

試算台灣森林碳固定機能

文、圖 ■ 廖大牛 ■ 前行政院農業委員會林業處處長

一、前言

依各氣象站歷年年平均溫度（23.1℃）的偏差（圖1）及年平均降水量（1,985.4 mm）的偏差（圖2），1940年以後溫度上昇超出平均之上，如區分為前55年（平均22.8℃）與後55年（平均23.5℃）比較時相差0.7℃，倘以早期30年（註1）（平均22.6℃）與最近30年（平均23.6℃）比較時上昇1℃，若以1951年

為基準年時，西元年度Y的氣溫的上昇預測為 $T(^{\circ}\text{C}) = 23.1 + 0.013(Y - 1951)$ 。

至於年降水量偏差的週期，在早期為約60年溫和變化，目前縮短為十多年的短期激烈變化，降水量的變動大，表示地球溫暖化現象無例外的出現在台灣，本文試探討森林在台灣能吸收固定多少碳。

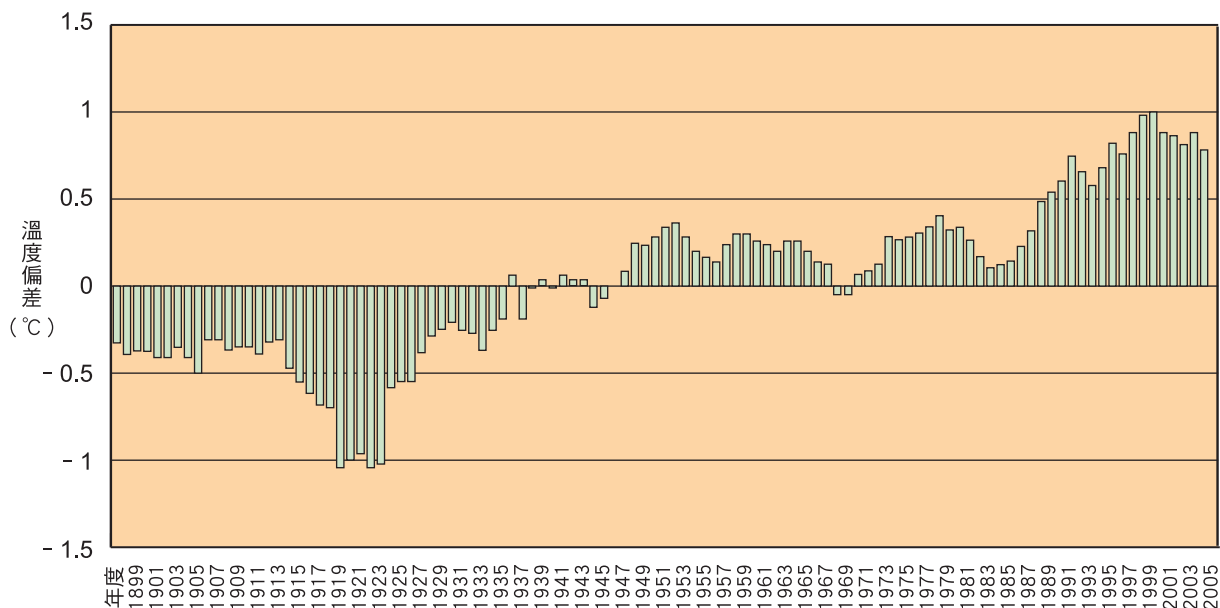


圖1 台灣各氣象站年平均溫度對總平均溫度之偏差。

註：總平均溫度為23.1℃，偏差經5項過濾消除雜訊。

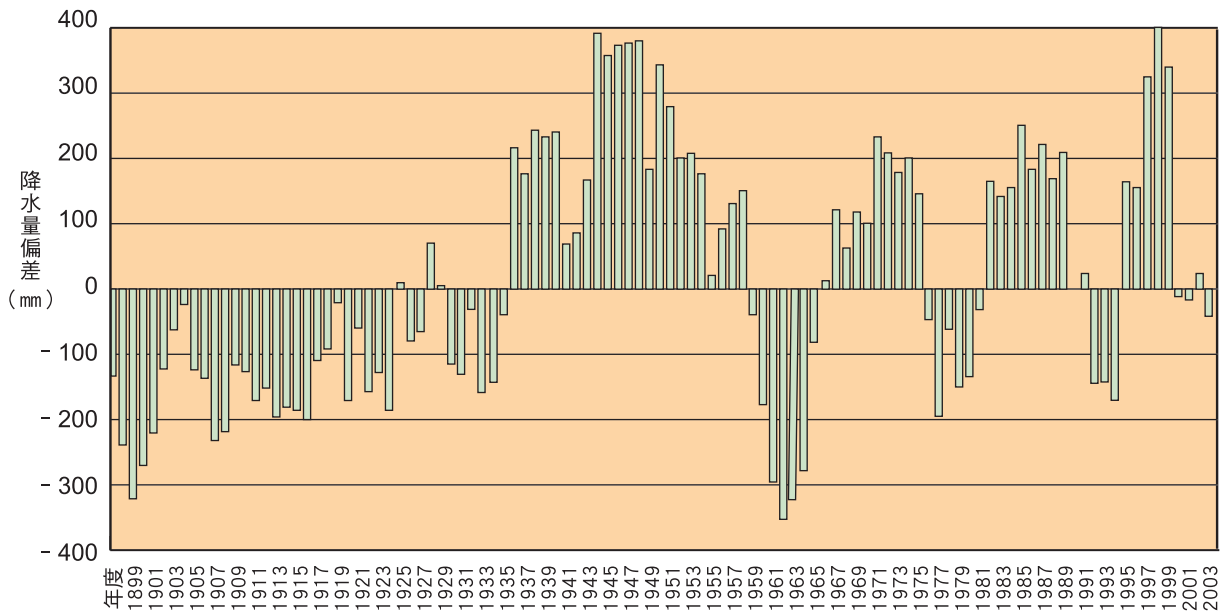


圖2 台灣各氣象站歷年年平均降水量對總平均的偏差週期。

註：總平均年降水量為1,985.4 mm，偏差以5項雜訊過濾（noise filtering）。

二、森林固碳機能

