

森林收穫與林產品使用 之碳貯存與流動分析模式

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、森林收穫與林產品使用與京都議定書 (Kyoto Protocol) 規範

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。而森林收穫與林產品使用，並非在短時間將原先自大氣所吸存的二氧化碳再釋放出，而是將林木長期所吸存的碳，以另一種形式加以固定，其固定的時間及數量，則森林收穫效率、林產品之利用率及使用年限而異。因此森林收穫與林產品使用在近年召開的氣候變化綱要公約締約國大會，漸為人所重視，去年 (2004) 召開的第十次氣候變化綱要公約締約國大會 (COP10) 中。來自各國政府的代表的主要討論議題之一，即就土地利用、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，在此指南內容中。即清楚說明並討論森林碳吸存與排放估計方法，而收穫木材產品 (Harvested Wood Products; HWP) 的方法與模式，也受到很多的討論，並有初步的共識。

二、森林收穫與林產品使用之碳量流向概念

森林收穫和林產品的流動與貯存量變動在全球碳循環中是相當重要的，因為二氧化碳流動量取決於植物和土壤的釋放速率，而森林收穫乃將原先所吸存於植物的部分加以改變，因此會影響大氣碳循環。當林木伐採收穫時，大部分成為所得材積，但有部分留置於林地成為殘材而分解將碳釋放回大氣，收穫所得材積，加上進口木材及林產品減去出口木材及林產品的部分，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，因棄置、燃燒，而釋放碳



回大氣，大部分成為林產品而供人們消費使用，在市場上使用之林產品，尚包括進口林產品扣除出口林產品的部分。林產品有其不同的使用年限，市場上使用之林產品當達使用年限時，有部分可再回收使用，成為木質材料而再生產為其他林產品，其他部分則成為廢棄物，便將所貯存的碳釋放大氣。市場上使用之林產品時會因氧化而將碳釋放大氣中，也經由燃燒和林產品的短時間消費使用，而將碳釋放大氣。當森林收穫之後的材積再生長（再造林）和長時間消費使用的林產品中的貯存量增加時，二氧化碳再度被吸存於植物及林產品中，因此經對森林資源與林產品適當管理，能影響森林資源或整個國家二氧化碳的排放水準。

森林資源林木收穫與林產品使用時之碳流動與貯存量來源，包括原木消費（生產用材、薪炭材）、林木收穫後留置在林地及市場上使用之林產品等部分（見圖1）。

三、木質材料與林產品之碳流動與貯存量模式

（一）計量方法

在1996年的IPCC準則中，使用IPCC預設法（IPCC default approach），計量森林收穫與林產品使用的二氧化碳流動與貯存情形，其基本假設，即將森林收穫與林產品使用的二氧化碳排放是納入木材生長和收穫國家，而林產品本身的貯存量並沒有改變。但事實上，林產品為一個碳貯存庫，會隨時間

