

木材密度在環境生態上的應用

林振榮¹、塗三賢¹、李志璇¹

引言

1904年美國學者道格拉斯(A.E. Douglass)發現了一個有趣的現象，在某農家院子裡，有個大梁柱橫斷面上有很多一圈一圈的樹輪，其靠近中心樹輪之間的間隔特別狹窄，靠近外圍樹皮的11個樹輪間隔(寬度)則比較寬，他懷疑樹輪間隔與氣候有關，於是查閱當地的氣象資料後，發現當地氣候在多年前，發生過持續多年的旱災，旱災之後則是風調雨順。道格拉斯推想，樹木如果每年長一個樹輪，11年風調雨順時，樹木長出的樹輪間隔比較寬；而持續多年的旱災，產生樹輪的間隔則特別狹窄，樹輪間隔的表現正好與氣候變化具有相關性。道格拉斯接著進一步調查附近範圍的樹木年輪，發現也都呈現相同的相對生長速率，因此，道格拉斯對年輪展開科學研究，稱為樹輪年代學(Dendrochronology)，包括用年輪定年法來估計美國原住民遺址(木材)的年代及研究氣候變化。樹木每年徑向生長呈現的生長輪，可以反應環境的變化，簡稱為樹輪學(Tree ring science)。之後陸續發展許多樹輪學的應用派別，包括年輪氣候學(Dendroclimatology)，根據樹木年輪的變化推論過去氣候的學科；樹木生態學(Dendroecology)則是應用樹輪來探討影響地球生態系的因子等。

木材密度(或寬度)不僅是強度最重要的評估指標，由木材年輪密度作為指標，來研究環境生態變化的現象，也提供了許多重要科

學證據，原因是依據環境生態氣候變化對樹木(生物)生長過程中，所造成樹幹內部實質影響的結果，因此反過來說，可以由木材年輪密度(或寬度)來推論環境變化。本報告說明幾個應用木材密度作為參數來評估環境生態變化的研究，提供讀者參酌。

氣候暖化的影響

前人研究指出「中歐森林自1870年以來木材材積有生長加快，木材密度有下降的傾向」，說明從上個世紀到現在的木材密度下降(趨勢)，對於評估樹木生長趨勢和計算碳吸存(Carbon sequestration)非常重要，最後對森林管理和木材利用有影響。自1870年以來，由於氣候溫度升高(暖化)，生長季節延長以及氣候變化的其他因素，中歐森林樹木加速生長，依據中歐現有最古老的試驗區木材樣本，優勢樹種包括挪威雲杉(*Picea abies* (L.) H. Karst)、蘇格蘭松樹(*Pinus sylvestris* L.)、歐洲山毛櫸(*Fagus sylvatica* L.)和無梗橡木(*Quercus petraea*(Mattuschka) Liebl)等樹種，在超過100年以來其木材密度顯著下降。由文獻得知，林分和樹木的木材體積生長速度較快，自1900年以來，木材密度下降了8~12%，林分生物量增加量與材積增加量相比則增加了9~24%。與過去的情況相較之下，現有的樹幹直徑和年輪寬度、樹木抗風穩定性、木材強度以及碳吸存等均有減少的趨勢。木材密度下降主要是因為晚材密度下降、早材比率

¹ 林業試驗所·森林利用組

(寬度)增加的趨勢，與生長季節延長和乾沉降(Dry deposition)的施肥效應有關。由於具有歷史價值的林分材積及木材密度在時間序列的改變，計算生物量及碳吸存量應該要注意。

老齡林(Old-growth forest)的材性

保育熱帶森林的重要前置工作之一為樹種多樣性的調查，但是，這樣的調查相當花費時間與金錢，也需要專業知識。前人研究指出「木材密度作為一種保育工具，將干擾量化並確定熱帶森林中的保育優先區域」，由此可知，利用老齡林的木材特性將有助於讓保育工作更有效率。例如，研究人員調查婆羅洲(Borneo)東部樹種，來確定木材密度是否可以用於森林干擾的量化指標並評估其保育的重要性。結果發現，某塊土地中的木材平均密度與干擾水準呈現顯著的負相關，木材密度較高的生育地幾乎完全發生在老齡林中。平均木材密度與樹木物種的多樣性呈單峰(Unimodal)關係，這顯示該老齡林生育地中的平均木材密度可能比物種多樣性有更好地指標性效果，並能進一步作為確定東南亞熱帶雨林保育重點地區的有力工具。

土壤水分的影響

研究人員針對加洲沿海51個被子植物進行調查，結果發現木材密度和導管特性不僅在功能上相互關聯，它們可能還具有獨特的生態聯繫。其中，木材密度與土壤水分關係最密切，前述調查結果指出土壤水分愈高，木材密度愈低，反之，土壤水分愈低，木材密度愈高，且較大的導管明顯出現在較高的樹木位置，並出現在較高的土壤水分情形。木材密度

對於木本植物的生態至關重要，因為它反應了碳對樹木結構支持的分配，而碳反過來又是多種生命歷史特徵變化的基礎。一般而言，在各種樹種中，木材密度與生長速率呈負相關，樹木生長愈快，木材密度愈低；生長愈慢，木材密度會愈高。因此，木材密度更高的樹種往往會在以後演替中出現，並存在較低的冠層中，木材密度增加的原因之一是樹木對病原體或乾旱引起的木質部腐朽空洞化的抵抗力及逆境時產生。一個樹種的生長受到環境生態影響而反應出木材密度的特性，樹木受到環境條件的適應性生長反應機制(功能)，透過觀察符合幾種預測的生態模式，木材密度高是生長緩慢之樹種的特徵，例如在林下、乾燥土壤或營養貧瘠的土壤中發現的樹種。

