

# 森林資源碳吸存與碳排放權交易

◎李國忠／台灣大學森林學研究所  
林俊成／林業試驗所林業經濟系

## 一、森林資源之碳排放權交易制度基礎

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）通過「京都議定書」，對造林吸存碳的貢獻有所肯定，規定1990年以後所進行之造林、再造林及森林採伐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，並建立「清潔發展機制」（Clean Development Mechanism; CDM），此機制之設立，為另一種形式的共同減量（Activities Implemented Jointly; AIJ），使森林資源所吸存的碳量，將成為一種可交易的產品。

## 二、森林資源二氧化碳吸存量研究

台灣森林資源二氧化碳吸存量研究，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無森林砍伐的狀況下，台灣森林資源每年可吸存大氣中17.38百萬公噸的二氧化碳。楊盛行（1997）採用聯合國氣候變化政府間專家委員會（Intergovernmental Panel on Climate

Change; IPCC）方法計算台灣地區森林之二氧化碳吸收量，以1994年第三次森林資源調查資料，台灣森林資源可吸存35.3百萬公噸的二氧化碳。楊榮啓、馮豐隆、黃俊維（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。林俊成、李國忠、林裕仁（1999）估算林齡為7-81年生之柳杉人工林二氧化碳吸存量為每公頃591.21公噸。李國忠、林俊成、陳麗琴（2000）估算林齡為13-23年生之台灣杉人工林二氧化碳吸存量為每公頃平均為281.6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，將可提高碳的吸存。

國外森林資源二氧化碳吸存量之研究，Sedjo（1989）試算造林對二氧化碳的吸存量，在普通人工林每公頃年平均生長量為15立方公尺的林地，每公頃每年可吸存14.3公噸的二氧化碳。Dixon et al（1993）估算不同森林經營方式之二氧化碳吸存量，當輪伐期為50年，折現率

為5%時，在熱帶地區，經天然更新之林地二氧化碳吸存量為每公頃715公噸，農地造林之林地二氧化碳吸存量為每公頃220-458.3公噸，砍伐跡地造林之二氧化碳吸存量為每公頃238.3公噸。溫帶地區之荒地造林或新植造林二氧化碳吸存量為每公頃440公噸，砍伐跡地造林二氧化碳吸存量為每公頃205.3公噸。Pedro et al (1994) 分析馬來西亞沙巴 (Sabah) 地區大規模種植龍腦香科 (Dipterocarpaceae) 林木對二氧化碳的吸存效果，初步估計輪伐期如為60年，每公頃可吸收715公噸的二氧化碳。Maclaren (1996) 分析紐西蘭人工林地二氧化碳的吸存量，當輪伐期為20-50年時，平均每公頃二氧化碳的吸存量約在264-685.6公噸之間。

### 三、森林資源吸存大氣二氧化碳之經濟效率

森林資源吸存大氣二氧化碳所需適應成本較由產業來減少二氧化碳排放量之減量成本經濟。例如：丘依樞 (1994) 引用國外文獻，以產業結構調整來削減二氧化碳每公噸所需費用約為100美元；楊浩彥 (1998) 研究發現，如調整台灣地區產業結構來減量1%的二氧化碳，將使國民生產毛額下降0.016-0.088%；許志義、周鳳瑛 (1999) 評估台灣地區二氧化碳減量對產業結構的影響，在不同情境下，實證結果顯示其二氧化碳減量成本每公噸在345-404美元。森林資源吸存大氣的二氧化碳所需適應成本，Winjum et al. (1993) 估算熱帶地區造林吸存二

氧化碳每公噸所需成本為0.82-1.64美元。Dixon et al. (1993) 估算熱帶地區造林吸存二氧化碳每公噸所需成本為1.64-16.36美元，溫帶地區造林吸存二氧化碳每公噸所需成本為0.55-13.64美元。Houghton (1991) 估算熱帶地區造林吸存二氧化碳每公噸所需成本為1.09-10.09美元。Dudek and LeBlanc (1990) 估算造林吸存二氧化碳每公噸所需成本為6.64-10.67美元。Van Kooten et al (1992) 估算造林吸存二氧化碳每公噸所需成本為5-45美元。林俊成、李國忠、林裕仁 (1999) 估算柳杉造林地吸存二氧化碳每公噸所需成本為新台幣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。而造林不僅可吸收與貯存二氧化碳，同時也可提供國計民生材料，促進木材工業與林產品市場繁榮發展，故增加造林面積、改善林分結構，提高林地的生產力，也可提高林木吸收與貯存二氧化碳量。

