

# 近代育林思維之發展趨勢與作業調適<sup>(註)</sup>

文/圖 郭幸榮 ■ 台灣大學森林環境暨資源學系名譽教授(通訊作者)  
劉興旺 ■ 台灣大學實驗林管理處技正

## 一、緒言

近代育林作業計畫與操作實務主要以森林永續經營(Sustainable Forest Management, SFM)為依歸。SFM係將傳統的經營目標林產物(主要為木材)之生產轉移為森林生態系經營，發揮森林之生態功能(Ecological Functions)，如生物多樣性(Biodiversity)之保育、水土資源之維護、碳減量及木材生產等多目標，另外，當地居民的社會經濟效益也應予以併同考量，不可偏廢。因此，SFM乃定義為森林經營必須維護森林生態系之健康與活力，以滿足人們現代的需求，惟不可壓縮後代的福祉。

SFM觀念在1970年代自美國興起，歷經1980年的孕育，至1990年代漸趨成熟。林業發達國家的育林作業因之衍生新的趨勢，在歐洲係將原有的自然導向育林(Nature-oriented

Silviculture)或稱生態化育林(Ecological Silviculture)予以強化，樹種及結構單純化的天然更新林分或人工林導引趨向複雜化，使森林兼具木材生產及社會所需求的其他功能(Schütz, 1999)。在日本，則自1980年代興起了多樣性導向森林經營(Diversity-oriented Forest Management)的思維及作業，擴大採用長輪伐期(Long Rotation)及非皆伐更新法(Non-clearcutting Methods)以兼顧環境及經濟二者的效益(Fujimori, 2001)。

森林維護環境的功能，在地理尺度上，包括了區域性及全球性二個範疇。區域性的功能如海岸防風林防止砂塵飛揚、鹽沫擴散；集水區森林淨化水質、穩定水量、降低洪峰；坡地森林則防止土層崩塌、減緩地面逕流、降低土壤沖蝕等。在全球尺度方面，森林可紓減大氣

的CO<sub>2</sub>濃度。因此，1997年的京都議定書已將非林地造林(Afforestation)及跡地造林(Reforestation)列為可增加碳庫規模的方案；合宜的育林作業則可提高森林的產能，增加碳貯存的能力；至於以木材產品替代高耗能的鋼鐵、水泥及延長木材使用年限，也有減碳之效果。反之，毀林(Deforestation)，即森林砍伐之後將林地變更為農業、工業、交通、住宅等用途之行為，則加速碳自林地排放，而增加大氣CO<sub>2</sub>的濃度(IPCC, 2000; Schoene and Netto, 2005)。據估計，人為所增加大氣碳的來源中，比例最大者為全球工業化以來大量燃燒石化燃料，其次為毀林的惡果(Moore *et al.*, 1996)。

大氣CO<sub>2</sub>濃度增加對森林具有正負面影響，正面效益為增加光合作用原料的來源，提升光合作用速率，以及緩和土壤中有機物的分解速率，而增加森林的碳貯存量，這也是目前大氣CO<sub>2</sub>濃度比預估值為低的一重要原因，惟此種正面效益乃視樹種特性、土壤肥沃度、降水分布以及森林狀態而異(Moore *et al.*, 1996)。在負面效應方面，大氣CO<sub>2</sub>濃度增加為全球氣候變遷的重大原因，包括氣象樣式(Weather Patterns)的變化，如平均溫度上升、降水分布與強度改變、極端氣候事件發生的強度及頻度增加，以及海平面上升等(IPCC, 2007)。氣候的改變會衝擊現有的森林，可使其活力下降、健康劣化、易罹病蟲害、死亡，以及火、風災風險增加，因此，林業必須有因應的調適策略，以減輕衝擊的損失(Maciver and Wheaton, 2005; Schoene and Netto, 2005; Allen *et al.*, 2010)。

緣於此種全球性的變化趨勢，各國森林學界已著手研究因應策略，最近的世界性研討會

有瑞典大學(Swedish University)、森林研究組織國際聯盟(International Union of Forest Research Organizations, IUFRO)及世界糧農組織(FAO)在2008年8月於瑞典Umeå所舉辦的聯合會，探討全球環境變遷對森林生態系及其功能之衝擊、森林經營作業之調適、科學研究及林業政策等多項議題，以及由各國代表提出該國的因應方案供與會者參考(Bernier and Schoene, 2009)。在我國，林業的調適方案則在前(2010)年6月由農委會邀請專家學者討論訂定未來的調適策略。

傳統的育林作業實務包括林分之建造、疏伐、修枝、輪伐期、更新法等皆以生產木材之人工林或天然更新林分中較接近純林者所訂定，目標為達到最大之經濟效益。在全球新趨勢之導引下，傳統的育林作業模式及實務工作必須作不同程度之調整以有效經營森林，使其樹種組成多樣化及結構複雜化，而且存在於健康、活力狀態，在未來的逆境下更具耐受性及經營彈性。在地景尺度上，將異樣化的森林作多種變化的組合、配置，降低森林因長期經營而潛在的風險，以發揮整體的多樣性功能。

## 二、森林的水土資源維護與育林作業之調適

### (一)水資源維護及災害防止

#### 1.森林的影響

森林具有長的冠層及大量的葉面積指數(Leaf Area Index, LAI)，致比低矮的植群如農業作物或草原蒸散耗損較多的水量，也截留較高比例的降水。因此，在集水區的人工林將會減少注入河川的水量，其減量的趨勢隨

