

森林資源碳吸存監測計畫

文 ■ 林俊成 ■ 林業試驗所林業經濟組助理研究員（通訊作者）

李國忠 ■ 台灣大學森林資源暨環境學系教授

一、前言

近二百年來，工業革命促進經濟快速繁榮與發展、人口急速增加，使得能源耗用量大增，對環境產生極大的衝擊，導致環境污染問題日趨嚴重。人類大量使用石化燃料及改變土地利用（熱帶雨林大量開墾、伐木），造成大氣中二氧化碳濃度由工業革命前之280ppm上升到現在的358ppm。根據1996年聯合國氣候變化政府間專家委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change；IPCC）的評估報告指出，人類活動所排放的溫室氣體，如不採取任何防治措施，則預估平均地面氣溫於2100年時將比1990年時增加1~3.5°C，海平面將上升15~95公分；其後果將是氣候系統發生變遷，導致暴雨或乾旱極端事件頻傳，區域降水型態發生變化，造成水資源分配不均或不足，海平面水位上升，易使低窪地區海水倒灌，積水不退；海流改變，漁場轉移等衝擊，嚴重影響人類及環境的健康，導致嚴重的經濟成本損失（IPCC, 1996）。

陸地生態系中，森林生態系對二氧化碳吸收與貯存具重要的貢獻，林木為二氧化碳

主要吸收來源，藉由林木本身生理特性進行光合作用，吸收大氣中的二氧化碳並轉化為氧氣，也進行呼吸作用排放二氧化碳，所貯存的淨二氧化碳量即轉化為材積生長蓄積部分。森林的土壤及枯枝落葉層也有貯存二氧化碳的功效，因此在全球溫室效應及氣候變遷中，森林資源擔負二氧化碳貯存及吸收的重要角色。在世界為「地球村」的理念下，1997年12月「京都議定書」（Kyoto protocol）制定了各國溫室氣體排放的抑制目標。具體規範了38個工業國家2008到2012年之溫室氣體排放的減量標準。其中針對1990年以後所進行之造林、再造林及森林伐採之二氧化碳吸收或排放之淨值，可併入排放減量值計算。同時在聯合減量（Activities Implemented Jointly; AIJ）及清潔發展機制（Clean Development Mechanism; CDM）的架構下，森林資源所吸存的碳量，日後將成為一種可交易的產品。在第九次締約國大會（COP9）中，通過了「清潔發展機制之下的造林和再造林計畫活動的模式和程序」（Modalities and procedure for afforestation and reforestation project activities under the



Clean Development Mechanism) , 內容即明確說明：參與清潔發展機制之下的造林和再造林計畫活動的一方，應在計畫活動設計書中列入監測計畫。因此如何精確監測與估算森林資源碳吸存量，以期建立國際性的碳交易體系，便成為一個重要的課題。

Winrock國際農業發展機構 (Winrock International Institute for Agricultural Development) 設計出一套森林資源的碳監測、調查與分析計畫，以監測森林和農地造林的碳吸存量，目前在百里斯 (Belize)、玻利維亞 (Bolivia)、巴西 (Brazil)、菲律賓 (Philippines)、印尼 (Indonesia) 和美國 (United States) 等國已開始進行，並有初步結果 (MacDicken, 1997; Winrock, 1999)。本文首先說明森林資源碳吸存概念，並以Winrock機構所發展的森林資源碳監測計畫之方法進行說明與探討，最後以印尼碳監測計畫實施情形為例說明。

