

京都議定書與 森林資源碳吸存效果

◎李國忠／國立台灣大學森林學研究所教授

◎林俊成／農委會林業試驗所林業經濟系助理

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。溫室氣體的大量排放促進「溫室效應」，引發「全球溫暖化」(Global Warming)現象，其中以二氧化碳排放為溫室效應的主要成因。已開發國家在過去二百年來大量消耗石化原料，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360ppm，每年仍以0.5ppm的速率快速增加。根據1996年聯合國氣候變化政府間專家委員會(IPCC)第二次評估報告指出，人類活動所排放的溫室氣體，若不採取任何防治措施，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，漁場轉移等影響。

在世界為「地球村」的理念下，聯合國於1988年11月成立「氣候變化政府間專家委員

會」(IPCC)，對全球氣候變化問題作通盤的探討，在1992年5月9日通過「聯合國氣候變化綱要公約」(United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC)，並於1992年6月初在巴西里約舉行聯合國環境與發展大會(United Nations Conference on Environment and Development: UNCED)(又稱「地球高峰會議」)。會中共有155國簽署「氣候變化綱要公約」，原則性管制二氧化碳之排放。該公約於1994年3月21日正式生效成為國際法(第50個簽約國遞交認可書後的第90天)，並持續接受未簽署國家加入簽署。「氣候變化綱要公約」共有26條條文與2個附錄，至今已有171個國家認可公約。在各方期盼下，1997年12月1日至10日，「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)於日本京都舉行，共有來自全球的160個締約國，250個非政府組織及媒體參與此會。會中通過了「京都議定書」，來制定各國溫室氣體排放的抑制目標。具體的規範工業國家2008到2012年之溫室氣體排放的減量標準，使得溫室氣體量從1992年「氣候變化綱要公約」提

出之初期承諾，進展到議定書實質性的責任承擔階段。

二、京都議定書主要內容

根據京都議定書的內容，全文共有 27 條條文及 A、B 兩項附件，主要內容為：

- (一) 規範締約國家應以個別或共同方式，確保於 2008 年至 2012 年時，承諾將人為排放之溫室氣體總量，控制在該國家以 1990 年的減少排放水準，平均再削減 5.2%，並採行差異性削減目標，各國削減目標如表 1。

表 1：各國削減目標

削減(-)及增加(+)百分比	國家別
- 8%	歐盟 (15 國)、東歐各國 (12 國)
- 7%	美國
- 6%	日本、加拿大、匈牙利、波蘭
- 5%	克羅埃西亞
0%	俄羅斯、烏克蘭、紐西蘭
+ 1%	挪威
+ 8%	澳洲
+ 10%	冰島

- (二) 管制二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亞氮(N₂O)、氫氟碳化物(HFC_s)、全氟碳化物(PFC_s)、六氟化硫(SF₆)等六種溫室氣體，其中二氧化碳、甲烷、氧化亞氮管制基準年訂為 1990 年，而氫氟碳化

物、全氟碳化物與六氟化硫管制基準年為 1995 年。

- (三) 若前一個承諾期間所減量幅度超過規範訂定之目標值，其超過的數量可保留合併至下一個承諾期，作為減量成果。
- (四) 確認碳排放權可交易制度，在國與國之間可進行碳排放交易。
- (五) 成立「清潔發展機制」(Clean Development Mechanism；CDM)，來認可共同減量計畫，並將減量成果分配給出資國，獲得的任何排放減量單位或分配數量，可納為其減量成果。
- (六) 1990 年以後所進行之新植造林、更新造林及森林採伐所吸收或排放二氧化碳之淨值，可併入排放減量值計算。

根據京都議定書的規範，削減二氧化碳排放量，以減緩氣候變遷的衝擊，已為世界各國所共同關注的議題與努力的目標。欲減緩因二氧化碳濃度增加所產生的衝擊，可由二氧化碳減量(mitigation)及環境適應(adaptation)兩方面著手。在減量上，可調整產業結構，由高耗能或高排放二氧化碳的產業移往低耗能、低污染、高附加價值產業，並積極增加能源使用效率，抑制能源消耗等途徑來進行。但從調整產業及能源結構來達成二氧化碳減量目的，將可能對國家整體經濟產生較大的衝擊；同時減量成本也較高，因此使用環境適應方法，應為值得重視的課題。在森林資源中，促進可持續的(永續性)森林經營策略、加強新植造林和更新造林來吸存二氧化碳。在京都議定書內容中，即肯定森林資源對吸收溫室氣體的效果，明定 1990 年以後所進行之新植造林、更新造林及森林採伐之二氧化碳吸收或排放之淨值，