林齡增加而愈為明顯，在冠層鬱閉至成熟期達到最大。惟人工林降低河川流量的效應尚因樹種、林分經營作業、氣候、土壤及林況而異。葉片光滑且具有腊質的樹種，截留雨水的比例會較低；落葉樹種在落葉期也大幅降低截留雨水及蒸散耗水的能力；針葉樹種則通常比闊葉樹種截留及耗損較多的雨水。因影響森林水文的主要因子為LAI，因此，枝葉繁茂、生長迅速的樹種在鬱閉期會耗用較多的水分(Fujimori, 2001)。採用較低的栽植密度或在輪伐期內進行修枝、疏伐以降低冠層鬱閉度則會減少LAI而降低水分的耗損(Calder *et al.*, 2007; van Dijk and Keenan, 2007)。

森林對水文的影響尚要考量洪水及河川在枯水期的流量。森林內的林木、伴生的地表植群及枯枝落葉會降低地表逕流的流速與流量，延緩匯集的時間。另外，林木細根不新生與死亡之交替循環會增加土壤的小孔隙，土壤動物的活動則增加中、大型孔隙，有機物可促進土壤的粒團化(Aggregation)，這些過程皆可增加水分滲入土壤的能力而降低地表逕流量，降低洪峰高度及延後發生的時間，在中小型集水區確實有此種效益。但在大型集水區且在極端強烈降雨情況下，由於河川流量係匯集自廣大區域的大量雨水而來，森林降低洪峰的效益即有其侷限，只在下游的洪水氾濫平原(Flood Plain)的森林尚有緩和洪水之潛力(Calder *et al.*, 2007)。惟經彙整1990至2000年發生在56個發展中國家的案例，Bradshaw等研究者(2007)仍認為森林具降低洪水頻度的功能，當森林毀損的比例愈大，洪水的風險愈高，災害愈為嚴重。

雨後至枯水期來臨前的河川流量，森林覆蓋的集水區下降較無森林覆蓋的裸地緩慢，枯水期則二者的河川流量相近似(Fujimori, 2001)。惟另有研究資料顯示，森林覆蓋的集水區，其枯水期之河川流量較草生覆蓋者為低(Calder *et al.*, 2007)。

在水質方面，灰塵、微粒及污染物不論是以乾沉降或隨雨水濕降在森林區域，皆會因土壤的物理、化學或生物過程而予以淨化。森林也因林木冠層、地表植物及枯枝落葉阻止土壤表面的沖蝕，且因不使用或僅低量使用肥料、除草劑等化學藥劑，致流出的水質較農業區域潔淨(Calder *et al.*, 2007)。

## 2. 育林作業之調適

為了發揮森林在水資源保育及水質淨化的功能，藉強度疏伐疏開冠層，使覆蓋度在70%以下，增加陽光入射量，誘導冠層下植群的生長，使土壤內的根系由冠層林木的粗根與底矮植物的細根所組合的複雜結構，為降低土壤表面沖蝕之最佳狀態(Reubens *et al.*, 2007)。因此，育林作業的適度應用以控制冠層的覆蓋度、維持林內微環境在適宜狀態(圖1)，下層植物得以旺盛生長(圖2)，是集水區人工林經營的準則。當森林達到輪伐期之際，若採用皆伐更新，則有大量綠色枝葉留存於林地，以及林地微氣候條件因皆伐而改變下，土壤有機物的分解速度會加快，土壤中氮的濃度尤其是硝酸鹽(Nitrate)升高。硝酸鹽為易於溶解於水的氮源，將會隨逕流進入溪流中，而導致水質劣化。其他陽離子如鈣、鎂和鉀也會在皆伐之後急遽升高，而降低水質。另外，土壤中的粗形孔隙(Coarse Pores)

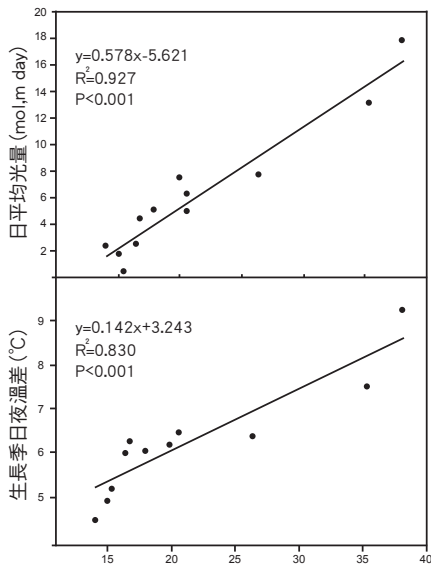


圖1 冠層開闊度對生長季節入輻射(上)及日夜溫差(下)的效應(郭等, 2009)

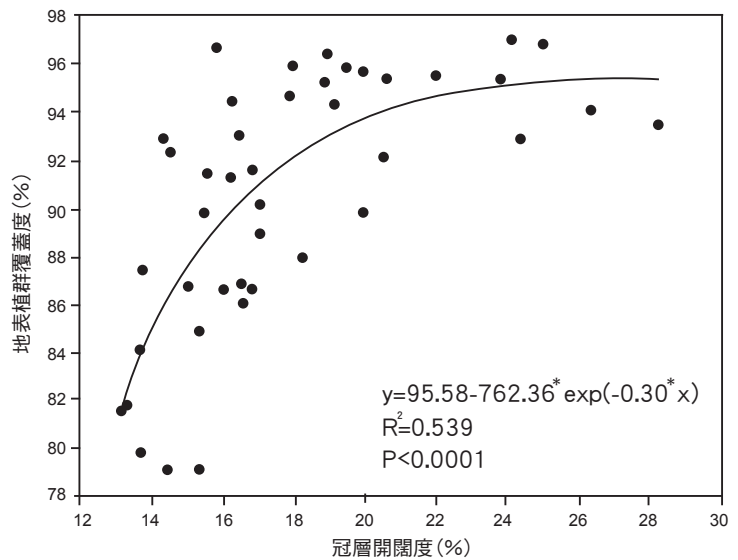


圖2 冠層開闊度對地表植群覆蓋度之影響(郭等, 2009)

