

京都議定書生效後之森林資源碳吸存策略

文、圖 ■ 林俊成 ■ 林業試驗所林業經濟組助理研究員

李國忠 ■ 台灣大學森林環境暨資源學系教授

一、京都議定書 (Kyoto Protocol) 將於今年正式生效

溫室氣體的大量排放增強溫室效應，引發「全球溫暖化」現象，其中以二氧化碳排放為溫室效應的主要成因。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) 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異常，導致暴雨或乾旱等極端氣候事件。在1992年6月於巴西里約舉行的「地球高峰會議」中提出的「氣候變化綱要公約」(United Nations Framework Convention on Climate Change；UNFCCC)，已於1994年3月21日生效而成為正式的國際法。但根據1996年之預估，認為若要在21世紀末將二氧化碳濃度穩定在工業革命前的兩倍，則目前全球排放量必須削減一半。但在簽訂「氣候變化綱要公約」後，全球二氧化碳濃度仍在不斷上

升，原公約減量目標普遍認為並未被會員國認真執行，而在國際上引起極大的爭議，普遍認為需制定具有法律力的議定書以達成共識。因為於1995年3月在德國柏林召開第一次氣候變化綱要公約締約國大會 (Conference of the Parties；COP1)，訂定了「柏林規定」(Berlin Mandate)，決議將在1997年的第三次氣候變化綱要公約締約國大會 (COP3) 中，簽訂管制二氧化碳排放量之議定書。在各方期盼下，第三次氣候變化綱要公約締約國大會於1997年12月1日至10日於日本京都舉行，共有160個締約國及250個非政府組織參加，會中經熱烈討論通過「京都議定書」來制定各國溫室氣體排放的抑制目標。具體規範了38個國家及歐盟 (即所謂附件二國家)，以個別或共同的方式控制人為排放之溫室氣體數量以期減少溫室效應對全球環境所造成的影響，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。京都議定書的內容，全文共有27條條文，主要內容為規範締約國家應以個別或共同方



式，確保於2008年至2012年時，承諾將人為排放之二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、氧化亞氮（N₂O）、氫氟碳化物（HFCs）、全氟碳化物（PFCs）、六氟化硫（SF₆）等六種溫室氣體排放總量，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。亦制定三種聯合減量（Joint Implementation；JI）、清潔發展機制（Clean Development Mechanism；CDM）及排放權交易制度（Emissions Trading；ET）等三種彈性機制。有關議定書生效的時間，係根據京都議定書第25條規定，當議定書獲得55個以上的國家批准和其合計二氧化碳排放量至少佔附件一國家在1990年二氧化碳排放總量的55%時，則在第90天後，議定書開始生效。去年（2004）對於「氣候變化綱要公約」及「京都議定書」而言，為特別

具意義的一年。因為去年為「氣候變化綱要公約」正式執行屆滿10年，同時，由於俄羅斯總統普丁（Vladimir Putin）於11月4日正式簽署京都議定書，使得批准國家累計有128個，批准認可京都議定書國家合計二氧化碳排放量佔附件一國家在1990年二氧化碳排放總量的61.6%，正式跨過55%二氧化碳排放總量的生效門檻，因此，京都議定書正式於今（2005）年2月16日起生效。使京都議定書成為實質環保規範，對於全球在降低氣候變化危害的任務上，邁入一個嶄新的階段。

第十次氣候變化綱要公約締約國大會（COP10）剛於2004年12月在阿根廷的首都的布宜諾斯艾利斯舉辦。這次於12月6日至18日間召開的締約國大會，與會團體總數超過6,100個，包括：167個國家、2個觀察團隊、272個國際性非官方之環保團體及其他觀



▲ 森林具有吸存大氣二氧化碳的效果。

察組織團隊等。會議期間來自各國政府的代表的主要討論議題之一，乃就土地利用、土地利用變化及森林中的做法指南（Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry；GPG-LULUCF）進行了深入的探討。而在科學與技術諮詢附屬機構會議（Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice；SBSTA）以及執行附屬機構（Subsidiary Body for Implementation；SBI）的主要討論和磋商的議題包括：在清潔發展機制之下的小規模造林再造林計畫、技術轉讓、溫室氣體清單、預測以及清單的報告和評審等相關政策和做法。這次締約國大會中，與會成員國針對氣候變遷相關政策之「和緩氣候變遷計畫」、以及「環境適應性」兩大議題，進行修改、補強的討論工作。