併入排放減量值計算。

三、森林資源與大氣間碳的循環過程

森林資源兼具有吸收、貯存、釋放二氧化碳的機能，為陸地生態系值得重視的部分。森林中的林木和其他植被，藉由本身的生理機能進行光合作用，吸收大氣中的二氧化碳並轉化為有機碳的形式，貯存於其植物體部分（包括地上、地下）及森林土壤中。當林木為中、幼齡林時，隨著林齡而增加生物量，也提高其對碳的吸收能力，並將碳加以貯存；當林木已屆成熟林時，植物體可維持高蓄積的碳量，但它們對碳的吸收能力卻下降，此時所繼續增加和固定的碳量是相當少的。因此在森林資源中，林木及植物體對碳的貯存能力會隨年齡、林分組成狀態、森林生產力、經營活動與否，森林火災、病蟲害等因素而有所差異；一旦林木被伐採，仍可將所貯存的碳，以另一種形式固定在木材產製品中。森林資源與大氣間碳的循環過程，以圖1來說明：



圖1. 森林資源與大氣間碳的循環過程
(Canadian Forest Service, 1998)

森林資源在碳循環過程中，包括對碳的吸收、固定、排放與轉移三個部分：

- (1) 吸收：森林資源吸收大氣中二氧化碳典型的自然機制，為林木及綠色植物進行光合作用，從大氣中吸收二氧化碳，轉化為有機碳的形式累積貯存在植物體中，並排出氧氣。
- (2) 固定：由大氣系統中所吸收的二氧化碳被貯存而固定在森林土壤、森林中林木、其他植被、枯枝落葉層中。除此之外，尚有進口及之前所留存的碳量。
- (3) 排放與轉移：經任何過程、活動或機制（如森林火災、林地轉換為農地或都市用地、伐採收穫等）釋放二氧化碳進入大氣，或被收穫的林木，經各種加工程序成為木材產製品，原先貯存的碳量大部分可繼續被貯存在這些產製品中。但有部分會因腐爛或燃燒，而將所貯存的碳以二氧化碳的形式釋放回大氣之中。轉移則指當年出口的林產品所含碳量。

這三個部分的關係為：森林資源吸收的碳量 = 排放碳量 + 固定碳量 + 轉移碳量 ($U_i = E_i + F_i + T_i$)，從碳平衡的角度考慮，則碳平衡 = 吸收碳量 - 排放碳量 = 固定碳量 + 轉移碳量 ($B_i = U_i - E_i = F_i + T_i$)，式中 i 為年，如果 $B_i > 0$ ，則 $U_i > E_i$ 或 $F_i + T_i > 0$ ，表示森林生態系中，當年內有一定量的碳累積，即固定於生態系中，則對大氣之二氧化碳量而言，吸收多於排放。

四、森林資源與二氧化碳吸存關係

陸地生態系中，森林生態系對碳吸收與貯存具重要的貢獻。林木為二氧化碳主要吸收

者，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；所貯存的二氧化碳即以有機碳形式貯存於植物體內。植物體所貯存的碳量，會隨林齡增加而增加，增加量依植物體之生長率、年級生長率及枯死率而異。植物體有部分成為枯枝落葉而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，該有機質所貯存的碳量亦有部分直接分解、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木材，部分則留置於林地成為殘材，慢慢分解將碳回歸回大氣。林木收穫所得材積，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。在市場上的最終產品的使用，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，也產生部分碳的釋放。

在此一系統中，碳的貯存池 (pools) 為大氣、植被、枯枝落葉與土壤有機質、木材產製品，在這些貯存池間的流動， $F_{ab}=FNPP$ ，為淨初級生產，由植被的淨同化作用，將大氣中的二氧化碳轉化為有機碳的形式貯存於植被中；由植被流向枯枝落葉與土壤有機質 (F_{bh}) 為植被成為枯枝落葉層的部分；枯枝落葉與土