也會在皆伐作業過程受到擠壓而減少。因此，皆伐更新法並不適用於集水區。相較之下，非皆伐更新作業如擇伐、傘伐或複層林的建造對集水區的傷害通常較小而被採用。

在樹種的組合方面，以針、闊葉樹種混植建造對水土資源的保護將比針葉樹純林有利(Raymond *et al.*, 2009)。在台灣，因鑑於過去原生林大面積砍伐對環境的傷害，又因合宜的更新作業法尚未能訂定，而在1995年全面封存天然林，不作經營作業；人工林的經營也在輿論壓力下幾乎陷於停頓。2009年的莫拉克颱風對南部的天然林及人工林皆帶來嚴重的傷害，故天然林完全封存的政策應予檢討，研擬發揮其在水、土保安功能的策略(黃裕星, 2010)。

## (二)土壤資源保育

### 1. 森林的效益

由於森林覆蓋可減少地表逕流及土壤的沖蝕，加上底層母岩持續風化，故森林區域的土壤會逐漸增厚。在山地坡面，增厚的土層在林木強大根系的固持及其與下層岩石的摩擦力作用之下而得以穩定，當土層的位移力道大於根系的物理力量時，土層乃崩塌，通常稱為淺層崩落(Shallow Collapses)，為自然而不可避免的過程，但要數百年或更久的期間才會發生。因此，山地坡面有森林覆蓋乃為降低土壤沖蝕及坡面頻繁移動的重要因素。當森林藉由皆伐更新建造新林後一段期間，約在15至20年之間，上一代的老舊根系已死亡、腐爛，而新一代的林木之根系尚柔弱，為發生土壤淺層崩落風險最高的期間，因此，坡面森林採用短輪伐期的皆伐更新作業為不適宜的經營模式(Fujimori, 2001)。

### 2. 育林作業之調適

通常認為老齡林分或近於自然的林分其維護集水區水、土二種資源的功能較幼齡的人工林為強，因此，將人工林藉育林作業逐漸導向自然化的森林為林業發展國家的經營策略(Schütz, 1999; Bauhus *et al.*, 2009)，惟木材的產能降低為不可避免的衝擊。為了調和正負面的影響，集水區的人工林要規劃為長輪伐期。在幼齡發育期，即平均年生長量(MAI)達到最大之前或達到後的期間內，要進行修枝及數次的疏伐作業以改變林分的結構，改善林內的微環境，提供林下栽植苗木生長的條件(圖3)，或誘導下層前生樹的發育(圖4)，且藉留存的大徑林木之根系來固持土壤(Fujimori, 2001; Bauhus *et al.*, 2009)。

非皆伐更新作業對土壤資源的保育優於皆伐作業，如擇伐更新法或以強度且具有變化的疏伐模式配合下層栽植為最為有利的方案，而較可望被環保人士、森林經營家及社會公益人士共同接受(Kearney *et al.*, 2010)。林分結構在計畫性的疏伐及更新作業的誘導下，將會逐漸複雜化而朝向老齡林分特性發育，惟仍缺乏巨樹及枯立、倒木(Fujimori, 2001; Bauhus *et al.*, 2009)。在樹種的引用方面，則以建造針、闊葉或闊葉樹種的混生林為導向(Schütz, 1999)。

### 三、藉育林作業之調整加強生物多樣性的保育

所謂生物多樣性即指各不同來源的生物之變異，包括3個層級(Levels)，最基本層級為遺傳多樣性，存於遺傳結構的差異，導致同一物種內個體間或種源間的差異；第二層級為物種多

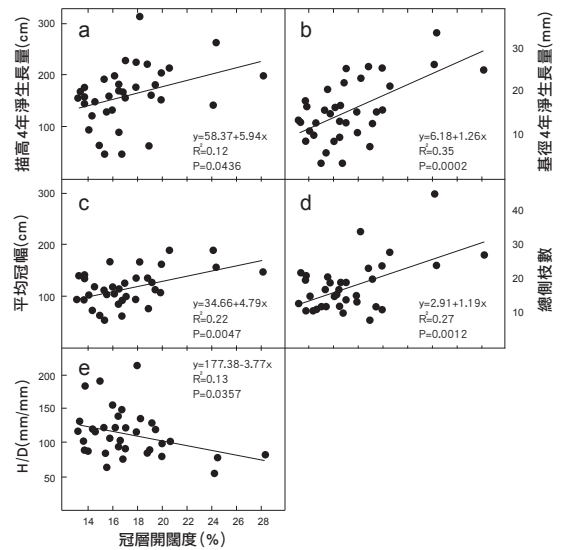


圖3 冠層開闊度對孔隙栽植之狹葉櫟生長及形態之影響(姚，2010)



圖4 疏伐區下層植群之生長表現(翁等，2011)

樣性，即在一植群或森林內物種的豐富度；最高層級為生態系多樣性，即於同一區域內的生態系間存有之差異。森林生態系為陸域生態系中生物多樣性最為豐富者，約佔全部物種的80%。為了保護物種永續生存，全世界約有13.5%的森林面積劃為保護區(Protected Area)，

