

以林齡－蓄積量模式估算柳杉及檜木人工林的碳吸存量

劉知妤¹ 王兆桓^{1*}

1. 國立宜蘭大學自然資源學系

摘要

在全球暖化之環境議題中，藉由森林「碳吸存」來減緩溫室效應，已成為目前重要發展趨勢之一。如何有效地推估森林碳吸存量，亦為國家施政的重要議題。在實務上比較容易執行的方法，通常是以森林蓄積量來轉換成生物量，再使用碳轉換係數求得碳值，來評估碳貯存量。本研究應用林務局森林資源調查及永久樣區的資料，以林齡為基礎，發展各區域柳杉及檜木人工林的蓄積量模式，並參酌各區域資料配製所得之迴歸係數、地理位置及氣候等因素，將具有相似類型者予以重新整合，使更易於推估各林齡的森林蓄積量，進一步求得各林齡之生長率。接著再採用 IPCC 所建議或國內 2006 年以前先驅研究的轉換係數值，來估算碳吸存量。結果顯示從 1995-2005 年，以國內轉換係數去估算柳杉林型年平均的碳吸存量為 $95.85 \times 10^3 \text{ Mg}$ ($1 \text{ Mg} = 10^6 \text{ g}$ ；公噸)，檜木則為 $52.64 \times 10^3 \text{ Mg}$ ；亦即台灣柳杉林型平均每頃一年的碳吸存量為 $2.07 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，檜木林型則為 $2.10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。台灣中南部不論是柳杉或檜木人工林其蓄積量及碳吸存量皆較東、北區好。本研究結果可提供相關領域的研究人員或森林經營管理者作為參考，並希望日後國內轉換係數發展較為完善時，配合本研究的方法，可進一步更精確地估算我國森林的碳吸存量。

關鍵詞：森林蓄積量、生物量、森林資源調查、碳吸存、永久樣區

Carbon Sequestration Estimates for Cryptomeria and Cypress Plantations by Age-Based Stock Model

Chih-Yu Liu¹ Chao-Huan Wang^{1*}

1. Department of Natural Resources, National Ilan University

Abstract

In the environment issue of the global warming, to decelerate the greenhouse effect by forest carbon sequestration has already become one of the currently important development trends. In practice, forest inventory data are widely used for forest carbon stock estimates. Such data usually represent forest wood volume stock ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$), which needs to be converted to biomass carbon value (Mg C ha^{-1}). The objective of this study is to estimate the carbon stock for cryptomeria and cypress plantations in Taiwan on the basis of age-based forestry statistics. The data sets of the third forest inventory and the permanent plots for cryptomeria and cypress plantations in Taiwan were applied to develop the regional accumulation of wood volume model based on stand age. We also combined those equations according to similar regression coefficients, the geographical location and the climate condition. It made much easier to estimate forest wood volume by age class, and

furthermore to calculate growth rate. The carbon stock could be estimated using the conversion factors of IPCC or the local prior study before 2006. The results using the local conversion factors showed that, in the period from 1995 to 2005, cryptomeria and cypress plantations in Taiwan, respectively, sequestered 95.85×10^3 and 52.64×10^3 Mg C per year (1 Mg = 10^6 g), one with an area-weighted mean 2.07 Mg C ha^{-1} per year, the other was 2.10 Mg C. The amounts of area-weighted mean (Mg C ha^{-1} per year) in both cryptomeria and cypress forest types in the central and southern part of Taiwan were higher than those in the northern and eastern part of Taiwan. The results of this study can provide a good reference for related researchers and forest management.

Key words: forest stock, biomass, forest inventory, carbon sequestration, permanent plots

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

前 言

近幾年來，全球暖化之環境議題已受到各國的關注。自人類大量使用石化燃料、濫墾林地及過度伐木，使得大氣中二氧化碳濃度由工業革命之前 280 ppm 上升到現在的 358 ppm (林俊成等, 2005)。許多研究報告指出，大氣中二氧化碳濃度急劇之上升會導致溫室效應，更進一步造成全球氣候變遷(Global Climate Change)。而全球氣候變遷除了造成環境生態的改變外，亦可能引起人體健康之影響(李芝珊、萬國華, 1996)。各國為了減緩此情形之發生，不使其威脅人類社會與生態環境，在 1992 年 6 月於巴西里約熱內盧舉行「地球高峰會議(Earth Summit)」，通過聯合國「氣候變化綱要公約(The United

Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)」。雖然各國承諾致力於達到減少溫室氣體之排放，但因公約本身不具有法律約束力，致使成效並不大。因此，在 1997 年 12 月，「聯合國氣候變化綱要公約第三次締約國大會(The Third Meeting of the Conference of the Parties, COP3)」所制定的「京都議定書(Kyoto Protocol)」是已具有法律約束力，並將 1990 年以後所進行之造林、再造林及林木伐採作業所吸收或排放二氧化碳之淨值，可併入排放減量之計算(邱祈榮、王瑞閔, 2006)。而今「京都議定書」也於 2005 年 2 月 16 日正式生效，它具體的規範了 38 個工業國家從 2008 到 2012 年之溫室氣體排放的減量標準及減量機制，並更加肯定森林對碳吸存的正面功能(王義仲、林俊成, 2006)。