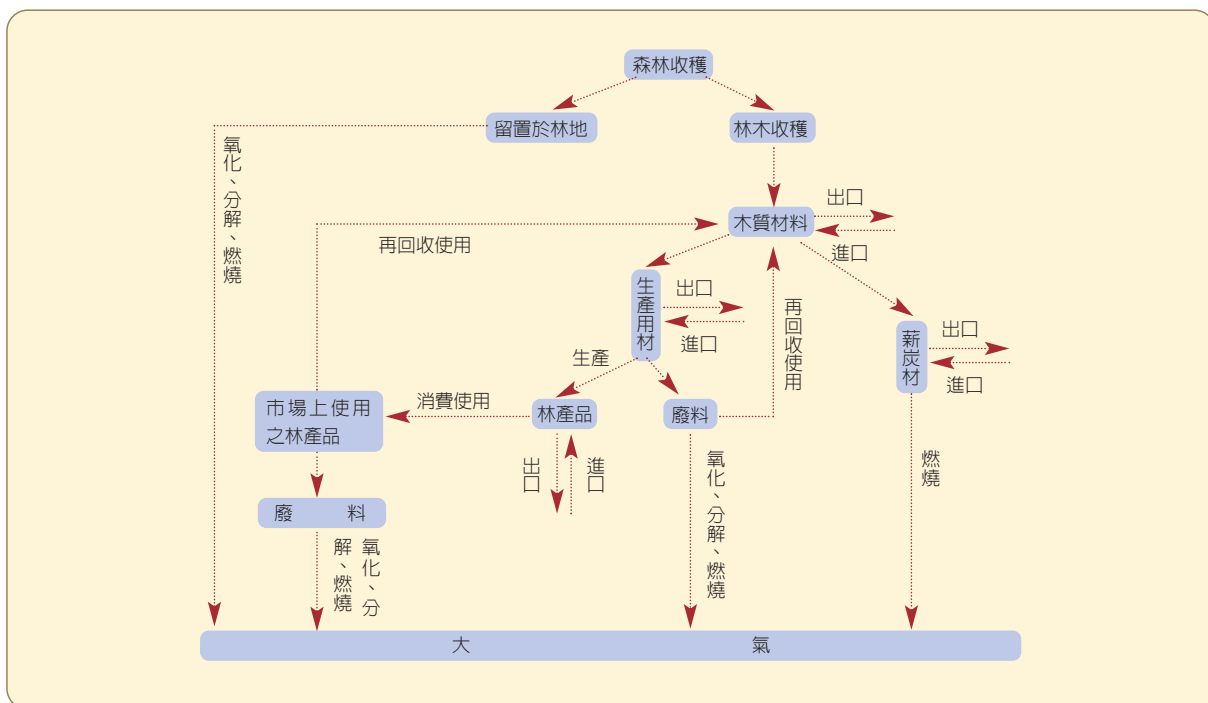


圖1 森林收穫與林產品使用之碳量流向

而有所變化。因此IPCC預設法頗受爭議，之後，在1998年5月，在塞內加爾（Senegal）的Dakar舉行IPCC專家會議，便針對森林收穫與林產品使用的二氧化碳排放和吸存量，探討其計量方法的選擇原則及具可行性的計量方法及計量範圍，提出大氣流動法（atmospheric flow approach）、貯量改變法（stock change approach）、生產法（production approach），並與IPCC預設法進行比較。2001年2月，在紐西蘭（New Zealand）的Rotorua召開林木收穫及林產品使用之碳貯存與流動的研討會，對IPCC預設法、大氣流動法、貯量改變法、生產法有廣泛討論。

1. IPCC預設法

在方法的計量中，林木收穫與林產品使用之二氧化碳排放量是被納入每年木材生產收穫的國家計算（圖2）。但這種方法頗受爭議，因為該方法假設林產品本身的碳貯存量並沒有變化，收穫木材時的碳排放量視同在收穫的同一年度排放回大氣，並未考慮林產

品的使用年限及林產品固定碳量所延遲排放的部分，假如林產品碳貯存庫是保留不變的，那麼，這個方法的假設是合理的，但事實上，全世界的林產品貯存庫正隨著時間的過去持續增加（Winjum *et al.*, 1998）。此一方法有修正的必要及空間，因而衍生出以下三種方法。

2. 貯量改變法

乃把一個國家當做密閉式系統，估算木材生產及林產品消費使用時碳貯存量的變化（圖3）。其變動量乃由木材生長的木材生產國家而轉移到林產品消費使用的國家，是納入於木材消費國家，換言之，貯存量是在木材消費國家所發生變動的，碳貯量可轉移出系統範圍（一個國家），即貯量從一個國家移轉到另外一個國家。貯量改變法計算上需扣除省產材收穫及收穫後留置於林地所減少的碳量外，需加上在林產品消費使用時，長時間消費使用與市場上使用之林產品的流動排放碳量的差值（Winjum *et al.*, 1998），其數