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 1988年成立) 分析地球由太陽所獲得熱量為 235 W/m^2 ，此能量如晚上完全輻射回太空時其平均溫度為 -19°C 。然地球生態系的大氣平衡約在6,000萬年前到達目前組成(表1)。此等瓦斯中含有熱力學活性的成分，致地球保持 15°C 的平均氣溫適合生物生存，維護地球生態系的最重要生產者(由無機物生產有機物)為植物，供動物消費延續生命。

樹木與一般植物體內含有16種元素：氫(H, 1.00794)、碳(C, 12.0107)、氮(N, 14.0067)、氧(O, 15.9994)、氟(F, 18.9984032)、鈉(Na, 22.98977)、鎂(Mg, 24.305)、鋁(Al, 26.981538)、矽(Si, 28.0855)、磷(P, 30.973761)、

硫(S, 32.065)、氯(Cl, 35.453)、鉀(K, 39.0983)、鈣(Ca, 40.078)、錳(Mn, 54.938049)、鐵(Fe, 55.845)。此等元素在植物體內結合成無機物及有機物。

1. 無機物：

水分：H、O

灰分：O、F、N、a、M、g、Al、Si、P、S、Cl、K、Ca、Mn、Fe

2. 有機物：H、C、N、O、Mg、P、S、Fe

其中水分有生理水分、吸濕水分(Hygroscopic Moisture)及毛管水分之分，生材中樹葉佔45%~70%、樹幹含30%~60%為水分。灰分則乾燥樹木樹葉燃燒後所殘留的物質，葉中佔2.7%~7%、樹幹中佔0.2%~0.9%。有機物包括纖維素(Cellulose)、