惟在最近十數年來，國際間鑑於全球氣候變遷可能對瀕臨滅絕物種生存之威脅及對生態系的傷害，而呼籲應再擴大保護區的面積(FAO, 2009)。在區域性的功能方面，山地保護區尚因禁止人們的活動或居住，當極端氣候發生時，可減輕災難的嚴重性或完全避免，如前(2009)年8月莫拉克颱風的災害，保護區即有減輕之功效(林俊全，2010)。

在森林經營方面，為了維護生物多樣性，尤其面對全球氣候變遷的威脅，已有相當多的研究自不同的生物或作業層級提出建議，下述策略可供參考引用。

#### (一) 第一層級：擴大造林材料的遺傳差異

在森林建造時，要重視造林材料即種子或苗木的遺傳差異。人工林的傳統模式係力求各林木的形質均勻，以提高森林管理績效與木材收穫量及品質，故在種子及苗木階段即篩選外形或遺傳性狀相近者供新林建造之用。此種作業模式有導致遺傳差異窄化的趨勢，受氣候因子或病、蟲為害的風險較高。今後，為提高林分對逆境的耐受性，必須重視造林材料的遺傳變異，評估各重要樹種分布的地理間之遺傳差異及基因結合狀況，作為造林材料選擇之基礎。在國內，未來的造林作業會改用大量原生闊葉樹種，但其遺傳差異大多尚未研究，故皆自野外採集未經遺傳改良的野生種子進行育苗，而沒有任何規範，甚或無法查證種子的採集地。這種做法的潛在風險是造林材料所適應的環境條件不清楚；或其近親授粉的比例過高，因為野生的種子其父本花粉通常是來自鄰近的林木，而存有親緣關係，即有高比例的種子屬於近親交配，致枯死率及生長衰退的風險

較高。種子園所生產的種子為優良的造林材料，因園內的母樹具有不同的遺傳結構，且經後裔檢定，有良好的管理作業，致種子通常具優良的遺傳性狀及生理活性(Wang and Morgenstern, 2009)。

在過去，為了提高木材的產量，引用外來樹種為國內外常見的方案。外來樹種可能適應當地的環境條件而生長良好，成為當地的重要造林樹種，如柳杉、杉木在台灣即有很大面積的造林地；或成為世界重要的木材來源，如紐西蘭所栽植的美國松類有大量的木材可輸出，南美洲及中國有大面積的澳洲桉樹造林地以供應紙漿用材，可作為典型案例。但外來種可能因無法適應環境條件或抵抗病蟲為害而陷於失敗，如以前引植於國內之摩鹿加合歡因颱風為害嚴重，銀合歡因遭病、蟲襲擊而陷於失敗，近期則有琉球松及濕地松人工林遭線蟲為害而在短短數年之內完全毀損。因此，外來種的成敗，乃取決於對環境條件的適應能力及病蟲害的抵抗力，育林作業雖可減輕風險，但無法完全避免。

無性繁殖材料應用在新林的建造已有悠久的歷史，近期則有組織培養苗木的加入，但目前全世界所用的造林材料仍以種子苗為主(Sands, 2007)。以無性繁殖材料所建造、經營的方式稱之為營養系林業(Clonal Forestry)，因其遺傳結構單純化，致所用的營養系數量愈多，林分經營風險愈低，通常需要有30至40個基因型(Genotypes)較具安全性(Carnus *et al.*, 2006)。

近年來，桉樹、楊樹、松類等造林樹種的基因轉殖(Gene Transfer)苗木應用在建造人工林

之案例已日益增多，包括抗病、抗蟲、抗除草劑及改善材質、提高紙漿收率等效益之基因轉殖苗之應用(Carnus *et al.*, 2006)，惟自林業長期經營的角度而言，逆境或病、蟲害的生態風險仍應列為引用基因轉殖材料時應予考量的因素，如降低木質素含量的桉樹，雖可提高纖維收穫量、以及降低產程的化學藥劑之使用量而降低對環境之污染，但在林分發育過程卻提高颱風折斷的風險。因此，在採用基因轉殖材料前，務必評估收益與風險，以及對生態、社會與經濟面之衝擊。

## (二)第二層級：建造多樹種混合之新林

人工建造之同齡純林(Forest Monocultures)，生物多樣性較天然林低，穩定性較弱，較易受異常氣候因子之傷害及病蟲害之蔓延，乃期盼經由二樹種以上建造混合林以提高產能及降低風險。依據現有的資訊，混植林(Mixed Species Plantation)的組成樹種間之互相競爭性必須要低、林地資源之利用彼此要有所差異才可獲利，例如以耐陰與需光樹種混合建造，耐陰種可在需光種之部分遮光環境下擷取穿越的光源以進行光合作用；或將落葉樹種與常綠樹種混植，在落葉期，常綠樹種可獲得充足光源，以及吸收落葉分解所提供的養分來源；或高價值用材樹種與固氮樹種混植，而由後者提供氮源來提高前者的產能。目前已有案例證實同齡純林受病、蟲之害較混生林嚴重，主要原因有二：一為易罹病蟲害之樹種在未混植抗病、抗蟲害樹種當為屏障來隔離的情況下，當病、蟲害發生時易迅速蔓延；二為同齡純林內缺乏天敵(Natural Enemies)來抑制病蟲原(Smith *et al.*, 1997)。

因為混植林有其優點，致有今後應以混植林逐漸取代純林之建議，惟目前在技術及經濟層面的資訊尚嚴重不足，必須予以加強，包括評估混植樹種長期共存的可能性；混植樹種必須有高的經濟價值，或至少有一樹種甚具價值而其他樹種有利其生長；以及至少有一樹種對病、蟲確有抵抗能力。欲達成上述理想的所有條件，目前尚有困難。較易達成的替代方案為以原生樹種混植，且各樹種皆採取群狀或帶狀配置方式，即各樹種構成栽植群或帶，互相隔離，以防競爭力較弱的樹種被淘汰，或阻止病蟲害之蔓延。