二、京都議定書肯定森林資源對吸存二氧化碳的貢獻

1997年之聯合國氣候變化綱要公約第三次締約國大會（COP3）通過「京都議定書」，對森林碳吸存的貢獻有所肯定，規定1990年以後所進行之非林地造林（afforestation）、更新造林（reforestation）及森林砍伐（deforestation）之二氧化碳吸收或排放之淨值，可併入排放減量值計算。同時確認碳排放權交易制度（ET）、聯合減量（AIJ）及清潔發展機制（CDM）架構的建立，使森林資源所吸存的二氧化碳量，將成為一種可交易的產品。而在第九次締約國大會中在森

林相關議題有相當的進展與成果，因此又被稱為「森林的締約國會議」（forest COP）。大會通過了「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），內容包括森林等定義、認證和指定經營實體、參與計畫活動的要求、批准與登記、監測、審核與認證、臨時認證排放減少量（Temporary certified emission reductions；tCERs）、與長期認證排放減少量（Long-term certified emission reductions；lCERs）的發放、處理清潔發展機制之下的造林和再造林計畫活動的無成效問題等。此外，也通過了「清潔發展機制之下的造林和再造林計畫活動相關的經營實體的認證標準」（Standards for the accreditation of operational entities in relation to afforestation and reforestation project activities under the Clean Development Mechanism）、「清潔發展機制之下的造林和再造林計畫活動的計畫設計書」（Project design document for afforestation and reforestation project activities under the Clean Development Mechanism）等重要文件（台灣因應氣候變化綱要公約資訊網之網頁資料）。在京都議定書生效後，如何在清潔發展機制下從事造林及再造林，其初步的具體內容，主要在「清潔發展機制之下的小規模造林或再造林計畫活動」（Small-scale afforestation and reforestation project activ-



▲森林具有吸存大氣二氧化碳的效果。

ities under the Clean Development Mechanism)。此一活動是指預計制定或執行小規模造林或再造林計畫活動，其每年形成溫室氣體人為淨二氧化碳吸存量在八千噸以下。如果清潔發展機制之下的某個小規模造林或再造林計畫活動，如每年形成溫室氣體人為淨二氧化碳吸存量大於八千噸，則超出的清除量不得作為tCERs 或lCERs 發放。

三、營建綠色環境可增加二氧化碳吸存

如何降低二氧化碳濃度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，其方法可由二氧化碳減量及環境適應著手。在減量方法上，可從調整產業結構，積極增加能源使用效率，抑制能源消耗來進行，但此種方法將可能對國家整體經濟產生較大的衝擊，同時減量所需成本也較高。因此，營造可持續的綠色環境，強化森林經營，推廣生態材料使用與回收再利用等之環境適應方法，為吸存大氣二氧化碳之重要課題，此即為綠色環境經營的理念，欲營

造綠色環境，可經由幾個方面著手。

(一) 環境綠化與綠色營造

過去人類因都市建築建設政策失當，使得都市的綠地不足、人口過度集中，同時因建築物的通風不足、節能設計不當而造成能源浪費，加上都市環境的人工不透水地面設計，造成土地保水性能劣化（林憲德，1998）。由於都市中多為鋼筋水泥等構造物，其儲熱容量大，加上各種機動車輛及空調設備排出的熱氣，使得溫度往往比鄰近地區為高，造成都市微氣候的改變之「熱島效應」（heat islands），使得都市溫室效應加劇，而綠色環境的營造，藉由植物的自然機制、生態功能，對環境保育有極大的貢獻。綠化所產生的生態效益，將使都市機制可以持續運作。因此，經由大地環境、都市林、道路、公園、工業區等之環境綠化與綠色建築營造等來達成綠色營造之效益。

1. 大地環境綠化

將大地營造為綠地，在土地上保持植物生長，無論在平地、坡地或山地、水域等地形，成為整體植被景觀。綠地並不侷限於植物的數量，而強調在環境特質上，具較高自然度的各類土地使用。綠地具有復舊土地、回復地力，提供生物棲地、覓食環境與遷移路徑等生態功能，淨化空氣、吸存二氧化碳、改善環境微氣候等環境保護功能，另尚有提供具空間美質之生活環境與視野之景觀功能及社會人文、休閒遊憩、環境教育等功能（中國文化大學環境設計學院景觀學系，1996）。

2. 都市林環境綠化

營造都市林，經由種植林木及植物，能調節氣候、重建都市棲地和增加生物歧異度。都市林在減少大氣二氧化碳的貢獻可分為兩方面，一、經由長期的林木生長活動，經由光合作用吸存二氧化碳的能力會隨之增加；二、林木環繞於建築物周圍，能調節微氣候，減少對暖氣及空調的需求，可減少因電力生產消耗所排放的二氧化碳，增加種植和植被覆蓋能減緩都市熱島效應的衝擊和節省能源使用。都市林的碳吸存能力，和森林的林木一樣，視林木的生長和枯死情形而異，也依樹種組成、林齡結構、森林的健全情形等而異。