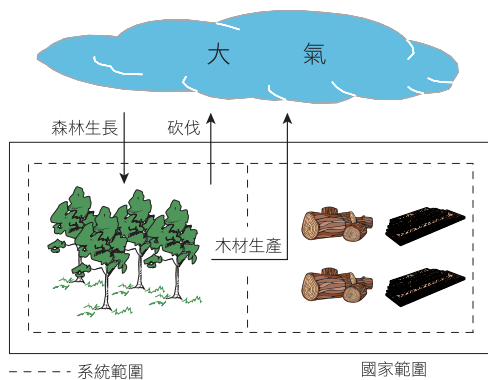


圖2 IPCC預設法（修改自Brown *et al.*, 1998）

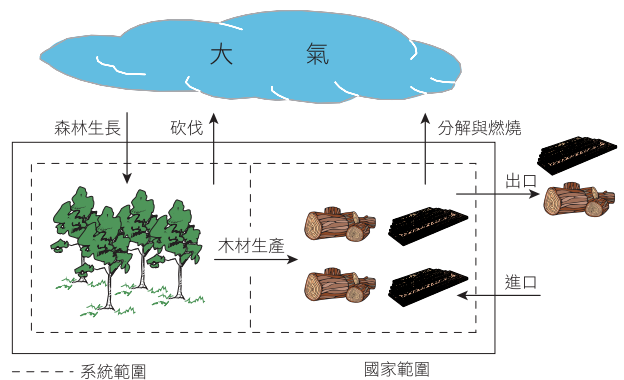
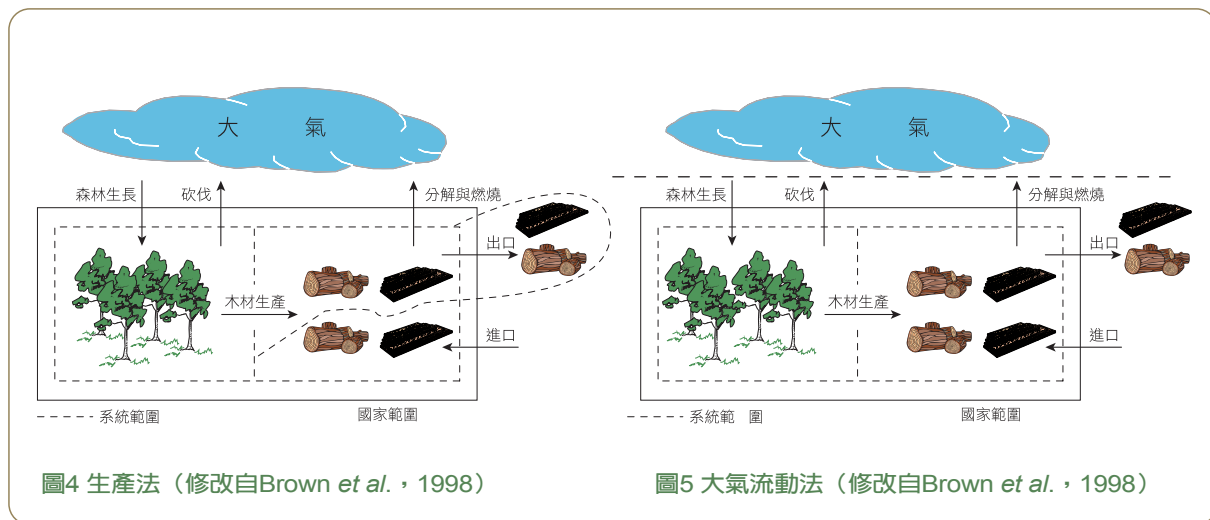


圖3 貯量改變法（修改自Brown *et al.*, 1998）



學模式為：碳貯存改變量 = - [國內林木收穫生產時之碳量 + 林木收穫後留置於林地碳量] + [林產品長時間消費使用時之碳量 - 市場上使用之林產品的流動排放碳量]。

3. 生產法

生產法估算碳在森林和林產品貯存庫的貯量變動情形，其貯量變動量是納入於生產國家中，此方法只估算國內製造林產品的貯存量，並不提供一個國家完整貯存的變化(圖4)。任何碳貯存量轉移出系統範圍時，碳並沒有從一個國家貯量移轉到另外一個國家。假如林產品被交易或移轉，使用生產法只能知道貯存量在何時發生變動，但不知何地發生變動。生產法的缺點是出口國家保留出口林產品碳貯存量，並且負擔林產品最終碳排放的責任，另一個缺點是在林產品進口國貯存量中無法估算減少廢料的數量，而進口國家並沒有改善林產品使用效率的誘因。生產法在計量時，林產品被售至國外而離開國內，此一部份在計量碳的淨改變是困難而