二、森林資源碳吸存效果

(一) 全球碳循環中森林的角色

全球碳循環中，陸地生態系及海洋對大氣中的碳具有吸收與固定的功能，而石化燃料的燃燒及土地利用的改變為大氣中碳的主要來源。1995年IPCC分析全球的碳循環，以二氧化碳的發生源以化石 (fossil fuel) 燃料的燃燒和水泥生產的排放量為最高，為 $5.5 \pm 0.5\text{Gt}$ ($1\text{Gt}=10^{15}\text{g}$)，熱帶地區的土地使用改變的淨排放量為 $1.6 \pm 1.0\text{Gt}$ ，兩者所排放的二氧化碳有 $3.3 \pm 0.2\text{Gt}$ 滯留在大氣中，此為大氣二氧化碳濃度增加的來源。 $2.0 \pm 0.8\text{Gt}$ 被海洋所吸存，僅有因北半球森林的再生所吸存 $0.5 \pm 0.5\text{Gt}$ ，但是在其他陸地的吸收匯所吸存的 $1.3 \pm 1.5\text{Gt}$ 中，許多研究認為有部分乃由於森林資源所提供的。森林資源在此循環中的貯存與流動，主要由淨光合作用量所貯存的碳量及土地使用改變 (如伐採及濫墾) 所造成碳的釋放。

表1 全球碳循環

單位：Gt/年

項 目	IPCC 1992	IPCC 1994	IPCC 1995
二氧化碳發生源			
(1)化石燃料的燃燒和水泥生產的排放	5.5 ± 0.5	5.5 ± 0.5	5.5 ± 0.5
(2)熱帶地區的土地使用改變的淨排放量	1.6 ± 1.0	1.6 ± 1.0	1.6 ± 1.0
(3)人為的排放合計=(1)+(2)	7.1 ± 1.1	7.1 ± 1.1	7.1 ± 1.1
碳貯存匯			
(4)大氣中的貯存量	3.4 ± 0.2	3.2 ± 0.2	3.3 ± 0.2
(5)海洋的吸存	2.0 ± 0.8	2.0 ± 0.8	2.0 ± 0.8
(6)因北半球森林的再生所吸存	未計算	0.5 ± 0.5	0.5 ± 0.5
(7)其他陸地的吸收匯=(3)-((4)+(5)+(6))	1.7 ± 1.4	1.4 ± 1.5	1.3 ± 1.5
(如二氧化碳與氮的施肥效果、氣候效果)			

▲ 資料來源：IPCC (1996)

台灣地區在1990年溫室氣體總排放量約為149百萬公噸，其中以二氧化碳排放量占82.9%為最高，其次為甲烷占15.5%，氧化亞氮占1.6%。其來源以化石燃料所排放的二氧化碳量最高，約占二氧化碳總排放量的91%（112.7百萬公噸），水泥生產之排放量居次，約6%（9.2百萬公噸），土地使用及森林變更（如：非永續性伐林）共釋放出約1.8百萬公噸，廢耕後的農地土壤釋出2百萬公噸。1995年時，我國能源部門所排放的二氧化碳總量為163百萬公噸（全世界排名第24位），約占全球排放總量的0.5%，每年每人平均排放量為7.63公噸（排名第36名）。根據經濟部1996年5月公布之「能源政策白皮書」所推估我國未來初級能源總需求及二氧化碳排放趨勢，依現階段各項已規劃之經建目標與能源使用趨勢，在不考慮新增各項能源措

施之情形下，預估2000年我國二氧化碳的總排放量為232百萬公噸，較1990年增加106%（陳雄文、賴麗瑩，1997；楊任徵，1998）

（二）森林資源與大氣間的碳流動

影響森林資源和大氣間碳的循環，主要為植被（林木）、腐植質（枯枝落葉）、森林土壤、林產品的貯存與釋放（圖1），將這四類加總便為森林部門的碳吸存量。

林木藉由本身生理特性進行光合作用吸收大氣中二氧化碳，並釋放出氧氣，根據光合作用反應式，植物體生物量增加1公噸，需要1.6公噸的二氧化碳，同時釋放1.2公噸的氧氣。所貯存的二氧化碳即轉化為有機碳形式儲存於植物體內，植物體所貯存的碳量，會隨林齡增加而增加，不同植物有不同的生長量，增加量依植物體之生長率、晉級生長率及枯死率而異。植物體部分成為枯枝落葉而

