

平地造林之降溫效益：比較夏冬季節與日夜差異

文／圖 ■ 鄭智馨 ■ 國立臺灣大學森林環境暨資源學系副教授(通訊作者)

黃于軒 ■ 國立臺灣大學森林環境暨資源學系助理

洪志祐 ■ 國立臺灣大學森林環境暨資源學系助理

曾聰堯 ■ 林業試驗所助理研究員

一、前言

全球暖化是目前相當受到關注的議題，IPCC 於 2013 年第 5 次評估報告中指出，造成全球暖化的原因極可能是大氣不斷增加的溫室氣體效應所引起，並以二氧化碳濃度上升的影響最大。大氣不斷攀升的二氧化碳濃度與人類活動息息相關，石化燃料燃燒及森林砍伐為大氣二氧化碳濃度上升的最主要來源。為減緩溫室氣體效應的惡化，降低石化燃料燃燒、發展再生性替代能源或是增加森林環境對大氣二氧化碳吸收等不同措施的實施是必要的。

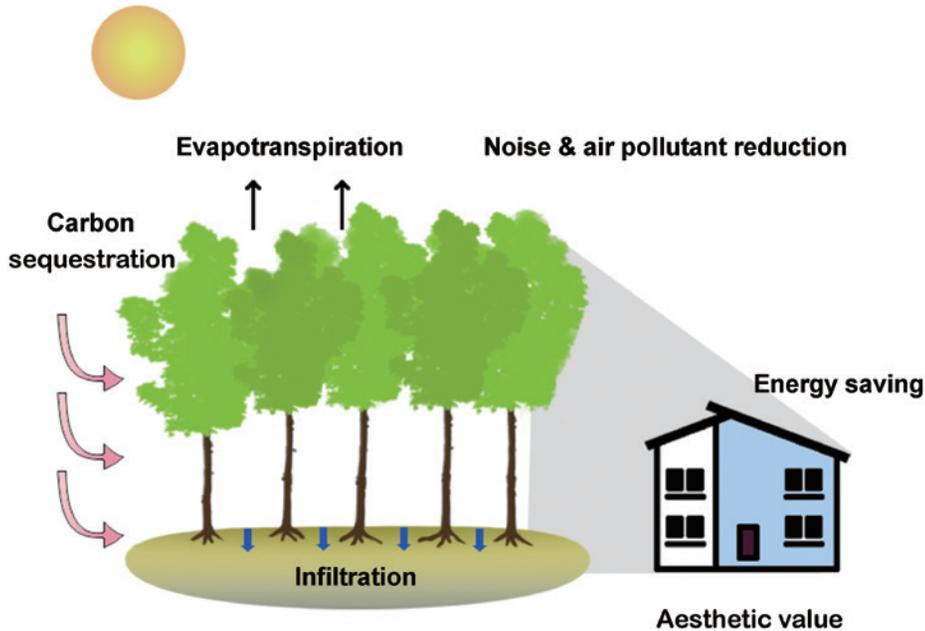
相較於工業方式減低二氧化碳排放，森林植林減碳普遍被認為是較具經濟效益，也是當今許多國家與相關會議積極努力目標。例如中國與歐盟於過去 20 年間，每年分別增加 170 萬與 80 萬公頃造林。2011 年德國與國際自然保護聯盟 (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources) 提出的波昂挑

戰 (Bonn Challenge)，即計畫於 2020 年前完成全球 1.5 億公頃劣化與砍伐森林的復育目標。2014 年聯合國氣候高峰會提出的紐約森林宣言 (New York Declaration on Forests)，也呼籲全球共同進行超過 3.5 億公頃的森林及農地復育。

林木生長除了固定大氣中二氧化碳，減緩溫室氣體效應外，林木種植更具備了多樣性的生態系統服務 (ecosystem services) 功能，涵蓋生態、環境、景觀與防災安全等不同層面 (圖 1)。就如樹冠遮蔭效應，可降低陽光直接輻射，加上植物光合作用過程的水分蒸散作用，有助於對微氣候的調節與氣溫的降溫，適當的林木種植，可降低夏季屋內溫度，達到減少能源使用與節能減碳的效益。林木也可防風、降低噪音，阻絕甚至移除空氣污染物的功能，例如對 PM2.5、臭氧、甲醛、二氧化氮等空氣污染物的減量與移除。此外，林木所提