圖5 大氣流動法 (修改自Brown *et al.*, 1998)

且複雜的，因為木材可能在一個國家生產，而出口到另一個國家，進口國家有可能又將木材出口到第三個國家，因此追蹤林產品最終在那個國家消費是困難的 (Jaques, 2001)，故林產品的量在很多國家可能在木材收穫上是被混淆 (Pingoud, 2001)。因此，生產法能被視為IPCC預設法與大氣流動法或者貯量改變法的一種過渡方法。

4. 大氣流動法

大氣流動法估算在一國的範圍內，森林和大氣之間林木收穫與林產品使用和大氣間之碳流動變化(圖5)，與何時和何地發生實際的排放和吸存量，從收穫原木與林產品的碳總排放到大氣的部分是納入於消費國家，任何碳貯存量的排放可轉移出系統範圍，是從一個國家的貯存量移轉到另外一個國家，假如木材是國內自行生產和消費，在排放的分配上是沒有改變的。

在計量上，林木收穫與林產品使用時流動到大氣的碳量來源包括：因林木砍伐收穫

而留置於林地淨量、薪炭材燃燒、林產加工時所產生廢材、林產品短時間消費使用時的直接氧化釋放及市場上使用之林產品流動排放等。其數學模式為：碳流動量 = [林木收穫後留置於林地碳量 + 薪炭材之碳量 + 生產過程所消耗（殘留物、廢材）等廢料之碳量 + 林產品短時間消費使用時之碳量 + 市場上使用之林產品的流動排放碳量]

（二）計量方法之比較

在國家尺度而言，這幾種計量方法有幾點不同（Lim *et al.*, 1999）：

1. 森林收穫與林產品使用和大氣間之碳流動關係

大氣流動法計算碳釋放到大氣的淨排放量，而貯量改變法和生產法則計算森林和林產品貯存庫中碳貯存量的變動情形。

2. 計量範圍

大氣流動法計量範圍在於整個國家和大氣之間碳的流動變化，因此，需要計算釋放到大氣的碳流動量。貯量變動法計量範圍是在一個國家內，貯量變動量是包括國家所消費（含生產及進出口）的林產品。生產法計量範圍在林木生產量上，碳的排放是計量在林木生產國家，並未列入出口和其他木質材料消費的部分。

3. 空間的尺度

在國家的空間尺度範圍，這三種方法是有差別的，一是在計量範圍的不同。二是處理進出口木質材料之碳變動量是不同，這個差別涉及國家之碳減量政策和排放責任的歸屬問題。三是在計算碳變動、排放和吸存在

何時、何地發生的問題上是不同的，這個差別涉及森林資源管理、使用進口薪炭材和廢料減量策略問題。大氣流動法說明碳排放何時、何地發生，貯量變動法則說明貯量變動何時、何地發生，生產法說明貯量變動何時發生，但假如林產品是出口則並未說明發生地點。

4. 所需資料及敏感性

愈詳細的計量資料，可減少計量結果的不確定性，但對一些國家而言可能會有困難，因為資料的獲得需要經驗的累積、獲得資料之準確性和可行性、收集資料所費成本的高低、空間資料的追蹤、時間序列資料的完整和潛在的雙重計量情形，皆需花較多的成本才可能完成。貯量改變法比大氣流動法需較少的資料和計算，成本可能較少，但計量結果的描繪則較不完全，在產品貯存量的計量，可由流動的變化中導出，但在使用年限、氧化率具較高的不確定性，為降低不確定性可由直接取樣來達成，但成本可能是昂貴的。因此每個方法各有利弊。對資料的敏感性比較，大氣流動法對使用年限、林產品進出口量變動量是較敏感的（Thompson, 2001；Rosland, 2001），生產法對出口林產品的使用年限是敏感的。