3. 道路綠化

植物材料在道路綠化美化中扮演極為重要的角色，道路綠化美化不僅可美化城市景緻之美學上的功能，兼有協調街道景觀、指引道路動線等空間功能，同時在環境的功能上，具有淨化空氣、調節氣候、控制噪音等功能（郭俊開，1996）。為了加強環境保護並豐富道路景緻，行道樹綠化可採用複層栽植，適當地配植部分灌木、草花或地被植物等，並留設休憩空間組成整體的綠化系統。行道樹是整個都市當中綠地系統的網絡，即綠色走廊，具有連結各個獨立綠地的功能，對於生活在都市中的野生動物而言更是重要的綠廊，在動物的遷移上扮演著重要的角色（莊光明、許榮輝，1998）。

4. 工業區環境綠化

在大面積的工業區土地建立保護林帶，

期能創造大面積的綠色資源，這種綠帶不僅可淨化空氣，吸存二氧化碳，並能兼收調節局部環境之氣候、減弱噪音、防風及過濾效果、美化環境及防災、提高工作效率及敦親睦鄰之效。根據計算每公頃森林每天能夠吸收一公噸的二氧化碳並釋放出0.73公噸的氧氣，所以栽培植物不僅美化環境，還能調節環境中的氧氣和二氧化碳的濃度（林業試驗所，1996；中華民國環境綠化協會，1999）。

5. 綠色建築營造

大氣二氧化碳濃度的大幅增加主要源自於人類的耗能行為，其中我國的建築相關產業的耗能（包括建材生產、營建運輸、住宅、商業用能源），佔我國總能源消耗33%，這些能源所產生的溫室氣體二氧化碳排放量佔我國總溫室氣體二氧化碳排放量的33.73%。可見建築產業對地球溫暖化有重大的影響。分析指出五層樓RC構造住宅每平方公尺樓板面積所使用總建材量，相當於排放250公斤的二氧化碳，其對環保的衝擊可見一斑。在都市建築政策上，推行綠化是緩和氣候溫暖化最有效的對策之一。綠化可藉植物的光



▲森林具有吸存大氣二氧化碳的效果。



(圖片 / 作者提供)

合作用吸存大氣中的二氧化碳，如在臺北開闢地種植一株榕樹40年間約可吸存67公噸的二氧化碳，其效果可抵消上述五層樓RC構造住宅268平方公尺樓板面積的排放量（林憲德，1998）。

（二）森林資源的合理經營利用

永續性的森林經營活動可提高二氧化碳吸存潛力，因生長力旺盛的林分，對大氣中二氧化碳吸存能力最強，因此，如為天然更新林和經營管理得好的人工林生態系統，由於淨生產量高，則固定大氣中的二氧化碳量就更多。針對林分蓄積量大的林地加以保護以避免破壞，對林分蓄積量低及低生產力的林地，以再造林或加強經營森林使之再生，具高生產力林地可從事林業經濟性經營使其收穫最大化，以供日後木材市場使用。由於二氧化碳吸存能力與林地生產力有顯著的關係，因此，可由天然林合理撫育及提高人工林經營效率兩方面著手。

依第三次台灣森林資源及土地利用調查結果，台灣森林資源之天然林面積有1,527,500公頃，佔台灣森林面積之72.7%，

對森林資源吸存大氣二氧化碳扮演極重要的角色。但由於森林吸存大氣二氧化碳量的多寡乃取決於森林淨生長量，未受干擾的天然林雖可吸收大量的二氧化碳，但森林群落中的其他植物、動物和微生物呼吸量大，枯枝落葉大量分解消耗有機質而釋放出二氧化碳，因此，天然林吸收和釋放的二氧化碳量基本上是平衡的。天然林在碳貯存量雖然保存有高蓄積，但其生產量與枯死量略維持平衡，故淨生長量大致為零。天然林若原本林相優良，自然無需多做干擾，如果天然林蓄積量低、生長量差、林相不良的低生產力森林，則有改善的空間與潛力（吳俊賢，1999）。欲提高天然林之碳淨吸存量，對低生產力的森林，可應用人工管理之育林體系促進天然更新的經營策略，以改善林況，調整林木生長空間，促進天然更新及幼樹幼苗生長，使森林之不同林齡結構的林分能順序延續地更替調整，以維護林分原有生物與演化程式，豐富新生林分結構，並復舊原有林分結構的型態、數量與功能，建造具健康、複雜性與異質性的多層次壯年天然林分結