壤有機質流向大氣中 (F_{ha}) 為在枯枝落葉及腐植層中的異營生物 (動物、微生物) 呼吸作用將碳釋放回大氣；由植被經林木收穫而成為木材產品時，碳的流向為 F_{bw} ；木材產品流向大氣的碳量為 F_{wa} ，在未經伐採的天然林系統中，由於林產品的產出為零，因此 $F_{bw}=F_{wa}$ 。如在天然林或人工林中進行林木收穫，則 $F_{bw}=F_{harvest}$ ；即植被所貯存的碳量轉而貯存於木材產品中；但林產品及木材會隨時間而氣化、腐爛、燃燒 ($F_{wa}=F_{decay}$)。因此，當 $F_{ab}=F_{ha}+F_{wa}$ 時，則為穩定狀態，表示大氣中的碳量與植被的碳量相等，即植被自大氣中所吸存的量與釋放的量相同。當 $F_{ab}<F_{ha}+F_{wa}$ 時，則為釋放狀態，即植被自大氣中所吸存的量少於釋放大氣的量。當 $F_{ab}>F_{ha}+F_{wa}$ 時，則為吸收狀態，即植被自大氣中所吸存的量大於釋放大氣的量。



圖 2. 森林資源之碳吸存、釋放流向系統

森林資源對碳貯存與吸收的研究，Sedjo (1989) 曾試算造林對碳的固定量，在普通人工林年平均生長量每公頃 15 立方公尺的林分，1 立方公尺可吸收 0.26 公噸的碳；Dixon

et al. (1993b)估算熱帶及溫帶地區在不同經營方式之碳吸存量，當輪伐期為50年，折現率為5%時，在熱帶地區經天然更新之林地碳吸存量為195公噸/公頃，農地造林碳吸存量為60-125公噸/公頃，跡地造林碳吸存量為65公噸/公頃，在溫帶地區之荒地造林或新植造林碳吸存量為120公噸/公頃，跡地造林碳吸存量為56公噸/公頃。Pedro et al. (1994)分析馬來西亞Sabah地區大規模種植龍腦香科林木對碳的吸存效果，初步估計輪伐期如為60年，每公頃可吸收195公噸。Maclaren (1996)分析紐西蘭人工林地碳的吸存量，當輪伐期為20-50年時，平均每公頃碳的吸存量約在72-187公噸之間。國內研究方面，楊盛行 (1997)採用IPCC方法計算台灣地區森林之二氧化碳吸收量，以第三次台灣森林資源及土地利用調查資料，估算1994年台灣地區森林碳吸收總量約為26.271百萬公噸，換算成二氧化碳涵容量為96.326百萬公噸。王立志 (1996)使用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森林砍伐的狀況下，則台灣森林每年可吸存大氣中4.74百萬公噸的碳，換算成二氧化碳為17.38百萬公噸；楊榮啓等 (1998)根據IPCC方法，使用「台灣林木資源之生長及枯死」(林務局，1982)調查所得生長率資料，估算1996年台灣地區森林共吸存21.869百萬公噸的二氧化碳。上述三篇研究結果有所差異，其原因在於，雖同樣使用IPCC的方法，但在資料的引用上卻有所不同，楊盛行 (1997)以第三次台灣森林資源及土地利用調查資料，將樹種分為闊葉樹林、針闊葉混生林、針葉樹林、竹林，依不同林地面積，年平均生長速率估算，在乾物質含碳量比率則使用0.45。王立志 (1996)使用第二次森

林資源調查之生長量及生長率資料，假設各種木材平均比重為500kg/m³，乾物質含碳量比率為0.5，平均全樹含碳量為幹材的1.7倍。楊榮啓等 (1998)使用「台灣林木資源之生長及枯死」調查所得生長率資料，依不同樹種之年蓄積生長量、木材比重，來估算生質增加量，依植群類型不同，其擴張率(全樹生物量/樹幹生物量之比率)也因之不同，在1.75至2.00間，乾物質含碳量比率為0.5。因此提昇資料來源可信度與估算方法模式的準確性，將可增加估算結果的正確性。林俊成等 (1999)以本省人工林造林面積最多之樹種—柳杉人工林，依生物量變化做計量上分析。估算結果每公頃可貯存碳量為161.24公噸，換算為貯存二氧化碳量為591.21公噸。

五、結論與討論

森林為陸地生態系的主要生態系統，藉由植物本身的生理特性進行光合作用吸收大氣中二氧化碳，將二氧化碳轉化為有機碳成為生物量儲存於植物體中，所表現於外的形式則為植物的生長蓄積，對減少大氣中二氧化碳濃度有所貢獻，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。