在 1980 年左右，學者評估全球天然林的含碳量為 330 Pg (1 Pg = 10^9 Mg : 10 億公噸)，土壤為 660 Pg，而人工林為 10 Pg(Fukuda et al., 2003)。一般認為海洋、土壤與森林是地球上主要的碳匯，海洋每年可沉積 2 Pg 的碳，而森林每年可淨吸收約 0.5 Pg 的碳，因此森林在碳吸存的功能上扮演不可忽視的重要角色(張彬等, 2005; 簡慧貞, 2006)。到目前為止，已有不少專家學者研究不同推估方式對台灣碳吸存估算的影響。其中，王立志(1996)使用台灣第二次森林資源調查之生長量及生長率資料，在假設無林地變更及無砍伐的狀況下，森林資源每年可吸存大氣中 4.74 Tg(1Tg = 10^6 Mg : 百萬公噸

的碳。林裕仁等(2002)採用台灣第三次森林資源調查資料的蓄積量與面積數據，而林木樹種之生長量與枯死量則採第二次森林資源調查之結果，若以大陸的生物量擴展係數(BEF)(Fang et al., 2001)估算台灣林木碳貯存量為 150.70 Tg，其每年可吸收大氣中約 4.56 Tg 的碳。日本學者 Fukuda 等(2003)以林齡為基礎，採用 Mitscherlich 方程式配製不同區域的柳杉及扁柏人工林蓄積量與生物量分佈模式，以基礎密度和擴展係數，將樹幹材積轉換成總生物量，之後再乘上碳轉換係數以估算碳貯存量。邱祈榮、王瑞閔(2006)採用聯合國氣候變化政府間專家委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)所提出估算林業部門二氧化碳與碳吸存量方法及試算原則，並應用第三次森林資源調查資料，再配合 2004 年 SPOT 衛星影像，統計出近十年來國有林事業區面積的留存情形，並採用林務局第二次森林資源調查結果之生長率，估算台灣地區國有林各林型碳吸存量，從 1995 到 2004 年，以 IPCC 與國內先前研究的轉換係數值，推估無林地損失狀況下，平均每年森林碳吸存量分別約為 3.97 Tg 與 3.12 Tg。

藉由森林「碳吸存」來減緩溫室效應，已成為目前重要發展趨勢之一。如何有效地推估森林碳吸存量，亦為國家施政的重要議題。在估算大面積森林碳吸存量方面，蓄積量變化的估算及以轉換係數進行碳吸存量估算，此二者相輔相成，皆有一定的重要性。台灣第一次、第二次和第三次森林資源調查所用的取樣方法皆不相同，且間隔時間很長，故無法從各次森林資源調查的蓄積量相減而獲得有用的生長量值以便進行碳吸存的估算。取而代之，國內在估算大面積森林碳吸存量方面，前人研究是以固定生長率估算生長量，進一步求得碳吸存量；但是，其使用的生長率為台灣第二次森林資源調查時之生長率，並非第三次森林資源調查時之生長率，兩者調查時間相差十幾年，因此前者的生長率可能無法適用於後者。可惜第三次森林資源調查時並沒有做生長量調查，故也不能提供當時的生長率；林務局目前另外設置永久樣區，雖然經過調查，但是複測資料還需要另 5 年的檢核。此外，如果使用固定生長率做長期預測，它是一種複率的公式，容易產生隨著時間拉長而預測值遽增的現象。

一般而言，人工林每公頃每年的碳吸存量遠大於天然林的量，因此碳吸存主要是以人工林較為重要。台灣森林人工林面積約佔所有林地面積的 1/5；但由表 1 中可知，國內前人研究對台灣大面積林地所有林型所估算的碳吸存量卻與日本柳杉及扁柏人工林碳吸存量相近，其原因可能為國內前人研究是使用台灣第二次森林資源調查固定的生長率來推算林木蓄積量，可能會有高估的情形，因此值得加入新的資料和發展新的方法來估算碳吸存量。

本研究應用台灣第三次森林資源調查資料及林務局近年來設置的永久樣區資料，以林齡為基礎，發展柳杉及檜木人工林的蓄積量模式，使更易於推估各林齡的森林蓄積量。進一步求得各林齡之生長率，接著再採用國內前人研究所採用的 IPCC 轉換係數值或國內調查的轉換係數值，來估算森林碳吸存量。其所得之結果，可提供相關領域的研究人員或森林經營管理者作為參考。並希望日後國內轉換係數發展較為完善時，可將兩者相互配合，以建立一套能合理地估算我國森林碳吸存量的系統。

材料及方法

一、研究材料及資料來源

柳杉(*Cryptomeria japonica* var. *japonica*)，為柳杉屬，原產於中國大陸及日本，最早於 1896 年自日本引進台灣(林俊成等，1999)，由於柳杉初期生長較一般針葉樹種快，因而成為國內在海拔 1,000~2,000 m 間最常見的人工造林樹種之一。檜木林型包含紅檜(*Chamaecyparis formosensis*)和台灣扁柏(*Chamaecyparis obtusa* var. *formosana*)為台灣之貴重針葉樹種，在檜木人工林裡以種植紅檜較多。紅檜為台灣之特有種，屬柏科，樹性偏陽，分布最低至海拔 1,050 m，最盛處在海拔 1,500~2,150 m 間。台灣扁柏，亦屬柏科，特產台灣中央山脈海拔 1,300~2,800 m 間(劉業經等，1994)。本研究以此二種人工林林型為研究對象，資料來源主要是應用林務局第三次台灣森林資源調查(林務局，1995)及林務局森林永久樣區初設的資料(林務局，2006)。林型面積在國有林部分(包括國有林事業區、台大實驗林、興大惠蓀林場、林試所六龜研究中心)採用第三次台灣森林資源調查的林相圖資料，但是台灣第三次森林資源調查並沒有製作非國有林的林相圖，因此採用其航空照片樣點的判釋結果以比例估算非國有林各林型面積(王兆桓，2006)。