碳吸存量的計算

木材密度可以幫助我們從碳吸存和群落動態了解森林生態系統的功能，在碳循環研究中，樹木的木材密度用於計算森林碳儲量，並評估森林在緩解氣候變化中的作用或評估森林砍伐對氣候的影響；在群落生態學中，木材密度是種性能的指標，反應生長潛力和死亡風險之間的生物力學作用，快速生長的短命樹種往往具有較低的木材密度，而生長緩慢的長命樹種則傾向於具有較高的木材密度。在木材技術中，木材的大多數物理和機械性能與木材密度密切相關，所以林業研究通常測量木材密度來代表某些指標。

木材的基本密度是木本植物的重要生態特徵，其在群落生態學中可反應特徵樹種的表現及適應性，而在碳循環研究中則可計算樹木和森林生物量。有研究指出，過往以



圖1 未疏伐柳杉(下), 疏伐後柳杉(上)反應生長的環境條件, 年輪有較大寬度及較高密度可解釋生育地狀況(受風力影響)。(林振榮 攝)

12%(標準)的含水率下測量木材密度, 但是基於生態目的, 這個木材密度應該轉換為基本木材密度(Basic wood density), 基本木材密度是絕乾質量與生材容積之比(不同於氣乾密度或12%密度), 然後可以使用基本木材密度並根據生立木材積計算樹幹生物量, 在全球木材密度數據庫中, 應使用新的轉換因子來推導基本木材密度, 以防止高估全球森林碳儲量, 並允許從木材密度預測更好的樹種群落動態。

樹冠擴張的策略

上述環境生態變化以外, 木材密度也反應了樹木的生活史、機械特性與生理策略。木材密度可能會影響樹木擴展樹幹及樹冠, 研究人員調查145種熱帶樹木的結構差異性發現, 不同木材密度的樹木在森林中的捕光策

略是不同的。從工程理論和木材密度特性可以預測, 就生物質產生而言, 低密度木材以垂直樹幹擴張更有效, 而高密度木材以水平枝幹擴張更有效。在標準樹木高度比較樹種時, 木材密度與樹幹直徑為負相關, 與樹幹生物量正相關。顯示木材密度低的樹種產生的樹幹較粗, 但生物量成本較低。木材密度與樹冠寬度呈正相關, 與最低葉面高度呈負相關, 這表明高木材密度樹種的樹冠比低木材密度樹種更寬更深。但是, 在樹木高度大於18 m時沒有相關性, 這可能顯示橫向樹冠擴張到局部位置的較大塑性反應。

木材密度解釋了在同時存在的熱帶樹木物種中, 有效的垂直樹幹伸長與水平樹冠伸展之間的權衡。這樣的機械約制表示不同木材密度樹種之間的樹木結構差異, 低木材密度樹種

在暴露的樹冠中顯示出有效的高度擴展以獲得更好的光照情況，而高木材密度樹種在陰暗的森林下層，則顯示出有效的水平樹冠擴展以增強當前光的攔截和持久性。研究結果得知，藉由木材密度設定的機械約制設定，同時存在樹種在結構和光捕獲策略上是不同的。

結語

樹木生長的外部及內在表現特性，受到遺傳、環境、樹齡、部位等因素的影響，其中樹木的生長受到周遭環境條件的影響，在外觀上呈現不同的生長表現特性，而在樹木內部木質部也產生不同木材的性能，從最簡單的細胞組織開始，到年輪及各種木材強度，也顯著地受到周圍環境的影響(圖1~3)。其中，最重要且最簡單的評估指標就是木材密度，本文以四個研究案例介紹如何以木材密度評估環境生態變化，包括①木材密度是計算碳吸存的重要參數、②氣候暖化使氣溫上升促進樹木生長並使木材密度降低的趨勢、③生長緩慢的老齡林則反應了較高的木材密度、



圖2 杉木年輪較窄有較深的顏色及較高的木材密度，可說明樹木受到生長逆境的影响。(林振榮 攝)

④樹冠垂直擴張策略的樹木有較低的木材密度，而枝幹水平擴張策略的樹木有較高木材密度。屬於林產物理木材性質指標的木材密度，也可以作為環境生態的應用，由於地球受到氣候變遷及暖化作用等的影響，木材密度或許可以扮演一個重要的研究角色，藉此瞭解氣候變遷對樹木及族群生態變化的影響，並作為未來減災應變及調適行動的建議。同時其他木材物理及化學性質也逐漸被作為樹木適應環境生長的應用參數，例如樹木生長受到逆境反應的緊縮策略，可能會反應較高的密度、較窄的年輪、較高木材強度等，產生較多不同的抵抗性二次代謝化學物質(防禦機制)。樹木的生長反應將呈現在外部及內部，將環境生態視野區分為樹木內外部，外部的型態、組成、多樣性等等可透過外觀調查窺知並解釋緣由；而從樹木內在世界組織、密度、強度、生理機制等等來探究及瞭解環境生態的狀況也具有其重要意義。⊗



圖3 光臘樹在樹輪上留下深色痕跡(癒合組織)，產生較高的木材密度，可追溯樹木受到獨角仙咬食的影响。(林振榮 攝)