供生物棲息空間，具有增加生物多樣性的生態功能。林地土壤可增加水分入滲，適度將雨水導入土壤，達到減緩強降雨造成過多表面逕流的防災功能。林木栽植也有助於放鬆心情、減

少壓力與疲憊感，增加視覺美觀，提升房屋價值，且林木提供的休閒遊憩空間，更可成為家人、鄰居與朋友活動場所與生活回憶。



▲圖1、森林多樣性的生態系統服務功能，涵蓋生態、環境、景觀與防災安全等不同層面。

二、平地景觀造林

臺灣平地景觀造林及綠美化方案推動始於 2002 年，主要在於平地地區缺乏大面積綠地，加上當時又面臨加入 WTO 後的國際競爭，國內農業產業結構極需進行調整，政府政策即鼓勵停產農地，長期休耕或是生長效益較低農地改以造林，並結合環境綠美化，增加平地地區森林綠地面積，創造優質的農村森林生態環境與增加民眾休閒空間，為後世子孫打造一個舒適、和諧、潔淨、安全的綠色新環境。

至 2014 年止，已完成平地造林與綠美化面積總計 17,506 公頃，現有平地造林對大氣二氧化碳吸收、生態保育與水土保持促進、綠地面積與優質遊憩環境提供等，成效顯著。造林林地同樣具有調節微氣候與降低地表氣溫功能，不過迄今仍缺乏實際數據提供平地造林可降溫度數，本專題以彰化溪州平地造林的實際地表氣溫量測為例子，比較成林造林地與鄰近農地的氣溫差異，瞭解氣溫在夏、冬季節與日、夜間的降溫效益。此外，也一併探討平

地造林與鄰近農地間，有效光合作用輻射量（photosynthetically active radiation, PAR）、土壤溫度與土壤水分勢能（water potential）等環境因子的差異。

三、彰化溪州造林地林分特性與環境監測

調查造林地位於彰化縣溪州鄉，為台糖公司蔗田轉作造林。不同於花蓮大富大農與屏東林後四林平地森林園區的大面積連續造林，溪州造林地呈現較不連續分布，許多造林地散佈於農地中，且少部分蔗田仍持續甘蔗種植，以供虎尾糖廠製糖原料使用。溪州造林開始於 2002 年，主要造林樹種有阿勃勒（*Cassia fistula*）、苦楝（*Melia azedarach*）、桃花心木（*Swietenia macrophylla*）、水黃皮（*Millettia pinnata*）、臺灣欒樹（*Koelreuteria henryi*）與光臘樹（*Fraxinus formosana*）等。林木栽培密度每公頃栽植 1,500 棵，採行植栽種，行間距離 3.6 公尺，相鄰林木距離 1.8 公尺，種植期間每年進行施肥、除草與灌溉等管理措施。

經 10 年種植後，林木平均胸高直徑（diameter at breast height）介於 11.6 ~ 17.0 公分，樹高介於 7.2 ~ 11.6 公尺，林分密度介於每公頃 1,044 ~ 1,389 棵，地上部林木碳蓄積為 25.0 ~ 74.4 ton C ha⁻¹。以速生樹種造林林分，如桃花心木、苦楝造林地的林分較為高大，而水黃皮與臺灣欒樹造林林分則相對較矮小。苦

楝與水黃皮造林林分資料與林分照片如表 1 與圖 2、圖 3 所示，苦楝造林地林木的平均胸高直徑、樹高與林木蓄積碳量分別為 16.2 公分、11.6 公尺與 59.5 ton C ha⁻¹，水黃皮造林地林木的平均胸高直徑、樹高與林木蓄積碳量分別為 11.6 公分、7.2 公尺與 25 ton C ha⁻¹。詳細林木生長資料，可參考作者 2016 年發表於台灣林業科學之論文。