由於第三次台灣森林資源調查，採用系統取樣方式，其樣區均勻分佈於全省各地，可得蓄積量不偏推算值，且調查人員經統一訓練後再實地執行，品質較為一致。因此，本研究以第三次台灣森林資源調查資料為基礎線(base line)，再以林齡為基礎的蓄積量模式作為指引曲線(guide curve)來推估後續各年度的蓄積量。在配製蓄積量模式時，本研究選取其純林(目標樹種的材積

佔樣區總材積 80%以上)及有林齡的樣區。不過，在林務局永久樣區部份的調查工作是由林管處個別訓練與執行，品質較不一致；為得到較清晰的趨勢，本研究選取其中面積至少為 0.05 ha 的樣區，且要求當蓄積量大於 1000 m³ ha⁻¹時，必須使用 0.1 ha 的樣區。

二、研究方法

(一)蓄積量推估模式

本研究採常用來評估森林生長的 Mitscherlich 方程式，該式曾用來建立日本柳杉與扁柏人工林的蓄積量模式(Fukuda et al., 2003)，因此本研究所得結果可做為台灣與日本間相似林型生長情形的比較。本研究將各區域的林齡與材積，做非線性迴歸分析，求得各區域資料配製所得之迴歸係數，以便有效估算各林齡的森林蓄積量。其蓄積量方程式如下(Fukuda et al., 2003)：

$$WV = m_1 \{ 1 - m_2 \exp(-m_3 x) \} \dots \dots \dots (1)$$

式(1)中 WV : 每公頃林分蓄積量(m³ ha⁻¹)

x : 林分年齡(yr)

m₁、m₂、m₃ : 各區域資料配製所得之迴歸係數

(二)碳貯存量估算方法

本研究評估柳杉與檜木的碳貯存量，是利用每公頃林木蓄積量及 2006 年以前國內前人研究所使用的 IPCC 轉換係數值與國內調查的轉換係數值，在配合下述之模式(李國忠等，2000；邱祈榮、王瑞閔，2006；IPCC, 2003)以進行碳貯存量推算：

$$C_{\text{plant}} = A \cdot V_{\text{stem/ha}} \cdot BD \cdot EF \cdot C_{\text{con}} \dots \dots \dots (2)$$

或

$$C_{\text{plant}} = A \cdot V_{\text{stem/ha}} \cdot V_{\text{whole/stem}} \cdot VW \cdot C_{\text{con}}$$

式(2)中

C_{plant} : 該林型碳貯存量(Mg C)

A : 林型面積(ha)

V_{stem/ha} : 林型每公頃材積(m³ ha⁻¹)

BD : 基礎密度(樹幹絕乾重量/樹幹生材體積)

EF : 擴展係數(全株乾重/樹幹乾重)

$$EF = EF_a \cdot (1+R)$$

EF_a : 地上部擴展係數(地上部乾重/樹幹乾重)

R : 地下部與地上部乾重比

C_{con} : 碳含量轉換係數(ratio of carbon content)

V_{whole/stem} : 全株材積與樹幹材積轉換係數

VW : 重量與材積轉換係數，將全株材積轉換成全株乾重

表 1 前人研究台灣大面積森林、日本柳杉與扁柏人工林碳吸存估算

Table 1 Prior studies on carbon sequestration estimated for large scale forest land in Taiwan, and for Cypress and Cryptomeria plantations in Japan.

作者	生長量估算方式	轉換係數	林地範圍	碳吸存量 (Mg C ha ⁻¹ yr ⁻¹)
王立志 (1996)	第二次森林資源調查及生長量資料	IPCC 係數	全島林地 所有林型	2.56
林裕仁等 (2002)	第三次森林資源調查及第二次森林資源調查之生長量資料	生物量擴展係數	全島林地 所有林型	2.46
邱祈榮、王瑞閔 (2006)	第三次森林資源調查及第二次森林資源調查之生長率資料	IPCC 係數	國有林事業區 所有林型	2.72
		國內係數	國有林事業區 所有林型	2.14
日本學者 Fukuda 等 (2003)	日本森林調查資料	以林齡為基礎的擴展係數	日本 柳杉人工林 扁柏人工林	2.66* 2.27*

註：*不扣除伐採量

$V_{\text{whole/stem}}$ 和 VW 為早期公式使用的項目，目前則逐漸改採用 BD 和 EF 。如果依公式各項所代表的意義， $V_{\text{whole/stem}}$ 是一種體積比，為全株(含幹、枝、根、葉)材積與樹幹材積比，它是將樹幹體積擴展成全株體積。 EF 是一種重量比，它是將樹幹乾重擴展成全株乾重。在測計實務上皆是以取樣的方式來推算，而全株重量會較全株體積容易求得，樹幹容積密度會較全株容積密度容易求得；因此 EF 較 $V_{\text{whole/stem}}$ 容易求得，同理 BD 較 VW 容易求得。雖然以前文獻有時會把 EF 和 $V_{\text{whole/stem}}$ 、 BD 和 VW 視為相同而混著使用，但是如果依數學公式所顯示的意義，二者所轉換的對象是有所差異。

本研究在估算台灣地區柳杉及檜木人工林碳吸存量時，碳含量轉換係數皆設為 0.5，除了以 IPCC 的轉換係數估算外，還將上述國內先前研究所得的轉換係數帶入碳吸存估測模式計算，以比較二者間之差異。