表1 大氣化學組織

氣體	分子量	容積比 (%)
準固定成分		
氮 (N ₂)	28.02	78.11
氧 (O ₂)	31.99	20.95
氬 (Ar)	39.94	0.93
氖 (Ne)	20.18	18.2 E - 4
氦 (He)	4.00	5.2 E - 4
氪 (Kr)	83.80	1.1 E - 4
氙 (Xe)	131.30	0.09 E - 4
熱力學活性變動成分		
水蒸氣 (H ₂ O)	18.00	0~7
二氧化碳 (CO ₂)	44.00	平均 0.036
甲烷 (CH ₄)	16.04	0.00017
氧化亞氮 (N ₂ O)	44.02	0.5 E - 4
臭氧 (O ₃)	47.99	平均 4 E - 4

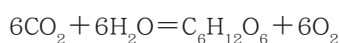
資料來源：森林と地球環境保全。

木素 (Lignin)、戊聚糖 (Pentosan)、甘露聚糖 (Mannan)、半乳聚糖 (Galactan)、生物鹼 (Alkaloid)、樹膠 (Gum)、精油等含碳物質。其中纖維素含量佔50~60%、木素含量佔20~30%，為木質部的主要成分。

樹木由葉氣孔吸收大氣中的二氧化碳 (CO₂) 與根抽上的水分 (H₂O) 為原料在葉綠體 (Chloroplast) 利用太陽能 (hν) 合成碳水化合物。



為產生1 mol的碳水化合物需112 kcal的能，而1個光子 (Photon) 的能 $\varepsilon = h\nu = (hc) / \lambda$ (h =Planck定數=6.62559, E-19)。所產生的碳水化合物進一步合成為糖、脂質或蛋白質等。光合作用 (Photosynthesis) 的碳固定初期合成的有機物為葡萄糖 (Glucose, C₆H₁₂O₆)：



葡萄糖的多數無水單位 (Anhydride unit) 聚合 (Polymerization) 濃縮成多樣構造的多糖類。纖維素 (C₆H₁₀O₅)_n 為鏈狀聚合物來強化細胞的二次細胞壁。構成木質組織的大半為死細胞，無原形質 (Protoplasm)，無生機化後內部空洞累積Phenylpropane系聚合的木素 (C₁₈H₃₀O₁₅) 來剛性化細胞及互相粘住細胞，增加樹幹的力學強度。木素為高耐久性高分子化合物的長期循環素材。

森林在IPCC的COP 7 (Conference of the Practices to Framework Convention on Climate Change, 2001) 定義為「單位面積上的樹冠覆蓋率10~30%以上，樹高2~5 m以上，其叢集面積在0.05~1.0 ha以上者」。我國森林調查以疏密度30%面積0.5 ha為準，可調繪成小班。

森林生態系為棲息生育在森林的動物、植物、微生物等生物及與周圍的土、水、大



氣間的物質交換、能量交換、競爭、共生的體系，在此生物體與環境間形成生產、消費、分解體系的維持。保全的中心議題為生物、土、水的安定的存在，維持養分、能源循環的平衡構造，對自然災害等外在變異有抵抗力而安定性高。太古的自然生態系（森林生態系、湖沼生態系、河川生態系）在人類破壞下轉為半自然生態系致能量循環與碳、氧、氫及營養鹽的物質循環失平衡。巨額石化能源耗費影響碳循環的CO₂大量滯留在大氣中，產業革命前（1750）CO₂在大氣的濃度為280 ppm，現今增加到368 ppm，上昇31%（IPCC, WG I II III 2001），預測到21世紀末可能增加到550~970 ppm，氣溫上昇1.4~5.8℃。二氧化碳為構造安定的物質、分解速度極遲緩，維持高溫狀態，帶來異常的氣象。

地球規模的碳分布大別為5個碳貯蓄庫（Carbon Pool）（表2），以海洋貯蓄量最高（39兆噸），地下資源其次（5兆噸），

表2 地球碳貯蓄庫（單位：GTC）

貯蓄庫	IPCC評估（2000年）	P. Lal（2004年）* ²	Eswaran（1993）* ³
海洋	39,000	38,000	38,000
地下資源		5,000	4,000
土壤	2,000（森林660）*	2,500	1,500
大氣	760	760	750
植物	500（森林330）*	560	550
地殼			65,500,000

