

從



吸收

碳素貯藏看木材利用 與造林樹種之選擇

王松永／台灣大學森林學系教授

1. 前言

由於人類活動大量燃燒石油、煤炭等石化燃料而釋放大量 CO_2 ，在 1988 年大氣中 CO_2 濃度以超過 350ppmv，造成地球嚴重的「溫室效應」，如何降低 CO_2 之產生已是全球各國關注的問題。1997 年 12 月聯合國在日本京都召開國際環保會議，擬定聯合國氣候變化綱要公約京都協議書對 CO_2 的減量水準，如我國被要求在 2000 年回歸至 1990 年排放水準，則將使我國內生產毛額(GDP)萎縮 34% 以上，對於國內經濟成長勢將造成重大衝擊。此意味著台灣經濟將倒退 6、7 年以上。為因應此課題除從節約能源，能源結構調整，產業結構及改善工業能源消費或製程等著手，或使用不會產生 CO_2 之能源如太陽能、核能外。另外增加造林面積，利用活性化森林吸收 CO_2 亦為積極的措施，並且為該公約所承認可抵消被要求 CO_2 減量的一種手段。

木材之生產與利用可考慮是從大氣中吸收固定 CO_2 ，再將 O_2 釋放至大氣中，最後將部份碳素儲藏。此全部系統以地球規模展開時，在世界各地間會以各種關係相連結，相互間會形成複雜的流程。

森林所扮演的水源涵養、國土保安、淨化空氣、提供保健、遊樂場所等無形效益是無庸置疑。森林是一種生命體，其會藉光合作用吸收固定 CO_2 ，一般樹木為生產 1 噸之植物

質(纖維素等)，需吸收1.6噸 CO_2 ，而會釋出1.2噸 O_2 。一般認為在正常狀態下，森林生態系會維持平衡。其碳循環亦可維持平衡狀態，此時森林即不是碳素貯藏源(sink)，亦不是釋出源(source)。但遺憾的，近年來由於人類活動過度頻繁產生多量 CO_2 ，需藉森林之光合作用加以吸收固定，為達成此目標，經常維持林地的活性化，即增加人工林面積有其必要性。此可由1976～1984年間，日本全森林2500萬公頃林地，每年生長量為1660萬噸，其中天然林1500萬公頃，生長量為300萬噸，只佔18%，而人工林1000萬公頃，生長量則為1360萬噸，佔82%。很明顯的，人工林均為壯齡木為 CO_2 貯存源，可貯藏大量碳素，但天然林均為老齡木為 CO_2 釋出源，貯藏之碳素量相當有限，此由日本人工林面積只佔全森林之40%，但每年則吸收固定82%之碳素量可明白。值此國內正推動全民造林之際，正可藉此造

林之森林吸收工業生產所排放之 CO_2 而達到 CO_2 減量之目標。有關造林樹種之選擇需考慮到 CO_2 之吸收與固定效率。因樹木會進行光合作用，吸收與固定 CO_2 之同時，亦會進行呼吸作用分解其所合成的碳水化合物以獲得生長所需能量，兩者相差，即純生物量才是林木所固定的碳素量。木材之構成元素為50%之碳，43%之氫及6%之氧，故密度較大之樹種，其單位體積林木所固定之碳素量會較高，如相思樹木材絕乾密度約 $0.8\text{g}/\text{cm}^3$ ，則其每 m^3 會固定400kg之碳素在木材內部。相對的，柳杉材絕乾密度約 $0.38\text{g}/\text{cm}^3$ ，則其每 m^3 只會固定190kg碳素在木材內部。

森林主產物之木材為民生資財，而且被公認為下一世紀(21世紀)的生態材料。在其達成上述公益功能後，達到伐期森林亦需加以伐採，供人類利用，因適切的使用木材不但不會破壞地球

環境，由於其伐採跡地更新造林，反而能帶動森林活性化，吸收更多 CO_2 ，固定更多碳素。ITTO已規畫至2000年，木材利用對象訂為來自永續森林之林木，即造林木，而ISO-14000亦針對生產自永續森林之林木才可以認證，並可以在國際間進行貿易行為。這均表明今後木材利用對象只有造林木，所以在全民造林規畫之際，對於造林樹種之選擇應對今後之用途：如建築、家具、工業等一併考慮規劃，少不至於到達伐期之林木，其市場受到影響，無法達到有效利用之目標。