(三)各年度蓄積量與碳貯存量推估

本研究針對區域的蓄積量方程式，採用林齡推估森林蓄積量，以第三次資源調查樣區的調查年度為基礎，並以當時實際調查材積除以預測材積為修正比率，推算 1990 到 2005 年的森林蓄積量，而無林齡之部分，則是採用逆迴歸式以調查資料的材積去估測林齡，並以最高年限為 90 年生為限，再用預測之林齡去推估生長率。而碳貯存量方面，各區域的平均每公頃蓄積量乘上區域面積，加總後即求得總蓄積量，之後再配合轉換係數，以估算碳貯存量。

結果與討論

一、柳杉及檜木人工林蓄積量之推估

Mitscherlich 的每公頃森林蓄積量方程式，可顯示出不同區域 R^2 的情形。各區域資料之不同迴歸係數值，則分別代表該區域林型的生長趨勢。在分析的過程中，我們嘗試考慮其地理位置以及各地區的迴歸係數相似情形，去結合方程式。在柳杉林型與檜木林型資料方面，北區及東區具有較相似的迴歸係數值，且在地理及氣候上的考量下，我們將這兩區結合為一個新的資料庫。中區的樣區較少，且靠近南區的預測曲線，因此在地理及氣候上的考量下，中區及南區結合成另一個資料庫。各區域包括的林區：東、北區為台東處、花蓮處、羅東處和新竹處等 4 個林區，中、南區為東勢處、南投處、嘉義處、屏東處、台大實驗林、興大惠蓀林場、林試所六龜研究中心等 4 個林區和 3 個實驗林。

所得之以林齡為基礎的蓄積量迴歸式如表 2 所示，本研究所採用的非線性迴歸式的 R^2 是用修正的平方和來計算，所得結果可與平均材積相比較，顯示蓄積量顯著地會隨著年齡而改變。表 2 的結果可用來做預測或模擬的使用，但因其使用的模式是屬於簡單型的，只有年齡一個變數，僅較適合做大面積森林的推測，其使用限制條件為儘可能在如圖 1 和圖 2 所示原始資料分配的範圍。不同時期每公頃森林蓄積量的變化趨勢，會因林型及地區而有所差異(圖 1 和圖 2)。由此得知，台灣中、南區所栽植的柳杉林較東、北區生長好。從檜木蓄積量預測圖估測，大約在 40 年生前，台灣中、南區所栽植的檜木林亦較東、北區生長好，但因樣區數的不足，而無法進一步推估東、北區 40 年生後之蓄積量生長情形。

戚啓勳(1980)指出颱風風向在北半球是以逆時鐘方向繞入中心，而過去資料統計颱風中心登入台灣本島以宜蘭、花蓮間為次數最多，且任何颱風路徑下台灣北部及東北部都可產生相當大的風力，若颱風中心穿過北部或北方近海，產生之風速會更為猛烈，除非颱風直接穿過台灣中部，否則中央山脈以西的中部地區，受颱風影

響最小。由此可知，侵襲台灣的颱風風向以逆時鐘方向旋轉繞入中心，而台灣又有中央山脈屏障，故台灣東部及北部所受之威脅較西部及南部為大。此外，冬季時台灣北部受東北季風之影響大於南部。因此，台灣東、北區人工林較台灣中、南區者容易受到風害干擾而影響其生長。

表 2 檜木及柳杉人工林區域性 Mitscherlich 方程式的迴歸係數

Table 2 Regression coefficients for Mitscherlich formula relating the accumulation of wood volume ($m^3 ha^{-1}$) to stand age for Cypress and Cryptomeria plantations.

方程式	區域性資料	m_1	m_2	m_3	R^2	n
柳杉						
(1)	東區及北區	553.8	1.0861	0.0314	0.307	58
(2)	中區及南區	14024.8	0.9977	0.000803	0.373	12
檜木						
(3)	東區及北區	37624.3	1.0018	0.000293	0.490	42
(4)	中區及南區	729.5	1.0997	0.0241	0.633	26

註：本非線性迴歸式的 R^2 值是用修正的平方和(corrected sum of square)。

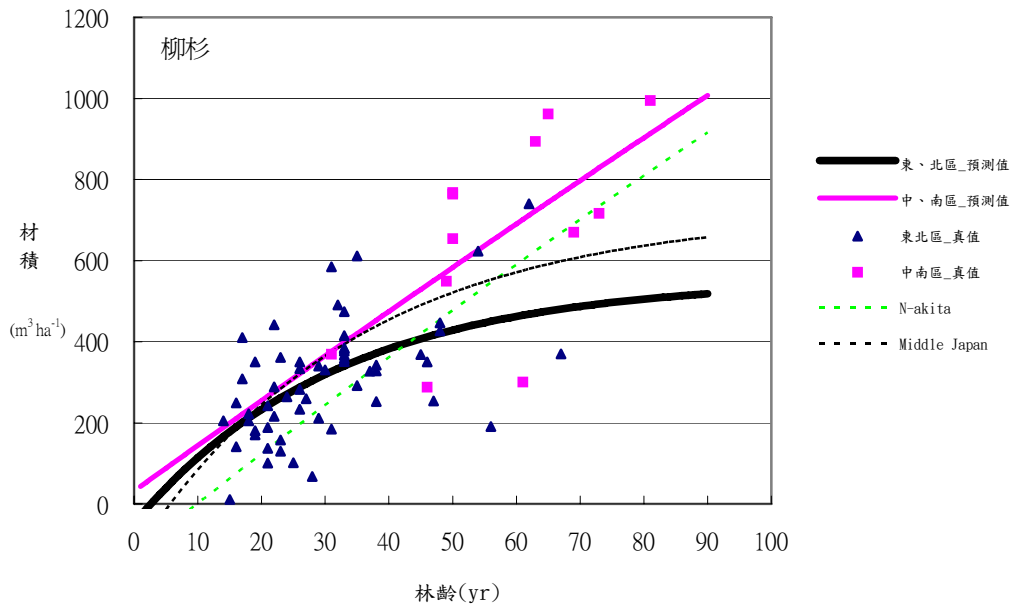


圖 1 柳杉人工林蓄積量預測模式圖

Fig. 1 Pattern of accumulation of volume per hectare over time in Cryptomeria plantation predicted by equations.