構，促使成為具混合林與複層林型態之林分，以豐富林分歧異度與生產力，此種近天然式的育林經營方式，為德國森林經營時所採用。

提高人工林經營效率，以增加林地的生產力，在增加生長量之餘，也相對提高碳吸存量，在做法上，可藉延長輪伐期以增加森林林地碳量的蓄積；栽植時，在適地適木的原則下選擇適當樹種；改善林木育種技術、林下栽植等來達成最適生產力和林地碳密度的增加；另對林地進行撫育、施肥、育林處理技術的使用與改進（如疏伐、修枝、森林齡級和空間結構的調整），以增加碳吸存量。如本島人工林造林面積最多之樹種－柳杉人工林，每公頃可貯存碳量為161公噸，換算為貯存二氧化碳量為591公噸（林俊成等，1999）。林齡為13～23年生之台灣杉人工林，每公頃二氧化碳吸存量平均為282公噸，由於造林地之林木尚未達成熟的狀態，仍持續生長中，因此，如能提高林地生產力，將可提高二氧化碳吸存量（李國忠等，2000）。依林俊成等（2002）之全民造林運動二氧化碳吸存潛力之經濟效益評估的研究結果：樟樹林齡為20年的碳吸存量為每公頃50.76公噸，台灣櫟林齡為20年的碳吸存量為每公頃84.75公噸，柳杉林齡為20年的碳吸存量為每公頃33.27公噸，杉木林齡為20年的碳吸存量為每公頃30.61公噸。

（三）規劃永續林木收穫及提高林產品使用效率

林木屆伐期而伐採，便將林木狀態所貯

存的碳加以收穫，林木收穫後，將原先所貯存的碳，以林產品的形式固定。李國忠等（2004）針對台大實驗林生態系經營示範區內之人造森林，以野外調查資料推估各樹種之生長潛力，再以碳吸存評估模式模擬現有柳杉人造森林不同林分經營策略在20年後之碳吸存潛力。結果顯示，將森林做適當的收穫經營，且伐採後再造林，則對林分的碳吸存量有所助益。而林木伐採後，便將林木狀態所貯存的碳加以收穫，將原先所貯存的碳，以林產品的形式固定。因此，如能同時提高木材的利用率，則碳吸存量比維持現況為高（林分再造林所增加的量加上固定於林產品的量）。Houghton（1996）認為提高林木收穫過程之生產效率、延長林產品使用壽命等皆會降低碳的釋放速率。因此，在伐採集運時，提高林木收穫和過程的效率，改良收穫技術，可避免碳的損失。台灣99%以上木材需求由國外供給，目前木材輸出國已逐漸重視該國森林的保育而減少當地森林的伐採，台灣木基工業如未積極開拓新的管道時，將可能產生木材原料來源不足的問題，欲減緩此一衝擊，提高木材自給率為必然趨勢。增加木材自給率時，如能同時提高林產品生產及資源利用效率，減少廢材產出量，將可減少碳流動排放量。

（四）減少森林破壞衝擊

森林除林木可吸存大氣二氧化碳，其枯枝落葉層及森林土壤也有貯存碳的能力，不當林地破壞是造成森林二氧化碳釋放的最大原因。Marlandan and Marland（1992）指



出大規模的立地、成熟林木和低生產力林地，要回歸到原來的碳的吸存狀況需要很多年。改變林地利用方式，造成森林生產力的降低與生物量的減少，微氣候的改變，使森林的擾動頻率增加，如森林火災、林地裸露，土壤流失與退化，使森林林木及土壤中所貯存的有機碳快速流失。同時因林地破壞也使森林的林分的齡級分佈產生變化，幼齡級比例的增加，使森林吸存二氧化碳的功能減弱。

（五）使用綠色產品，加強資源回收

使用綠色產品（林產品），來替代製造過程中耗能量大的產品（如金屬製品），可節省節源消耗，減緩溫室效應的壓力，林產品在製程上所排放的二氧化碳與能源消耗，與其他材料而言相對為少。如用木材原料替代其他原料，不僅在能源消耗上節省，木質材料的利用可延遲碳釋放於大氣中，因此，使

用林產品可以替代金屬、鋁、混凝土和其他材料，可減少能源的消耗和減少石化能源的消費。在相同的能源效率之下，木材的二氧化碳排放量明顯地少於石化原料所排放；在等量熱值比較時，木材與燃料油燃燒之二氧化碳釋放量，燃料油229公斤（1噸木材相當於229公斤燃料油）全部的二氧化碳排放量為1,023公斤，木材僅為66.4公斤（陳載永、莊純合，1999）。各種材料在製造時所消耗的能源及碳的釋出量，木質材料則為其他金屬材料的數十分之一至數百分之一（王松永，1998）。因此，木質材料經常被稱為生態材料，其對環境改善的貢獻除了木質材料外，生態能源的利用亦為目前許多先進國家所重視，而加強廢紙、廢料的再回收及循環利用，可減少林木伐採的壓力。🌲

參考文獻（請逕洽作者）



（圖片 / 作者提供）