

一、前言

(一) 研究動機

溫室氣體大量排放導致溫室效應，引發「全球溫暖化」(Global Warming)，其中以二氧化碳排放為溫室效應的主要成因。Mauna Loa observatory 指出，大氣中的二氧化碳濃度由 1958 年的 315ppm 至 1988 年已升至 350ppm，預測在 2050 年時，將達到 600ppm。根據 1996 年聯合國氣候變化政府間專家委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC) 第二次評估報告指出，人類活動所排放的溫室氣體，若不採取任何防治措施，預估平均地面氣溫於 2100 年時將比 1990 年時增加 1-3.5℃，海平面將上升 15-95 公分，其後果將是氣候系統發生變遷，導致暴雨或乾旱極端事件頻傳，區域降水型態發生變化，造成水資源分配不均或不足，海平面水位上升，易使低窪地區海水倒灌，積水不退，海流改變，漁場轉移等 (林俊成等，1999)。

溫室效應的形成對全球的生態與經濟造成破壞性的影響，因此現今世界各國對溫室氣體採行積極管制措施，共同面對此全球性的問題。二氧化碳排放抑制策略有兩種，一為預防二氧化碳的產生，如節約能源使用、提高能源使用效率、使用再生能源等政策宣導、發行排放許可證、徵收碳稅；二為消除已產生的二氧化碳之策略，利用陸上或海洋生

物加以固定，其中以陸上植物—森林吸取大氣中過多的二氧化碳之方法，在政治考量上較其他方式（如抽取碳稅）阻力少且對經濟發展影響較小，容易受世界各國接受。在美國的國家行動方案中，對林業部門推動現有林的保護，以加速植樹來增加二氧化碳吸收源；加拿大相當重視農林部門對二氧化碳的吸收能力，而進行綠色計畫（林素貞、張子見，1996）。

根據黃肇英等人（1993）利用台灣歷年能源消費量資料以 IPCC 第二方法估算二氧化碳排放量，1990 年台灣總二氧化碳排放量為 116 百萬公噸，預計 2000 年將增加至 243 百萬公噸。若台灣未來以已開發國家之名加入 FCCC（Framework Convention Climate Change；FCCC），則必須減少 127 百萬公噸二氧化碳排放量。而陳佳琪（1997）為了利用植樹造林吸取二氧化碳減緩溫室效應，建立了一個農林雙部門模型。由模型估算結果，植樹造林方式最多僅能達吸取 21 百萬公噸二氧化碳的目標，約達預計減量的 17%，所以政府必須利用誘因來吸引民間加入造林的行列。

陸地生態系中，森林對二氧化碳吸收與固定具重要貢獻，藉由林木本身生理特性進行光合作用吸收大氣中二氧化碳，所貯存的二氧化碳轉化為有機碳貯存於植物體內。全地球表面每年二氧化碳經光合作用固定，轉變成植物之有機物質，約為 2×10^{11} 噸碳量，相關的植物吸收 7×10^{11} 噸二氧化碳時，同

時可產生 5×10^{11} 噸植物之有機物質。依植物種類不同，其固定碳量亦有差別。陸地植物以森林植物所固定之碳量最大，不僅其光合作用之效率高，同時所佔陸地面積亦最大（易希道，1983）。

Sedjo (1989) 曾試算造林對碳的固定量，在普通人工林年平均生產量每公頃 15 立方公尺材積的林地，1 立方公尺材積可吸收 0.26 公噸的碳。

王立志 (1996) 使用第二次森林資源調查之生長量及生長率資料，在假設無林地變更及森林砍伐的狀況下，則台灣森林每年可吸存大氣中 17.38 百萬公噸的二氧化碳。

Brown *et al.* (1986) 估計熱帶造林地每年可吸收 $0.03-0.11 \times 10^9$ 公噸的碳，並指出其碳吸收最多的齡級位於 0-5 及 6-10 年生之林木。

林俊成等 (1999) 以生物量法估算人工柳杉林之碳及二氧化碳貯存效果，結果顯示，柳杉人工林貯存碳量為每公頃 161.24 公噸，換算貯存二氧化碳量為每公頃 591.21 公噸。

(二) 研究目的

森林樹冠層在森林生態系中之物質循環及能量流轉扮演著重要的角色，目前大多數的研究都以生物量推估林木對二氧化碳的吸收固定效應，少有針對樹種直接在野外現場測定光合作用，探討一些其他因素的狀況來瞭解林木對碳的吸收釋出情形。國

內已有林信輝及劉坤樹（1997）、黃文俊（1999）、王亞男（2000）及郭耀綸（2000）等研究人員對本省的幾種闊葉樹及針葉樹的柳杉進行其葉片光合作用及氣孔導度等相關的直接測定，這些研究對於各種不同林木之二氧化碳相關效益能有較詳細的瞭解。

本研究即以此觀點為主軸，針對位於台灣中部苗栗農工和興林場林下栽植之3年生樟樹與台灣欒作現場的光合作用相關測定，目的在於：

1. 瞭解林下栽植之樟樹與台灣欒光合作用情形，以推估其二氧化碳固定效益。
2. 瞭解兩樹種林下栽植時光合作用與環境因子變化之相關性。
3. 綜合前人研究比較各樹種間與各齡級間對二氧化碳固定效能。

二、 前人研究

(一) 光合作用及其它環境因子的關係

林木藉由光合作用來吸收二氧化碳，但影響光合作用的因素甚多，如二氧化碳濃度、光、溫度及水，另外如樹種、樹齡、呼吸作用與蒸散作用等生理因子，亦為重要的影響因素。

1. 二氧化碳

二氧化碳為光合作用暗反應的基質，隨著二氧化碳的濃度提高，淨光合速率亦隨之增加(Williams and Flanagan, 1998)。外加二氧化碳濃度 (C_a) 的增加，葉肉細胞間隙的二氧化碳濃度 (C_i) 也隨之增加，大多數作物均維持著一定的 C_i/C_a 比，約為 0.7 左右，所以 C_i/C_a 可當作是一種探測光合作用是否受到限制的指標。如果增加外界二氧化碳濃度之後的 C_i/C_a 值比正常大氣下 C_i/C_a 值小，則表示此時的氣孔傳導度已經對光合作用產生了限制的影響 (Drake *et al.*, 1997)。

長期增加二氧化碳的結果導致蔗糖與澱粉濃度增加 60 - 100 %，Rubisco 濃度、活性與再生能力下降、光合作用的能力減低，且氣孔密度降低。氣孔開張度減低，增加了水分的利用效率 (Drake *et al.*, 1997)。但是氣孔密度降低，氣孔開張度減低之後伴隨而來的是蒸散速率降低、葉溫增加。短期增加二氧化碳濃度，則使光合產物的輸出速率增加 (Grodzinski *et al.*, 1998)。各種長、短期增加二氧化碳濃度對光合速率的改變，應可用 Rubisco 活

性變化來解釋：一是目前大氣中的二氧化碳濃度並不能讓 Rubisco 的活性達到飽和，從外增加二氧化碳濃度正好讓 Rubisco 的活性增加至飽和；二是二氧化碳抑制了 Rubisco 與氧氣間的氧化作用，亦即降低了光呼吸作用。

二氧化碳對於提升 C_3 植物的光合作用效率比 C_4 植物佳。換句話說， C_4 型植物在高濃度下生長促進程度並不如 C_3 型植物為大（林安秋，1996）。在 C_3 路徑時，其羧化反應？是 ribulose biphosphat carboxylase(RuBP carboxylase or Rubisco), Rubisco 有羧化？與與氧化？兩種功能， O_2 與 CO_2 會競爭 Rubisco，所以當 CO_2 濃度增加時羧化反應速率增加，並抑制氧化？的活性，使淨光合作用增加。在 C_4 路徑方面，其反應？是 phosphoenolpyruvate carboxylase(PEP carboxylase), 此？在一定的 CO_2 濃度下已飽和，故增加 CO_2 濃度時不會有明顯的反應。

2. 光

太陽輻射之性質有光度、光質及光週期，這三種特性會影響植物的生長與發育（Salisbury and Ross, 1992），對光合作用整體表現之影響仍以光度為主。當光強度為零時，光合速率成為負值，光強度逐漸增高， CO_2 消耗量隨而增加，當光合速率等於零時，亦即是光合速率與呼吸速率相等時的光強度稱為光補償點。光強度持續增高時，光合速率隨

之增高，但當達到某限度時趨於飽和，此時光強度雖繼續增高，光合速率仍保持一定。

一般來講高濃度的二氧化碳可以補償光強度的不足，在 C_3 植物上主要是藉由降低光呼吸與降低光補償點來增加碳收穫量，因此，在冬天時提高二氧化碳的濃度是較有助益的。

3. 水分

水分狀況會間接影響光合作用。在缺水的情況下，光合作用下降前，細胞的生長與增大會先受到抑制。當水分缺乏時，細胞內的碳水化合物會累積以調整滲透壓來對抗乾旱，此時亦會影響氣孔的運動，部份的氣孔將關閉以減少蒸散作用，並可以增進水分的利用效率。

4. 溫度

光合作用的適溫因植物種類的不同而異，原產熱帶的植物，其光合作用的適溫較高，一般為 30~35。溫帶原產的植物，其適溫較低，約 22~25。任何植物於低溫下的光合速率均低。光合速率隨溫度的上升而增高，在某溫度限度下，其光合速率保持高值，溫度繼續升高時，光合速率反而降低。Whitehead *et al.* (2001) 研究模擬紐西蘭原生林每年碳吸存情形，發現在所有變項中，溫度是最主要的影響因子。Idso *et al.* (1987) 研究試驗了幾種草本植物後指出，高溫時，在高濃度的二氧化碳下會

促進其生長，但在低溫且高濃度的二氧化碳下則生長速率會降低。相反的，Sionit *et al.* (1981) 卻發現，黃秋葵 (okra) 在二氧化碳濃度 1000ppm，日夜溫 26/20 下，其生產並沒有增加，但在 20/14 下，則出現較佳的收穫量。

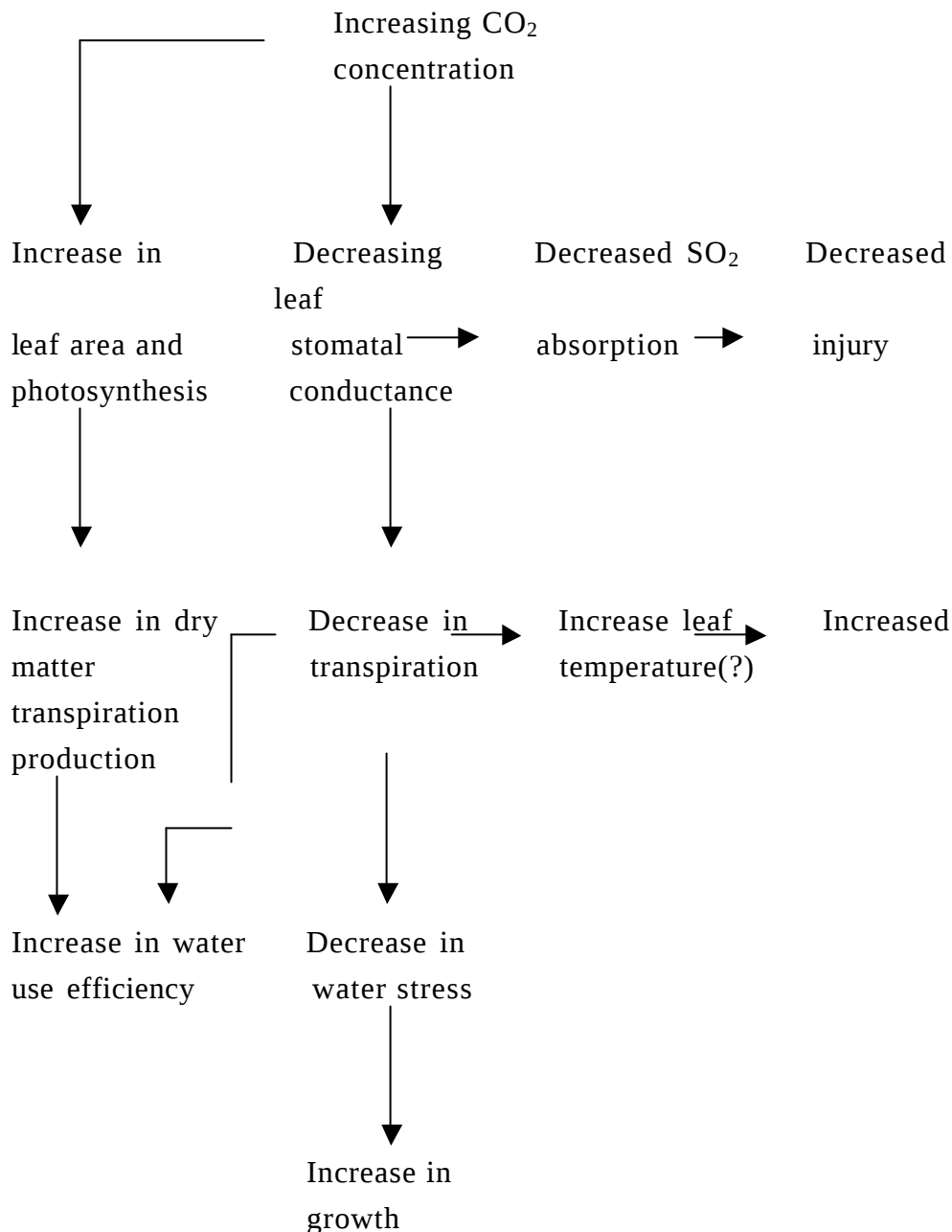


圖 1 二氧化碳增加與植物生理過程間之相互關係

(Kramer , 1986)

圖 1 為二氧化碳濃度增加時，與植物各種生理過程之相互關係。包括二氧化碳增加導致光合作用速率增加、乾物產量增加、水分利用效率提昇、減少氣孔導度等結果 (Kramer , 1986)。