## (三)第三層級：林分經營的多樣化

藉育林作業手段在林分建造、撫育或輪伐期收穫時創造林分的異質性為另一方案。在林分新建時，選擇適宜樹種及計畫性的配置是常用手段。另外，在栽植前的林地整治、栽植後的刈草作業以及栽植期的差異，會影響地表植群的組成。天然發生的闊葉樹種則應刻意保留，或採用帶狀、孔狀刈草作業取代全面刈草作業，會有更多樹種共存於人工林之機會。

疏伐可降低樹種間或樹種內個體間的競爭，而影響林分的樹種組成及發育，故在林分進入競爭而導致單木枯死期時實施疏伐作業以降低林分密度是相當重要的方案(Schütz, 2002; Lindh and Muir, 2004)。惟弱度下層疏伐所增加的林內光度相當有限，且由於冠層在疏伐之後的加速生長而很快的再度鬱閉，達不到促進地表植群生長的預期功能(翁等, 2011)。因此，強度或系統性的疏伐使人工林冠層鬱閉降低至70%至30%之範圍內，以促進前生樹(Advances)(在生態學常稱為苗木庫，seedling

banks)之生長及地表植群的繁茂，為可行的策略(圖4)。若在大型孔隙有演替早、中期樹種自行增殖，更可達到樹種組成複雜化的理想效果(Maas-Hebner, 2005)，但因降低冠層覆蓋而減少木材的總產量是其缺陷(翁等，2011)。

長輪伐期為日本(Fujimori, 2001)及美國西太平洋區花旗松林分(Carnus et al., 2006)採用的方案，此種模式的配套措施為在輪伐期內進行修枝以及數次的疏伐作業，藉以引導人工林樹種組成及林分結構逐漸趨向老齡林性狀(Bauhus et al., 2009；翁等，2011)，也可以延緩MAI下降的速率，以生產大徑木，提高材質(Carnus et al., 2006)；缺陷是林分的輪伐期延長而導致極端性氣候事件如颱風、豪雨、病蟲或火災的風險也相對提高(Smith, 1997)。

#### (四) 第四層級：更新作業之調整

林分屆輪伐期而伐採更新之際，皆伐更新只適於需光性樹種之建造，不利於演替後期耐陰種之生長，而使新林分的樹種組成及冠層結構因而單純化。單株擇伐(Single-tree Selection System)為模仿單株林木受害死亡而形成小孔隙之更新模式，以建造異齡林為目標，更新過程對林分結構及土壤生物的衝擊最小，但因孔隙小而只適宜耐陰樹種之更新，而且作業困難、成本高，在山地森林不易採行。另外，如果伐採作業監控不慎，易衍生砍伐優形林木或貴重樹種而使林分逐漸劣化之弊端。群狀擇伐(Group-selection System)可創造不同大小孔隙，大的孔隙其直徑甚至可達成熟林木樹高之2倍，以適宜不同需光性樹種在同一林地建立，為近年來被喜愛的更新法，惟仍需監控留存木的形質以改善新林分的遺傳結構。

傘伐更新法(Shelterwood System)以分期伐(Partial Cutting)來收穫老齡林木及重建新林，伐採次數及每次伐採之強度視更新樹種之生理生態習性、發育階段及更新目標而異，故在同一林分的不同區塊可採用不規則的配置，而創造多樣的孔隙及更新微環境，使新林分的結構多樣化，而保有老齡林分之部分特性(Bauhus et al., 2009)，適用於生態系經營林分之更新模式(Schütz, 2002; Raymond et al., 2009)。

傘伐及擇伐為較複雜、技術較高的更新模式，必須累積經驗才能實施。較簡易的方法為二段林相(Two-aged Stands)即複層林之建造，新林分的變化較皆伐更新的同齡林為高，為替代皆伐更新之可行方案(Smith et al., 1997)。

## 四、全球環境變遷與育林作業之調適

根據IPCC(2007)的預測，環境變遷在未來尚會持續發生，對森林活力及其內伴生的生物種之生存將會有更大的威脅(Allen et al., 2010)，因此，森林保護區的面積有擴大的必要，以增加不同的棲地而維護物種的生存(Mansourian et al., 2009)。惟設置保護區為被動的措施，就具有高經濟價值且為木材的主要供應源人工林而言，不可坐以等待災難的發生，有必要規劃相關的育林作業，在適當的時期介入，以改變林分的狀況，提升對逆境(Stress)的耐受性及經營的彈性，降低森林受傷害的風險，提升碳減量的功能及對社會服務的價值(Bernier and Schoene, 2009)。