5. 綜合比較

IPCC預設法是不考慮碳在林產品的長期貯存量，假設林產品貯存庫的部分是沒有變動，和全部排放是納入於生產國家每年收穫的部分，忽略森林吸收碳而貯藏於林產品並隨著時間改變的可能性。大氣流動法中，



進口木材的總排放是被納入進口消費國所排放部分，大氣流動法不鼓勵進口薪炭材取代石化燃料，它鼓勵國內永續的木材收穫與使用來替代石化燃料。貯量改變法和生產法的差異在於對於長時間消費使用林產品碳貯存量的認定差異。貯量改變法認為透過進出口貿易後，長期使用林產品所貯存的碳量應納入進口消費國所貯存，而生產法則認為應納入出口生產國的貯存量。

(三) 計量方法的選擇原則

可依調查目的，經由以下準則來選擇適當的計量方法：

1. 計量方法的複雜性

計量方法的複雜程度，影響實際應用時的難易。大致而言，隨著要求的準確度增加，複雜性也愈高。在IPCC預設法中，林產品所貯存的碳量假設在收穫時便被排放出，並未考慮林產品的使用年限、氧化率、林產品的進出口等問題，因此在方法上較其他三種方法簡單。貯量改變法比大氣流動法只需要較少的資料和計算，但所得結果的描述則較不完全 (Jaques, 2001)。

2. 資料取得難易與成本考量

Rosland (2001) 認為計量時最主要的問題在於資料的可獲得性及不確定性。因此所有的計量方法需要較詳細的資料，對於所有方法，資料取得的難易程度限制方法使用的可行性。大氣流動法、貯量改變法、生產法所需的資料都比IPCC預設法為多，但所需資料較為類似，IPCC預設法所需資料，可由FAO的統計資料取得，而其他三種方法則尚

需原木和林產品生產、進口、出口的資料，在做較精細的評估時，尚需要估計過去所使用木質材料的數量資料。貯量改變法，尚需林產品的消費資料 (如木屋、家具等等)，但很少國家直接地測量這些貯存量，因此可能限制這個方法的使用。對於生產法而言，主要的限制在於需要全部國家出口產品的貯存量資料，資料的取得難易，將成為方法是否可行一大因素。用材和林產品的進出口資料，可由商業性生產的林產品中加以推導得出，但在收穫率和薪炭材上資料可能會因未透過正式的收集與記錄而有所誤差，可能會因為國家資料的可用性與統計資料的準確性問題，而在方法的使用上會有所限制。一般而言，國家資料如果取得容易，不用再額外去取得其他資料時，則資料取得的成本相對為低。

3. 方法的準確度

明確的調查目的和適當的計畫工具及方法，可反應真實資料的完整性和準確性，並提供碳減量誘因和碳量分配的責任，因此可能需要一個混合的計量方法。在任何方法的計量，應提供真實的碳排放與貯存量與時間、空間的碳流動與變化量。一般而言，要求計量方法的準確度愈高，則會增加方法使用時的複雜性，估計的誤差尚取決於資料品質和計量方法所假設的數字的敏感度，較粗略的的假設數字可能產生更大排放計量上的誤差。由於大氣流動法、貯量改變法、生產法這三種方法，計量時包含很多假設，如產品的分解和氧化率、材積轉換為重量之轉換

係數和估計伐採後留於林地部分的比例等，Winjum *et al.* (1998) 研究顯示：材積轉換為重量之轉換係數、碳量轉換係數、幹材轉換為全株的轉換係數等，具有較高的敏感度，另木材和紙類的分解速率、廢料率等在林產品的使用上具有不確定性，會因國家之間的經濟活動和廢料處理與再循環技術而有所差異，因此計量時，則應先對這些假設加以確定。而IPCC預設法，由於對排放到大氣的反應是不準確，因此被認為是較差的方法(Thompson, 2001)。因此可因調查目標、獲得資料的熟練度、精確度和完整性的要求而有不同層級的資料，要求的層級愈高其複雜性及所需的資料也愈多(Lim *et al.*, 1999; Jaques, 2001)。