5. 二氧化碳與林木生長

已有許多針對草本植物及溫室作物的研究報告指出，二氧化碳可以當成肥料來增進生長 (Kozlowski *et al.* , 1991)。Kimball (1983 , 1986) 收集並調查 38 種作物後提出，二氧化碳增加為原來的二倍時，則可增加 33 % 的市場收穫量。

Sionit *et al.* (1985) 將德達松 (loblolly pine) 及香楓 (sweet gum) 的種子苗分別以 350ppm、500ppm 及 650ppm 濃度的二氧化碳處理，經過 28 週後發現，在二氧化碳濃度 500ppm 處理之後，香楓之總乾物量比經過濃度 350ppm 處理後多出 40 %，而德達松則多出 55 %；經 650ppm 濃度處理，乾物量沒有特別顯著的增加，但樹高生長卻增加。Loblolly pine 之乾物量多在冬季大量增加，令人驚訝的是其經過濃度 650ppm 處理後並不比經濃度 350ppm 處理後有較大的改善，探討其原因可能是冬季時受到光因素的限制。而另一試驗以二氧化碳濃度 675ppm 與 1000ppm 處理，並分別加以高光度與低光度，結果發現兩樹種的樹高、莖基部之直徑、葉面積及總乾物量於高光強度下均大量增加，而在低光強度下，香楓增加的量少，而德達松則沒有增

加。

Sionit and Kramer (1986) 將 15 種不同種類之林木的試驗研究結果整理如下：

- (1) 在二氧化碳濃度 400-700ppm 之範圍，林木的總乾物重、直徑及高生長皆有增加。
- (2) 當二氧化碳濃度高於 500-600ppm 時，通常林木只有少量的生長，偶而甚至會有下降的情形。
- (3) 高濃度的二氧化碳對林木形態結構上有相當的影響，如增加枝條量、葉面積、葉片厚度等，但並非對每一樹種之結果皆相同。
- (4) 不同種類的林木其反應皆不同，不可一概而論，故應針對每一樹種作個別的研究。
- (5) 在增加二氧化碳濃度時，不同種類之苗木其競爭能力有所不同。

6. 二氧化碳與氣孔導度

二氧化碳向內擴散及水分的向外蒸散主要皆經由氣孔，在高濃度的二氧化碳環境下，會導致部份氣孔關閉，使氣孔導度下降。

Rogers *et al.* (1983) 提出，香楓在二氧化碳濃度增加 2 倍下，氣孔導度減少 40 % 。

Beadle *et al.* (1979) 將西特喀雲杉 (Sitka

spruce) 置於二氧化碳濃度 20-600ppm 下，並不影響其氣孔導度；但在 Surano *et al.* (1986) 之報告中則指出，美國西部黃松 (ponderosa pine) 之針葉在 500-600ppm 之二氧化碳濃度下，其氣孔導度比低濃度時減少了 1/2。

Morison (1985) 提出，在高濃度二氧化碳環境下，氣孔之關閉可使水分利用效率增加 30-50 %。

圖 2 呈現的是美國東部白楊 (eastern cottonwood) 種子苗在數種二氧化碳濃度下，其氣孔導度、蒸散作用與二氧化碳吸收間的複雜關係，氣孔導度與蒸散作用在二氧化碳濃度 600ppm 時，比 300ppm 時減少了 25 %，但光合作用則增加了 40 %。這種明顯的相反情形一部份是因其阻抗水與二氧化碳蒸散之生理作用不同，另一部份則是因其碳固定過程有個別差異的特性存在。

無論如何，碳的進入與固定，不僅靠氣孔之傳導，亦藉由液體的傳導路徑來完成，如細胞壁、細胞膜、葉綠體及其它胞器等；因此氣孔導度降低 50 %，對二氧化碳固定的影響比水分蒸發出去的影響小，也因此氣孔導度對二氧化碳向內擴散只是限制因素的一部份，但卻是對水份蒸發出去的一個重要因素。

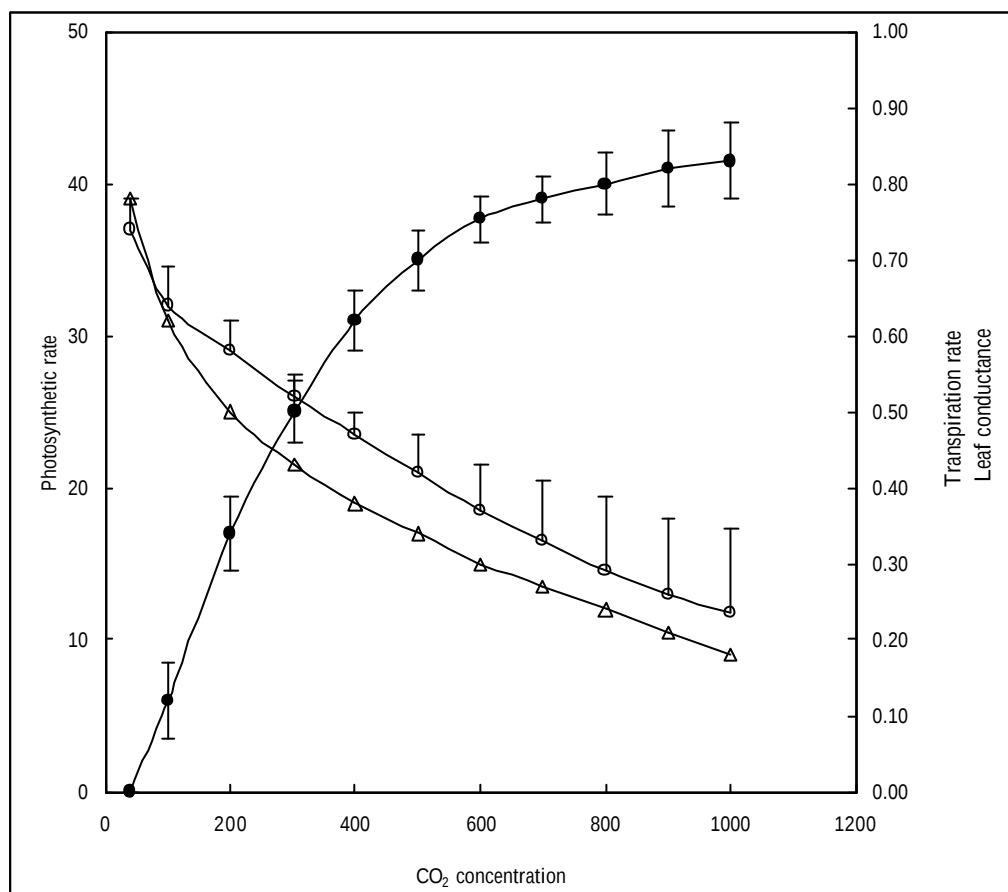


圖 2 美國東部白楊 (Eastern cottonwood) 之光合作用速率、蒸散速率、葉片導度在各種二氧化碳濃度 ($\mu\text{l/liter}$) 下之變化 (Kozlowski *et al.* , 1991) ● : 不同濃度二氧化碳下之淨光合成速率 ($\text{mg CO}_2 \text{ dm}^{-2} \text{ hr}^{-1}$) , ○ : 葉片導度 (cm s^{-1}) , △ : 蒸散速率 ($\times 100 \text{ mg H}_2\text{O dm}^{-2} \text{ hr}^{-1}$) 。

(二) 台灣地區不同樹種對二氧化碳固定量

1. 林信輝、劉坤樹 (1997) 選取宜蘭縣福山植物園的十種闊葉樹，包括八種樟科 (台灣雅楠、大葉楠、香楠、紅楠、長葉木薑子、瓊楠、香桂與牛樟) 二種殼斗科 (三斗柯與鋸葉長尾桫欏)，樹高約 2m。以 LI-6200 型攜帶式光合成蒸散測定裝置作野外光合成速率、蒸散速率與氣孔導度之測定，並分析其與各氣象因素之相關性。試驗結果發現，殼斗科植物之葉片光合成速率、蒸散速率與葉片導度均大於樟科植物，其中以鋸葉長尾桫欏之測值最大，長葉木薑子最小。季節變化以三斗柯受影響最小，香桂、香楠及長葉木薑子影響較大。
2. 黃文俊 (1999) 以 CI-301PS 攜帶式光合作用測定儀，試驗研究六種闊葉樹，落葉樹兩種，為棲蘭山區之台灣？樹四株 (樹高 11.2m、12.8m、17.2m、16.5m) 與福山區的山紅柿 (樹高 12.1m) 一株；常綠樹四種，分別為福山區的厚殼桂 (樹高 12.8m)、長葉木薑子 (樹高 10.1m)、黃杞 (樹高 13.3m) 與鋸葉長尾桫欏 (樹高 14.6m) 各一株。結果顯示，六種供試樹種之葉片光合成速率與氣孔導度以鋸葉長尾桫欏最大，長葉木薑子最小。推估日淨光合作 CO_2 固定量與 H_2O 蒸散量，10 月份晝間，台灣？

樹 8.5 個小時與鋸葉長尾桫 6.5 個小時，每平方公尺葉面積分別可固定 5.95g 與 5.81g 的 CO_2 ，日蒸散量分別為 487g 與 460g 之 H_2O 。推估年淨光合作用 CO_2 固定量與 H_2O 蒸散量方面，編號 1 與 2 台灣？樹 11 個月（含落葉期 3 個月），每平方公尺葉面積約可固定 4341g 與 3928g 之 CO_2 ，蒸散 287Kg 與 499Kg 之 H_2O ，編號 3 與 4 之台灣？樹 9 個月（含落葉期 3 個月），每平方公尺葉面積約可固定 2195g 與 2348g 之 CO_2 ，蒸散 490.67Kg 與 347Kg 之 H_2O 。山紅柿 11 個月（含落葉期 2 個月），每平方公尺葉面積約可固定 4635g 之 CO_2 ，蒸散 810Kg 之 H_2O 。鋸葉長尾桫 11 個月，每平方公尺葉面積約可固定 4742g 的 CO_2 ，蒸散 552Kg 的 H_2O 。黃杞 11 個月，每平方公尺葉面積約可固定 3979g 的 CO_2 ，蒸散 514Kg 之 H_2O 。厚殼桂 11 個月，每平方公尺葉面積約可固定 3906g 的 CO_2 ，蒸散 508Kg 的 H_2O 。長葉木薑子 11 個月，每平方公尺葉面積約可固定 1940g 的 CO_2 ，蒸散 431Kg 的 H_2O 。另外在與季節變化關係方面，各樹種於生長季節其光合作用速率、蒸散速率與氣孔導度皆呈現落葉闊葉樹大於常綠闊葉樹，冬季休眠時期，鋸葉長尾桫與黃杞可以維持較低的淨光合作用速率、蒸散速率與氣孔傳導速率。

3. 王亞男 (2000) 以北中南部之樟樹及中部的柳杉為試驗樹種，使用 CI301PS 攜帶式光合作用測定儀，研究其對二氧化碳之固定能力，所得結果為：台大校園 15 年生樟樹陽葉日平均光合作用速率 $6.15 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，陰葉日平均光合作用速率為 $3.03 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ；棲蘭山 10 年生樟樹陽葉之日平均光合作用速率值為 $5.08 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，陰葉日平均光合作用速率為 $3.52 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ；南投和社 14 年生樟樹陽葉日平均光合作用速率值為 $7.01 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，陰葉則為 $4.83 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ；屏東 20 年生樟樹陽葉之日平均光合作用速率為 $6.56 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，陰葉為 $1.93 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。在和社的柳杉陽葉測得之日平均光合作用速率為 $1.46 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，陰葉日平均光合作用速率為 $1.35 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。研究並選取南投和社地區的樟樹及柳杉估算葉面積。樟樹總平均每片葉面積為 15.34cm^2 ，全株葉面積為 157.2m^2 ，一日之二氧化碳固定量（8 時至 16 時）為 $28.33 \text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ，柳杉總平均每葉葉面積有 16.4cm^2 ，全株葉面積約為 25.07m^2 ，二氧化碳固定量為 $1.43 \text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 。

4. 郭耀綸 (2000) 研究測定南仁山低地雨林白榕樹冠上層、中層及林下九節木及大葉樹蘭的光合作用日變化與季節變化。結果指出：白榕樹冠上層葉的光合作用率在夏季會受到強光抑制，但在冬季則不會。光合作用率及氣孔導度在夏日高溫強光條件下有明顯的中午抑制現象。冬季寒流期間，在飽和光量下，光合作用率隨葉溫提高而增加。白榕樹冠上層葉瞬間最大光合作用率可達 $17.17 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，一日碳收穫量平均為 $275 \text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ，換算成 CO_2 重量為 $12 \text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 。白榕樹冠中層葉及林下植物的光合作用率因光量低而受到限制，一日碳收穫量分別為白榕上層葉的 30 % 及 7-11 %。白榕上層葉一日碳收穫量的季節變化與白天總光量並無顯著相關性，但與白天平均葉溫有顯著相關。

三、材料及方法

(一) 試驗地概況

5. 位置

和興林場位於苗栗縣獅潭鄉和興村十九份段，台三線 118.4K 之東方，東臨泰安鄉八卦力山，西與明德水庫集水區接壤，南和大湖鄉、泰安鄉毗鄰，位於東經 $120^{\circ}55'30''$ 北緯 $24^{\circ}30'50''$ ，海拔高介於 500-900 公尺之間，坡度 $20-40^{\circ}$ ，林地面積 54 公頃，屬於明德水庫上游集水區之水源水質保護區（圖 3）。