▲圖2、彰化溪州苦楝造林地林分照片



▲圖3、彰化溪州水黃皮造林地林分照片

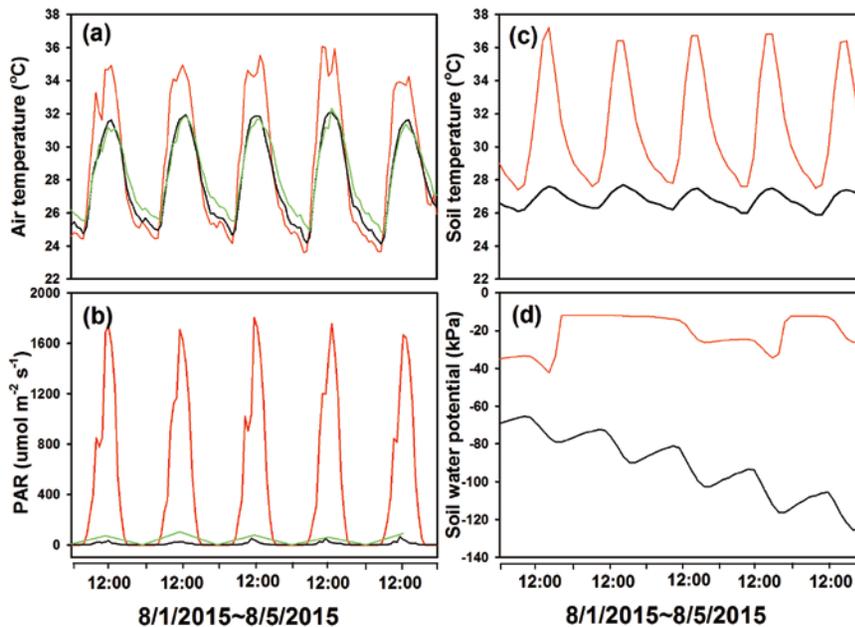
我們於苦楝造林地、水黃皮造林地與鄰近蔬菜種植農地，分別架設資料自動記錄儀器，

記錄每日地表氣溫、有效光合作用輻射量、土壤溫度與土壤水分勢能。3 自動記錄儀距離小於 200 公尺，以減少空間變異。資料監測紀錄使用的記錄儀器為 ONSET HOBO 公司的 U30 與 Decagon Devices 公司的 EM50 記錄儀。地表氣溫量測利用 ONSET HOBO S-TBH-M002 溫溼度感測計，感測計放置在太陽輻射保護罩 (ONSET HOBO RS3) 內，偵測地面高度 1.5 公尺的地表氣溫變化。有效光合作用輻射採用 HOBO 公司的偵測計 (S-LIA-M003)，量測波長 400 ~ 700 奈米之有效光合作用輻射量。土壤溫度與土壤水分勢能使用 Decagon Devices 公司之 MPS-2 感測計，埋設於土壤深度 10 公分處，量測該土壤深度下的土壤溫度與水分勢能變化。自動資料記錄儀器記錄時間自 2014 年 4 月至 2015 年 12

月，地表氣溫與有效光合作用輻射量每 1 小時記錄一筆資料，土壤溫度與水分勢能每 2 小時記錄一筆數據。本文列出 2015 年 1 月 15 ~ 20 日 (冬季) 與 2015 年 8 月 1 ~ 5 日 (夏季) 兩期間資料，比較地表氣溫、有效光合作用輻射量、土壤溫度與土壤水分勢能於造林地與農地的差異 (圖 4、圖 5)，所選擇日期均為晴朗日照天氣。