4. 排放計量的不確定性

資料的取得的完整性及可能誤差的範圍，將對排放計量結果產生不確定性，如果資料蒐集、木質材料流向分析完整，則估算林產品排放的誤差相對地為低，但在非正式的收穫(少量伐木或盜伐)的資料如無法取得將對計量結果產生誤差。對於資料缺乏國家，估算林產品排放所產生的誤差可能很大。Skog (2001) 在計量美國森林木材收穫的碳排放量時，在計量所需資料的不確定性中，分為低不確定性的資料(10%)及中高不確定性的資料(20%)，木材和紙產品的生產量、原木收穫到用材的轉換係數、林產品的進出口、林產品使用量等資料具低不確定性。而使用林產品所產的廢料、廢料的處理、市場上使用之林產品的年份、在使用後

的產品處理方式為燃燒、分解、成為垃圾、在垃圾的分解率等的資料則具有中高不確定性。

5. 與京都議定書規範的關聯性

京都議定書規範1990年後各國的碳減量目標，其中在森林資源部分，雖未提及森林收穫與林產品的碳貯存與流動的變化，但這個部分也是相當重要的，因此在計量方法的選擇上，估計碳貯存量的變動，可選擇貯量改變法和生產法，估算碳排放量時，可選擇大氣流動法做為估計基礎根據。

6. 證明和可透視度

在京都議定書中，要求有關碳排放源和吸存匯應以較易了解和能驗證的方法來計量並提出報告，大氣流動法、貯量改變法、生產法皆能達到要求。大氣流動法詳細說明影響森林收穫與林產品中碳流動的過程，為政策制定提供所需要的資訊，可用來預測、認定國家估計測量的結果。貯量改變法，因為未追蹤變動的過程，所以較不適用於預測。生產法只可針對國內的、非進口部分及林產品進行預測。

7. 一致性

所謂一致性，乃指計量方法能符合其他部分準則的要求，一致性準則呈現這些方法中的差別，大氣流動法能與能源部門一致，排放是納入發生時間與地點的國家，生產法處理排放如同IPCC預設法，對於國際貿易方式所貯存的碳和土地使用改變所排放的部分是一樣的，排放同樣被納入於生產國家，貯量改變法與土地使用改變所排放的部分和準



則所規定其他生質材料的處置是一致的。

(四) 計量結果對森林資源經營的效果與誘因

IPCC預設法、貯量改變法、生產法和大氣流動法等四種計量方法，對於碳減量所提供的誘因大小，可做為選擇溫室氣體統計時的重要準則。計量方法對森林資源經營的效果與誘因，可區分為以下幾種 (Lim *et al.*, 1999)。

1. 增進森林資源碳貯存保育的效果

大致而言，這四種方法皆可促進森林碳貯存的保育，因為如果減少森林碳貯存量結果，相對會增加碳釋放回大氣的量。

2. 森林伐採在計量上的意義

森林伐採所造成的碳排放量，一般是納入森林伐採國家中計算。但大氣流動法中，如果森林伐採後將木材出口，則碳排放量納為進口國家計量，因此會增加森林伐採。

3. 林木長期貯存的生物量轉為林產品的誘因

IPCC預設法未考慮林產品長期使用所貯存的碳量，因此對林木長期貯存的生物量轉為林產品較不具誘因，而貯量改變法、生產法和大氣流動法，有考慮林產品長期使用所貯存的碳量。

4. 使用進口生質燃料替代石化燃料的誘因

IPCC預設法、貯量改變法、生產法有較大的誘因，因為是進口生質燃料，其排放量是被納入在林木生產國家而非進口消費國家，而大氣流動法，因為排放量是被納入進口消費國家，因此進口生質燃料將不會受到鼓勵。