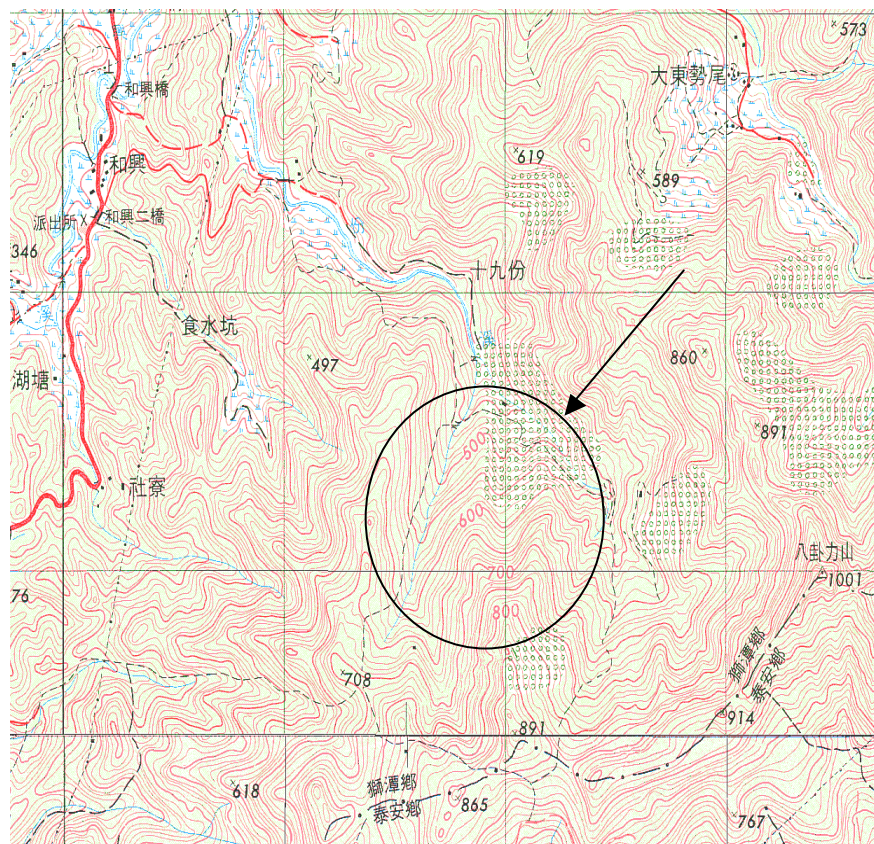


圖 3 試驗地位置圖（苗栗農工和興林場）

6. 氣候

林場位於本省中北部，在北回歸線之北，屬華南型的亞熱帶季風氣候區。冬季多東北季風，夏季多西南風，年平均氣溫約 18℃，依據苗栗農田水利會和興雨量站資料顯示，近十年來之年平均降雨量約為 2500 公釐，唯受全球氣候變遷，年降雨量變化顯著差異；如 2000 年降雨量 3619 公釐，1999 年降雨量 1892 公釐，相差有 1727 公釐之多。每年雨季分布 4、5、6、7、8 月，10 月後至次年 2 月為乾季。

7. 地形地勢

獅潭鄉地質屬上新世紀 300-400 萬年之沉積岩，地層為錦水頁岩，地質構造為頁岩、砂質頁岩、砂岩，厚度 300-350 公尺。苗栗縣境內的地形，山多平原少，所以有「山城」的雅號，為本省北部丘陵的南界線。地勢東高西低，由東南高峻向西北低斜。試驗地土壤屬苑裡坑系（Yuan Li Keng Series；Y1k）；苑裡坑系是由砂頁岩母質風化形成之黃棕色黃壤，剖面厚度約 60 公分左右，60 公分以下為母岩層或含半風化碎石屑達 70-80 % 之母質層，剖面質地以中細質地之粘質壤土或玢質粘壤土為主，土色呈較亮之黃棕色，為美國分類體系（Soil Taxonomy）中之典型低鹽基淡色弱育土（Typic Dystrochrepts）。

8. 林況

和興林場面積 54 公頃，其中以竹林（桂竹、孟宗竹、麻竹及綠竹）約 5 公頃，油桐林 10 公頃，杉木林 1 公頃，闊葉次生林則約佔 30 餘公頃，其主要以相思樹、山黃麻及楠榕群叢為主，少部份則為殼斗科之樹種。

9. 試驗樣樹相關位置情形

5.1 樟樹

位於海拔高 515 公尺處，樹高 4.84 公尺，胸徑 6.1 公分，四周上木皆為油桐，與樟樹距離約 2 公尺，12 個測定日之光合作用有效輻射（Photosynthesis Active Radiation, PAR）光量為 48 - 682 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

5.2 台灣欒

位於海拔高 510 公尺，樹高 4.03 公尺，胸徑 4.1 公分，四周上木有油桐、杉木及九芎等，與試驗樣樹台灣欒距離 1.5 - 2 公尺，12 個測定日之光合作用有效輻射光量在 86 - 691 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 間。

(二) 試驗材料與方法

1. 試驗樹種

選擇 3 年生次生林林下栽植的樟樹與台灣檫。

1.1 樟樹 (*Cinnamomum camphora*)

樟科樟屬，常綠喬木全株具香味，幹皮縱向深溝裂，葉薄革質，卵型或橢圓形，先端銳，平滑無毛，離基三出脈，葉背側脈及支脈腋脈有腺窩，花綠白色，果球形，徑 6mm，黑熟，產大陸長江以南，在台灣北部海拔 1200m，南部 1800m 以下普遍分佈。

1.2 台灣檫 (*Zelkova serrata*)

榆科檫樹屬，又名雞油，落葉喬木，幹皮灰褐色，雲片狀剝落，葉紙質，長卵形，表面粗糙，產大陸及台灣全島海拔 300-1000m 附近，為闊葉樹中最優良木材之一。

2.試驗期間樣樹樹高及胸徑生長情形

試驗期間分別量測四次（90年5月、90年8月、90年11月及91年4月）樟樹與台灣櫟之樹高及胸徑並記錄之（表1）。

表 1 樟樹與台灣櫟樹高及胸徑變化

	樟 樹		台 灣 櫟	
	樹 高 (cm)	胸 徑 (cm)	樹 高 (cm)	胸 徑 (cm)
90年5月	484	6.1	403	4.1
90年8月	530	6.3	486	4.8
90年11月	538	6.7	498	5.8
91年4月	558	7.3	528	7.3

3.光合作用測定

3.1 測定儀器

採用美國 CID 公司之 CI-310 攜帶式光合作用儀，其係由 CO₂ 氣體分析系統及一個可替換式的 Chamber 所組成。

3.2 儀器設定條件

Open system

Flow rate : 0.4 lpm

Added Interval : 0 sec (means using the optimal time
interval)

Response time : 15 sec

Leaf area : 6.25 cm²

3.3 測定項目 (附錄 1、 2)

CO₂ in

CO₂ out

Rhin

Rhout

RAR

Tair

Tleaf

ATM pressure

Photosynthesis

Transpiration

Conductance

Internal CO₂

3.4 儀器校正

a. CO₂ 零點校正 (Calibrate CO₂ Zero)

於每次的測定日開始使用時現場進行 0 點校正。

將 soda lime tube 緊密連接於 CI-310 分析儀器的入口 (inlet) 與出口 (outlet) , 然後依照電腦螢幕指示開始進行 Calibrate CO₂ Zero。

b. CO₂ 標準氣體校正 (Calibrate CO₂ Span)

每個月於實驗室內進行 CO₂ 標準氣體校正一次。

使用的 CO₂ 濃度為 411 ppm , 再依電腦螢幕指示操作進行。通氣管必需再接上一個 "T" 型連接管 , 以避免過量的氣體衝入系統中。

3.5 測定方法與時間

試驗自九十年五月至九十一年四月共一年期間，每月測量樟樹及台灣欒各一天，分別為 90 年 5 月 26、27 日，6 月 9、10 日，7 月 11、12 日，8 月 24、25 日，9 月 23、24 日，10 月 20、26 日，11 月 23、24 日，12 月 16、19 日，91 年 1 月 26、27 日，2 月 2、3 日，3 月 30、31 日，4 月 12、13 日，兩樹種各 12 日。

於樟樹與台灣欒四周以竹子搭建成二層，以利試驗進行（圖 4、5）。

因試驗樣樹為 3 年生之林木，樹幹著生枝條之冠層長度約為 2.5 公尺，樹冠寬幅約為 1.5 公尺，故將樟樹與台灣欒分為上層葉及下層葉（樹冠長 $1/2$ ）進行測定，而非分為上、中、下層與陽葉、陰葉。

上下二層各隨機選取三片葉片（因為幼齡樹，多數葉片較小，而試驗所使用的最小 chamber 面積為 6.25cm^2 ，故所選取的葉片以 chamber 可以夾滿為原則），每葉片測定三次，每個小時輪流一回，先測定上層葉，再測定下層葉，並將儀器所測定之讀值記錄儲存。

每個月選擇晴天或無雨天時進行乙次，各樹種分別由上午八時至下午四時測定一天九個小時。



圖 4 試驗樹種 --- 樟 樹



圖 5 試驗樹種 --- 台 灣 櫟

4. 葉面積之測定

4.1 測定儀器

儀器使用 Laser Area Meter CI-203 葉面積測定儀，將葉片直接放入儀器內即可讀出面積值（ mm^2 ）。

4.2 測定方法

於 90 年 10 月至 11 月，收集樟樹與台灣櫟之落葉，將其分為大、中、小型葉三群，再各取 100 葉以儀器直接測量葉面積，讀值記錄後取平均值，然後以人工計算估測著生枝條數及每枝條約有多少的大、中、小型葉片，推估整株樹的葉面積。

（三）統計分析

以微軟公司 Excel 2000 版軟體之皮耳森相關係數來檢定不同位置葉片的淨光合作用速率與環境因子之相關性及計算 R-square；另使用 SAS 8.0 版軟體作變異數分析來檢定季節變化的差異。

CO₂ 換算： $1 \mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1} = 0.044 \text{mgCO}_2 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$

四、結果與討論

(一) 樟樹

1. 樹冠上層葉

1.1 淨光合作用速率與蒸散速率、氣孔導度

樟樹樹冠上層葉在 12 月的測定日所測得之平均測值如表 2, 淨光合作用速率總平均為 $5.06 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 蒸散速率為 $0.44 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 及氣孔導度為 $35.82 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。淨光合作用速率總平均值與王亞男 (2000) 所測得棲蘭山樟樹陽葉 ($5.08 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 及南投和社樟樹陰葉 ($4.83 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 相近。蒸散速率日平均測值與黃文俊 (1999) 所測得福山常綠闊葉樹 ($0.5-0.8 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 及王亞男 (2000) 研究之台大校園樟樹陰葉測值較近 ($0.43 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 但皆低於其他地區及不同冠層葉之值; 而氣孔導度的平均測值則皆較其他地區及樹種為低; 可能因為林下栽植所能接受到的光度不同, 使有不同的微環境造成。將其蒸散速率、氣孔導度與淨光合作用速率變化以皮耳森相關係數檢定後, 並未明顯見到有顯著相關性, 12 個測日平均相關係數為 0.39 及 0.41 (表 3), 而郭耀綸 (2000) 的研究, 光合作用與氣孔導度的 R^2 值則為 0.91。