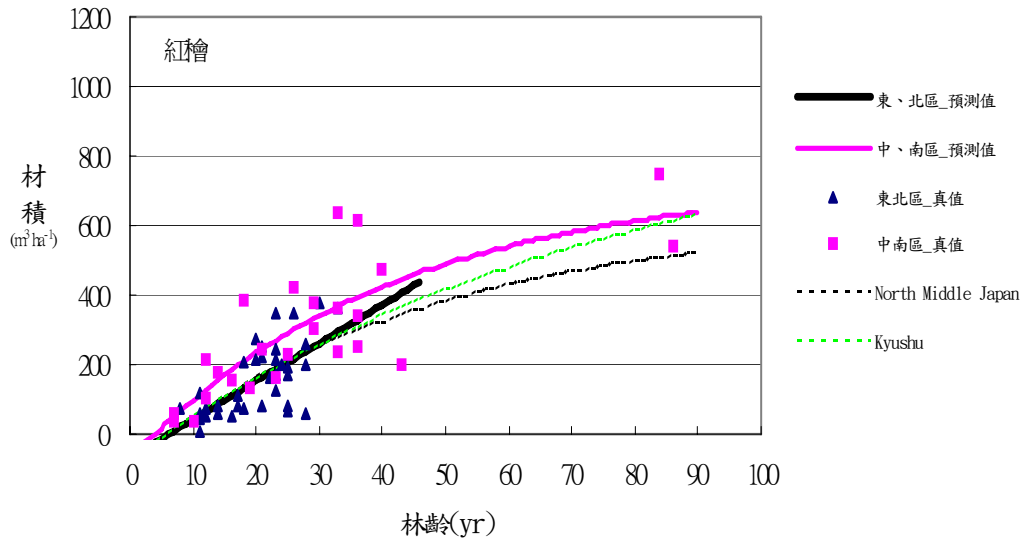


圖 2 檜木人工林蓄積量預測模式圖

Fig. 2 Pattern of accumulation of volume per hectare over time in Cypress plantation predicted by equations.

本研究亦加入了日本學者的研究成果 (Fukuda et al., 2003)，並選擇迴歸係數值相近的日本區域以比較其差異。由圖 1 和圖 2 可知，台灣中、南區的柳杉人工林蓄積量預測與日本的秋田北部(N-Akita)相比，生長較好；但台灣東、北區較日本為差。台灣中、南區的檜木人工林與日本的九州(Kyushu)相比，一開始林木生長速率較快，在 50 年生後生長速率有遞減的情形，因此在 90 年生左右，蓄積量則差異不大。

從 Fukuda et al.(2003)的研究報告中是無法詳細得到日本柳杉及扁柏人工林逐年生長量，故無法直接和台灣的生長量相比較。但是可以從本研究圖 1 和圖 2 比較迴歸曲線和樣本散佈情形以得知相對生長的好壞。在紅檜人工林方面，台灣迴歸曲線在日本迴歸曲線的上方，可推測台灣紅檜生長要比日本扁柏好。在柳杉人工林方面，台灣樣本散佈於日本迴歸曲線下方的樣本數較多，

可推測台灣柳杉生長要比日本柳杉差。

二、柳杉及檜木人工林碳吸存量之推算

台灣各區域柳杉及檜木人工林面積及 1995 年和 2005 年蓄積量估算值如表 3 所示。其中，非國有林部份因為地面樣區很少，故沒有配製年齡-蓄積量曲線，其蓄積量預測值是使用另兩個區域的迴歸曲線預測後再取平均值。無論是柳杉或檜木人工林，在林型面積方面東、北區皆較中、南區為多，而在每公頃蓄積量方面，東、北區皆較中、南區為少。本研究在使用第三次森林資源調查資料，作材積的推算時，會因各樣區的調查資料年度不同，而作材積推算的修正，使其值代表同一年度的蓄積量。同時本研究是針對全省人工柳杉林與檜木林的蓄積量進行推估，因此所得之值會大於林務局僅推估國有林事業區的蓄積量。

表 3 各區域柳杉及檜木人工林面積及蓄積量

Table 3 Area and stock for Cypress and Cryptomeria plantations by region

	面積 (10 ³ ha)	1995 年蓄積量 (m ³ ha ⁻¹)	2005 年蓄積量 (m ³ ha ⁻¹)
檜木林型			
東、北區	14.32	74.08	143.05
中、南區	10.58	88.73	175.39
非國有林	0.15	80.36	156.91
柳杉林型			
東、北區	30.66	266.27	328.43
中、南區	10.47	401.96	511.93
非國有林	5.16	170.93	279.91

碳吸存量可由柳杉及檜木人工林總蓄積量推估，由式(2)估算，得分區加權平均碳貯存量、碳吸存量及分區加權平均碳吸存量。若再將碳吸存量乘上碳與二氧化碳的重量比 3.67，即可進一步得到二氧化碳吸存量。本研究針對柳杉及檜木林型蓄積量，並假設林地面積無變更及無砍伐的狀況下，應用林務局第三次台灣森林資源調查資料為基礎線，以進行碳吸存量的推估。表 4 顯示，若以 IPCC 所建議的轉換係數值來估算全省柳杉及檜木人工林從 1995 至 2005 年的淨碳吸存量，則較採用國內轉換係數所估測的結果，柳杉人工林會高出 76.06×10^3 Mg，檜木人工林則會高出 38.37×10^3 Mg，兩者之和為 114.43×10^3 Mg。由此可見，轉換係數的差異，對碳吸存量會產生顯著的影響。