四、平地造林之降溫效應

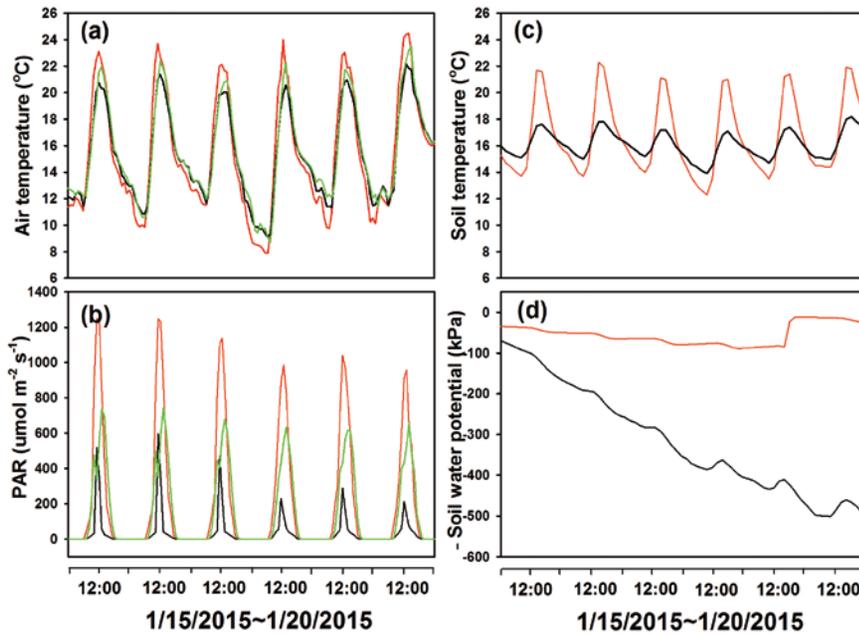
調查結果顯示造林地於夏季日間地表氣溫的降溫現象最明顯，夏季時，造林地日間高溫可較鄰近農地高溫低 3 ~ 4 度 (圖 4 (a))。冬季時，造林地的日間高溫同樣低於鄰近農地，但兩者溫度差異較夏季小，介於 1.5 ~ 2.5



▲圖4、彰化溪州苦楝造林地、水黃皮造林與鄰近農地於夏季8月1日~8月5日(2015年)之 (a)地表氣溫、(b)有效光合作用輻射量(PAR)、(c)土壤溫度與(d)土壤水分勢能之變化。綠色線條為苦楝造林地，黑色線條為水黃皮造林地，紅色線條為農地。

度間（圖 5 (a)）。有效光合作用輻射量與葉面積指數的數值顯示（圖 4 (b)、表 1），夏季造林地的降溫主要來自林木的遮蔭效應及蒸散作用，鬱閉且茂密的樹冠有效阻擋輻射進入造林地而達到降低溫度效果。而冬季較少的

樹冠遮蔭，加上較弱的陽光輻射，使得造林地與農地冬季日間氣溫差異較不明顯，苦楝造林地於冬季時的落葉，造成其日間氣溫略高於水黃皮造林地，兩者約有 0.8 ~ 1.0 度差異。



▲圖5、彰化溪州苦楝造林地、水黃皮造林與鄰近農地於冬季1月15日~1月20日(2015年)之(a)地表氣溫、(b)有效光合作用輻射量(PAR)、(c)土壤溫度與(d)土壤水分勢能之變化。綠色線條為苦楝造林地，黑色線條為水黃皮造林地，紅色線條為農地。

表 1、彰化溪州苦楝與水黃皮造林地之林分基本資料

	苦楝造林地	水黃皮造林地	鄰近農地
平均胸高直徑 (cm)	16.2 ± 0.9 ^a	11.6 ± 0.3	冬季: 高麗菜 夏季: 小黃瓜
樹高 (m)	11.6 ± 0.6	7.2 ± 0.4	
林分密度 (no. ha ⁻¹)	1089 ± 19	1389 ± 51	
地上部林木碳儲存量 (ton C ha ⁻¹)	59.5 ± 8.2	25.0 ± 2.7	
葉面積指數 (m ² m ⁻²) ^b	冬季: 1.1 夏季: 4.0	冬季: 4.6 夏季: 7.4	

註：a：平均值 ± 標準偏差

b：葉面積指數 (leaf area index)：單位面積土地上累積葉面積比值，以 LI-COR LAI-2200 量測。

不同於日間氣溫變化，造林地夜間地表氣溫反而較鄰近農地高，夏、冬兩季夜間氣溫均較農地高 0.5 ~ 1 度（圖 4 (c)、圖 5 (c)）。農地夜間較低的氣溫來自空曠農地的冷空氣對流，且農地夜間容易受到輻射冷卻效應而降溫；相反地，造林地夜間較高的溫度可能來自於林木樹冠阻礙夜間冷空氣對流，另一方面則來自林木日間吸收陽光輻射的熱釋放。不過造林地夜間增加溫度，遠少於農地日間增加溫度，使得造林地整體日、夜間平均地表氣溫低於鄰近農地，呈現淨降溫現象。