### 四、森林資源碳排放權交易制度實例

二氧化碳排放量多的國家或公司，藉提供資金以協助其他國家或地區造林，並可將其造林所吸存的二氧化碳量，納為其減量成果，此即以較低的成本得到較多的二氧化碳抵減量。而擁有森林資源的國家或地區，藉其他國家或公司的資金援助進行造林，不僅可減輕當地大氣二氧化碳濃度，並藉森林的永

續經營，可厚植木材來源，提供未來民生與林產品工業利用，也同時將所吸存的碳交易或抵減量賣給資金提供的國家或公司。在造林資金提供者與造林行為經營者間，藉森林資源碳排放權交易制度的實施，開創了一個雙贏（win-win）的局面，因此碳排放權交易將變成廿一世紀的重要產業（Totten, 1999）。世界上已有許多國家正從事森林資源碳排放權交易制度，茲將各國執行的實例列舉如下：

#### （一）巴拉圭（Paraguay）

自然管理委員會（Nature Conservancy），共投資3.8百萬美元保護約6萬公頃的拉丁美洲最後殘留且未被干擾的熱帶森林，美國AES（Applied Energy Services）公司投資其中約2百萬美元以得到碳排放權，其碳抵減成本約為每公噸0.14美元，其協定時間達35年。

#### （二）哥斯大黎加（Costa Rica）

哥斯大黎加的CARFIX計畫，此計畫目標包括森林保育、碳吸存、減少土壤沖蝕和水資源的衰退等，這個結合森林保存和永續森林經營計畫是被納入世界生物圈保育計畫（World Biosphere Reserve）中，計畫項目包括森林保存、更新、再造林、減少原木砍伐衝擊和永續森林經營，利用碳吸存和森林永續經營的收入來取代以往邊際農業活動的收入，在29萬公頃的土地共投資12.5百萬美元，以吸存7.6百萬公噸的碳，其碳抵減成本約為每公噸1.46美元。

#### （三）百里斯（Belize）

在Rio Bravo Conservation and Management Area（RBCMA）實施碳吸存計畫，於1995年結合包括自然管理委員會（Nature Conservancy）和威斯康辛電力公司（Wisconsin Electric Power Company），底特律愛迪生公司（Detroit Edison Company），Cinergy 會社（Cinergy Corporation），PacifiCorp，Suncor和Utilitree等所結合的電力事業協會，共投資5.7百萬美元來保存Rio Bravo區域13,200公頃的森林面積。藉由計畫的實施，百里斯將獲得集水區保護和生物歧異度保存的效益，區域內的社區將可藉生態旅遊活動及砍伐部分經認證的林木收穫中得到受益，而這些投資的公司可獲得較低成本的碳排放權，將有多於1.6百萬噸的碳以每公噸3美元的成本被吸存。

#### （四）玻利維亞（Bolivia）

玻利維亞的Noel Kempff Mercado國家公園，為一個值得注意和具高度獨特性的碳量抵減的例子，美國電力公司（American Electric Power; AEP）、PacifiCorp、BP America所組成的協會與自然管理委員會（Nature Conservancy）合作，在64萬公頃的林地上，投資9.5百萬美元給當地森林經營團體以保存日後整個原木砍伐的權利。後來，這個投資的面積倍增到150萬公頃，在這保存砍伐的土地上可從事天然更新以增加碳吸存量。對這些公司而言，投資森林保存與復舊，在抵減溫室氣體排放的成本上，

可達較高的成本效率，抵減成本為每公噸美金0.63分（以1997年的幣值計算），同時此計畫的實施將保存廣大地區的生物歧異度，使玻利維亞成為另一個生態旅遊的公開展示場所。