表 2 樟樹樹冠上下層葉 12 個月測定日之平均測值

	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	平均
上層淨光合作用速率 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	2.90 $\pm$ 1.98	2.28 $\pm$ 1.62	2.55 $\pm$ 2.22	3.41 $\pm$ 2.96	5.51 $\pm$ 3.02	10.43 $\pm$ 8.92	11.26 $\pm$ 5.09	12.87 $\pm$ 4.59	6.13 $\pm$ 4.66	1.87 $\pm$ 1.78	1.27 $\pm$ 1.09	0.26 $\pm$ 0.18	5.06
下層淨光合作用速率 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	1.06 $\pm$ 1.01	0.73 $\pm$ 0.74	0.91 $\pm$ 0.93	1.18 $\pm$ 0.95	2.19 $\pm$ 1.26	4.15 $\pm$ 3.50	5.74 $\pm$ 3.28	8.31 $\pm$ 3.34	4.26 $\pm$ 4.27	0.73 $\pm$ 0.65	0.46 $\pm$ 0.37	0.01 $\pm$ 0.01	2.48
上層蒸散速率 ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	0.12 $\pm$ 0.04	0.28 $\pm$ 0.03	0.33 $\pm$ 0.08	0.44 $\pm$ 0.16	0.21 $\pm$ 0.06	0.23 $\pm$ 0.08	0.77 $\pm$ 0.42	1.39 $\pm$ 1.07	1.03 $\pm$ 0.76	0.14 $\pm$ 0.04	0.18 $\pm$ 0.06	0.11 $\pm$ 0.04	0.44
下層蒸散速率 ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	0.03 $\pm$ 0.02	0.10 $\pm$ 0.01	0.01 $\pm$ 0.01	0.12 $\pm$ 0.06	0.02 $\pm$ 0.02	0.04 $\pm$ 0.0	0.03 $\pm$ 0.01	0.04 $\pm$ 0.02	0.08 $\pm$ 0.04	0.03 $\pm$ 0.02	0.02 $\pm$ 0.01	0.01 $\pm$ 0.01	0.04
上層氣孔導度 ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	23.33 $\pm$ 4.36	23.88 $\pm$ 2.16	38.55 $\pm$ 6.22	38.17 $\pm$ 4.17	39.22 $\pm$ 7.61	41.2 $\pm$ 6.95	43.23 $\pm$ 5.83	53.5 $\pm$ 3.88	43.22 $\pm$ 6.72	37.72 $\pm$ 4.11	35.7 $\pm$ 6.11	12.11 $\pm$ 2.42	35.82
下層氣孔導度 ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	1.20 $\pm$ 0.08	1.01 $\pm$ 0.41	1.38 $\pm$ 1.16	1.00 $\pm$ 0.07	1.11 $\pm$ 0.40	0.92 $\pm$ 0.35	0.83 $\pm$ 0.42	0.88 $\pm$ 0.34	1.02 $\pm$ 0.04	1.14 $\pm$ 0.67	1.12 $\pm$ 0.31	1.18 $\pm$ 0.37	1.07
上層光合作用有效輻射 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	153 $\pm$ 82	347 $\pm$ 184	424 $\pm$ 151	434 $\pm$ 129	451 $\pm$ 164	532 $\pm$ 179	532 $\pm$ 180	684 $\pm$ 164	388 $\pm$ 189	205 $\pm$ 117	171 $\pm$ 97	157 $\pm$ 90	373.15
下層光合作用有效輻射 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	58 $\pm$ 29	138 $\pm$ 69	161 $\pm$ 80	165 $\pm$ 82	175 $\pm$ 78	187 $\pm$ 93	188 $\pm$ 100	227 $\pm$ 113	167 $\pm$ 93	167 $\pm$ 93	119 $\pm$ 63	65 $\pm$ 35	142
上層葉溫 ()	12.11 $\pm$ 0.38	11.52 $\pm$ 0.34	23.25 $\pm$ 0.81	24.30 $\pm$ 0.88	27.72 $\pm$ 0.97	27.59 $\pm$ 0.99	25.80 $\pm$ 0.91	28.72 $\pm$ 1.00	23.84 $\pm$ 0.84	22.64 $\pm$ 1.21	15.43 $\pm$ 0.54	15.19 $\pm$ 0.53	21.51
下層葉溫 ()	5.19 $\pm$ 0.14	4.94 $\pm$ 0.10	17.20 $\pm$ 0.35	18.33 $\pm$ 0.38	20.50 $\pm$ 0.42	25.46 $\pm$ 0.52	24.78 $\pm$ 0.65	23.98 $\pm$ 0.49	21.13 $\pm$ 0.43	21.26 $\pm$ 0.44	14.83 $\pm$ 0.31	14.31 $\pm$ 0.30	17.66
上層相對濕度 (%)	58.71 $\pm$ 1.21	70.61 $\pm$ 0.73	74.43 $\pm$ 1.00	60.91 $\pm$ 0.90	75.95 $\pm$ 1.30	70.16 $\pm$ 1.54	66.23 $\pm$ 1.42	75.07 $\pm$ 1.12	70.68 $\pm$ 0.82	70.97 $\pm$ 0.77	66.87 $\pm$ 1.02	57.06 $\pm$ 0.68	68.14
下層相對濕度 (%)	77.26 $\pm$ 3.46	82.26 $\pm$ 2.79	79.30 $\pm$ 3.04	72.17 $\pm$ 3.23	80.65 $\pm$ 3.61	74.50 $\pm$ 2.96	71.37 $\pm$ 3.14	79.71 $\pm$ 3.57	77.73 $\pm$ 3.42	71.37 $\pm$ 3.14	71.53 $\pm$ 2.92	64.34 $\pm$ 2.83	75.16
上層 CO ₂ 濃度 (ppm)	335 $\pm$ 11	336 $\pm$ 11	334 $\pm$ 12	338 $\pm$ 11	341 $\pm$ 12	364 $\pm$ 12	335 $\pm$ 11	361 $\pm$ 15	346 $\pm$ 12	336 $\pm$ 11	336 $\pm$ 11	333 $\pm$ 11	342
下層 CO ₂ 濃度 (ppm)	328 $\pm$ 8	329 $\pm$ 8	334 $\pm$ 8	328 $\pm$ 8	329 $\pm$ 8	352 $\pm$ 9	329 $\pm$ 8	358 $\pm$ 9	337 $\pm$ 9	338 $\pm$ 7	328 $\pm$ 8	329 $\pm$ 8	335

表 3 樟樹樹冠上下層葉淨光合作用速率 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 與蒸散
速率 ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、氣孔導度 ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、PAR ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、葉溫 ()、相對濕度 (%) 及 CO_2 濃度 (ppm)
的皮耳森相關係數

	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	平均
上層蒸散速率	0.35	0.27	0.15	0.44	0.45	0.56	0.34	0.60	0.16	0.17	0.65	0.51	0.39
下層蒸散速率	0.52	0.12	0.63	0.02	-0.41	0.24	0.35	0.65	0.62	-0.07	-0.16	0.01	0.21
上層氣孔導度	-0.01	0.02	0.50	0.74	0.49	0.39	0.30	0.62	0.70	0.37	0.48	0.37	0.41
下層氣孔導度	0.39	-0.17	-0.01	0.50	-0.15	0.96	0.89	0.68	0.74	0.09	0.28	-0.11	0.34
上層光合作用有效輻射	0.86	0.84	0.84	0.78	0.74	0.84	0.92	0.92	0.92	0.93	0.91	0.92	0.86
下層光合作用有效輻射	0.79	0.80	0.73	0.91	0.92	0.90	0.82	0.84	0.88	0.60	0.94	0.83	0.83
上層葉溫	0.47	0.50	0.66	0.70	0.79	0.63	0.63	0.62	0.76	0.42	0.77	0.69	0.64
下層葉溫	0.69	0.60	0.41	0.60	0.47	0.75	0.85	0.75	0.66	0.24	0.59	0.54	0.59
上層相對濕度	-0.09	-0.13	-0.24	0.04	-0.44	-0.31	-0.57	-0.21	-0.45	-0.34	-0.26	-0.38	-0.28
下層相對濕度	-0.34	0.15	0.03	-0.07	0.16	-0.13	-0.38	-0.29	-0.28	0.00	-0.02	0.19	-0.08
上層 CO_2 濃度	0.83	0.67	0.87	0.85	0.41	0.77	0.71	0.80	0.82	0.89	0.83	0.87	0.78
下層 CO_2 濃度	0.60	0.64	0.70	0.70	0.81	0.69	0.62	0.72	0.77	0.53	0.79	0.88	0.70

1.2 光合作用有效輻射(Photosynthesis Active Radiation, PAR)、CO₂ 濃度、葉溫、相對濕度

比較樟樹 12 個測定日樹冠上層葉淨光合作用速率與光合作用有效輻射日變化，發現平均的光合作用速率多隨著 PAR 改變。PAR 約在上午 10 時開始上升（夏季時上升時間提前且上升幅度較快），至下午 2 時下降，而淨光合作用速率也有相同類似的趨勢（圖 6、圖 7）。

兩者以皮耳森相關係數檢定，其相關係數在 0.74-0.93 間，平均值為 0.86，顯示有明顯的相關性。

上層葉 12 個測定日與淨光合作用速率另一個相關係數較高的因子是 CO₂ 濃度，除了 5 月 26 日為 0.41 外，其餘的測定日皆可在 0.67 以上，最高的為 10 月 20 日的 0.89。葉溫的變化與淨光合作用速率之相關係數為 0.42-0.79，平均值 0.64，亦有一定程度之相關性。

而相對濕度之相關係數則呈現為負相關情形（-0.28）。

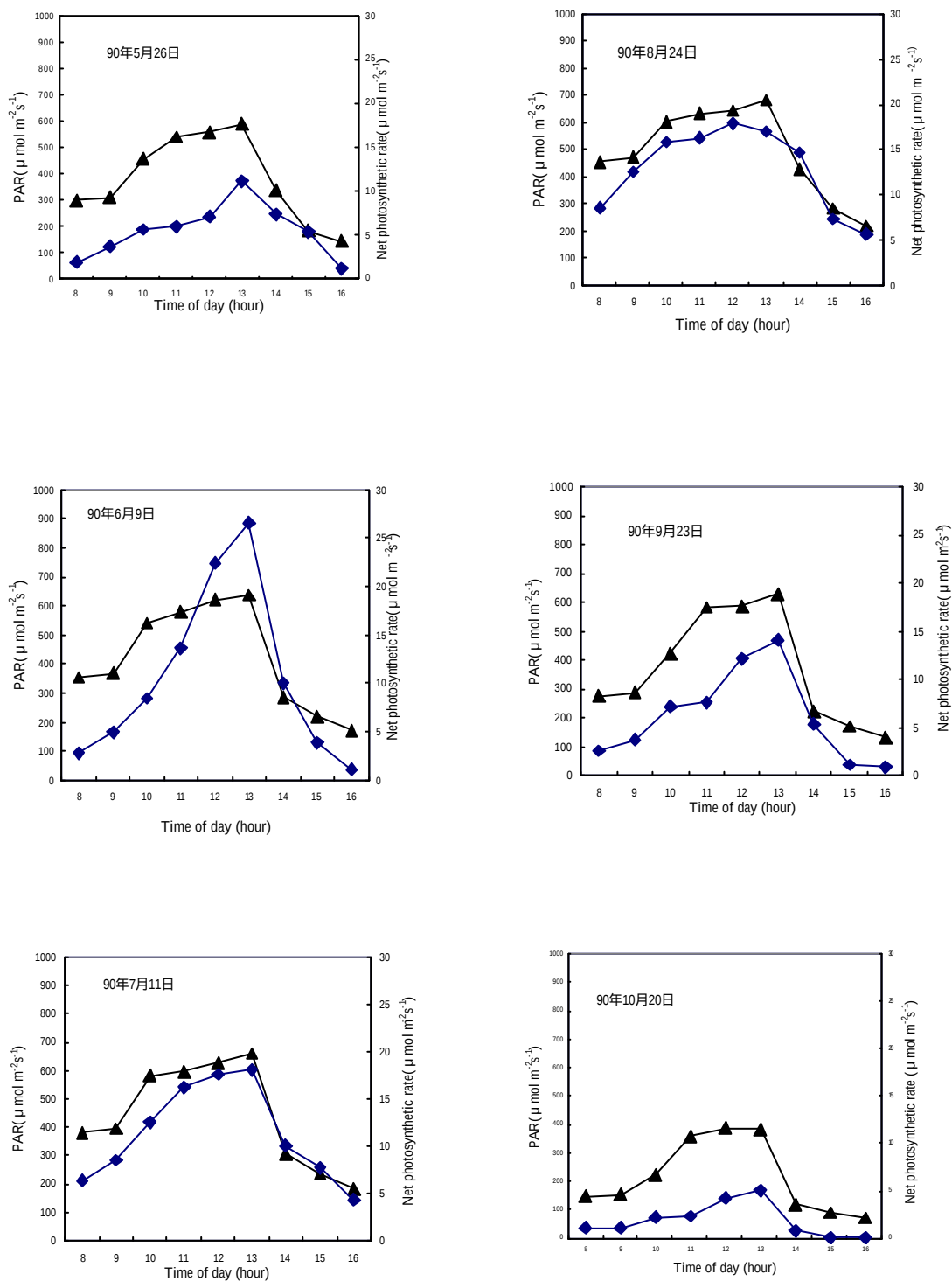


圖 6 樟樹樹冠上層葉 90 年 5 月-10 月淨光合作用速率與 PAR 之日變化。 淨光合作用速率 ▲ 光合作用有效輻射 (PAR)

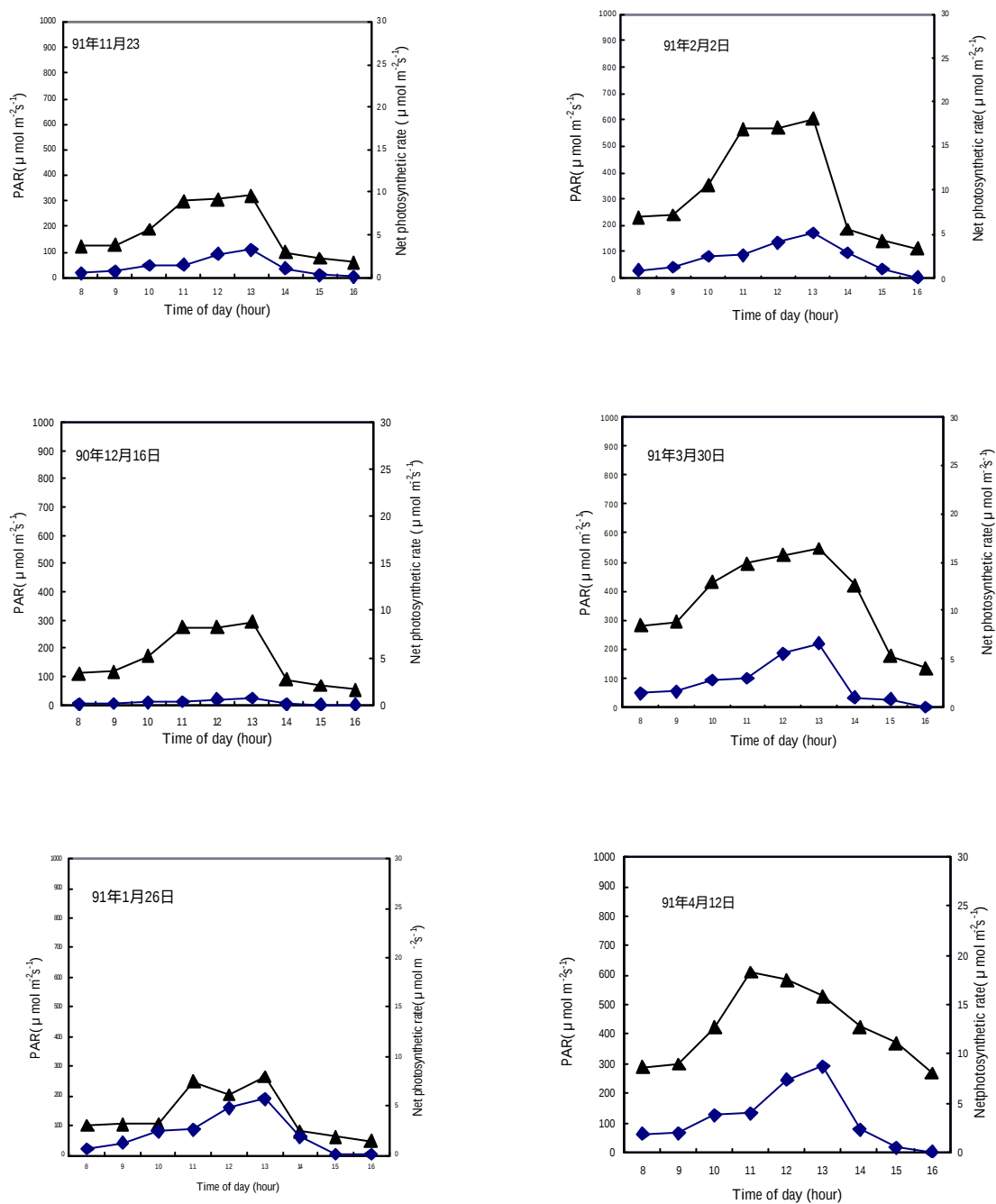


圖 7.樟樹樹冠上層葉 90 年 11 月-91 年 4 月淨光合作用速率與 PAR 之日變化。

淨光合作用速率、▲ 光合作用有效輻射 (PAR)