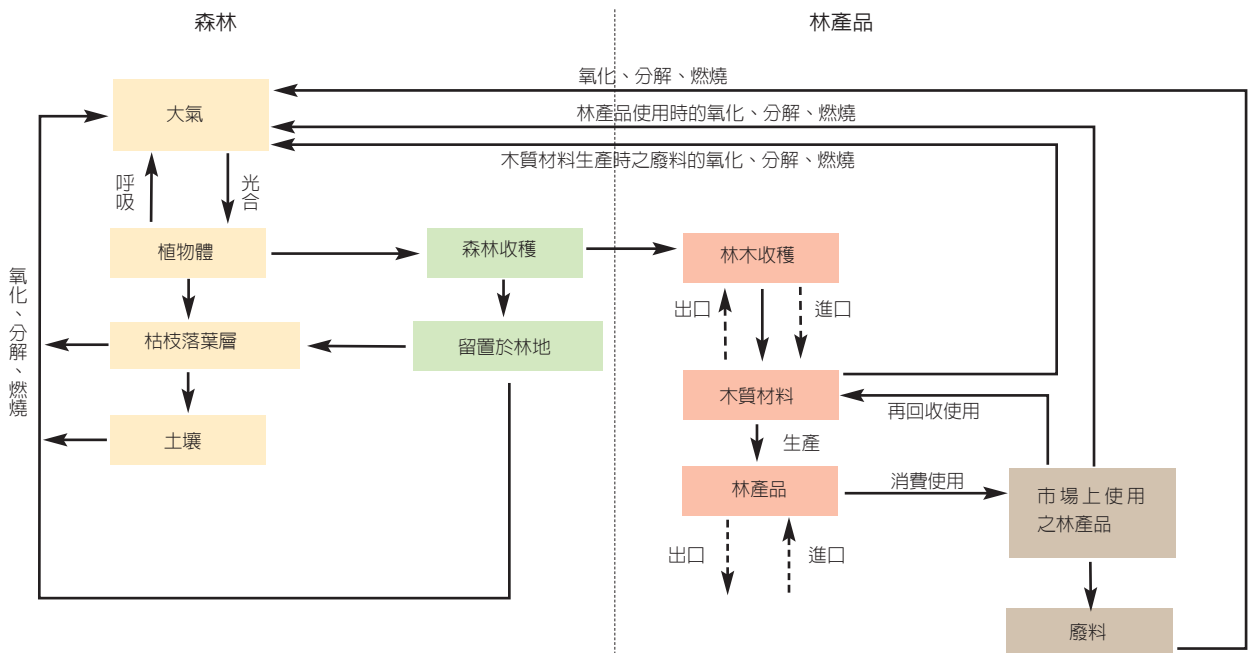


圖1 森林資源與大氣間碳吸存與釋放流向



將碳貯存於林地表面，部分直接分解、腐爛、散失而將碳回歸於大氣中，部分分解成為土壤有機質，土壤有機質所貯存的碳量有部分直接分解、腐爛、散失而將碳回歸於大氣中，當林木已屆輪伐期時，將森林中的林木伐除而收穫林木材積，部分留置於林地成為殘材而分解將碳回歸大氣，林木收穫材積，加上進口減去出口的部分，便成為木質材料供國內林產工業加工使用，在加工過程中，有部分成為廢料，經棄置、燃燒，而釋放碳回大氣，大部分成為最終產品而供人們消費使用，在市場上最終產品的使用，尚包括進口扣除出口的部分，最終產品在使用時，有各種不同的形式，如製材、合板、其他木製品、紙及紙製品等，有其不同的使用壽命，使用的產品當屆使用壽命時，有部分可再循環利用，成為木質材料的再利用，生產為其他林產品，而無法再循環利用的部分，則成為廢棄物，便將所貯存的碳釋放到大氣，當然在使用產品時，也有部分碳的釋放產生 (Winjum *et al.*, 1998; 林俊成等, 2000)。

三、森林資源碳監測計畫內容及實施方法

依據Winrock機構之碳監測計畫工作手冊 (MacDicken, 1997)、野外試驗方法 (Winrock International, 1999) 及其他監測相關研究說明監測計畫的內容及實施方法。