2. 木材消費與碳素貯藏

1996年本省所消費木材及木質材料、紙漿等各為製材1,594,577 m^3 ，原木1,734,394 m^3 ，合板2,197,534 m^3 （進口1,371,034 m^3 ，省產826,500 m^3 ），木質板材（包含粒片板、纖維板等）512,007 m^3 ，合計共消費6,038,512 m^3 ，而紙纖為

1,257,394 噸。當木材及木質材料絕乾密度以 500kg/m^3 考慮時，則1996年本省木材相關產品消費量為 $6,038,512\text{m}^3 \times 500 = 3,019,256$ 噸，加上紙漿則共有4,276,650噸，其中50%為碳素(C)，故其貯藏相當於2,138,325噸·C。此意味著本省1996年因利用木材相關產品而貯藏約213萬噸碳素，不使其回歸大氣中。

本省森林蓄積量為3.58億 m^3 ，每 m^3 可蓄積0.25噸碳之比例加以換算時，則本省森林約可蓄積碳素量為 $3.58 \text{ 億 } \text{m}^3 \times 0.25 \text{ 噸} = 0.895 \text{ 億噸(碳)}$ 。而森林生長率以5%計算，則每年生長量為0.179億 m^3 ，每年固定之碳素量 $0.179 \text{ 億 } \text{m}^3 \times 0.25 \text{ 噸} = 0.04475 \text{ 億噸(碳)}$ 。此意味著全省所利用木材及木質材料相關產品所貯藏碳素量相當於全森林每一年生長所能貯藏碳素量的47%。

就木材在住宅使用情形考慮時，在該住宅使用期間，有將木材在生長時從大

氣中所吸收之碳素貯藏在住宅中（在此以碳素貯藏庫表現之）之意義。此亦可說木造住宅所具有的意義。鋼材、混凝土是不具有此種機能。

在1993年日本之木造住宅總樓（地）板面積為 $2,960,473,000\text{m}^2$ ，非木造住宅總樓（地）板面積為 $1,418,627,000\text{m}^2$ 。木造住宅所使用製材品及合板材積為 $0.1737\text{m}^3/\text{m}^2$ 。鋼筋混凝土造住宅（RC造）為 $0.0281\text{m}^3/\text{m}^2$ ，鋼骨造住宅（S造）為 $0.04141\text{m}^3/\text{m}^2$ 。1993年日本全住宅所使用木材量各為木造住宅 $514,353,000\text{m}^3$ ，非木造住宅 $49,368,000\text{m}^3$ 。將其換算成碳素貯藏量，木材密度為 0.5ton/m^3 ，重量之50%為碳素時，則碳素貯藏量各為，木造住宅：128,588,000噸，非木造住宅：12,342,000噸，全部為140,930,000噸。1990年日本全森林蓄積量為 $3,137,580,000\text{m}^3$ ，換算成碳素貯藏量時為784,395,000噸。如此，住宅中所貯藏碳

素量是為全森林所貯藏量之18%。此意味著在日本都市內亦存在著一座相當於其全森林之18%的都市森林。而住宅之碳素貯藏量中，木造住宅佔91%，由此可明白木造住宅在碳素貯藏所扮演的角色是多麼重要。

3. 木材生產與利用過程之碳素貯存變化

在林地栽植之樹木會自大氣中吸收 CO_2 ，藉其生命力在樹體內以碳素加以固定，隨著年數之經過會使其貯存量增加，此為樹木之生長。經過一定時間後，生長至某大小的造林木會被砍伐（一部分被廢棄），而被搬運至工廠製材，當作住宅等之構造部材所使用。此時，在樹木中所貯存的碳素會保持在該狀態下而被貯存於製材品等木質材料中是當然之事。經若干年後這些住宅會被解體，但被解體之一部分會被製成粒片，這些板材會當作家具材料等所使用，在此期間亦會將碳素貯存起來。在一定期間後，這些家

具又會被解體，而被廢棄掉。在此階段，樹木生長期間所貯存的碳素全部會回歸

成為木材工業之原木。此林地之全生物量 $794.2\text{m}^3/\text{ha}$ 是當作幹材而獲得。原木被搬

運至製材工廠，加工成柱、樑等建材，該階段之製材利用率為60%。使用這些製材品建設住宅，供33年居住後，此住宅被解體，其中60%被搬運至粒片板工

廠，而加工成粒片板，該階段之製材利用率為80%。由這些解體材所得板材是當作家具部材使用，這些家具使用17年後被解體廢棄掉。

生長期間亦有部分被釋放至大氣中，但被加工成製材品部分是被當作住宅構成部材33年，回收利用之粒片板部分是當作家具材料更被貯存17年。於是從栽植至100年後生長時被固定之碳素會全部回歸大氣中。在圖1，從造林至50年是表示林業生產，從後來之伐採至解體廢棄為止之50年期間表示木材利用之狀況。其係結合木材生產與木材利用，林學與林產學的模式圖。