2. 樹冠下層葉

2.1 淨光合作用速率與蒸散速率、氣孔導度

樹冠下層葉的淨光合作用速率總平均值與黃文俊 (1999) 測得之長葉木薑子 ($2.91 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、王亞男 (2000) 所測得台大樟樹陰葉 ($3.03 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 及郭耀綸 (2000) 南仁山白榕樹冠中層葉 ($2.09 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 相近。蒸散速率日平均測值 ($0.04 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、氣孔導度平均測值 ($35.82 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)，兩項皆較其他地區及樹種所測得值為低。

2.2 光合作用有效輻射 (Photosynthesis Active Radiation, PAR)、CO₂ 濃度、葉溫、相對濕度

在樟樹樹冠下層葉因有樹冠上層葉的遮阻，下層葉所接受到的 PAR 低至 $57\text{-}227 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的範圍，日平均受光量為樹冠上層葉受光量的 38%，一日平均光合作用率只有 $2.48 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，為上層葉淨光合作用率的 49%。

下層葉白天的淨光合作用速率受 PAR 及 CO₂ 濃度影響大，12 個測日平均之相關係數分別為 0.83 及 0.70，而葉溫則為 0.59。

在 12 個測定日中，並無發現有與郭耀綸（2000）所研究提出的中午抑制現象，可能是測定日的 PAR 強度均未過高使發生抑制，另亦有可能是葉溫的影響；根據郭耀綸（2000）研究指出，當光量（Light intensity）高於 $1600 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 時，在溫度較低的測定日，光合作用率在強光下仍能保持不降，但在溫度高的測定日，光合作用率在高於 $1600 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的強光下即明顯降低，而光合作用率在強光下不降時的測定日，其日平均葉溫多不超過 26 。

本試驗的 12 個測定日中，葉日均溫高於 26 的有 90 年 5 月 26 日 27.72、6 月 9 日 27.59 及 8 月 24 日 28.72，此三天中僅於 8 月 24 日下午 1 時，PAR 升高至 $682 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 時，淨光合作用速率由原來的 $17.91 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 降低至 $17.02 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，當時的葉溫為 29.94，其他 2 個測日當 PAR 最大時，葉溫皆低於 29，無出現中午抑制現象。

若結合樟樹樹冠上層葉與下層葉的 12 個測定日變化資料，將淨光合作用速率相關性較大的環境因子 PAR 及 CO_2 濃度作分析，可見當 PAR 及 CO_2 濃度增加，淨光合作用速率也有隨之增加的趨勢（圖 8、圖 9）。

分析 12 個測定日出現最大淨光合作用速率的時段，發現出現頻率多在下午 1 時（除 8 月 24 日為中午 12 時），且其中有 10 個測定日 PAR 之最大值也在同時段出現，此結果反映出一天中出現最大淨光合作用速率

的時段沒有明顯的季節變化，且 PAR 的強度影響著光合作用的效率。

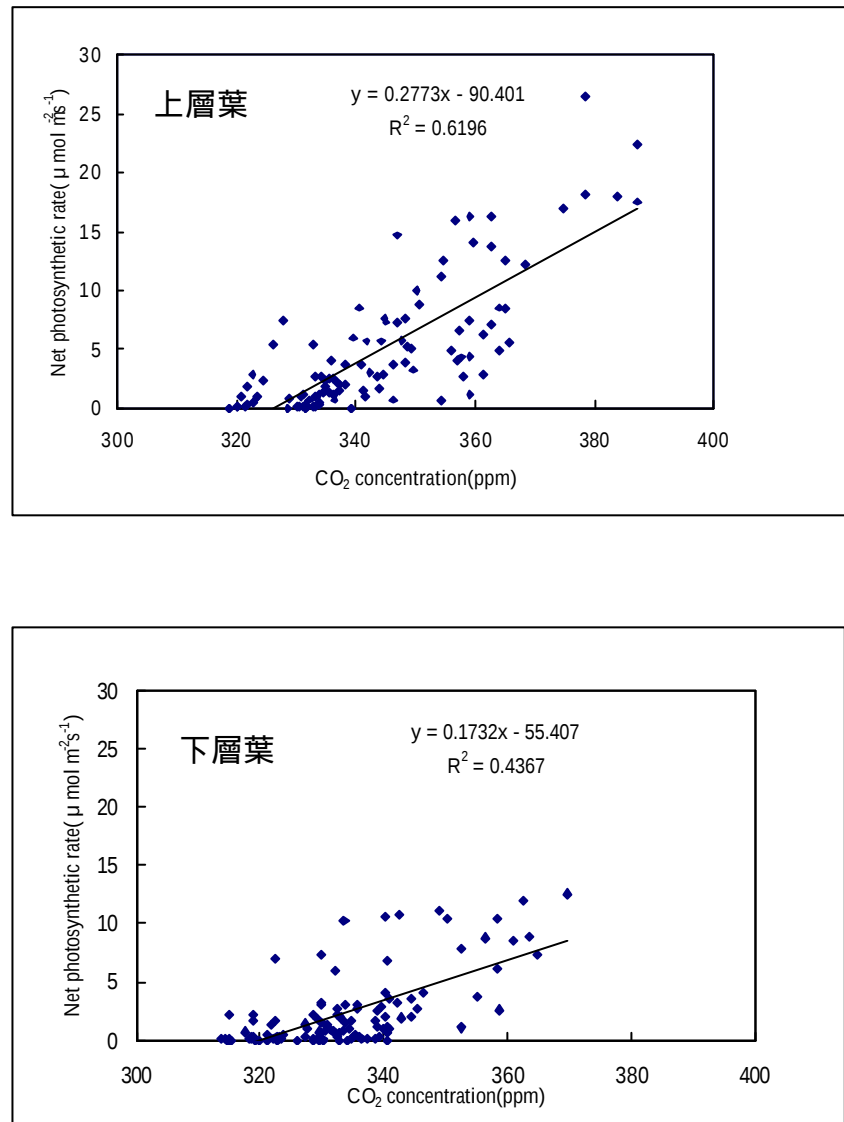


圖 8.樟樹樹冠上下層淨光合作用速率與 CO_2 濃度變化之相關圖

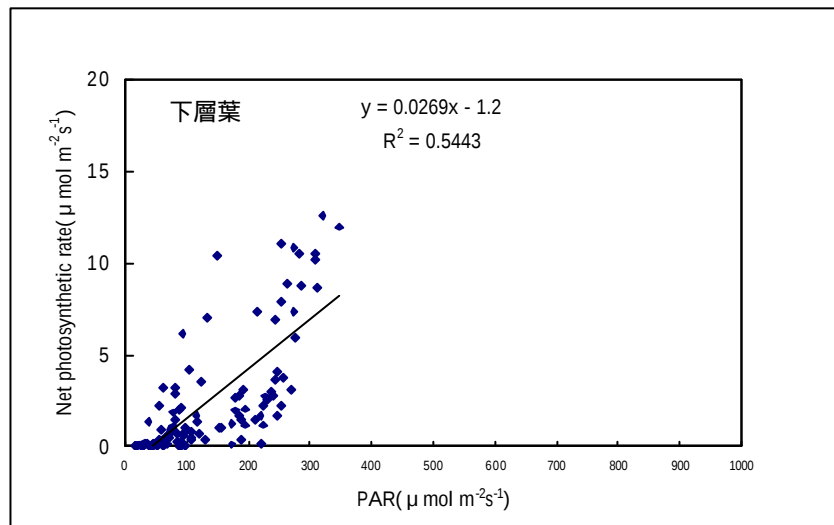
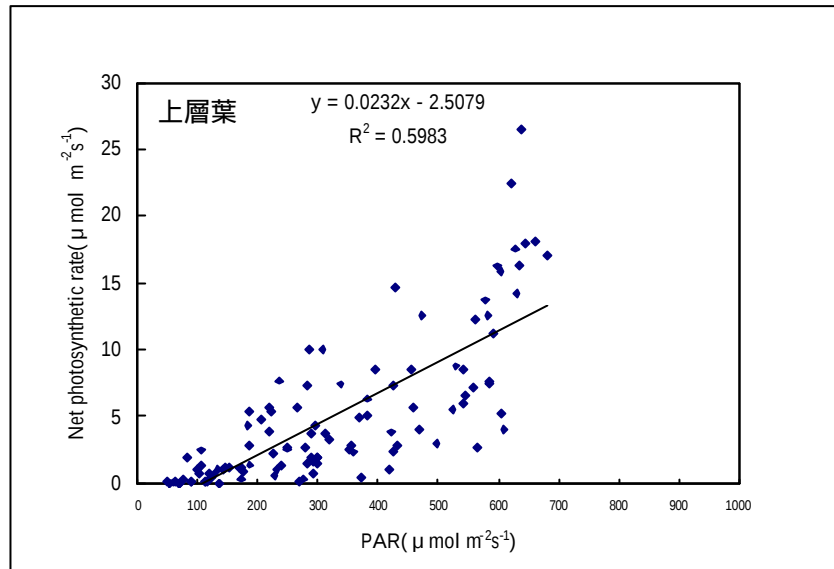


圖 9 樟樹樟樹樹冠上下層淨光合作用速率與 PAR 變化之相關圖

3. 淨光合作用速率與 CO₂ 固定量

樟樹樹冠上層葉 12 個測定日平均光合作用率介於 0.26-12.87 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 之間，日總平均為 5.06 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，累計 9 個小時的碳收穫量，12 個測定日的平均為 164 $\text{mmol CO}_2 \text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ，換算成重量則為 7.2g (表 4)，與王亞男 (2000) 所測得棲蘭山 10 年生樟樹陽葉之日平均光合作用速率 5.08 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 較為類似。

比較不同測定日的碳收穫量，發現於 90 年 12 月 16 日數值最低 (8.4 $\text{mmol CO}_2 \text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$)；當天之平均 PAR 為 157 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，略高於 91 年 1 月 26 日的 153 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，而 CO₂ 濃度則為 12 個測日中最低的 333 ppm，一日碳收穫量高於 164 $\text{mmol CO}_2 \text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 平均值的測定日分別在 5、6、7、8 及 9 月出現，可見樟樹樹冠上層葉較高的一日碳收穫量多集中在夏季，進一步以 12-2 月當冬季，3-5 月為春季，6-8 月夏季，9-11 為秋季，將此 4 個季節的一日碳收穫量作變異數分析，結果除了春季與秋季無顯著差異外，其他季節皆相互有顯著差異，其中以夏季之一日碳收穫量最大，冬季最少。

表 4 樟樹 12 個測定樹冠上下層葉 CO₂固定量

	淨光合作用速率日平均值		CO ₂ 固定量			
	($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)		$\text{mmol m}^{-2}\text{d}^{-1}$		$\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$	
	上層葉	下層葉	上層葉	下層葉	上層葉	下層葉
91年1月26日	2.9	1.06	94	34	4.13	1.51
91年2月2日	2.28	0.73	74	24	3.25	1.04
91年3月30日	2.55	0.91	83	29	3.64	1.30
91年4月12日	3.41	1.18	110	38	4.86	1.68
90年5月26日	5.51	2.19	179	71	7.86	3.12
90年6月9日	10.43	4.15	338	134	4.87	5.92
90年7月11日	11.26	5.74	365	186	16.05	8.18
90年8月24日	12.87	8.31	417	269	18.35	11.85
90年9月23日	6.13	4.26	199	138	8.74	6.07
90年10月20日	1.87	0.73	61	24	2.67	1.04
90年11月23日	1.27	0.46	41	15	1.81	0.66
90年12月16日	0.26	0.01	8	0	0.37	0.01
平均	5.06	2.48	164	80	7.21	3.54

(二) 台灣櫟

1. 樹冠上層葉

1.1 淨光合作用速率與蒸散速率、氣孔導度

台灣櫟淨光合作用速率總平均值與文俊黃 (1999) 測得之黃杞 ($3.46 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、王亞男 (2000) 所測得棲蘭山樟樹陰葉 ($3.52 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 相近。蒸散速率日平均測值 ($0.74 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 與黃文俊 (1999) 所測得福山常綠闊葉樹 ($0.5\text{-}0.8 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 相似。氣孔導度的平均測值 ($30.62 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)，皆較其他地區及樹種為低 (表 5)。

1.2 光合作用有效輻射、CO₂ 濃度、葉溫、相對濕度

台灣櫟樹冠上層葉淨光合作用速率也皆隨著 PAR 的變化而改變，PAR 在上午 10 時上升至下午 1 時開始下降，淨光合作用速率大致亦有相同趨勢；但兩者皆達到最大值之時段，除了 1 月 27 日、2 月 3 日外，皆不相同，其中有 8 個測日淨光合作用速率最大值時間多較 PAR 最大值的出現為晚 (圖 10、11)。兩者之間的皮耳森相關係數在 0.56-0.95 間，平均為 0.82 (表 6)。而淨光合作用速率是否如樟樹樹冠上層葉般與 CO₂ 有同樣的相關性？發現其相關係數在 0.33-0.78 之間，平均為 0.60，不若樟樹的相關，尤其在 12 月及 2 月，相關係數僅為 0.33、0.34；另在葉溫方面，相關性亦較樟樹上層