(一) 基本資料的建立

1. 分析資料需求

不同的監測對象及目標，對資料型態的要求也不同，在進行碳監測時，主要碳庫 (carbon pools) 為地上部生物量、地下部生物量、土壤、枯枝落葉層，不同碳庫在估算時，對資料的需求也不同，因此在樣區設置前，應先分析其資料需求，如應有海拔高、方位、坡向等地理位置資料，及土地使用、林型等林地分類資料及林木之樹種、林齡、樹高、胸高直徑等生物量估算的資料，土壤碳庫估算則需有土深、土型、土壤結構、含水率等資料。

2. 現有資料評估

對現有資料的收集，有助於樣區設置人力、物力的節省，資料來源包括遙測衛星資料、航空測量資料、野外調查資料、地圖及輔助資料。

(二) 調查設計

森林資源碳監測調查時，首重永久樣區的設置，永久樣區取樣調查，在調查設計則需考慮樣區的設置、取樣設計、樣本大小、圖籍準備、確定調查時間等。

1. 永久樣區的設置

永久樣區是指一個取樣單位在設置及記錄之後，可提供於相同位置，但是不同時間的狀態下對於發生的變化進行重覆的測量 (IUFRO, 1992; 馮豐隆、黃志成, 1993)。永久樣區在監測時有兩個主要的優點：對趨勢有較正確的資料。比其他方法較容易驗證，且可再測量。永久樣區資料庫系統的基

本架構（馮豐隆、黃志成，1993）：

（1）調查資料的可變化性，資料型態適合未來資料的加入。

（2）調查資料易更新及修正。

（3）重覆調查所得之資料易於對可能測量之誤差作檢核。

（4）資料的儲存須方便於其他研究人員之萃取，以利其研究之進行。

（5）所利用的程式對一般使用者必須是有效的，能及時獲得有效的測量資料和相關資訊。

永久樣區可有效率的評估過去時間碳吸存量的變化，但永久樣區必須限制在相同經營方式，以便長期監測及維持正確性。

2. 取樣設計

在取樣設計的方法主要有簡單逢機取樣、系統取樣、分層逢機取樣等。分層逢機取樣因在各分層實施逢機取樣，當成本固定時，可比其他取樣方法得到較精密的估計值，因此用在碳吸存量的調查取樣，每一分層可以植被型、土型、地形來區分，也可使用工具來定義分層，如使用衛星影像、航照圖和植被、土壤或地形圖，這些量測可用遙感探測影像來組合。而地理資訊系統（Geographic Information System; GIS）能自動決定分層的大小和排除區域或環域的大小。

3. 樣本大小

碳調查成本的多寡直接反應精密水準的高低，樣本數多雖可獲得較高的精密度，但所需成本也較高，由於每一分層和每個碳庫

需被適當的測量，而碳調查又較傳統森林調查來得複雜，因此決定樣本大小是相當重要的。在每一個碳庫的樣本大小是要分開來決定。在分層逢機取樣時，如從每一分層中抽取相同取樣率的樣本，也就是採用比例分配（楊榮啟，1987），但在碳調查時，樣本大小的決定，主要有兩種方式，一為在固定精密度水準下的最適樣區分配，二為在固定調查成本下的最適樣區分配。

4. 圖籍準備

圖籍資料的準備及建立，可減少測量時的誤差，提高其精密度。可使用衛星影像資料及地理資訊系統（GIS）的功能以減少可能的偏誤，並可正確地找出野外的永久樣區地點。

5. 調查時間

由於調查監測並非頻繁的，因此在連續性的監測，季節性循環的考量是必要的，調查的季節時間應固定以提高精密度。

（三）測量程序

1. 野外樣區定位

用來野外樣區定位的方法，主要有全球衛星定位系統及羅盤儀的使用，其中以GPS較為精準，目前已廣泛使用。因為GPS具有絕對座標定位之功能，在森林資源調查的層面上，可提供永久樣區定位之用，若配合具有結合處理分析空間與屬性資料功能的GIS，將使資料得以充分利用（馮豐隆、黃志成，1994）。