#### （五）馬來西亞（Malaysia）

由於原木砍伐作業會顯著改變森林的結構，因此減少砍伐原木衝擊活動能減少砍伐原木時所造成的損害，在麻薩諸塞州（Massachusetts）的新英格蘭電力系統（New England Electric Systems; NEES），1992年在馬來西亞的沙巴（Sabah）地區投資45萬美元在減少砍伐原木衝擊計畫（Reduced-Impact Logging; RIL），計畫面積共1,400公頃，投資內容除了碳吸存外，尚有發展 RIL技術和程序。NEES在1995年完全領導這個計畫，每公頃將因減少砍伐原木的衝擊而節省約40噸的碳排放量（1,400公頃的區域共節省58,000公噸的碳排放量），成功的NEES計畫擴展到 UtiliTree Carbon Company另外的1千公頃森林地區，預期在公元2000年將可獲益抵減4萬公噸的碳量，在這計畫的40年期間將可抵減10.2萬公噸的碳量。

#### （六）美國（United States）

兩個永續性森林經營（Sustainable Forest Management; SFM）計畫，1.太平洋森林信託的森林永續基金（The Pacific Forest Trust's Forests Forever Fund）計畫，目標在於經由改善森林經營以達碳吸存極大化的效果，計畫目標乃在於增

加北加州的紅木壯齡林的碳吸存量。經由改善森林經營以增加老齡級林分，並減少土壤有機碳的流失和重建天然林的組成結構以達提高碳吸存效果。在2000年至少可吸存28,000公噸的碳量，在2095年時將達65,400公噸的碳量。2.西奧勒岡碳吸存計畫（Western Oregon Carbon Sequestration Project）是在西奧勒岡州的非工業用林地的伐採跡地共375公頃種植林木，包括Trexler and Associates, Inc., Oregon Woods, Inc.和地主參與這個計畫，到2062年，這個計畫將吸存15.2至20.2萬公噸的碳量。

#### （七）巴西（Brazil）

在1998年後期，Peugeot聲明將投資10.8百萬美元在佐雷那（Juruena）及 Mato Grosso State的12,000公頃林地中種植10百萬株的林木，首要目標為使熱帶森林生態系再度得到生息，並使之與老齡林的生物歧異度儘可能接近以達成碳吸存效果。這個將退化土地使之再生而具生產力的計畫預計一年將可吸存5萬公噸的碳量，每公噸碳所需的成本約1.3美元。計畫項目包括5千公頃的伐木跡地再造本土速生樹種，經營7千公頃天然與次生林使之恢復生產力，農地造林區域將提供長期的技術援助。

#### （八）俄羅斯聯邦（Russian Federation）

在莫斯科（Moscow）南方700英哩的Saratov，1993年發起RUSAFOR新植造林計畫，由俄羅斯聯邦林務署（Russian Federal Forest Service）與奧勒岡

(Oregon) 州立大學、環境保護基金和美國環保署共同合作。這個計畫的焦點在邊際農業土地和先前被燃燒的森林林分上減少土壤沖蝕和增加碳吸存，在4個立地共900公頃種植闊葉樹與松類樹種，以減少因土壤沖蝕和生物量分解所排放的碳量，同時藉林木的生長和土壤有機碳的累積以增加森林碳吸存量。這個計畫將可吸存近8萬公噸的碳，每公噸碳吸存所需成本約3.75美元。

#### (九) 澳大利亞 (Australia)

在1998年6月，新南威爾斯 (New South Wales; NSW) 為澳大利亞第一個碳排放權交易的省份，由新南威爾斯省政府與太平洋電力 (Pacific Power) 及Delta Energy兩個電力公司合作，使用造林來抵減溫室氣體的排放效果。太平洋電力在新南威爾斯的森林種植1,000公頃桉樹以取得4,500噸的碳排放權，太平洋電力在隨後的9年有優先購買權利，以得到額外的54,000噸的碳排放權。Delta Energy種植41公頃的蒙達利松 (Pinus radiata)，在未來30年可得到5,775公噸的碳排放權。