自1970年以來，至少有88個案例顯示緣於極端氣候因素所引起之水分缺短或熱害而導致

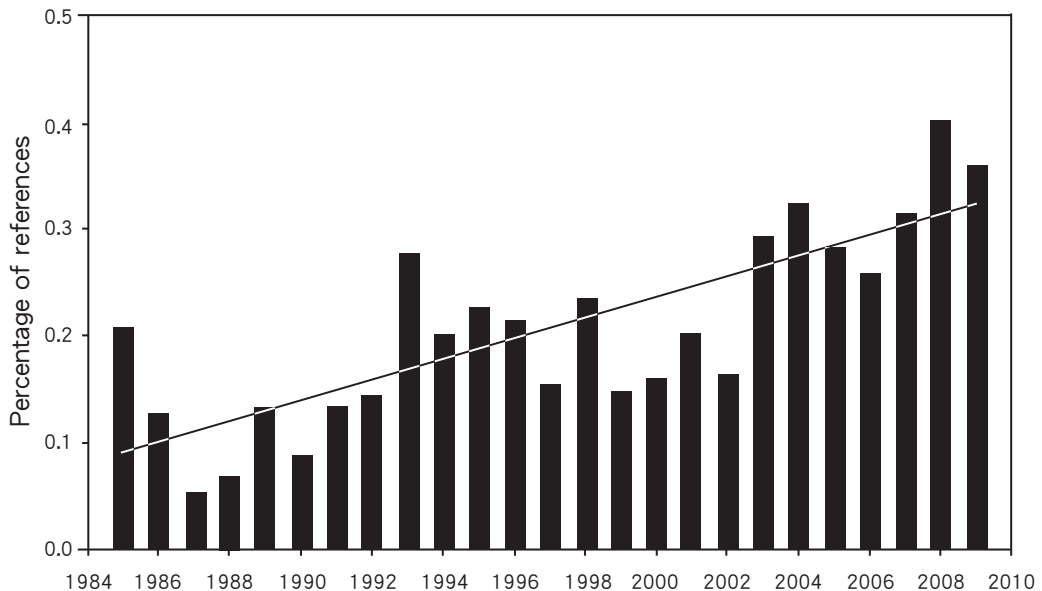


圖5 氣候因素導致森林受害文獻篇數佔森林領域之比例的年變化(Allen *et al.*, 2010)

森林衰退或死亡，而且有愈多的科學論文探討氣候因素引起之熱害，尤其2003年以後有更多的相關研究見其端倪(Allen *et al.*, 2010)(圖5)。事實上，氣候性的乾旱或熱害導致森林的衰退或死亡，並非始於今日，只是由於最近的氣候暖化及乾旱使森林死亡的案例迅速增加。

氣溫上升會加速蒸散與蒸發作用而耗損更多的水分，導致森林因缺水而受害甚或死亡。從生理學(Physiology)的角度而言，導致森林大面積死亡的原因有3種假說，一為極度乾旱導致木質部(Xylem)內汽泡化(Cavitation)而阻塞水分之輸送；二為乾旱導致光合作用因氣孔關閉而停止，代謝活性也受到抑制，林木因碳源不足而陷於飢餓，降低對生物病原的抵抗力；三為乾旱導致生物病原族群的增殖。因此，全球溫度上升，在半乾燥區域(Semi-arid Region)或中生

性(Mesic)地區皆可能遭遇缺水逆境，尤其降雨嚴重短缺之年度或季節，森林所受傷害將更為嚴重(Allen *et al.*, 2010)。

溫帶或暖溫帶的山地森林，在冬天低溫期，光合速率及呼吸速率皆會大幅降低，當氣溫不正常上升時，對光合作用的效益比對呼吸速率的提升為小，致碳的貯存會加速耗損，嚴重時導致碳飢餓而死亡，輕者則影響翌年春天恢復生長期所需的能量，降低生長勢及產能。在生殖生長方面，分布於緯度或海拔下限的樹種或種源，雄花芽可能因冬天低溫期過短，冷激(Chilling)不足，影響花粉的發育而未能完成授粉及生產種子，導致樹種的分布向高緯度或高海拔退縮，台灣杉即有此種疑慮(徐等，2002)。分布緯度或海拔範圍狹窄的樹種，則可能有滅絕之虞(Sands, 2007)。

林木的生長緩慢，但死亡卻很快，已生存幾百年的林木在嚴重乾旱時可能在幾個月內或幾年內死亡。因此，成熟林木的死亡所導致森林生態系的改變，將遠快於幼木更新及生長的替補能力。森林大面積死亡將進而影響生態功能及社會福祉，例如森林受害後，太陽能量被森林截留的比例下降，可感熱增加，氣溫上升。另一方面，森林大面積死亡則將導致區域性的降雨量及土壤可用水分雙雙下降，地下水的挹注量減少，水資源供應可能陷於短缺，該地居民的生活受到威脅，遊憩資源也減損(Berrier and Schoene, 2009)。

自全球的角度而言，森林大面積死亡，不僅固碳能力消失，且碳會自死亡的森林經由分解而釋出。據估算，全球森林所貯存的碳大於大氣的總碳量，森林釋放碳的回饋關係將會使大氣的碳濃度大幅度上升，全球氣候變遷更為惡化(Allen *et al.*, 2010)。

森林紓減大氣CO<sub>2</sub>含量可經由3種路徑來進行，一為增加森林的面積，即非林地造林，二為避免森林的衰敗及永久消失，三為有效經營已存在之森林(Ray *et al.*, 2009)。目前為農牧用地、草生地或廢棄林地等未為森林覆蓋的土地，人為積極介入建立新林，即為非林地造林，可增加碳的貯存量。林務局所推動之邊際農地或山坡地之農牧用地造林，即歸在這一類別。已存在或新建的人工林，因在短期內(數年或數十年)即可生產木材，且產能高於天然林，致可減少天然林的砍伐量，而緩和碳自土壤的釋出，歸為第二類別。惟天然林周邊的居民或當地政府若經濟條件未獲得改善，則砍伐天然林且將林地變更為其他用途的毀林行為將不可