相較於氣溫變化，造林地與農地土壤溫度在夏季的差異更明顯，農地夏季土壤溫度可在陽光直射下，高溫可達 37.2 度，而造林地土壤溫度受到樹冠遮蔭、土壤表面枯枝落葉層與表層土壤的隔熱保護，土壤溫度維持在 26 ~ 28 度之間。農地與造林地夏季土壤溫度差異介於 1.5 ~ 10 度，以日間溫度差異高於夜間差異。冬季時，造林地土壤溫度維持在 16 ~ 18 度，農地土壤溫度日、夜間呈現 14 ~ 22 度變動（圖 5 (c)），使得農地日間土壤溫度高於造林地，晚上則低於造林地，但冬季整體日、夜間平均土壤溫度同樣為造林地低於農地。

由於兩調查期間均有作物種植（冬季：高麗菜、夏季：小黃瓜），使得農地土壤具有較高土壤水分勢能，圖 4 (d) 與圖 5 (d) 也可看出當土壤水分勢能下降時，農民即進行灌溉以增加土壤水分勢能。造林地在無降

雨與灌溉下，其土壤水分勢能低於農地土壤，造林地土壤甚至可在長時間未降雨時，表層土壤水分勢能低至 -1300 kPa，接近植物永久萎凋點（permanent wilting point）。但調查造林林木並無缺水萎凋現象發生，顯示造林林木仍藉由吸收下層土壤水分，維持蒸散作用與生理功能。

五、建議與結語

本調查結果發現平地造林具明顯降溫效益，夏季時，造林地地表氣溫於早上 10 點至下午 2 點間，平均的高溫可較鄰近農地低 3.2 度，平均的土壤溫度更可較農地低 8.2 度；冬季時，造林平均日間高溫可較農地低 1.8 度，平均土壤溫度可低 3.0 度。雖然造林地夜間溫度可高於鄰近農地，但夜間增加溫度遠小於日間的降溫作用，使得造林地整體日、夜間溫度低於鄰近農地，達到淨降溫效益。同樣的造林降溫現象，更可被應用於都市降溫上，但相較於本文比較的造林地與農地，都市地表氣溫受到「都市熱島效應（urban heat island）」影響，



（圖片／高遠文化）

內部的水泥建築與柏油路面容易吸收太陽輻射，且在較少水分蒸發散 (evapotranspiration) 與空氣對流，以及過多廢熱積聚下，都市氣溫升溫現象變得更加明顯，特別是水泥材料與過多能源廢熱的夜間熱釋放，造成都市夜間升溫現象最為明顯，而本文提出農地具有夜間氣溫低於造林地夜間氣溫的現象，在都市環境特性中並不適用。都市公園冷島效應 (park cool island) 即藉增加公園綠地達到都市降溫效益，即使只是小規模綠化屋頂 (green roof) 或是綠地植栽，都可能對都市熱島效應產生明顯降溫效果。不過，不同於都市內的公園綠地或是行道樹環境，本篇調查林分為成林且樹冠鬱閉平地造林林分，更多對都市林或是行道樹降溫效益的研究仍是必要的，且更為完整評估臺灣現有平地造林的降溫現象，以及平地造林如何對

大區域範圍的影響也是必要的。

面對越來越嚴峻的全球暖化，有效地減緩溫室氣體效應與降低可能的負面影響，是現今社會必須共同面對的挑戰。就森林而言，林木生長不僅可吸收固定大氣二氧化碳而降低大氣二氧化碳濃度，增加林地的同時，更提供了多樣性的生態系統服務功能。苦楝與水黃皮造林地於夏季時，具有相同降溫效果，不過冬季落葉後的苦楝，可增加太陽輻射穿透，提高冬季白天溫度；類似的現象就如溫帶地區的落葉樹造林，溫帶地區落葉樹栽植可於夏季提供遮蔭，冬季則讓陽光穿透增高地表溫度。雖然苦楝種植並不被許多人士接受（如其諧音、易受風折樹枝），但其高大且快速生長的樹冠，初春開花的美麗景觀，確實可應用於現代造林，也是最近常見的造林樹種之一。🌱

(圖片／高遠文化)