日本柳杉與台灣柳杉人工林的綜合後轉換係數 ($BD \cdot EF \cdot C_{con}$) 分別為 0.274 ($0.319 \cdot 1.72 \cdot 0.5 = 0.274$) 和 0.265 ($0.302 \cdot 1.754 \cdot 0.5 = 0.265$)，二者相近。在檜木人工林方面，台灣紅檜的 BD 有 0.333 及 0.387 兩個轉換值(王松永, 2002)，前者較常被使用，但是如果加上後者的轉換係數值，則日本扁柏的綜合後轉換係數值 0.310 ($0.360 \cdot 1.72 \cdot 0.5 = 0.310$) 介於台灣紅檜的綜合後轉換係數值 0.275 ($0.333 \cdot 1.65 \cdot 0.5 = 0.275$) ~ 0.312 ($0.378 \cdot 1.65 \cdot 0.5 = 0.312$) 範圍內。

使用國內轉換係數所估算的分區加權平均碳吸存量與日本學者研究結果(Fukuda et al., 2003)相比，台灣的柳杉和檜木二者分別為 2.07 及 2.10 Mg C ha⁻¹per year，而日本的柳杉和扁柏各為 2.66 和 2.27 Mg C ha⁻¹per year(不扣除伐採收穫量)。本省的柳杉及檜木人工林分區加權平均碳吸存量，與日本相比，在柳杉部分較低，在檜木部分則視採用的轉換係數而定。台灣檜木人工林在材積生長量方面略優於日本扁柏，但在表 4 中的碳吸存量为略低於日本扁柏，其主要原因為台灣檜木人工林是以紅檜為主，而日本扁柏的綜合後轉換係數 0.310 較台灣紅檜常用的綜合後轉換係數 0.275 為大。但是如果考慮另一個 BD 值為 0.378，則台灣檜木人工林的碳吸存量會大於日本扁柏人工林的碳吸存量。因此，國內研究值得在檜木人工林做較精確的調查。

此外，亦可使用日本的碳吸存量除以 C_{con} 、EF 和 BD 等轉換係數以求得生長量的概略推測值(因日本柳杉的 EF 值會隨年齡而改變，但只能引用平均 EF 值，故無法求得確切的生長量值)。台灣柳杉人工林碳吸存量为 2.07 Mg C ha⁻¹ year⁻¹，綜合後的轉換係數為 0.265，而日本柳杉人工林碳吸存量为 2.66 Mg C ha⁻¹ year⁻¹(不扣除砍伐量)，綜合後的轉換係數為 0.274，故可推測台灣柳杉生長量 $7.81 \text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{year}^{-1}$ 要比日本柳杉約 $9.71 \text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{year}^{-1}$ 差。

台灣柳杉與檜木人工林每公頃蓄積量與碳吸存量估算值如表 5 所示，1990-2005 年檜木與柳杉人工林單位面積蓄積量的總平均值各為 99.93 與 305.61 m³ ha⁻¹，柳杉人工林的平均每公頃生長量較檜木人工林為高，但柳杉及檜木人工林的生長率有逐年下降的趨勢，尤其是在

台灣柳杉人工林部份，2004 年的生長率預測值只剩 2.01%。

結論

國內前人研究常使用固定的生長率來推算蓄積量的增加情形，進一步求得碳吸存量。但該公式會以複利方式增加蓄積量，不適宜做長期預測，台灣森林資源調查的相隔時間太長，因此採用固定的生長率推算法具有較大的風險。

本研究使用林齡-蓄積量模式估算森林碳吸存量，推估得知台灣柳杉與檜木人工林 1990-2005 年的平均蓄積量各為 305.61 和 99.93 m³ ha⁻¹，柳杉的平均生長量較檜木為高，但柳杉及檜木人工林的生長率有逐年下降的趨勢。1995-2005 年碳吸存方面，以 IPCC 轉換值估算柳杉人工林的碳吸存量为 171.91 × 10³ Mg C per year，檜木為 91.01 × 10³ Mg C per year；以國內轉換係數去估算柳杉人工林的碳吸存量为 95.85 × 10³ Mg C per year，檜木為 52.64 × 10³ Mg C per year。

台灣森林因禁伐，所以林分年齡只會增加，無法藉由更新而降低年齡。一般而言，生長率為一動態值，會隨著年齡增加而減少，而本研究亦顯現出生長率有下降之趨勢。尤其是在台灣柳杉人工林部份，2004 年的生長率預測值只剩 2.01%，其主要原因為台灣柳杉人工林已進入成熟期，故其年生長量明顯地逐年遞減。因此，如何針對台灣柳杉人工林進行撫育與更新作業以延續其生長為一重要的議題。檜木人工林的年碳吸存則是逐年增加，其可能原因為檜木人工林目前還在年輕階段，故其年生長量還有些微上升的趨勢。檜木人工林目前每公頃的生長量已有逐漸超越柳杉的趨勢，值得進行疏伐、修枝和施肥等撫育工作，以期生產高形質的林木，因為未來林產品也有可能算入碳吸存量。

在各年度面積增減方面，目前尚無法得到可信賴的數據，因此本研究假設林地面積不變來進行各林型蓄積量的推算，但亦希望日後第四次森林資源調查或更詳盡的研究之發展出來，再配合其資料做完善的森林蓄積量及碳吸存之分析。此外，建議台灣森林資源調查時，對於國有林和非國有林應採取一致的調查方法，皆要製作林相圖，以利於各林型面積和蓄積量的估算。調查的間隔年數能夠固定，並予縮短，以利於生長量和碳吸存量的估算。