5. 使用國內生產的生質燃料替代石化燃料的誘因

由於林木收穫後，可經再造林來達到碳的平衡，因此國內生產生質燃料來替代石化燃料，可相對減少碳的排放。另在大氣流動法上，生質燃料出口國家可相對減少國家的排放量。

6. 永續生產木材進出口貿易的誘因

IPCC預設法未將木材進出口的部分納入計算。貯量改變法將進口木材計量在進口消費國家，出口木材計量是納為出口國家中。生產法，進口木材的碳貯存量不納為木材進口國家計算，而納入木材出口國家計算，因此，和IPCC預設法與貯量改變法相較，較不鼓勵進口木材來消費反而是鼓勵出口長期使用的林產品。大氣流動法，則較不鼓勵永續生產木材的進口，而是鼓勵木材出口，因為進口林產品的碳排放量是被納入為進口國家。

7. 國與國間生質燃料交易的誘因

IPCC預設法、貯量改變法、生產法，並不鼓勵國與國間生質燃料的交易，而大氣流動法，因生質燃料被燃燒的碳排放量是納為進口國家中，則提供較大的誘因。

四、台灣地區木質材料與林產品使用對碳流動與貯存之實證分析

在分析木質材料與林產品使用對碳流動與貯存效果，其方法有大氣流動法、貯量改變法、生產法與IPCC預設法。但由於台灣地



▲森林收穫後便將碳固定於林產品中。

區近年來木材皆仰賴外材，木材自給率極低，因此以生產量法來推估，將導致無法顯現真實木材供需的碳量流動變化，且估算結果差異不大，而IPCC預設法法在估算上忽略木材的生產與消費，因此森林資源林木收穫與林產品使用時之二氧化碳流動與貯存效

果，應先計算其碳量流動與貯存，並採用大氣流動法及貯量改變法進行分析。

根據台灣地區木質材料消費量及林產品流向，與2000~2012年之木質材料及林產品消費情形預測結果，藉材積與各轉換係數加以轉換為碳含量。應用大氣流動法分析1990~1999年間，台灣地區木質材料與林產品消費使用時流動到大氣的碳量，結果顯示：1990年時流動到大氣的碳量為228.99萬公噸，1992年時流動到大氣的碳量為達高點，為248.55萬公噸，之後則略為下降，1999年時流動到大氣的碳量為226.77萬公噸，預估2012年時為290.22萬公噸。由結果可以看出流動到大氣的量，大致隨時間增加而增加。流動到大氣的碳量，主要來自市場上使用林產品已屆年限而釋放、生產過程中的廢料產