京都議定書中，通過之排放限制及減量目標，碳排放權交易制度的確認、成立「清潔發展機制」，開啓了以經濟工具達成特定目標。代表著未來碳排放權交易市場之可行性。「清潔發展機制」之設立，開啓了國家與國家間減量額的轉移。因此，藉碳排放權可交易及「清潔發展機制」的運作，可以說是另一種形式的共同減量。本省99%以上的木材需求來自進口材，如何加強本國森林經營效率及加強造林

工作，推動跨國合作造林（Activities Implemented Jointly:AIJ），以達二氧化碳減量，為盡地球村公民對環境保護的一份義務。在國內亦可加強森林經營效率、厚植資源，滿足國計民生用材與環境保應盡之義務。

美國為開始執行跨國減量計畫（United States Initiative on Joint Implementation: USIJI），提供經費與技術，協助開發中國家進行造林，以達碳吸存的效果（Ramirez and Gomez, 1998）。

以新植造林和更新造林來吸存二氧化碳所需的成本，比直接在化石燃料利用時去削減二氧化碳之減量成本相比較，更為經濟，對國家整體經濟的衝擊較小。如在能源生產中限制碳排放的邊際控制成本每公噸為 25 至 120 美元（Niskanen et al., 1996），改善石化能源使用效率以減少碳排放成本每公噸在 100 美元（Rubin et al., 1992、Dixon et al., 1993）。Dixon et al. (1993a) 估算熱帶地區造林貯存每公噸碳的成本為 6-60 美元，溫帶地區為 2-50 美元/公噸。Dixon et al. (1993b) 當輪伐期為 50 年，折現率為 5% 時，分析 33 國家的每公噸碳的成本在 0.5-77.9 美元。Winjum et al. (1993) 分析不同國家以造林來貯存碳之成本，阿根廷在跡地造林約 31 美元/公噸，荒地造林或新植造林約 18 美元/公噸，澳大利亞在跡地造林約 5 美元/公噸，巴西跡地造林約 10 美元/公噸，加拿大跡地造林約 11 美元/公噸，天然更新 6 美元/公噸，中國大陸跡地造林約 10 美元/公噸，德國跡地造林約 29 美元/公噸，印度跡地造林約 15 美元/公噸，馬來西亞跡地造林約 5 美元/公噸，墨西哥跡地造林約 4 美元/公噸，

南非跡地造林約 9 美元/公噸，蘇聯跡地造林約 6 美元/公噸，天然更新 5 美元/公噸，美國跡地造林約 5 美元/公噸，荒地造林或新植造林約 2 美元/公噸。Dudek and LeBlanc (1990) 估計造林貯存每公噸二氧化碳的成本在 6.64-10.67 美元；折算每公噸碳的成本為 26-43 美元。林俊成等 (1999) 分析柳杉人工林貯存每公噸碳所需的成本為新台幣 986.99 元，換算約為 37.24 美元；貯存每公噸二氧化碳成本為新台幣 269.18 元，換算約為 10.16 美元（1994 年新台幣與美元匯率為 1：26.5）因此，以造林方式來吸收及貯存二氧化碳的適應成本，比減量成本更為經濟，對國家整體經濟的衝擊較小。

從林業的角度來看，在二氧化碳的減量上，造林不僅可吸收與貯存二氧化碳，同時也可提供做木材市場之林產品使用，故增加造林面積、改善林地品質，提高林地的生產力，應可提高林木吸收與貯存二氧化碳量、延長林木輪伐期、林下栽植、增加中小徑木的利用、減少伐採量、改進森林經營制度等應為可行。因此以「全民造林運動」以增加造林面積應是值得鼓勵的。另現存林地應加強後期撫育工作，以增加碳的吸存量。在輪伐期的決定時，除考慮經濟上的林木利潤外，應同時考慮林木的非市場價值的貢獻（如碳吸存量）。在受益者付費原則下，應對造林行為給予補助。如考慮徵收碳稅時，如能將造林所吸存的量併入計算，將有助於造林行為。Binkley and van Kooten (1994) 建議碳稅可反應在森林經營活動上，經由增加林分的生物量，將可增加碳的貯存量。

參考文獻（略，請洽作者）■