本研究所得之結果，可提供相關領域的研究人員或森林經營管理者作為參考。並希望日後國內轉換係數發展較為完善時，可將兩者相互配合，以建立一套能合理地估算我國森林碳吸存量的系統。

表 4 1995-2005 年台灣檜木及柳杉人工林估算的碳吸存量

Table 4 Calculated carbon stocks for Cypress and Cryptomeria plantations in Taiwan for 1995-2005

林 型	1995				2005				1995-2005	
	面積 (10 ³ ha)	總蓄積量 (10 ³ m ³)	碳貯 存量 (Mg C)	加權平均 ⁽¹⁾ 碳貯存量 (Mg C ha ⁻¹)	面積 (10 ³ ha)	總蓄積量 (10 ³ m ³)	碳貯 存量 (Mg C)	加權平均 ⁽¹⁾ 碳貯存量 (Mg C ha ⁻¹)	碳吸存量 (Mg C per year)	加權平均 碳吸存量 (Mg C ha ⁻¹ per year)
IPCC 係數⁽²⁾										
柳杉	46.29	13254.44	6295.86×10 ³	136.01	46.29	16873.57	8014.95×10 ³	173.15	171.91×10 ³	3.71
檜木	25.05	2011.75	955.58×10 ³	38.15	25.05	3927.82	1865.72×10 ³	74.48	91.01×10 ³	3.63
國內係數⁽³⁾										
柳杉	46.29	13254.44	3510.49×10 ³	75.84	46.29	16873.57	4469.03×10 ³	96.54	95.85×10 ³	2.07
檜木	25.05	2011.75	552.68×10 ³	22.06	25.05	3927.82	1079.07×10 ³	43.08	52.64×10 ³	2.10

註：(1) 代表加權平均是以各區域的面積為權重。

(2) IPCC 的係數為 $V_{\text{whole/stem}}=1.9$ ， $VW=0.5$ ， $C_{\text{con}}=0.5$ (邱祈榮、王瑞閔，2006)。

(3) 國內以前係數紅檜為 $V_{\text{whole/stem}}=1.65$ ， $VW=0.333$ (李國忠等，2003；林國銓、何淑玲，2005)；柳杉為 $EF=1.754$ ， $BD=0.302$ ， $C_{\text{con}}=0.5$ (李訓煌，1978；馬子斌，1992；王松永，2002)； C_{con} 採用 0.5。

表 5 1990-2005 年台灣檜木及柳杉林型單位面積蓄積量及碳吸存量

Table 5 Calculated accumulation of wood volume per hectare ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) and carbon sequestration for Cypress and Cryptomeria forest types in Taiwan for 1990-2005

年份	檜木林型	生長量	生長率	碳吸存量	柳杉林型	生長量	生長率	碳吸存量
	單位面積蓄積量				單位面積蓄積量			
	($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	(%)	($\text{Mg C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)	($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	(%)	($\text{Mg C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)
1990	46.61	5.79	12.42%	1.59	240.99	9.45	3.92%	2.50
1991	52.40	5.77	11.00%	1.58	250.44	9.26	3.70%	2.45
1992	58.17	7.34	12.61%	2.02	259.70	9.07	3.49%	2.40
1993	65.51	7.30	11.14%	2.00	268.77	8.88	3.30%	2.35
1994	72.80	7.50	10.30%	2.06	277.65	8.70	3.13%	2.30
1995	80.30	7.40	9.21%	2.03	286.35	8.52	2.98%	2.26
1996	87.70	7.76	8.85%	2.13	294.87	8.35	2.83%	2.21
1997	95.46	7.73	8.10%	2.12	303.22	8.19	2.70%	2.17
1998	103.19	7.64	7.40%	2.10	311.41	8.03	2.58%	2.13
1999	110.83	7.77	7.01%	2.13	319.44	7.88	2.47%	2.09
2000	118.60	7.69	6.48%	2.11	327.32	7.72	2.36%	2.05
2001	126.29	7.60	6.02%	2.09	335.04	7.58	2.26%	2.01
2002	133.89	7.51	5.61%	2.06	342.62	7.44	2.17%	1.97
2003	141.41	7.55	5.34%	2.07	350.06	7.30	2.09%	1.93
2004	148.96	7.83	5.26%	2.15	357.36	7.17	2.01%	1.90
2005	156.79				364.53			

結論

國內前人研究常使用固定的生長率來推算蓄積量的增加情形，進一步求得碳吸存量。但該公式會以複利方式增加蓄積量，不適宜做長期預測，台灣森林資源調查的相隔時間太長，因此採用固定的生長率推算法具有較大的風險。

本研究使用林齡-蓄積量模式估算森林碳吸存量，推估得知台灣柳杉與檜木人工林 1990-2005 年的平均蓄積量各為 305.61 和 99.93 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ，柳杉的平均生長量較檜木為高，但柳杉及檜木人工林的生長率有逐年下降的趨勢。1995-2005 年碳吸存方面，以 IPCC 轉換值估算柳杉人工林的碳吸存為 $171.91 \times 10^3 \text{Mg C per year}$ ，檜木為 $91.01 \times 10^3 \text{Mg C per year}$ ；以國內轉換係數去估算柳杉人工林的碳吸存則為 $95.85 \times 10^3 \text{Mg C per year}$ ，檜木為 $52.64 \times 10^3 \text{Mg C per year}$ 。