▲林產品為生態材料。

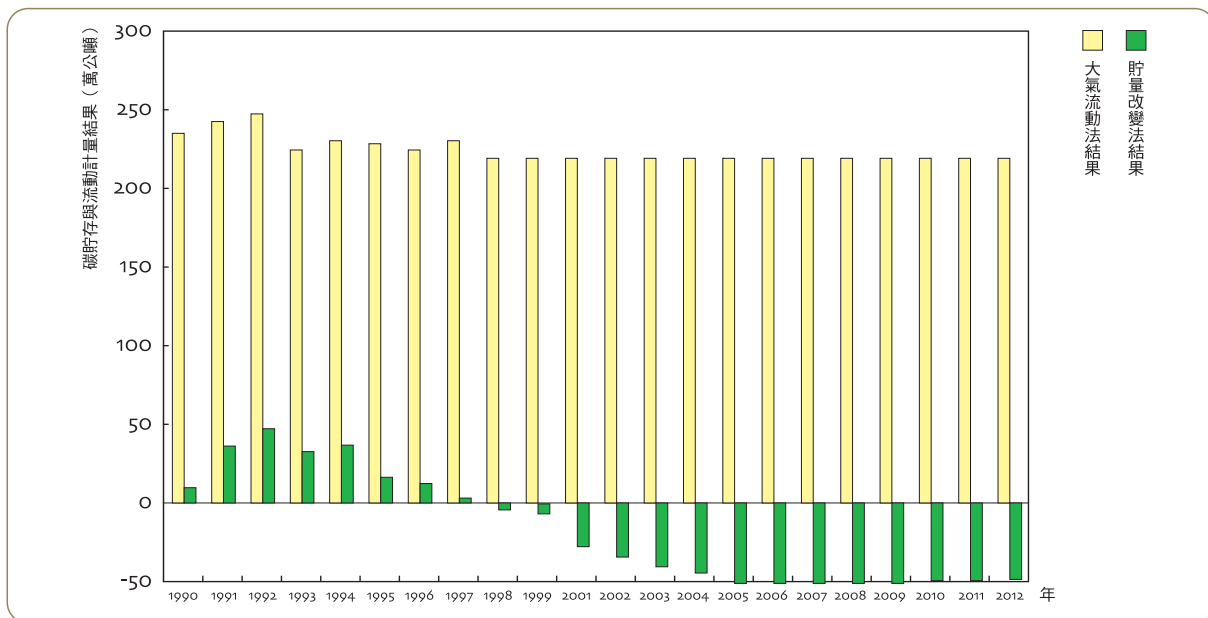


圖6 大氣流動法與貯量改變法計量結果

出，及短期使用的林產品，但其比例則在不同的時間有不同的結果，以1999年為例，主要來自市場上使用林產品已屆年限而釋放占流動量的44.96%，生產過程中的廢料產出占流動量的41.31%，及短時間使用的林產品，占流動量的12.50%，其中延長林產品的使用年限，將可較有效減少林產品的碳流動量。使用貯量改變法分析1990~1999年間，台灣

地區木質材料與林產品消費使用時碳貯存量變化情形，1990~1997年間碳貯存量為正值，1998~1999年間碳貯存量為負值。1990年時碳貯存量為13.17萬公噸，1999年碳貯存量為-9.45萬公噸，預估2012年時為-49.13萬公噸，貯量改變為減少的情形（圖6）。其主要原因在1997年以前，長時間消費使用之林產品生產量所貯存碳量，比市場上使用之



▲ 林產品為生態材料。



▲ 森林收穫後便將碳固定於林產品中。

林產品的碳流動排放量為多，而林木收穫總碳量及林木收穫時將林木留置於林地部分的碳量則變化不大，因此碳貯存量計量結果為正值。結果顯示，林產品長期生產量增加，將可增加貯存量，而減少市場上使用的林產品之碳排放量，可增加碳貯存量。

五、木質材料及林產品消費使用之碳減量策略

(一) 延長使用年限

在貯量改變法的計量時，長時間消費使用之林產品生產量增加1%時，碳貯存量改變增加2.617%，當所有的林產品的使用年限增加1年時，則貯量改變法之敏感度分析結果，可增加9.655%。由大氣流動法之敏感度分析結果，可減少1.492%，可見延長使用年限，對減少木質材料及林產品消費碳的流動與增加碳的貯量是有較大的助益。

(二) 加強廢料減量及廢料管理

使用大氣流動法分析森林收穫時與大氣間碳量的流動，生產過程中的廢料產出占流動量的41.31%，及短時間使用的林產品，占流動量的12.5%，由敏感度分析結果，廢材的總產出碳量增加1%時，流動到大氣的碳量增加0.413%。因此廢料減量及再利用，將可有效減少碳的流動。

(三) 生態材料的使用

林木經各種林產加工過程，大部分成為各種形式之林產品，便將長期蓄積所貯存碳量，以另一種固態林產品形式貯存。而林地可藉再造林，可吸存大氣中的二氧化碳。經



▲林產品的再回收利用。

本研究計算結果，木質材料消費與林產品消費使用流動到大氣中的碳量約為台灣森林年碳吸存量的37.55~47.26%。因此林產品的使用，可延緩碳的釋放，在碳循環中具有調節的功能。在貯量改變法的計量時，市場上使用之林產品的流動排放量增加1%時，碳貯存量改變減少3.109%，流動到大氣的碳量增加0.480%。由結果看出，市場上使用之林產品的流動排放量的增加，對貯量改變及流動量的影響較大，此原因乃市場上使用之林產品為一較大的碳貯存庫，因此數量的變動，對貯量的計量結果影響較大。而林產品除具有貯存碳的功能外，使用林產品，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，因此，木質材料經常被稱為生態材料，對環境改善有極大的貢獻。♻️

參考文獻（請洽作者）