避免，目前熱帶雨林即尚存在這種狀況(Sands, 2007)。

至於人工林，成長至某一年齡之後，會屆固碳與釋碳平衡期，森林失去固碳功能，甚或退化而成為碳的釋放源，則必須藉育林作業方案促進森林的活力，以適應氣候變遷，發揮固碳的功能(Ruddell *et al.*, 2007; Ray *et al.*, 2009)。計畫性的育林作業為篩選適合預期氣候變化趨勢及木材用途之種源或樹種作為造林材料。在林分層級，應增加樹種或種源的多樣性，調整疏伐作業模式以促使林分更為穩定，加強抵抗乾旱、颱風及病蟲傷害之潛力，林分也因持續存在於健康活力狀態而有更大的固碳功能(Ruddell *et al.*, 2007; Bernier and Schoene, 2009)。延長輪伐期會減少木材收穫對林地的衝擊、減少碳的釋放、增加地表植群及改善木材性質，具有碳減量的效果。惟延長輪伐期將減少木材的產量，必須藉助於擴大人工林面積或砍伐天然林來填補木材的需求量，因此，固碳與釋碳機制相互矛盾，為需面對及解決的問題(Ray *et al.*, 2009)。

人工林以延長輪伐期來增加碳貯存量的經營策略，尚包括改善材質而提高木材的使用年限、替代其他高耗能的產品，以及當為生物性能源，但這二種方案並不相互平行而是互為矛盾，乃因木材當能源之方案，必須採取集約經營及短輪伐期來生產大量木材，而採用長輪伐期以仿效老齡林的方案係貯存更多量的碳於森林，二者相互矛盾。因此，未來適宜的育林策略必須依當地之環境及經濟狀況而訂定(Ray *et al.*, 2009)。例如短伐期通常對區域性環境或居民的活動預期有較重大傷害，致延長輪伐期為

較理想的模式。

## 五、木材生產人工林之未來發展趨勢與育林策略

所謂人工林(Forest Plantation, 通常略為 Plantation)指的是在伐木跡地或非林地(Non-forested Land)經由種子直播或苗木栽植方式所建造之林分(Stand), 有時稱之為栽植林(Planted Forest), 主要目的為生產木材。造林樹種可能為原生種, 也可採用外來種; 面積至少0.5ha; 林地的樹冠覆蓋度至少要30%; 成熟林木的高度在5m以上(IPCC, 2000)。在2005年, 全世界人工林的面積約1億4千萬ha, 若包括人為栽植補強的半自然化森林(Semi-natural Forests), 據估算有2億7千1百萬ha(FAO, 2009)。在1990至2000年間, 約有53%的人工林係建造在熱帶地區, 即砍伐天然林以改建人工林的模式仍然繼續進行中。人工林約佔全部森林面積的4.8%, 每年約以4百50萬ha速度增加中。人工林中約有48%以生產工業用材為目標, 其他人工林係為了水土資源保育、燃料材生產、家畜庇蔭、提供野生動物棲地及景觀等用途(Sands, 2007)。預期至2030年, 主要林業國家的人工林及半自然化森林將增加27%, 每年產量可能增加63%(FAO, 2009)。人工林面積佔全部森林面積雖不足5%, 但供應全球圓木(Roundwood)需求量的35%, 預計至2020年將達50%, 可見人工林的重要性(Sands, 2007)。

同齡純林為較易於經營且省錢的模式, 且可生產大小均勻的木材, 產量高, 如巴西的人工林產能可達45 m<sup>3</sup>/ha/y(Sands, 2007)(表1)。造林樹種的選擇, 通常以生長迅速的先驅種

(Pioneer Species)為首選, 以達最大生產量。至於樹種的原產地, 則以原生種的風險較低, 但並非各國皆予採用, 例如美國幾全為原生種, 日本也以原生種占絕高比例。當原生種生長緩慢無法達到預期的產能時則採用外來種, 如紐西蘭及澳洲採用美國的松類, 巴西則用原產於澳洲的桉樹類以大量生產紙漿用材(Sands, 2007)。樹種的選用還要考量木材性質, 必須符合預期的用途, 否則會因無市場價值而陷於經營困境, 因此, 若以生產高品質木材為目標, 演替中、後期樹種較為適宜。在造林實務上, 也要考量樹種的生理生態習性, 以適應林地的微環境條件, 即所謂「適地適種」為原則, 否則將無法達到預期產能, 最簡易的作法係經由野外觀察各樹種在各種生育地的生長表現, 或進行系統性試驗研究予以評估, 篩選具有潛力的樹種, 降低生育地、樹種、林木發育過程對生長的限制(Fujimori, 2001), 且主產物木材有最大的乾物分配(Vance *et al.*, 2010)。種子則採自種子園為最適當, 種子生產林為次, 一般林分所採種子最不適當(Wang and Morgenstern, 2009), 卻為台灣近年採用最多的種子來源。

人工同齡純林因環境服務及生物多樣性功能較為低劣, 原則上, 必須增加林分的樹種組成, 以期森林的多樣功能間取得平衡。因此, 未來的趨勢為, 從林分建造起始就採用2樹種以上, 將耐陰能力不同的樹種混植, 若耐陰能力相近似, 則採用群狀或帶狀混植方式以降低種間的競爭。新林分若係以天然更新方式建立, 通常會有較多的樹種組成, 不足時, 則以人為補植方式增加目標樹種的比例。

新林建造時, 通常採用高栽植密度, 如針

葉樹種在2,000株/ha以上，目前國內闊葉樹種造林以1,500-2,000株/ha為多，建議也提高到2,000株/ha以上，期盼林分早期鬱閉，減少除草費用及抑制側枝的生長。但高的林分密度並不能完全抑制枝條的擴張，尤以闊葉樹種為然。為了生產高品質木材，修枝作業不可避免。疏伐則為林分發育階段控制密度，進而影響生長、材質及主伐木大小的作業。作業模式是在修枝作業有效控制主伐木的下層枝條之