台灣森林因禁伐，所以林分年齡只會增加，無法藉由更新而降低年齡。一般而言，生長率為一動態值，會隨著年齡增加而減少，而本研究亦顯現出生長率有下降之趨勢。尤其是在台灣柳杉人工林部份，2004 年的生長率預測值只剩 2.01%，其主要原因為台灣柳杉人工林已進入成熟期，故其年生長量明顯地逐年遞減。因此，如何針對台灣柳杉人工林進行撫育與更新作業以延續其生長為一重要的議題。檜木人工林的年碳吸存則是逐年增加，其可能原因為檜木人工林目前還在年輕階段，故其年生長量還有些微上升的趨勢。檜木人工林目前每公頃的生長量已有逐漸超越柳杉的趨勢，值得進行疏伐、修枝和施肥等撫育工作，以期生產高形質的林木，因為未來林產品也有可能會算入碳吸存量。

在各年度面積增減方面，目前尚無法得到可信賴的數據，因此本研究假設林地面積不變來進行各林型蓄積量的推算，但亦希望日後第四次森林資源調查或更詳盡的研究之發展出來，再配合其資料做完善的森林蓄積量及碳吸存之分析。此外，建議台灣森林資源調查時，對於國有林和非國有林應採取一致的調查方法，皆要製作林相圖，以利於各林型面積和蓄積量的估算。調查的間隔年數能夠固定，並予縮短，以利於生長量和碳吸存量的估算。

本研究所得之結果，可提供相關領域的研究人員或森林經營管理者作為參考。並希望日後國內轉換係數發展較為完善時，可將兩者相互配合，以建立一套能合理地估算我國森林碳吸存量的系統。

誌謝

本研究承行政院農委會林務局經費補助（95 農科-12.3.5-務-e2）。此外，蘇柏翰、吳思儀及李威震等研究生協助研究進行，溫育芳老師及黃鶯小姐在文稿撰寫上，亦給予作者莫大助益，在此表達由衷的謝意。

參考文獻

- 王立志。1996。氣候變遷對台灣林業的衝擊與適應。氣候變遷衝擊評估與因應策略建議研討會論文集 pp.215-229。台北。
- 王兆桓。2006。森林資源調查方法之評估。行政院農業委員會林務局委託研究計畫系列 95 農科-12.2.3-務-e1(5)。台北。
- 王松永。2002。商用木材（增訂本）。p.377。中華林產事業協會。台北。
- 王義仲、林俊成。2006。全球森林資源及碳匯評估。陸生圈碳匯評估及管理策略研討會 pp.5-1~5-12。台北。
- 李芝珊、萬國華。1996。全球變遷對人體健康之影響與因應策略。氣候變遷衝擊評估與因應策略建議研討會論文集 pp.365-380。國立臺灣大學全球變遷中心。
- 李訓煌。1978。不同齡級柳杉林之生長及樹木生物量生產之研究。國立臺灣大學森林學研究所碩士論文。p.83。台北。
- 李國忠、林俊成、陳麗琴。2000。台灣杉人工林碳吸存潛力及其成本效益分析。台灣林業科學 15(1):115-123。
- 李國忠、林俊成、林麗貞。2003。森林生態系林分經營策略之碳貯存效果與環境貢獻。氣候變遷對森林之二氧化碳吸存影響研討會論文集 pp.13-27。台北。
- 林俊成、李國忠、林裕仁。1999。柳杉人工林碳貯存效果與適應成本研究。臺大實驗林研究報告 13(1):51-60。
- 林俊成、李國忠。2005。京都議定書生效後之森林資源碳吸存策略。台灣林業 31(3):12-19。
- 林俊成、李國忠。2005。森林資源碳吸存監測計畫。台灣林業 31(5):4-11。林務局。1995。第三次台灣森林資源及土地利用調查。p.258。行政院農業委員會林務局。台北。
- 林務局。2006。森林永久樣區調查工作手冊。p.27。行政院農業委員會林務局森林企劃組。台北。
- 林國銓、何淑玲。2005。由生物量推估台灣不同林分之碳貯存量。森林經營對二氧化碳吸存量之貢獻研討會論文集 pp.97-108。台北。
- 林裕仁、李國忠、林俊成。2002。以生物量與材積關係式推估台灣地區森林林木碳吸存量之研究。臺大實驗林研究報告 16(2):71-79。台北。
- 邱祈榮、王瑞閔。2006。台灣地區國有林地各林型碳吸存量的估算。陸生圈碳匯評估及管理策略研討會 pp.4-1~4-18。台北。
- 馬子斌、陳政靜、熊如珍、黃清吟、陳欣欣、翟思湧。1992。重要商用木材之一般性質。臺灣省林業試驗所林業叢刊第 1 號。p.204。
- 戚啓勳。1980。颱風。p.215。季風出版社。台北。
- 張彬、管立豪、李姿瑩。2005。森林資源碳吸存資料庫建置初步成果。農政農情 156 期 pp.33-39。
- 劉業經、歐辰雄、呂福原。1994。臺灣樹木誌。p.925。

- 國立中興大學農學院出版委員會。台中。
- 簡慧貞。2006。植樹造林與碳匯管理策略。陸生圈碳匯評估及管理策略研討會 pp.2-1~2-30。台北。
- Fang, J.Y., A.P. Chen, C.H. Peng, S.Q. Zhao, and L.G. Ci (2001) Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science* 292: 2320-2322.
- Fukuda M., T. Iehara, and M. Matsumoto (2003) Carbon stock estimates for sugi and hinoki forests in Japan. *Forest Ecology and Management* 184:1-16.
- IPCC (2003) Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry.
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf.htm>

96年08月03日投稿

96年11月09日接受