2. 地上部生物量的測量

測量地上部的生物量，可在永久樣區



中，針對林木及草本植物來調查，林木的生物量，可量測胸高直徑大於5公分的所有林木植被，並在胸高處做記號，以便下次的調查。較小徑級的林木和草本的次樣本，可使用較小的方形或圓框形樣區來調查，僅調查胸高直徑，或胸高直徑及樹高同時調查，藉生物量表來轉換為生物量值。但如果調查時無生物量表可進行轉換推估，則最好藉調查結果發展出個別的生物量表，雖然生物量的推估也可由林木材積來轉換，但直接用生物量表來轉換生物量比用材積來轉換生物量更為精密。另外也可使用生物量函數來轉換生物量。生物量函數的取得步驟：先發展林木重量表，定義樹或灌木的直徑範圍及生物量的類型（莖、莖和枝條或葉），再進行野外測量與生物量相關的測量（胸高直徑或樹高），經足夠的樣本數目（一般30 - 100株）所得的數據，並將在野外取得樣本測溼重及在實驗室以80°C乾燥再稱重，由重量、胸高直徑或樹高的資料，經迴歸分析，找出其關係。一般普遍的生物量類型函數，如表2所示。

3. 草本植物及枯枝落葉層的測量

在每一個永久樣區可設置4 - 6個方形或圓框形樣區，砍下樣區內所有植被進行稱量，測量其生物量。

4. 地下部生物量的測量

如經濟可行時，則直接挖掘根系來測量其生物量可得較精確的估計值，但由於地下部生物量的取得成本較高，因此大都以估計的方法，即地上部生物量與地下部生物量占某一定比例來推估，依樹種不同而異，比例大約在5:1左右，或根的生物量約占地上部生物量的10%或15%以上。

5. 森林土壤的測量

森林土壤碳的來源由枯枝落葉及動物和植物的遺體、碎屑或有機質形式存在於土壤中，以及由雨水帶入。森林土壤量測量，一般距地表土深30公分，採取土樣帶回實驗室。在室內自然風乾後，用5 mm的篩網篩選，經篩選之土樣用玻璃瓶或密封袋密封存放，做有機碳含量測定。在有機碳含量測定時，土壤容積密度的求算是需要的，容積密

表2 生物量類型函數

以年雨量分類之氣候型	函數	R ²
乾(<1500mm)	$y=34.4703-8.0671D+0.6589D^2$	0.67
潮溼(1500-4000mm)	$Y=38.4908-11.7883D+1.1926D^2$	0.78
	$y=\exp[-3.1141+0.97191n(D^2H)]$	0.97
溼潤(>4000mm)	$y=\exp[-2.4090+0.95221n(D^2HS)]$	0.99
	$H=\exp[1.0710+0.5677\ln D]$	0.61
	$Y=13.2579-4.8945D$	0.90
	$Y=\exp[-3.3012+0.9439\ln(D^2H)]$	0.90
	$H=\exp[1.2017+0.5627\ln D]$	0.74

註：Y為地上部生物量，H高度(m)，D為胸高直徑，S為單位木材密度(tons/m³)。

▲資料來源：MacDicken(1997)

度為總土壤單位體積土壤固體物之乾重量。礦質土壤A層之容積密度常為1.0 - 1.6 g/cm³ (胡弘道, 1988)。將取樣樣本放進100°C烘乾72小時, 乾燥後, 記錄乾土壤重W (g), 故容積密度BD (g/cm³) = W (g) / 344.77, 土壤碳含量 (t/ha) = BD × 300 kg/m² × C濃度 (%) × 10, 在實驗室使用Walkley - Black程序測定土壤有機碳。

另外, 土壤中碳含量隨著土壤深度的增加而減少, 並呈良好的函數關係 (李意德等, 1998): $C_c = 8.21665 \times H^{-0.865168}$, 式中: C_c為土壤各土層的碳含量 (%), H為土層深度。

四、森林資源碳監測計畫實例

以印尼農地造林體系之碳監測計畫, 分析林木地上部生物量、土壤、枯枝落葉層和草本植物的碳含量 (Winrock International, 1999; Roshetko *et al.*, 1999)。