後，應考慮進行疏伐作業伐採非主伐木，以增加林分內的陽光入射量，促進留存的主伐木之生長及冠層枝條的發育，在針葉樹種，著生枝條的樹幹長度約佔樹幹全長的50-60%為理想，以改變樹幹的尖削度、維持年輪寬度的均勻性，以及增加對強風的抵抗能力，減少營林風險(Fujimori, 2001)。

木材生產過程必須遵守的原則為對環境友善及減少對其他物種的衝擊，各國採行最多的

表1 桉樹及松類人工林之MAI及輪伐期(Sands, 2007)

Species	Country	Rotation (y)	MAI (m <sup>3</sup> /ha/y)
<i>Eucalyptus hybrids</i>	Brazil(Aracruz)	7	40
<i>Eucalyptus hybrids</i>	Congo	8	25
<i>Eucalyptus grandis</i>	South Africa	8-10	20
<i>Eucalyptus grandis</i> (saw logs)	Uruguay (Rivera)	16	35
<i>Eucalyptus globules</i> (pulp)	Uruguay	8	20
<i>Eucalyptus globules</i>	Chile	10-12	20
<i>Eucalyptus globules</i>	Portugal	12-15	10
<i>Pinus radiata</i>	New Zealand	25	23
<i>Pinus radiata</i>	Chile	23	22
<i>Pinus radiata</i>	South Africa	25	18
<i>Pinus caribaea</i>	North Queensland	25-30	18
<i>Pinus patula</i>	South Africa	25	w18
<i>Pinus radiata</i>	Australia	30	17
<i>Pinus caribaea</i>	Latin America	15	15
<i>Pinus caribaea</i> × <i>elliottii</i>	South Queensland	25-30	15
<i>Pinus taeda</i> , <i>P. elliottii</i>	USA	23	13
<i>Pinus elliottii</i>	South Africa	30	12

策略為延長輪伐期及採用群狀擇伐或不規則傘伐來減少對林地及林分的傷害。如在日本，柳杉的輪伐期延長至100年以上，甚或200年(Fujimori, 2001)，美國太平洋林區的花旗松林則延長至60年以上(Smith, 1997)。延長輪伐期的前提為進行數次的疏伐作業，在林分發育早期的疏伐度較強，疏伐間隔年數較短，以有效疏開冠層。隨著林分年齡增加，生長減緩之後，疏伐強度降低且間隔延長，在主伐前10年不再疏伐，以維持林分的理想結構及生長(Smith, 1997；Fujimori, 2001)。

在台灣，1980年代以前，小徑木尚有市場需求，致有下層弱度疏伐的試驗研究，但林業機構並未有大量採行。隨著經濟狀況的改變、小徑木需求量的萎縮，以及對環境品質要求的提升等多種因子之限制，試驗性的疏伐作業更少，僅零星進行，各種疏伐作業對主伐木生長的促進效果及對生態功能之效應等相關資訊的累積甚為有限，林務局的疏伐作業政策也遲遲未推展，無以為據。另外，在1980年代以前所建造之國、公有人工林，將屆或已越逾輪伐期多年，因缺乏林分更新政策而無法實施更新作業；也無法藉強度疏伐作業配以孔隙栽植來改善林分的樹種組成及冠層結構。由於國、公有的天然林及人工林皆已封存多年，木材產量少，不足國內需求量的1%，仰賴進口的木材中，又以闊葉樹材為大宗，自1999年至2003年的統計，台灣為熱帶雨林闊葉樹材進口的第四大國，僅次於中國、日本及歐盟，為環保團體所訾議(Sands, 2007)(圖6)。林業機構在此種困境之下，國有人工林的經營應有積極的作為，採取必要的因應策略。

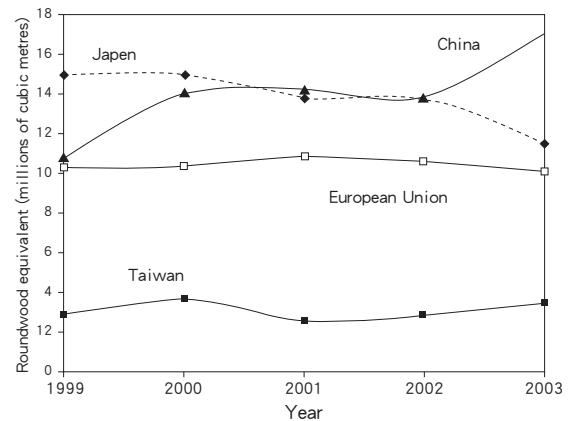


圖6 熱帶地區木材之主要輸入國(Sands, 2007)

## 六、結語

自1990年代以降，森林經營已從木材生產為唯一目標轉移至森林生態系經營，以發揮森林在水、土資源維護、生物多樣性保育、碳減量、休閒遊憩、以及木材生產等多樣性的功能。近年來，環境議題專家學者認為由於工業化國家大量燃燒石化燃料及熱帶雨林的毀損而釋放大量的CO<sub>2</sub>，進而導致全球氣候變遷，森林遭受極端氣候的衝擊及生物性為害的威脅愈來愈大，林業經營的風險也隨之提高，各國林學家已積極研擬調適策略。在台灣，由於天然林已禁止經營作業，故本文乃以人工林為主要對象，論述在永續經營體系之導向下，傳統育林作業的調整策略，以期人工林的樹種組成多樣化及冠層結構複雜化，而存在於健康、穩定狀態，降低極端氣候因子衝擊之風險，發揮森林的多目標功能。▲

參考文獻 (請逕洽作者)

註 本文主要內容於2010年10月28日在屏東科技大學主辦的中華林學會學術研討會演講，經修改及添加圖表而成。