註：GTC = 10⁹ ton carbon

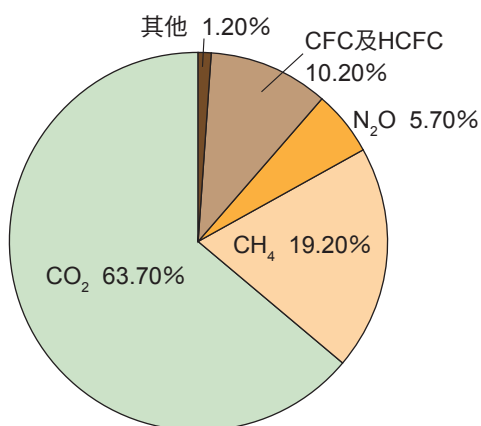
* 森林的碳貯蓄量為IPCC 1988年評估數據

*² 資料來自森林技術2005.1

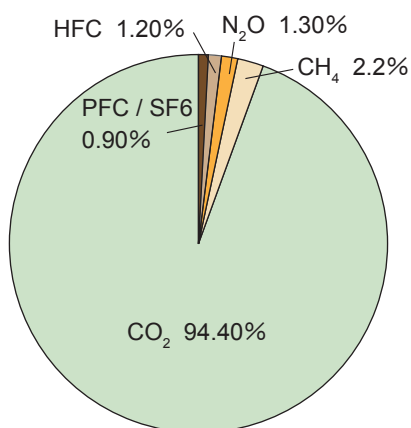
*³ 松本2002年參考製作

其後為土壤、大氣、植物。森林生態系中的碳貯蓄量為9,900億噸（樹木及森林土壤中的碳）。

大氣中吸收長波輻射能的氣體稱溫室氣體（Greenhouse Gas），按京都議定書（Kyoto Protocol）定二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、氧化亞氮（N₂O）、氫氟碳（HFCs, Hydrofluorocarbons）、全氟碳（PFCs, Perfluorocarbons）及六氟化硫（SF₆, Sulfurhexafluoride）等6種物質。然CO₂的溫室效應（Greenhouse Effect）雖不高（CO₂:CH₄:N₂O = 1:23:296），但其絕對量高、排出量多，在各種溫室氣體中CO₂的直接參與度極高，按圖3所示，CO₂的作用佔全世界的63.7%，日本則高達94.4%，我國加上燒香、燒金、放鞭炮、燒王船等民俗習慣，其危害程度可能較日本更高。近250年來大氣溫室氣體濃度變化所產生的輻射強迫已達+2.43 W/m²。



資料來源：IPCC (1995)。



資料來源：日本環境省 (2001)。

圖3 溫室效應氣體對地球溫暖化貢獻的參與度。

因此，為緩和地球溫暖化過程中，降低CO₂在大氣中的滯留量以利用森林的碳固定效果（Carboxylation Effect）。樹木的大部分為C3植物，當CO₂固定時關鍵酵素Rubisco（Ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase）對CO₂與O₂有觸媒作用，產生碳骨架構3的Phosphoglycerate，利用在目前低濃度的大氣CO₂條件下，進行光合成碳固定反應。森林生態系在碳循環中碳貯蓄庫的變化量，按IPCC的GPG（Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change）認定為在5個過程中（圖4）：