葉不明顯，為 0.43。

相對濕度之相關係數呈現為負相關情形（-0.01）。

2. 樹冠下層葉

2.1 淨光合作用速率與蒸散速率、氣孔導度

在樹冠下層淨光合作用速率、蒸散速率與氣孔導度的總平均測值分別為 $1.67 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $0.10 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 與 $1.01 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

2.2 光合作用有效輻射、CO₂ 濃度、葉溫、相對濕度

台灣欖樹冠下層葉所受到的 PAR，平均 12 個測日之值為 $236 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，日平均 PAR 量是樹冠上層葉所受到 PAR 量的 57%，較樟樹樹冠下層葉的 PAR 量比例為高，乃因台灣欖樹冠較樟樹開闊，上層葉對光的遮阻效果未如樟樹大，故下層葉可得到較多的光穿透。淨光合作用速率日平均值 $1.67 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 為上層葉的 43%。

下層葉 CO₂ 濃度在 12 個測定日平均值為 331 ppm，瞬間最大值可達 348 ppm，此值範圍以下的濃度值所對應的時段，都有出現淨光合作用速率的高峰值，表示 CO₂ 濃度在 348 ppm 不會成為其限制因子。

表 5 台灣檳樹冠上下層葉 12 個月測定日之平均測值

	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	平均
上層淨光合作用速率 ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	0.19 $\pm$ 0.11	0.80 $\pm$ 0.65	2.64 $\pm$ 1.78	4.30 $\pm$ 2.47	5.28 $\pm$ 3.19	7.30 $\pm$ 4.70	7.90 $\pm$ 4.80	9.53 $\pm$ 4.51	4.75 $\pm$ 3.12	3.43 $\pm$ 2.98	0.21 $\pm$ 0.12	0.11 $\pm$ 0.06	3.87
下層淨光合作用速率 ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	0.12 $\pm$ 0.10	0.44 $\pm$ 0.31	1.27 $\pm$ 0.85	2.01 $\pm$ 1.59	1.87 $\pm$ 1.14	2.04 $\pm$ 1.52	4.88 $\pm$ 3.22	4.70 $\pm$ 2.52	1.65 $\pm$ 1.19	0.83 $\pm$ 0.67	0.12 $\pm$ 0.06	0.07 $\pm$ 0.04	1.67
上層蒸散速率 ($\text{nmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	0.11 $\pm$ 0.05	0.14 $\pm$ 0.03	0.88 $\pm$ 0.31	2.34 $\pm$ 0.92	1.87 $\pm$ 0.67	1.06 $\pm$ 0.23	1.32 $\pm$ 0.91	0.62 $\pm$ 0.16	0.16 $\pm$ 0.34	0.11 $\pm$ 0.05	0.02 $\pm$ 0.01	0.03 $\pm$ 0.01	0.72
下層蒸散速率 ($\text{nmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	0.08 $\pm$ 0.05	0.06 $\pm$ 0.03	0.10 $\pm$ 0.06	0.20 $\pm$ 0.08	0.21 $\pm$ 0.09	0.15 $\pm$ 0.04	0.11 $\pm$ 0.07	0.18 $\pm$ 0.03	0.08 $\pm$ 0.04	0.04 $\pm$ 0.01	0.02 $\pm$ 0.01	0.02 $\pm$ 0.02	0.10
上層氣孔導度 ($\text{nmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	12.10 $\pm$ 1.37	10.33 $\pm$ 1.56	18.98 $\pm$ 2.06	44.2 $\pm$ 5.11	40.34 $\pm$ 4.88	38.90 $\pm$ 4.37	38.22 $\pm$ 6.22	45.5 $\pm$ 4.08	39.94 $\pm$ 3.83	34.02 $\pm$ 2.59	23.33 $\pm$ 2.22	21.56 $\pm$ 1.62	30.62
下層氣孔導度 ($\text{nmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	1.00 $\pm$ 0.04	0.82 $\pm$ 0.07	0.92 $\pm$ 0.11	1.10 $\pm$ 0.48	1.45 $\pm$ 0.67	1.08 $\pm$ 0.33	1.11 $\pm$ 0.61	1.20 $\pm$ 0.61	1.00 $\pm$ 0.71	0.70 $\pm$ 0.09	0.98 $\pm$ 0.14	0.81 $\pm$ 0.33	1.01
上層光合作用有效輻射 ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	157 $\pm$ 45	372 $\pm$ 88	457 $\pm$ 110	430 $\pm$ 104	489 $\pm$ 118	456 $\pm$ 110	502 $\pm$ 121	642 $\pm$ 108	555 $\pm$ 93	447 $\pm$ 108	231 $\pm$ 56	224 $\pm$ 54	413
下層光合作用有效輻射 ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	67 $\pm$ 51	159 $\pm$ 108	196 $\pm$ 147	274 $\pm$ 169	316 $\pm$ 225	278 $\pm$ 186	335 $\pm$ 148	421 $\pm$ 143	386 $\pm$ 131	129 $\pm$ 94	138 $\pm$ 47	134 $\pm$ 62	236
上層葉溫 ($^{\circ}\text{C}$)	10.52 $\pm$ 0.06	13.93 $\pm$ 0.09	23.76 $\pm$ 0.15	22.64 $\pm$ 0.14	26.26 $\pm$ 0.16	28.94 $\pm$ 0.18	28.82 $\pm$ 0.18	25.69 $\pm$ 0.16	25.69 $\pm$ 0.16	22.09 $\pm$ 0.14	17.48 $\pm$ 0.11	11.56 $\pm$ 0.13	21.45
下層葉溫 ($^{\circ}\text{C}$)	8.26 $\pm$ 0.48	10.95 $\pm$ 0.29	18.66 $\pm$ 0.75	17.78 $\pm$ 0.34	20.63 $\pm$ 0.36	22.74 $\pm$ 0.53	22.72 $\pm$ 0.41	20.19 $\pm$ 0.88	20.20 $\pm$ 1.29	21.82 $\pm$ 0.57	13.74 $\pm$ 0.28	9.08 $\pm$ 0.52	17.23
上層相對濕度 (%)	60.02 $\pm$ 3.49	57.41 $\pm$ 3.34	72.83 $\pm$ 4.24	63.82 $\pm$ 3.72	74.57 $\pm$ 4.34	65.07 $\pm$ 3.79	70.65 $\pm$ 4.11	64.09 $\pm$ 2.52	66.95 $\pm$ 2.49	73.07 $\pm$ 4.25	63.88 $\pm$ 3.72	65.01 $\pm$ 2.09	66.44
下層相對濕度 (%)	73.64 $\pm$ 0.95	70.44 $\pm$ 0.49	73.21 $\pm$ 0.92	78.30 $\pm$ 3.43	82.41 $\pm$ 0.61	71.91 $\pm$ 0.72	78.09 $\pm$ 1.19	70.83 $\pm$ 1.11	67.35 $\pm$ 0.64	78.13 $\pm$ 0.97	70.60 $\pm$ 0.67	71.85 $\pm$ 0.80	73.90
上層 CO ₂ 濃度 (ppm)	339 $\pm$ 6	334 $\pm$ 5	346 $\pm$ 5	347 $\pm$ 8	346 $\pm$ 6	351 $\pm$ 6	339 $\pm$ 5	355 $\pm$ 6	349 $\pm$ 5	329 $\pm$ 5	332 $\pm$ 5	340 $\pm$ 5	342
下層 CO ₂ 濃度 (ppm)	326 $\pm$ 10	321 $\pm$ 9	322 $\pm$ 7	333 $\pm$ 10	332 $\pm$ 8	338 $\pm$ 7	326 $\pm$ 9	341 $\pm$ 6	335 $\pm$ 8	329 $\pm$ 9	330 $\pm$ 8	338 $\pm$ 8	332

表 6 台灣樺樹冠上下層葉淨光合作用速率 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 與蒸散速率 ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 氣孔導度 ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) PAR ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 葉溫 () 相對濕度 (%) 及 CO_2 濃度 (ppm) 的皮耳森相關係數

	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	平均
上層蒸散速率	0.90	0.35	0.80	-0.08	0.37	0.41	0.12	0.13	0.51	0.19	0.42	0.72	0.40
下層蒸散速率	0.02	0.68	0.35	0.32	0.66	0.32	0.01	0.66	0.05	0.85	0.54	0.75	0.43
上層氣孔導度	0.20	0.31	0.45	0.36	0.67	0.73	0.32	0.25	0.91	0.72	0.51	0.62	0.50
下層氣孔導度	0.62	0.64	0.72	0.66	-0.32	-0.18	-0.31	0.54	-0.15	0.70	0.53	0.71	0.35
上層光合作用有效輻射	0.93	0.65	0.82	0.85	0.87	0.87	0.95	0.90	0.87	0.77	0.81	0.56	0.82
下層光合作用有效輻射	0.86	0.57	0.65	0.83	0.79	0.87	0.90	0.79	0.75	0.60	0.58	0.21	0.70
上層葉溫	0.60	0.27	0.33	0.48	0.45	0.50	0.46	0.50	0.51	0.29	0.40	0.38	0.43
下層葉溫	0.55	0.55	0.40	0.68	0.32	0.51	0.34	0.36	0.67	0.45	0.48	0.51	0.49
上層相對濕度	0.09	0.19	0.06	0.07	0.01	-0.01	-0.18	-0.13	-0.11	-0.08	-0.05	0.02	-0.01
下層相對濕度	0.05	-0.23	-0.43	0.22	-0.10	0.08	0.18	0.09	-0.17	-0.61	0.15	0.03	-0.06
上層 CO_2 濃度	0.70	0.34	0.47	0.78	0.62	0.68	0.75	0.61	0.68	0.71	0.55	0.33	0.60
下層 CO_2 濃度	0.62	0.38	0.85	0.86	0.53	0.55	0.60	0.51	0.68	0.57	0.55	0.21	0.57

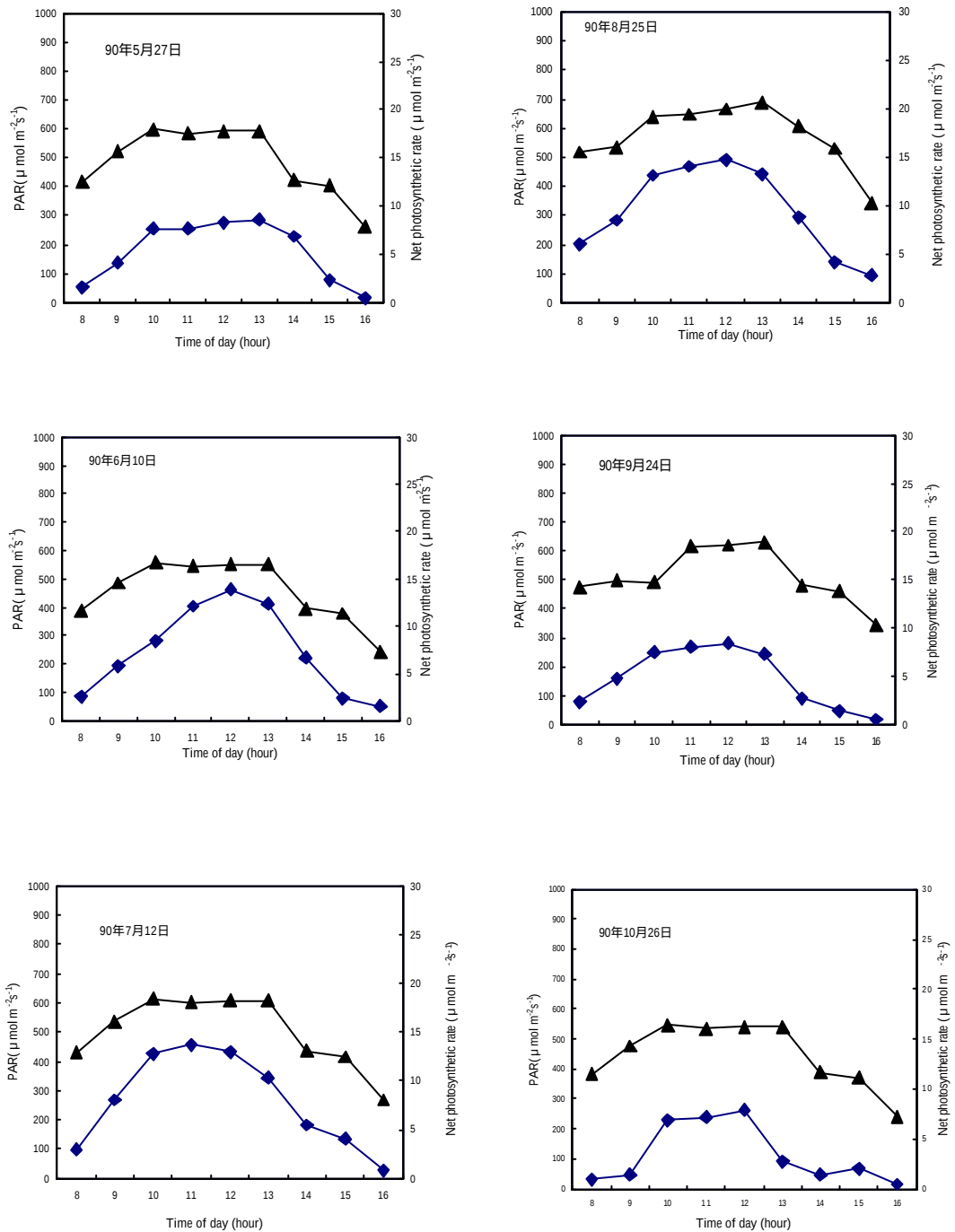


圖 10 台灣欒欖冠上層葉 90 年 5 月-90 年 10 月淨光合作用速率與 PAR 之日變化。 淨光合作用速率 ▲ 光合作用有效輻射 (PAR)