#### (十) 墨西哥 (Mexico)

Scolec Te 碳吸存計畫 (Scolec Te carbon sequestration project, Scolec Te 為馬雅方言為生長中的樹) 中，在墨西哥的契亞帕斯省 (Chiapas) 的9個馬雅人 (Mayan) 原有社區共計2,200公頃經由再造林與農地造林，這個計畫預計在30年中，將有33.3萬公噸的碳被累積吸存，其

每公噸所需成本約為10美元。

## 五、結語

「京都議定書」的制定，對森林資源吸存大氣二氧化碳的貢獻有所肯定，在1990年以後所進行之造林、再造林及森林採伐之二氧化碳吸收或排放之淨值，可併入排放減量值計算，而碳排放權交易制度的確認，建立「清潔發展機制」(Clean Development Mechanism; CDM)，此機制為另一種形式的共同減量，由於碳排放權可交易及藉造林吸存二氧化碳皆可列入本國的二氧化碳削減量。依第三次台灣森林資源及土地利用調查結果，台灣森林面積占全島面積的58.53%，蓄積量為358.7百萬立方公尺，對吸存大氣二氧化碳具有相當大的貢獻，因此森林資源對大氣二氧化碳吸存、改善溫室效應是值得重視的。

## 參考文獻

1. 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。第215-229頁。
2. 丘依樞 (1994) 探討森林對於溫室效應之控制。中國環保雜誌。(21/22):88-96。
3. 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。
4. 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。台大實驗林研究報告。13 (1):51-60。
5. 楊浩彥 (1998) 溫室氣體減量成本之研究。能源季刊。28 (3):72-80。
6. 楊盛行 (1997) 臺灣地區森林二氧化碳之涵容量估算。中華生質能源學會會誌。16 (1/2):1-10。
7. 楊榮啓、馮豐隆、黃俊維 (1998) 林業對溫室氣體減量策略規劃及衝擊評估 (二) 期末報告。121頁。
8. 許志義、周鳳瑛 (1999) 全球溫室效應與台灣永續發展之研究。八十八年度國科會永續發展研究計畫成果研討會論文集摘要。p.22-23。
9. Dixon RK, Winjum JK, Schroeder PE. (1993) Conservation and sequestration of carbon. *Global Environmental Change* 3 (2):159-173.
10. Dixon RK, Andrasko KJ, Sussman FG, Lavinson MA, Trexler MC, Vinson TS. (1993) Forest sector carbon offset projects: near-term opportunities to mitigate greenhouse gas emissions. *Water Air and Soil Pollution* 70:561 - 577.
11. Dudek DJ, LeBlanc A. (1990) Offsetting new CO<sub>2</sub> emission: a rational first greenhouse policy step. *Contemporary Policy Issues* 8:29-42.
12. Houghton, RA. (1991) Releases of carbon to the atmosphere from degradation of forests in tropical Asia. *Can. J. For. Res.* 21:132- 142.
13. Maclaren JP. (1996) Plantation forestry-its role as a carbon sink: conclusions from calculations based on New Zealand's planted forest estate. In: Apps MJ, Price DT, editors. *Forest Ecosystems, forest management and the global carbon cycle*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. p. 257-270.
14. Pedro MC, Yap SW, Albert G. (1994) Large scale enrichment planting with Dipterocarps as an alternative for carbon offset. In IUFRO editor. *Sustainable Forest managements. Proceedings of IUFRO International Workshop on Sustainable Forest managements*. 1994 October 17-21; Furano, Hokkaido, Japan. 135-145.
15. Sedjo RA. (1989) Forest to Offset the Greenhouse Effect. *Journal of Forestry* 87 (7): 12-15.
16. Totten, M. (1999) Getting it right: Emerging markets for storing carbon in forests. World Resources Institute. 49pp.
17. van Kooten GC, Arthur LM, Wilson WR. (1992) Potential to sequester carbon in Canadian forests: economic considerations. *Canadian Public Policy* (June):105-117.
18. Winjum JK, Dixon RK, Schroeder PE. 1993. Forest management and carbon storage: an analysis of 12 key forest nations. *Water Air and Soil Pollution* 70:239-57. ■