- (1) 地上部生物量
- (2) 地下部生物量
- (3) 枯死木
- (4) 枯枝落葉堆積量（Litter）
- (5) 森林土壤

依據森林生態系各部位的含碳量（表3）及坡面區位上的含碳量（表4），生物量中各部位的含碳率因木質部形成不同階段有差異，Violette就櫻樹各部位所測定的含碳率為

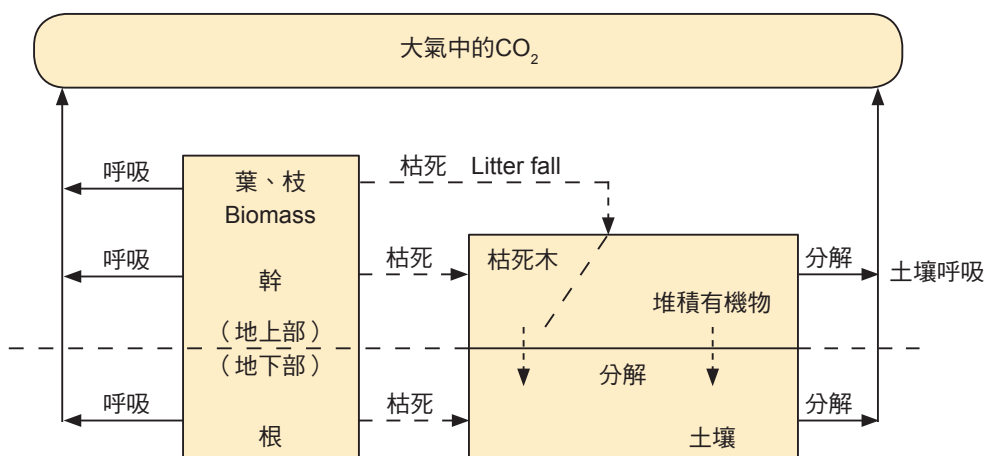


圖4 森林生態系的碳循環。



表3 森林之碳貯蓄量

林型別	有機物 (t/ha)	碳 (t/ha)	含碳比率
落葉闊葉樹林			
葉	4.2	2.2	0.524
枝條	102	52.2	0.512
幹	177	88.2	0.498
A ₀ 層	4.8	2.3	0.479
土壤	165	93.9	0.569
合計	447	239	0.535
熱帶闊葉樹林			
葉	4.9	2.4	0.490
枝條	74.6	36.3	0.487
幹	229	114	0.498
A ₀ 層	17.1	7.7	0.450
土壤	130	74	0.569
合計	526	234	0.445

資料來源：森林家必攜。

表4 斜坡面上的碳貯蓄量

坡區位	乾物量 (t/ha)	碳 (t/ha)	含碳比率
坡下部			
葉	4.23	2.2	0.520
枝	101.99	52.2	0.512
幹	170.71	88.1	0.516
A ₀	4.8	2.29	0.477
土壤		93.89	
坡上部			
葉	3.26	1.7	0.521
枝	18.69	9.6	0.514
幹	56.47	29.1	0.515
A ₀	15.46	7.58	0.490
土壤		50.15	

資料來源：森林生態學。

葉45.2%、樹皮49%、木材48.9%（表5）。

至於其他過程中的乾物量及含碳量如表6、7、8、9、10。

林木木質部（幹、枝、根）在生長過程中，固定大氣CO₂起源的C貯蓄在森林，故計算木質部（Xylem）所含的C，將C重量以CO₂與C的分子量比（44/12=3.67）乘上後，可得

由大氣固定的CO₂量：

$$CO_{2B} = C_B \times 3.67$$

式中CO_{2B}為Biomass所固定的CO₂重量，C_B為Biomass中的碳重量。IPCC提案，關於樹木的C含有量不根據分析的測定，以木質部乾燥重量乘以C含有率求之：

$$CO_{2B} = B \times Cr \times (44/12)$$

表5 櫻樹各部位的含碳率

部位區別	別含碳率(%)	部位區別	別含碳率(%)
樹葉	45.015	木材：上部枝條	48.351
樹皮：上部枝條	52.469	中部枝條	49.902
中部枝條	48.855	下部枝條	48.003
下部枝條	46.871	樹幹	48.925
樹幹	46.367	根部	49.324
根部	50.367	平均	48.901
平均	48.991		

資料來源：森林生態學。

表6 森林葉面積指數、葉量及落葉量

植物種類	葉面積指數(ha/ha)	葉量(ton/ha)	年落葉量(ton/ha)
常綠闊葉樹林	5~9	8.6±2.5	3.7±1.5
落葉闊葉樹林	3~7	3.1±1.5	3.2±2.0
常綠針葉樹林	6~10	16.9±5.2	3.4±2.5
落葉針葉樹林	2.5~4.5	3.0±1.0	2.7±0.6
松林	3~6	6.8±1.8	3.4±2.4
柳杉林	5~7	19.6±4.4	3.5±3.4
檜木林	5~7	14.0±2.5	
熱帶雨林	10	10	
草本植生	4~5		