(一) 計畫區域概述

計畫區域在印尼 (Indonesia) 蘇門答臘 (Sumatra) 之北Lampung省 (North Lampung Province), 本計畫區域稱為North Lampung benchmark area (NLBA), 面積有42,500公頃, 海拔高約100公尺, 坡度平緩, 土壤為排水良好、酸性、低肥力。土壤植物根系發展約1 - 1.5公尺, 土型為Oxisols/Ultisols (64%), Inceptisols (29%), Entisols (7%), 表層土壤型 (0 - 5公分) 的土壤質地, 61.7%為砂質, 24.9%為粉土, 13.4%為黏土, 次土型 (5 - 15公分)

的土壤質地, 71.1%為砂質, 6.19%為粉土, 22.7%為黏土, 表土到不滲透層土深大於100公分。年平均雨量約2,200mm, 雨量分布以5 - 6月最多 (>200mm), 1 - 4月為乾季, 雨量少於50mm, 年平均溫度約28°C。土地使用型態主要為稻米栽培及次生林, 此種土地使用型態為印尼普通的土地使用活動, 莊園的土地所有權面積較小 (通常0.25公頃左右), 除次生林外, 另栽植食用作物如樹薯、玉米、稻米、香料、藥用植物、椰子、檸檬樹等。

(二) 監測方法

監測方法主要是依據Winrock機構 (Winrock International Institute for Agricultural Development) 所發展之森林和農地造林的碳吸存量的監測方法。樣區建立和測量, 由於平均莊園面積為0.18公頃, 因此每個農地建兩個次樣區, 自次樣區中心, 在7.9公尺處或次樣區範圍1公尺內在東西南北建立四個點, 設圓框形樣區 (0.28m²), 測草本植物枯枝落葉 (直徑<5公分), 如框內為未熟樹或農業作物, 則不收集, 以減少對農業作物生產的衝擊, 及距表土30公分深採取為土壤樣本, 土壤容積密度取樣則採取為土深15公分, 地上部生物量的調查, 每一株胸高直徑大於5公分的植物, 測其胸高直徑, 並記錄種類名稱, 林木之外的作物如椰子、香蕉則測量高度。在每一個樣區, 至少測量2個次樣區及至少8個草本、枯枝、土壤樣本。草本、枯枝測其重量, 土壤經由5mm篩網篩選, 每個樣本乾燥至100°C,



使用Walkley - Black方法分析土壤有機碳。估計地上部生物量，則使用生物量函數，林木使用： $y = \exp[-2.134 + 2.530 \times \ln(D)]$ ；其他作物使用： $y = 4.5 + 7.7 \times H$ 。式中： y =地上部生物量， H =高度， D =胸高直徑。

(三) 監測結果

平均總碳貯存量為104 tC/ha，以土壤中所貯存為最多有60.8 tC/ha，地上部生物量所含碳量35.3 tC/ha次之。

五、碳監測計畫實施建議

森林資源碳監測計畫的實施有其必要，台灣尚屬起步階段，尚未見有現場監測的分析資料，是否可應用Winrock機構所發展的碳監測計畫調查與分析方法，值得進一步研究其可行性，在使用時有以下幾點值得注意：

(一) 生物量表及生物量函數的建立

目前在國內，關於林木生物量的研究僅

限於少數樹種，如柳杉、銀合歡、紅檜、台灣杉、桉樹等，生物量表更闕如，因此在進行碳監測時，生物量表或生物量函數的建立是相當必要的，可供日後長期監測之用。

(二) 永久樣區的有效利用

永久樣區的設置與維護，需投入相當大的金錢與人力，以往在森林經營調查時，永久樣區的設置，調查內容多以生長蓄積的調查為主，因此日後在調查，或可加上生物量及碳量的調查，以節省金錢的投入，增加永久樣區的使用效率。

(三) 碳含量轉換係數的精確化

地上部生物量碳含量的估算，主要由生物量經一連串的轉換係數來推估，在不同樹種之間，其單位生物量所含碳量也有差異，因此應就個別樹種，找出其轉換係數，以提高其精確度。🌲

參考文獻 (請逕洽作者)

