為 178.88 ton/ha)，其次為台灣杉造林(碳為 45.93 ton/ha，CO₂ 為 168.40 ton/ha)。而觀察增減量過程中，針葉樹種為人工林高於天然林，闊葉樹種排除掉樟樹可能因天然災害枯死，不適合該環境生長外，並無明顯的差異；又天然林中，針闊葉樹亦無明顯的差別，惟人工林，針葉樹遠大於闊葉樹。

為獲得和平事業區整個碳與 CO₂ 貯存總量，本研究將原 15 種林型參考林務局(2005)羅東林區管理處和平事業區檢訂調查報告書簡化成 10 種林型，以便計算整個事業區碳與 CO₂ 貯存之總量，並以第 2 次複查資料為依據，經分層取樣計算之結果，其整個事業區碳貯存總量約為 6,602,000 至 104,111,84 公噸範圍間，而 CO₂ 貯存總量範圍大約在 24,229,340 至 38,209,046 公噸之間。

森林永久樣區資料上在調查、彙整及建立上，相較於全國性森林資源調查為期更短，而對生長量及森林動態上更具意義及代表性，可配合其他研究資料來做為政府施政時的參考依據。而本研究永久樣區設置於 2001 年，經第 1 次及第 2 次複查，發現部份資料在野外調查，因其觀測者的筆誤或是分心，導致資料在建立時與前次資料有部份之落差，建議於往後複查調查之時，應將歷次調查資料一併攜帶，以便核對所得資料是否有遺漏或判斷錯誤之情形，將能更增加資料根本性精確度；另就調查人員建議 3~5 人為 1 組，應盡量遴選具有一定程度植物識別能力者及該永久樣區前次調查人員至少 1 名，以減少森林資料上之誤差及節省路程往返時間，更能有效提供良好之資料。

謝 誌

本研究感謝行政院農業委員會林務局羅東林區管理處提供永久樣區資料、相關資訊及資料之協助始得完成，特此感謝。

參考文獻

王兆桓、陳子英。2007。和平事業區森林永久樣區複查暨新設計畫委託案報告。行政院

- 農業委員會林務局羅東林區管理處委託計畫。87 頁。
- 王兆桓。2013。森林生長量與蓄積量分析系統操作手冊。國立宜蘭大學森林暨自然資源學系。宜蘭。
- 李國忠、林俊成、賴建興、林麗貞。2004。台大實驗林森林生態系不同林分經營策略之碳貯存效果。臺大實驗林研究報告 18(4):261-272。
- 林文亮、王兆桓、陳家玉。2001。臺灣地區人工林樹高方程式之建立。臺大實驗林研究報告 15(1):25-34。
- 林務局。1995。第三次台灣森林資源及土地利用調查。pp.8-9。台灣省農林廳林務局。臺北。
- 林務局。2005。和平事業區檢訂調查報告書(草稿)。行政院農業委員會林務局羅東林區管理處編印。宜蘭。
- 林務局。2006。森林永久樣區調查工作手冊。行政院農業委員會林務局。臺北。
- 林務局。2010。育林實務手冊。pp.150-193。行政院農業委員會林務局。臺北。
- 邱祈榮。1997。地面樣區分配之研究-以太平山事業區為例。中華林學季刊 30(1):105-116。
- 陳朝圳。1985。大雪山地區紅檜人工幼齡生長模式之研究。國立中興大學森林研究所碩士論文。臺中。
- 楊榮啓、林文亮。2003。森林測計學。國立編譯館。臺北。
- 劉知好、王兆桓。2008。以林齡－蓄積量模式估算柳杉及檜木人工林的碳吸存量。宜蘭大學生物資源學刊 4(1):35-45。
- 劉棠瑞、蘇鴻傑。1983。森林植物生態學。台灣商務。臺北。
- 環保署。2002。聯合國氣候變化綱要公約(UNFCCC National Communication of the Republic of China (Taiwan))。行政院環保署。台灣。
- 譚運籌。2007。新竹林區南庄事業區永久樣區之森林碳吸存效應。國立屏東科技大學森林系碩士學位論文。屏東。
- Brown, S., A. E. Lugo, and J. Chapman. 1986. Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget. *Canadian Journal of Forest Research* 16:390-394.
- Clutter, J. L., J. C. Fortson, L. V. Pienaar, G. H. Brister, and R. L. Bailey. 1983. *Timber management – a quantitative approach*. John Wiley & Sons Inc. New York. 333 pp.
- IPCC. 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf.htm>

- Marland, G., and B. Schlamadinger. 1997. Forests for carbon sequestration or fossil fuel substitution? A sensitivity analysis. *Biomass and Bioenergy* 13(6):389-397.
- Weiskittel, A. R., D. W. Hann, J. A. Kershaw, and J. K. Vanclay. 2011. *Forest growth and yield modeling*. Wiley-Blackwell, Chichester, UK. 415 pp.

103 年 4 月 28 日投稿
103 年 7 月 25 日接受