資料來源：森林資源經營學。

表7 林型與枯枝落葉量(Litter fall)

林型	乾物量(ton/ha)
常綠針葉樹林	4.23±0.97
檜木林	4.827
常綠闊葉樹林	4.5±1.4
闊葉樹林	6.51±0.81
楠木林	6.818
熱帶林	9.87±2.36

資料來源：森林生態學。

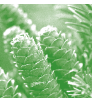


表8 A0層的有機物堆積量 (ton / ha)

森林帶	有機物堆積 (ton / ha)
亞寒帶 (針葉樹林)	54.9 (32.2~105)
溫帶 (柳杉林)	15.8 (9.2~29.1)
(落葉闊葉樹林)	15.3 (2.6~60.2)
暖帶 (常綠闊葉樹林)	17.1 (11.3~27.9)
亞熱帶闊葉樹林	7.3 (4.9~9.2)
熱帶闊葉樹林	3.7 (3.3~4.2)

資料來源：森林生態學。

表9 土壤深度層根系分布

樹種	松	柳杉	檜木		麻櫟
樹齡 (年)	45	50	50	47	40
樹高 (m)	14	16	14	14	16
胸徑 (cm)	26	32	23	36	26
土壤深度 (cm)	根系分布體積率 (%)				
0~20	37	30	45	39	30
20~40	29	18	16	33	31
40~60	9	15	20	13	11
60~80	7	18	10	9	6
80~100	3	12	6	5	6
100~150	9	4	3	1	11
150以上	6	3			8

資料來源：森林資源經營學。

式中B為Biomass量，Cr為含碳率。

樹木含碳率Cr的計算有二種方法任選一計算之。

1. 木質部全部視為纖維素等聚合多糖類的分子 ($C_6H_{10}O_5$)_n，按C的重量構成比

(62/162) 為C的含有率。按此比率計算時森林的木質部乾燥重量的1.63倍為其所固定的CO₂量。

2. 木質部的C含量，不管森林的樹種構成如何，一般認為乾燥重量的50%，即1/2

表10 森林土壤中含碳量

森林別	土壤含碳量 (tC / ha)
常綠針葉樹林	103±19
柳杉林	126±30
落葉闊葉樹林	90.3±19.7
常綠闊葉樹林	84.4±11.4
熱帶林	72.1±8

資料來源：森林生態學。

為含碳率 C_r ，如此計算的 CO_2 固定量為木質部乾燥重量的1.83倍。

然森林調查使用材積表僅表示可利用的幹材積（根株0.3 m以上的幹材積），故全木質部生物量要由幹材積推算時，以幹與枝條及幹（包括枝條）與根的乾燥重量比算定之。幹材積以容積密度換算成乾燥重量，乘以擴大係數（地上部重量／幹重量的比率） f_E ，然後再加上地下部／地上部的重量比率 R ：

$$B = V \times D \times f_E \times (1 + R)$$

式中 V 為幹材積、 D 為容積密度（比重），材積係參考森林資源航測調查資料。

根據森林資源調查全島林木蓄積量為357,463,000立方公尺，分別按樹種別乾比重換算，其乾燥重量為 $233,088.92 \times 10^6 \text{ kg}$ （表11）。其包括枝條及地下部的生物量，分別按針闊葉樹種分開計算（表12）：

$$\text{針葉樹} B = 95,534.71 \times 10^6 \text{ kg} \times 1.25 \times (1 + 0.28) = 152,855.536 \times 10^6 \text{ kg}$$

$$\text{闊葉樹} B = 137,554.21 \times 10^6 \text{ kg} \times 1.30 \times (1 + 0.22) = 218,160.977 \times 10^6 \text{ kg}$$