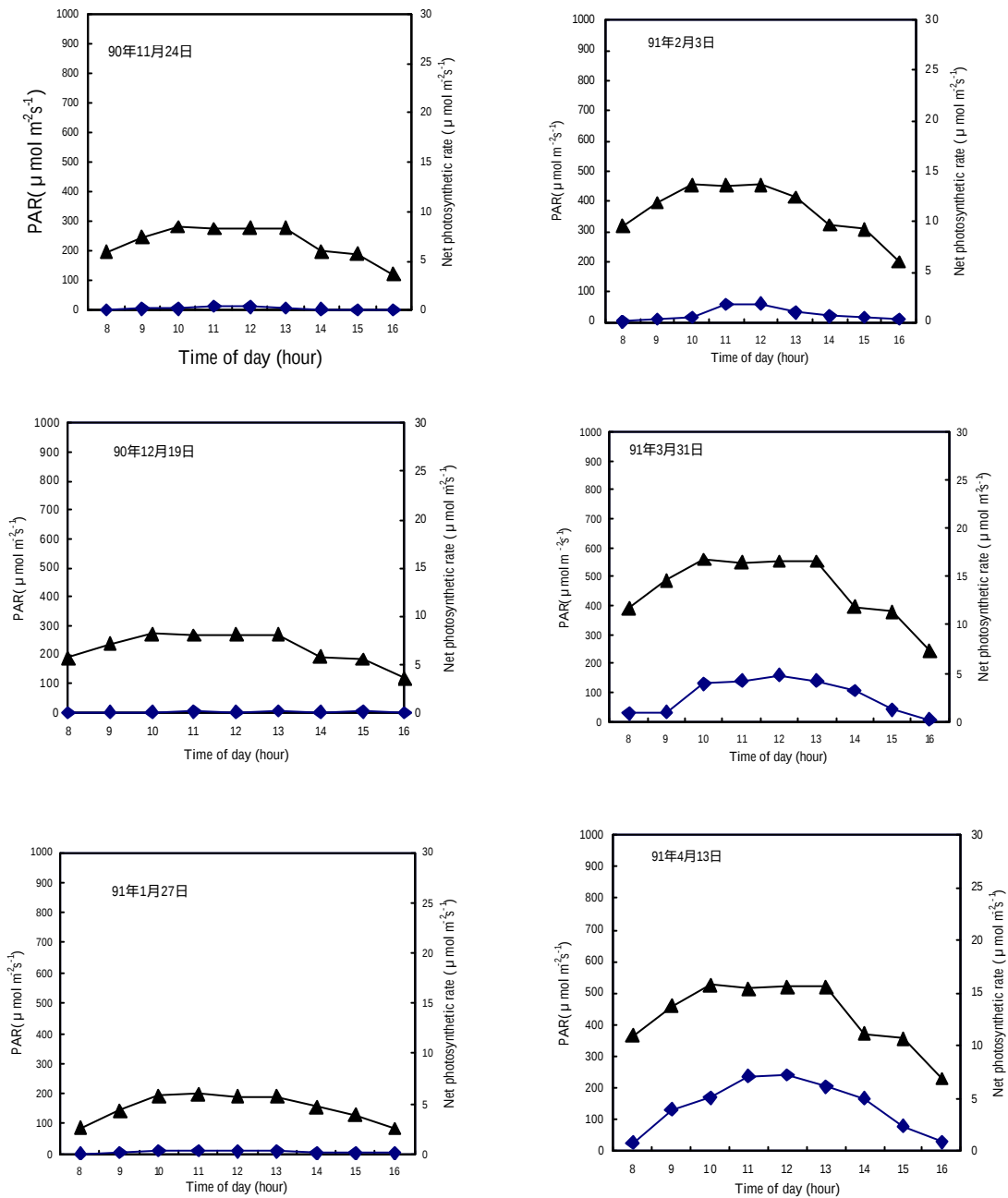


圖 11 台灣檳樹冠上層葉 90 年 11 月-91 年 4 月淨光合作用速率與 PAR 之日變化。 淨光合作用速率、▲ 光合作用有效輻射 (PAR)

結合台灣欖樹冠上層葉及下層葉淨光合作用速率情形，與較有相關性的環境因子 PAR 及 CO₂ 濃度作分析（圖 12、13），與樟樹所得的結果相似。

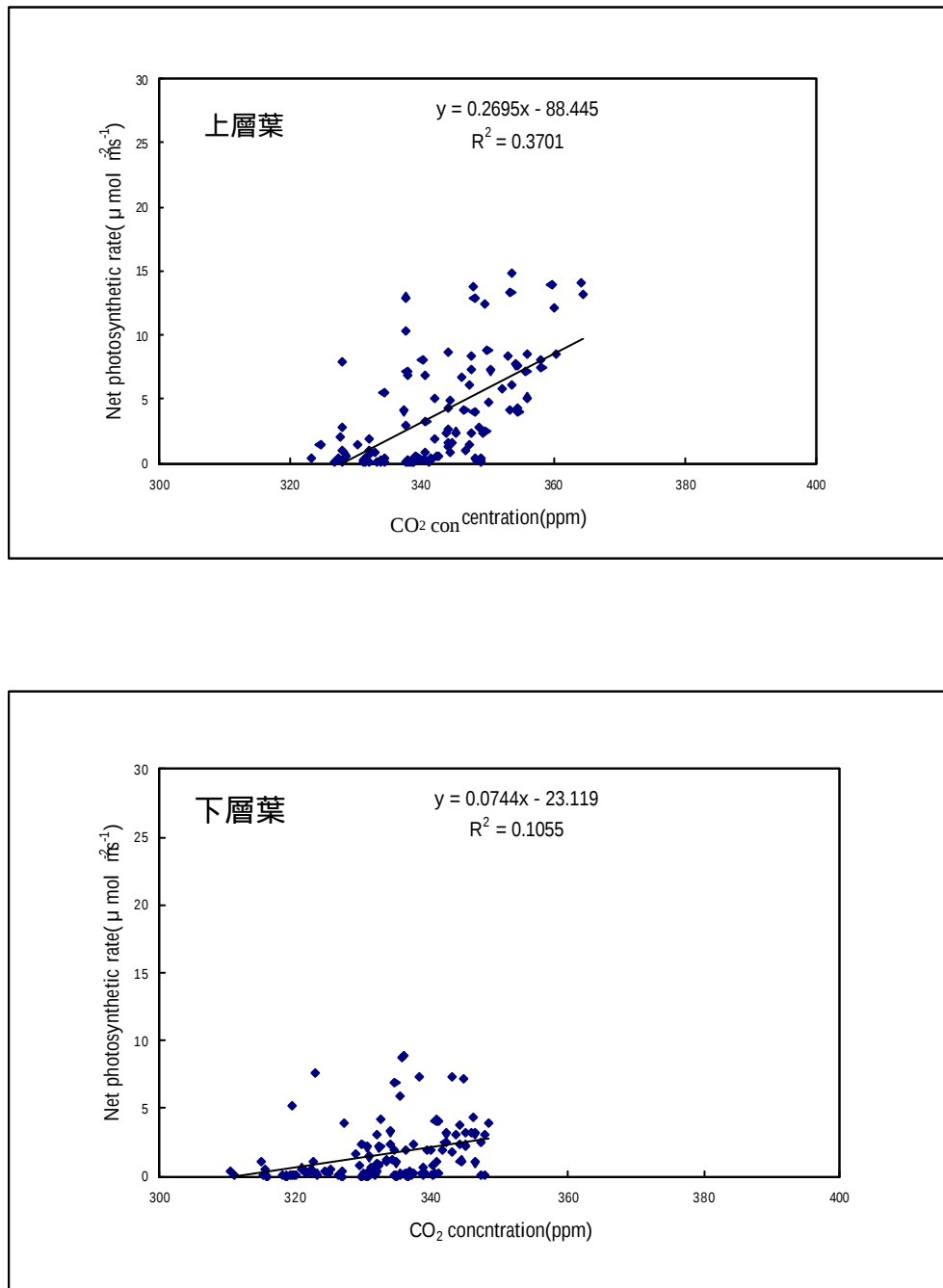


圖 12 台灣欖樹冠上下層淨光合作用速率與 CO₂ 濃度變化之相關圖

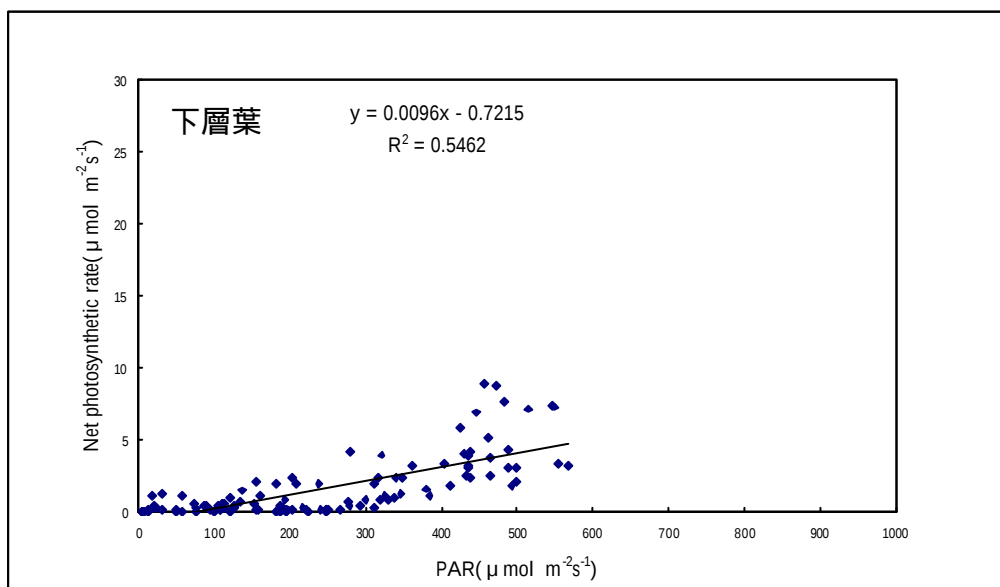
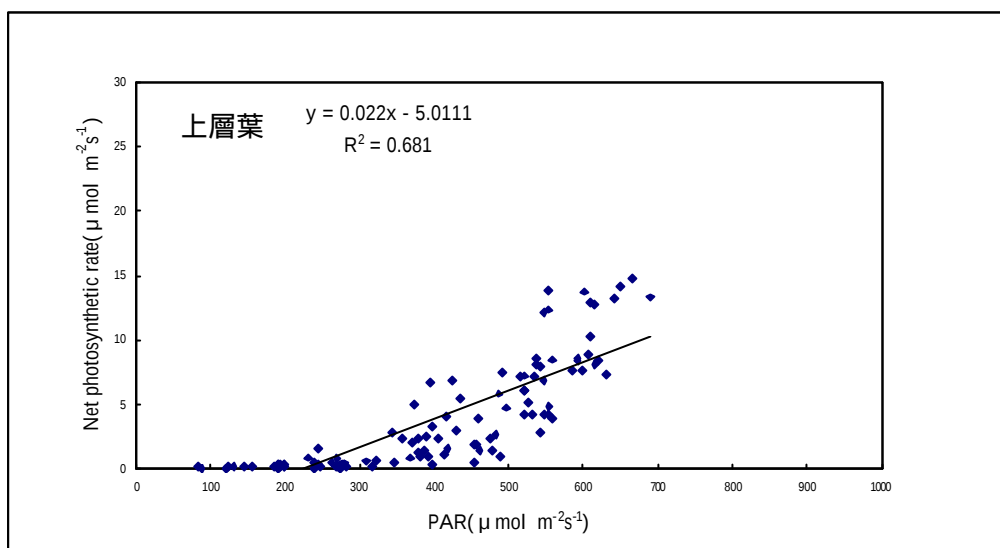


圖 13 台灣櫟樹冠上下層淨光合作用速率與 PAR 變化之相關圖

至於台灣欖是否會受到強光的抑制？12 個測定日的淨光合作用速率最大值多出現在上午 11 時至下午 1 時，而 PAR 的最大值則在 10 時至下午 1 時出現。當 PAR 在 $672 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下時，皆會出現最大的淨光合作用速率，只有於 8 月 25 日，當 PAR 升高至 $691 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 時，淨光合作用速率不升反降（當時葉溫為 27.7°C ），類似的情形，同樣在樟樹的 90 年 8 月 24 日的測值中出現，但就全部的測定日而視此情形僅出現一次，尚不足以視為強光之抑制。

在葉溫方面，12 個測日的日平均測值在 26°C 以上的有 5 月 27 日 26.26°C 、6 月 10 日 28.94°C 及 7 月 12 日 28.82°C ；此三天在葉溫高於 26°C 的時段裡同時也會出現一日中最大的淨光合作用速率，表示台灣欖在葉溫 29°C 以下並不會影響淨光合作用速率。

3. 淨光合作用速率與 CO_2 固定量

台灣欖樹冠上層葉 12 個測定日平均淨光合作用速率介於 $0.11 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ - $9.53 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，平均 $3.87 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。累計 9 個小時的碳收穫量，12 個測日平均為 $125 \text{mmol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ，換算成重量則為 5.52g 的 CO_2 （表 7）；下層葉累計一天碳收穫量為 $54 \text{mmol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 或 2.38g 的 CO_2 。

表 7 台灣櫟 12 個測定樹冠上下層葉 CO₂ 固定量

	淨光合作用速率日平均值		CO ₂ 固定量			
	($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)		($\text{mmol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)		($\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	
	上層葉	下層葉	上層葉	下層葉	上層葉	下層葉
91 年 1 月 27 日	0.19	0.12	6	4	0.27	0.17
91 年 2 月 3 日	0.80	0.44	26	14	1.14	0.63
91 年 3 月 31 日	2.64	1.27	86	41	3.76	1.81
91 年 4 月 13 日	4.30	2.01	139	65	6.13	2.87
90 年 5 月 27 日	5.28	1.87	171	61	7.53	2.67
90 年 6 月 10 日	7.30	2.04	237	66	0.41	2.91
90 年 7 月 12 日	7.90	4.88	256	158	11.26	6.96
90 年 8 月 25 日	9.53	4.70	309	152	13.59	6.70
90 年 9 月 24 日	4.75	1.65	154	53	6.77	2.35
90 年 10 月 26 日	3.43	0.83	111	27	4.89	1.18
90 年 11 月 24 日	0.21	0.12	7	4	0.30	0.17
90 年 12 月 19 日	0.11	0.07	4	2	0.16	0.10
平均	3.87	1.67	125	54	5.52	2.38