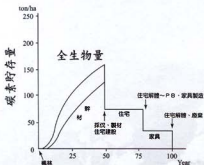


圖1 栽植1ha柳杉造林木之育林期間及柳杉利用之全過程之碳素貯存量之狀態（造林地為北關東，地位二等地）

大氣中。如將此碳素貯存量的經時變化以模式表示時，如圖1所示。

圖1表示在1ha林地栽植柳杉，從其生長曲線求出碳素貯存量，但為簡化，實際上在各階段所生產之疏伐木視為和主伐木一起生產進行處理。而此資料係依據日本北關東地區，二等地位林地之柳杉生長資料所畫出。在造林50年後，將林地皆伐，所生產全生物量並非全被利用，其幹材被伐採後，

上述狀況是從栽植至砍伐的經年變化換算成碳素貯存量即如圖1所示。花費50年所貯存之碳素，在其

生長期間亦有部分被釋放至大氣中，但被加工成製材品部分是被當作住宅構成部材33年，回收利用之粒片板部分是當作家具材料更被貯存17年。於是從栽植至100年後生長時被固定之碳素會全部回歸大氣中。在圖1，從造林至50年是表示林業生產，從後來之伐採至解體廢棄為止之50年期間表示木材利用之狀況。其係結合木材生產與木材利用，林學與林產學的模式圖。

這些木材生產與利用如以伐採地進行再造林為條件（再造林地並非一定為伐採地為佳），圖2所示可說為永續性，無限的，可經長期重覆進行的system。在此期間，新被栽植樹木之生長，所貯

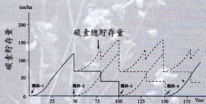


圖2 碳素貯存量之持續性（造林伐期50年，住宅使用33年，家具使用17年）

存碳素與當作住宅或家具材料被貯存碳素部分總和之總碳素量，由圖2可看出可永續保持極高水準。此圖是以1ha林地為對象之計算值，如就全世界造林地部分考慮時，則可產出地球之巨大量的碳素貯藏量。

4. 造林樹種的選擇

全民造林應包含國、公、私有林之全面性造林，其中主導者有國家與私人，雖然在森林生長期間均可扮演無形之公益功能。但森林是一種生命體，當生長超齡時，其公益功能會衰退，從對CO₂吸收固定觀點來說，可能會由sink轉變成source，所以到達伐齡之林木有必要砍伐供木材利用之必要。尤其木材是一種碳貯藏庫，為民生必需之資材，但森林生態系之完整亦為大眾所關心。因此將被要求在不破壞森林生態系前提下進行木材生產，則森林作業必須考慮上述課題。

(1) 將生產林與環境保育林、保護林加以區分，後者不考慮木材生產之施業與管理。

(2) 構成複層林，多樹種混

合林，盡可能不形成純林。

(3) 採取生態系維持為優先的伐採法（如小伐區，分散伐區等），而不進行大面積之皆伐。

針對上述生產林之樹種選擇，為因應將來木材利用之目的應以CO₂吸收與固定能力較大，且能配合木材利用者優先考慮為原則。如國、公有林可以長伐期、密度高之樹種為選擇對象，將來林木伐採後可供為家具、建築、合板等用材之用。如台灣檫木，其絕乾密度為0.8g/cm³，其實質量每立方公尺為800Kg，其中50%為碳素，則1m³木材貯存400Kg-C，相對的，柳杉的絕乾密度為0.336g/cm³，則其實質量每立方公尺為336Kg，而1m³木材貯存168Kg-C。而私有林則以短伐期之速生樹種為主，將可供為工業原料材之用。有關樹種選擇應依其用途，將施以適當之育林撫育措施，期能獲得所需之材質。如柳杉密植時，節之數目，直徑均較小，樹幹完滿枝下高亦高。疏植時，樹幹完滿度會減少。疏伐一般會增大其年輪寬，晚材率會減少，則比重會減低。又其