然森林調查中另有材質良好枯死木1,281,000立方公尺的林木生物量（ $1,281 \times 0.561$ ）為 $718.641 \times 10^6 \text{ kg}$ 。故林木木質部總生物量

（圖片／高遠文化 攝影／曾珮瑩）



表11 全島主要樹種別林木蓄積及其乾燥重量推算

樹種	蓄積 (1,000 m ³)	乾比重	乾燥重量 (10 ⁶ kg)
檜木	61,489	0.516	31,728.32
鐵杉	48,150	0.597	28,745.55
雲杉、冷杉	19,262	0.573	10,037.13
松類	1,468	0.640	339.52
柳杉	8,085	0.370	2,991.45
杉木	2,973	0.420	1,248.66
台灣杉	724	0.430	311.32
其他針葉樹	32,843	0.613	20,132.76
針葉樹小計	174,994		95,534.71
槠櫟類	38,851	0.880	34,188.88
櫟木	2,319	0.936	2,170.58
樟樹	1,031	0.694	715.51
烏心石	1,331	0.581	773.31
楠木類	35,606	0.615	21,897.69
其他闊葉樹	103,331	0.753	77,808.24
闊葉樹小計	182,469		137,554.21
林木合計	357,463	0.652	233,088.92

資料來源：蓄積量，第3次台灣森林資源及土地利用調查。

乾比重，林業試驗所叢書第1號、森林家必携、林業寶典及實用林業便覽。

乾燥重量B共有 $371,735.154 \times 10^6 \text{ kg}$ ，如採用表4木質部含碳量為0.516計算，得其貯蓄碳為 $191,815.339 \times 10^6 \text{ kg}$ ，換言之林木所固定的CO₂為 $703,962.295 \times 10^6 \text{ kg}$ 。

A₀層枯枝落葉數量，在台灣不管是檜木林或闊葉樹林因颱風倒木甚多，其數量採用表8暖帶林的乾物量17.1 t/ha及表4含碳量0.49，森林面積2,102,400 ha的A₀層碳貯蓄量為 $17,616.01 \times 10^6 \text{ kg}$ 。

表12 日本森林別容積密度D、擴大係數 f_e 及地下部比率R

容積密度	針葉樹	落葉闊葉樹	常綠闊葉樹	全闊葉樹	全樹種
D	0.374	0.462	0.602	0.492	0.452
(台灣)	0.532 (17種)		0.712 (45種)		

擴大係數 f_e	林齡(年)	溫帶林		北方林	
		針葉樹	闊葉樹	針闊混交	針葉樹
	20年生以下	1.61	1.41	1.58	1.65
	20年生以上	1.25	1.30	1.25	1.21

地下部 比率R	林齡(年)	溫帶林		北方林	
		針葉樹	闊葉樹	針闊混交	針葉樹
	20年生以下	0.24	0.21	0.23	0.27
	20年生以上	0.28	0.22	0.20	0.26

資料來源：最新環境綠化工學。

森林土壤的含碳量應該很高，因碳的平均周轉期（Turnover Time）在植物Biomass為約10年，在土壤中為約50年。茲參照表10，以保守推定如下（表13）：

綜合之，林木木質部含碳量：

$$191,815.34 \times 10^6 \text{ kg}$$

$$A_0 \text{ 層含碳量：} 17,616.01 \times 10^6 \text{ kg}$$

$$\text{森林土壤含碳量：} 167,153.15 \times 10^6 \text{ kg}$$

$$\text{碳貯蓄量合計：} 376,584.50 \times 10^6 \text{ kg}$$

$$(\text{=} 1,382,065.11 \times 10^5 \text{ kg, CO}_2)$$

表13 森林土壤中含碳量

森林種類	面積 (ha)	土壤含碳量 (tC / ha)	森林土壤中之碳 (10^6 kg)	註
針葉樹林	411,400	103.0	42,374.20	不含雲杉冷杉林
針闊混淆林	391,200	84.4	33,017.28	
闊葉樹林	1,272,700	72.1	91,761.67	包括竹林
合 計	2,075,300		167,153.15	