季節的變化在台灣欖樹冠上層葉有較大的影響，變異數分析的結果顯示春夏秋冬四季間皆有顯著的差異存在，其中以夏季的淨光合作用速率較佳，春季次之，冬季最差。

目前大氣中的 CO_2 濃度約為 350 ppm，此值尚未高達文獻研究中所指出會抑制光合作用速率之值，本試驗所測得的最高 CO_2 濃度在 366 ppm，並無發現淨光合作用下降或不變的狀況。可知在此試驗地的環境下，樟樹與台灣欖在 PAR 與 CO_2 濃度繼續上升時，淨光合作用速率仍有增加的潛力。

12 個測定日所測得樟樹之淨光合作用速率日平均值較台灣欖為佳，累計一日 9 個小時，樟樹可固定 7.2g 的 CO_2 ，而台灣欖則為 5.52g 的 CO_2 ；除此差別外，分別檢視一年中每個月份所測得的淨光合作用速率日平均值，台灣欖在 12 個月份中，分別於三、四、十月的測值高於樟樹，但在其他月份則皆低於樟樹，尤以一、二月時；當三、四月份春季的來臨，台灣欖葉片開始生長，此時生理活動非常旺盛，所以可合理解釋其淨光合作用速率的效率。

兩株試驗樹種的生育地四周皆有上木，所接受的光量會隨著時間改變，以中午日光直射時，樹冠上層葉可全面受光，其他時間受上木的遮蔭，有類似接受斑光的情形，所以可能因此才未出現強光抑制現象。

台灣櫟為落葉性樹種，試驗期間觀察到台灣櫟自 11 月時開始落葉，12 月至翌年 2 月時，樹冠的葉片幾乎全落盡，僅留下極少數的葉片，測得之淨光合作用速率值亦相當低，以這些所測得的低值累計一天 9 個小時的固定量，因整株樹的葉總面積低，故計算出的固定效果亦相對為低。樟樹為常綠樹種，雖在冬季也有落葉情形，且部分葉片枯黃，但它一年四季的樹冠總葉片量變化不若台灣櫟明顯，所以在推估 CO_2 固定量時，其累計的固定效果較佳。



(三) 以葉面積推算全株 CO₂ 固定量

1. 樟樹

1.1 全株葉面積

測量樟樹大型葉片平均葉面積為 3.35cm²，中型葉片平均葉面積為 14.19 cm²，小型葉片平均葉面積為 6.43 cm² (表 8)。

計算總枝條樹為 176 條，平均每一枝條之葉片數量約為 245 片，大型葉片佔 20%，中型葉片佔 55%，小型葉片則佔 25%，推算全株葉面積約為 60.73m²。

表 8 樟樹大型葉、中型葉、小型葉平均葉面積

	Leaf area (cm ²)		
	min	mean±SD	max
大型葉	19.20	23.35±2.60	26.98
中型葉	10.41	14.19±1.94	16.72
小型葉	3.07	6.43±2.04	8.76

1.2 全株 CO₂ 固定量

累計一天 9 小時平均 CO₂ 固定量約為 2.56 g m⁻²d⁻¹，整株一日 9 小時之固定量為 329.43 g(表 9)。

表 9 樟樹全株一日 9 小時 CO₂ 固定量之估算

總枝條數±SD	每一枝條葉片數±SD	全株葉面積 (m ²)	全株 CO ₂ 固定量 (g)
176 ±24	245 ±88	60.73	329.46

2.台灣檫

2.1 全株葉面積

測量台灣檫大型葉片平均葉面積為 19.73cm^2 , 中型葉片平均葉面積為 15.36 cm^2 , 小型葉片平均葉面積為 7.611 cm^2 (表 10)。

計算台灣檫總枝條樹為 205 條 , 平均每一枝條之葉片數量約為 238 片 , 大型葉片佔 18 % , 中型葉片佔 50 % , 小型葉片則佔 32 % , 推算全株葉面積約為 66.68m^2 。

表 10 台灣檫大型葉、中型葉、小型葉平均葉面積

	Leaf area (cm^2)		
	min	mean $\pm$ SD	max
大型葉	17.06	19.73 ± 2.52	24.39
中型葉	12.82	15.36 ± 2.12	16.96
小型葉	3.74	7.61 ± 2.35	10.77

2.2 全株 CO₂ 固定量

累計一天 9 小時, 平均 CO₂ 固定量約為 3.95, 以整年之平均值估算, 每平方公尺葉面積可固定 3.95g CO₂ g m⁻²d⁻¹, 全株一日 9 小時為 263.39 g。

表 11 全株台灣櫟一日 9 小時 CO₂ 固定量之估算

總枝條數±SD	每一枝條葉片數±SD	全株葉面積 (m ²)	全株 CO ₂ 固定量 (g)
205 ±43	238 ±108	66.68	263.39

在全株葉總面積方面, 樟樹的面積少於台灣櫟, 但因樟樹有高的淨光合作用速率, 所以若以全株來看, 樟樹可以在一天 9 小時裡固定較多的二氧化碳, 加上台灣櫟又有約 3 個月的落葉期, 此落葉期葉總面積也幾近於零, 故就整年而視, 其二氧化碳的固定量遠不及樟樹。

五、結論

林下栽植之樟樹與台灣欒整體而言其淨光合作用速率皆低於前人研究所測得之值，最明顯的差異在於光度明顯為低，進而影響到其光合作用。目前台灣的造林方向主為營造複層林相，而林下栽植已多為採用；本試驗所測得之樟樹及台灣欒於林下栽植時，雖受限於較低的光量，但亦可有如此的淨光合作用速率，可見樟樹與台灣欒的幼齡期在林下栽之生長狀況尚佳；故林下栽植此兩樹種除可營造複層林相外，亦可有二氧化碳減量的效果，尤以樟樹較台灣欒為佳。

六、參考文獻

- 王亞男 2000 柳衫、樟樹對溫室氣體效益之研究 八十九年度國科會/環保署科技合作研究計畫期末報告 41pp
- 林信輝、劉坤樹 1997 福山試驗林十種闊葉樹種之光合成率、蒸散率及葉片導度與氣象因子之關係 中華林學季刊 30 (3): 269 - 278
- 林俊成、李國忠、林裕仁 1999 柳衫人工林碳貯存效果與適應成本研究 台大實驗林研究報告 13 (1): 51 - 60
- 林素貞、張子見 1996 由 OECD 數國溫室效應行動方案與策略探討我國因應之道 能源季刊 26 (4): 2-12
- 易希道 1983 植物生理學國立編譯館 pp227-268
- 黃文俊 1999 台灣東北部六種闊葉樹種冠層二氧化碳固定功能之研究 國立台灣大學森林研究所碩士論文 49pp
- 黃肇英、方良吉 1993 氣候變化綱要公約、各國的立場與台灣地區因應策略的考慮 能源季刊 23 (3): 130-151
- 郭耀綸 2000 南仁山熱帶低地雨林白榕冠層及林下植物的光合作用 台灣林業科學 15 (3): 351-363
- 郭幸榮 1999 林木生理生態學國立台灣大學森林學系 pp108-121
- 陳佳琪 1997 以造林作為溫室氣體減量工具之經濟分析 國立台灣大學農業經濟研究所碩士論文 134pp

- 劉業經、呂福原、歐辰雄 1994 台灣樹木誌 國立中興大學農學院出版委員會 108p、329p
- Baure,H. , W. Larcher and R.B. Walker 1975
Photosynthesis and productivity in different environments Cambridge University Press pp557-589
- Brown,S. , A.E.Lugo and J. Chaman 1986 Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget Can.J.For.Res.16 : 390 - 394
- Constabel,A.J. 1996 Seasonal patterns of light transmission through boreal mixedwood canopies Can.J.For.Res.26 : 1008 - 1014
- Drake,B.G. , M.A.Gonzalez-Meler and S.P.Long 1997
More efficient plant : A consequence of rising atmospheric CO₂. Ann .Rev.Plant Physiol.Plant Mol.Biol. 48 : 609 - 639
- Farquhar,G.D. and T.D. Sharkey 1982 Stomatal conductance and photosynthesis Ann.Rev.Plant Physiol. 33 : 317 - 345
- Grodzinski,B. , J.Jiao and E.D.Leonardos 1998 Estimating photosynthesis and concurrent export rate in C₃ and C₄ species at ambient and elevated CO₂. Plant Physiol. 117 : 207 - 215
- Kozlowski,T.T . , P.J. Kramer and S.G. Pallardy 1991
The physiological ecology of woody plants. New York :

Academic Press,Inc. pp376-400

Kramer,P.J. 1981 Carbon dioxide concentration,
photosynthesis and dry matter production. Bio-Science
31:29-33

Sakusbury,F.B. and C.W. Ross 1992 Plant physiology 4th
edition The Wadsworth Publishing Company, Inc. pp.
207-244

Sedjo,R.A. 1989 Forest to offset the greenhouse effect.
Journal of Forestry 87 (7) 12-15

Sionit,N. , B.R. Strain , H. Hellmers , G.H. Riechers and
C.H. Jaeger 1985 Long-term atmospheric CO₂
enrichment affects the growth and development of
Liquidambar styraciflua and *Pinus taeda* seedlings
Can.J.For.Res. 15 : 468-471

Tolbert,N.E. and Jack Preiss 1994 Regulation of
atmospheric CO₂ and O₂ by photosynthetic carbon
metabolism New York : Oxford University Press pp8-33

Williams,T.G. and L.B.Flanagan 1998 Measuring and
modelling environmental influences on photosynthetic
gas exchange in *Sphagnum* and *Pleurozium* Plant Cell
and Environment 21 : 555-564

Whitehead,D. , J.R. Leathwick and A.S. Walcroft 2001
Modelling annual carbon uptake for the indigenous
forest of New Zealand. Forest Science 47(1) : 9-19

附錄 1. CI-310 攜帶式光合作用測定儀之各項生理參數解釋

- * CO₂ in : The amount of CO₂ (in ppm) at the inlet of the analyzer
- * CO₂ out : The amount of CO₂ (in ppm) at the outlet of the leaf chamber
- * RHin : The relative humidity (%) at the inlet of the analyzer
- * RHout : The relative humidity (%) at the inlet of the leaf chamber
- * PAR : Photosynthesis Active Radiation in term of $\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- * FlowRate : Flow rate is in liters per minute (lpm)
- * MassFlow : Mass flow rate in terms of $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- * Tair : Temperature of the ambient air (in) in the leaf chamber.
- * Tleaf : Leaf temperature (in) measured by the infrared temperature sensor
- * LeafAera : Leaf area is in cm^2
- * ATM pressure : Atmospheric pressure is in kPa where 100kPa=1bar
- * Photosynthesis : Net photosynthetic rate in terms of $\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- * Transpiration : Transpiration rate in terms of $\text{milimol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- * Conductance : Stomatal conductance rate in terms of $\text{milimol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- * Int. CO₂ : Internal CO₂ concentration in ppm

附錄 2. EQUATIONS

1. W : Mass flow rate per leaf area ($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) for open system

$$W = \frac{V}{60} \times \frac{273.15}{T_a} \times \frac{P}{1.1013} \times \frac{1}{22.41} \times \frac{10000}{A} = 2005.39 \times \frac{V \times P}{T_a \times A}$$

Where V : volume flow rate (liter/minute)

T_a : air temperature (K)

P : atmospheric pressure (bar)

A : leaf area (cm^2)

60 : convert minutes into seconds

22.41 : the volume of one mole of any gas at a standar temperature of 273.15K and a standard pressure of 1.013 bar (liters/mol)

10000 : converts cm^2 into m^2

2. P_n : Net photosynthetic rate ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) for open system

$$P_n = -W \times (C_o - C_i) = -2005.39 \times \frac{V \times P}{T_a \times A} \times (C_o - C_i)$$

Where $C_o(C_i)$: outlet (inlet) CO_2 concentration (ppm or $\mu\text{mol/mol}$)

3. E : Transpiration rate ($\text{milimol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

$$E = \frac{e_o - e_i}{P - e_o} \times W \times 10^3$$

$$e_o = h r_o \times e_s / 100$$

$$e_i = h r_i \times e_s / 100$$

$$e_s = 6.13753 \times 10^3 \times e^{\frac{18.564 - \frac{T_a}{254.4}}{T_a \times \frac{1}{T_a + 255.57}}}$$

Where $e_o (e_i)$: outlet (inlet) water vapor (bar)

P : atmospheric pressure (bar)

e_s : saturated water vapor at air temperature (bar)

T_a : air temperature ()

$hr_o(hr_i)$: outlet (inlet) relative humidity (%)

4. C_{leaf} : Leaf stomatal conductance ($\text{milimol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

$$C_{leaf} = \frac{W}{\frac{e_{leaf} - e_o}{e_o - e_i} \times \frac{P - e_o}{P} - R_b W} \times 1000$$

$$e_{leaf} = 6.13753 \times 10^{-3} \times e^{\frac{18.564 - \frac{T_{leaf}}{254.4}}{T_{leaf} \times \frac{1}{T_{leaf} + 255.57}}}$$

Where e_{leaf} : saturated water vapor at leaf temperature (bar)

T_{leaf} : leaf temperature ()

R_b : leaf boundary layer resistance ($\text{m}^2\text{s/mol}$). $0.3\text{m}^2\text{s/mol}$ is used

5. CO_{2int} : Internal CO_2 (ppm or $\mu\text{mol/mol}$)

$$CO_{2int} = C_i - 1.6 \times P_n(R_b + R_{leaf})$$

Where R_{leaf} : leaf stomatal resistance ($\text{m}^2\text{s/mol}$)