管胞亦會較短。進行強度疏伐時，其樹冠會變寬，枝條尺寸會增大，樹冠材之生產會增多。疏伐從材質觀點來看，弱度疏伐常常會被採用。修枝是以生產無節材為目的而除去枝條。從材質面來看條枝之效果有：①可生產無節材，②幹形可完滿，③單木之年輪寬可被限制，④樹冠材（未成熟材）量可減少，⑤可加速心材化。但修枝亦會發生下述缺點：①會發生變色，②發生不定芽，③修枝後所形成木材短時間會發生不規則木理，④重複修枝結果，容積密度（比重）之分布會不規則。綜合之修枝結果可得到無節材，強度、化妝均較優良。如合板用材亦需進行修枝作業較理想。

一般木材利用種類繁多，其主要項目可歸納於次，而所列出樹種主要以本土固有樹種為主，雖然目前國內所使用木材之98%為進口材，但在此將不考慮為造林之對象，因會牽涉到育林與馴化技術問題。

(1) 建築用材：一般建築用材包含柱、樑、楣、桁、壁板、樓（地）板、天花板、門窗等，一般木造住

宅之木材使用量，一戶建築住宅為 $0.1737\text{m}^3/\text{m}^2$ ，集合住宅或預鑄工法住宅為 $0.0281\text{m}^3/\text{m}^2$ ，鐵骨、鋼筋混凝土造住宅約 $0.044\text{m}^3/\text{m}^2$ 。可選擇樹種有扁柏、紅檜、梢楠、台灣杉、香杉、杉木、柳杉、台灣木、楠木、牛樟、校力、赤楊、長尾尖櫟、錐果櫟、茄苳、烏心石、相思樹等本土樹種，當然目前使用許多進口材，在此不加以考慮，因造林樹種之選擇應以本土樹種，或已馴化之樹種如柳杉、杉木等。

(2)家具用材：木製家具種類繁多，如衣櫥類、擱板櫥類、鏡台等貯藏式家具。椅子、桌子等有腳家具。床、流理台、縫紉機台、木製電子櫥櫃等商品。各種商品所使用木材之材料比率不同，但以衣櫥櫃等商品。各種商品所使用木材之材料比率不同，但以衣櫥類、擱板櫥類等貯藏式家具為例時，則其材料約佔製造原價之45%，而其中之70%-80%為木材與木質材料費用，當作化粧材料使用的鋸木類所佔比例更大。可選擇之省產樹種有

扁柏、紅檜、台灣杉、梢楠、香杉、烏心石、木荷、台灣櫟、擦樹、牛樟、樟木、光臘樹、杉木、柳杉、泡桐等。

(3)合板用材：所需原木應以樹幹通直，首末端直徑相差少之圓筒形，材質較為均質者較理想。以往均以南洋材柳桉類木材為主，但今後如省產之光臘樹、赤楊、針葉樹造林木的柳杉、杉木、台灣杉、紅檜、梢楠均為可選擇樹種。

(4)工業用材：包含粒片板、纖維板及紙漿用材大概均以速生樹種為主。如泡桐、相思樹、麻六甲合歡、橡膠木、薩爾多合歡、桉樹類，及其他山黃麻等為可選擇樹種。

5. 結論

從木材利用觀點來看，增加林地單位面積材積蓄積量為達成厚植森林資源之重要手段，因生產自永續森林的木材為今後利用的對象。所以造林之前需從 CO_2 吸收與固定能力，將來木材之用途，配合生育地條件，綜合選擇適當樹種，其為造林成功與否的關鍵課題。因樹種

選擇不當，或許會引起造林之失敗，或許無法開拓木材之市場，這些均需就國內外情勢加以研判再作決定。

在歐美、日等工業先進國家，住宅大部分均使用木質結構，而本省則大量使用無機質材料，尤其在都市中往往形成水泥森林，對生態環境衝擊甚大，如其在都市中往往形成水泥林，對生態環境衝擊甚大，如能增加生態材料的使用量，將可改善此種情況。木材構成元素50%為碳素，可以說是碳素的貯藏庫；林木蓄積量愈大其樹幹貯存的碳素也愈多，對於地球溫室效應的減低具有正面的功效。因此，適切的使用木材不但不會破壞地球環境，反而能帶動森林活性化，吸收更多 CO_2 固定更多碳素，肯定是下一世紀的「生態材料」，其可再生、再利用、可回收、省能源，對環境生態衝擊小。所以多利用造林木作為居住環境的結構材料及內裝材料，不但可以改善國人居住品質，並有助於造林木市場之開拓，一舉數得，實在值得我們大力的推廣利用。■