資料來源：森林面積為第3次森林資源調查。

雲杉冷杉林（27,100 ha）生育在岩石上認為有機質甚少。

按IPCC 2001的估計陸上植生的碳量（500 PgC）與土壤的碳量（1500 PgC）為1：3。



即台灣森林碳貯庫有376.58 MtC，如除以森林總面積（2,102,400 ha），則台灣的森林每公頃的碳貯蓄量為179.1 Tons C/ha，較溫帶林稍高（表14）。台灣在北緯25度（台北市），以南屬熱帶地區，唯森林的垂直分布包括溫帶至寒帶林，尚屬合理。

林木年生長量為3.38%（第2次森林資源調查），即年森林固定的碳為 $6,486.36 \times 10^6 \text{ kg}$ （ $191,815.34 \times 10^6 \text{ kg} \times 3.38\%$ ）。又因枯枝落葉每年增加到 A_0 層的有機質換算為碳量時 $5,527.50 \times 10^6 \text{ kg}$ （ $10,629,812 \text{ t} / \text{年} \times 0.52 = 5,527,502 \text{ tC}$ ）（表15）。故每年森林固定的碳量為 $12,013.86 \times 10^6 \text{ kg}$ （=

$44,090.87 \times 10^6 \text{ kgCO}_2$ ）。

綜合上述，台灣的森林碳貯蓄庫的碳為376.58 Mt C及每年固定 CO_2 量為44.09 Mt。

三、結語

根據台灣森林資源調查，森林面積有2,102,400 ha，林木積量為358,744,000 m^3 ，此森林的碳貯蓄量為357.31 M tons，即森林單位面積貯存178.3 tons C/ha。森林生長量及年落葉量可固定 $44,090.87 \times 10^6 \text{ kg}$ 的 CO_2 ，按我國2000年的 CO_2 排放量為238,935,970噸（呂鴻光）（表16）。🌱

表14 地球陸上生態系每公頃碳貯蓄量（IPCC 2000年報告）

生態系	每公頃碳貯蓄量		
	植物體	土壤	全體
熱帶林	120	123	243
溫帶林	57	96	153
北方林	64	344	408
森林全體	86	189	275
熱帶灌木	29	117	146
溫帶草原	7	236	243
沙漠、半沙漠	2	42	44
凍原	6	127	133
濕地	43	643	686
農地	2	80	82
整個地球	31	133	164

資料來源：森林與地球環境保全。

表15 台灣森林地A₀層的碳增加量

林型	面積 (ha)	落葉量 (t / ha)	年落葉量 (ton)	註
天然針葉樹林	220,100		883,700	
雲杉、冷杉	27,100	4.23	114,633	表7
鐵杉林	52,600	4.23	222,498	表7
檜木林	48,500	4.827	234,109	表7
其他針葉樹林	91,900	3.4	312,460	表6
混淆林	331,600	5.668	1,879,674	表7闊葉檜木
闊葉樹林	975,800	6.51	6,352,458	表7
人工林	422,600		1,513,980	
人工針葉樹林	218,400	3.5	764,400	表6
人工闊葉樹林	144,600	3.7	535,020	表6
人工混淆林	59,600	3.6	214,560	表6常綠柳杉
竹林	152,300			
合計	2,102,400		10,629,812	

表16 世界主要國家的二氧化碳排出量 (2004年)

國別	Mt of CO ₂	國別	Mt of CO ₂
美國	537.05	法國	386.92
加拿大	550.86	俄國	1,528.78
澳大利	354.36	中國	4,732.26
日本	1,214.99	印度	1,102.81
德國	848.60	巴西	323.32
英國	5,799.97	台灣	238.93

資料來源：地球溫暖化的科學。

參考文獻 (請逕洽作者)

註1：氣象30年平均為氣候。

註2：植物在高溫30℃、CO₂濃度1,500~2,000 ppm下最能發揮光合作用，溫室栽培中增加CO₂促生產稱CO₂施肥。



(圖片／高遠文化 攝影／曾珮瑩)