

樟樹與台灣檫於林下栽植二氧化碳固定效益之研究

廖述惠¹、王亞男²

(收件日期：民國 91 年 7 月 19 日、接受日期：民國 91 年 12 月 10 日)

【摘要】以台灣中北部苗栗農工和興林場林下栽植之三年生樟樹 (*Cinnamomum camphora*) 與台灣檫 (*Zelkova serrata*) 為試驗材料，自 2001 年 5 月至 2002 年 4 月每月分別測定上層葉及下層葉淨光合作用率、蒸散率、及氣孔導度三項生理因子，以及光合作用有效輻射、葉溫、相對濕度、及二氧化碳濃度等環境因子的日變化，藉以探討林下栽植之樟樹與台灣檫對二氧化碳的固定量。於 12 個測定日測得樟樹之日平均淨光合作用率在上層葉為 $5.06 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，下層葉為 $2.48 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ；台灣檫上層葉為 $3.87 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，下層葉為 $1.67 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。累計白天 9 小時樟樹上層葉平均每平方公尺葉面積可固定 7.21 g CO_2 ，下層葉為 3.54 g ；台灣檫則平均每平方公尺葉面積可固定 5.52 g CO_2 ，下層葉為 2.38 g 。

【關鍵詞】二氧化碳、淨光合作用速率、樟樹、台灣檫。

STUDY ON CARBON DIOXIDE FIXATION EFFICIENCY OF *CINNAMOMUM CAMPHORA* AND *ZELKOVA SERRATA* IN UNDERSTORY PLANTING

Shu-Hui Liao¹ Ya-Nan Wang²

(Received: July 19, 2002; Accepted: December 10, 2002)

【Abstract】In this study, *Cinnamomum camphora* and *Zelkova serrata* in understory planting of the experimental forest of National Miao-Li Agricultural and Industrial Vocational High School were selected, The efficiency of carbon dioxide fixation was analyzed by measuring net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance rate and other environmental factor in the field monthly. The results of investigation of *Cinnamomum camphora* were: the upper-leaf average net photosynthetic rate was $5.06 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$; the lower-leaf average net photosynthetic rate is $2.48 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. The results of investigation of *Zelkova serrata* were: the upper-leaf average net photosynthetic rate was $3.87 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, the lower-leaf was $1.67 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. For estimating the CO_2 fixation efficiency in 9 hours during the daytime, that of upper-leaf of *Cinnamomum* tree was $7.21 \text{ g m}^{-2}\text{s}^{-1}$, and that of lower-leaf of *Cinnamomum* tree was $3.54 \text{ g m}^{-2}\text{s}^{-1}$; that of upper-leaf of *Zelkova* was $5.52 \text{ g m}^{-2}\text{s}^{-1}$, and that of upper-leaf was $2.38 \text{ g m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

【Key words】 Carbon dioxide, net photosynthetic rate, *Cinnamomum camphora*, *Zelkova serrata*.

¹ 國立台灣大學森林系碩士班研究生。

Graduate student, Department of Forestry, National Taiwan University.

² 國立台灣大學森林學研究所教授 (通訊作者)。

Professor, Department of Forestry, National Taiwan University, Corresponding Author.

I、前言

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 指出，大氣中的二氧化碳濃度由 1958 年的 315 ppm 至 1988 年已升至 350 ppm，預測在 2050 年時，將達到 600 ppm。抑制二氧化碳的排放策略有兩種，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、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，其中以陸生植物-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，容易被世界各國接受。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。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報導的直接測定，這些研究對於各種林木之二氧化碳固定量有較詳細的報導。

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 年生樟樹與台灣檫進行現場的光合作用相關測定，以瞭解林下栽植之樟樹與台灣檫在不同樹冠層的光合作用情形，並推估其二氧化碳固定量。

II、材料與方法

(I) 試驗地概況

和興林場位於苗栗縣獅潭鄉和興村十九份段，台三線 118.4 K 之東方，海拔高介於 500-900 m 之間，坡度 20-40°，林地面積 54 ha，屬於明德水庫上游集水區之水源水質保護區，其林相有竹林 (桂竹、孟宗竹、麻竹及綠竹)、油桐

林，杉木林、次生闊葉林如相思樹、山黃麻及楠榕群叢等。氣候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°C，近十年來之年平均降雨量約為 2500 mm，唯受全球氣候變遷，年降雨量變化差異顯著；每年雨季分布 4、5、6、7、8 月，10 月後至次年 2 月為乾季。試驗地土壤屬苑裡坑系 (Yuan Li Keng Series ; Y1k)；由砂頁岩母質風化形成之黃棕色黃壤，剖面質地以中細質地之粘質壤土或玢質粘壤土為主。

(II) 試驗材料

1. 樟樹：3 年生，位於海拔高 515 m 處，樹高 4.84 m，胸徑 6.1 cm，四周上木皆為油桐，與樟樹距離約 2 m。
2. 台灣檫：3 年生，位於海拔高 510 m，樹高 4.03 m，胸徑 4.1 cm，四周上木有油桐、杉木及九芎等，與試驗樣樹台灣檫距離 1.5 ~ 2 m。

(III) 光合作用測定

儀器採用美國 CID 公司之 CI-310 攜帶式光合作用儀，試驗自 2001 年五月至 2002 年四月共一年期間，每月測量樟樹及台灣檫各一天，分別為 2001 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，2002 年 1 月 26、27 日，2 月 2、3 日，3 月 30、31 日，4 月 12、13 日，兩樹種各測定 12 日。

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 m，樹冠寬幅約為 1.5 m，故將樟樹與台灣檫各分為上層葉及下層葉 (樹冠長 1/2) 進行測定。上下二層各逢機選取三片葉片 (因為幼齡樹，多數葉片較小，而試驗所使用的最小葉箱面積為 6.25 cm²，故所選取的葉片以葉箱可以夾滿為原則)，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。每個月選擇晴天或無雨天時進行，

各樹種分別由上午 8 時至下午 4 時測定一天 9 個小時。

(IV) 葉面積測定

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 (mm²)。收集樟樹與台灣檫之落葉，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。

(V) 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率與環境因子之相關性及計算 R-square；另使用 SAS 8.0 版軟體做變異數分析來檢定季節變化的差異。

CO₂ 換算：1 μmol CO₂ m⁻²s⁻¹ = 0.044 mg CO₂ m⁻²s⁻¹。

III、結果與討論

(I) 樟樹

1. 樹冠上層葉

(1) 淨光合作用率與蒸散速率、氣孔導度

樟樹樹冠上層葉在 12 個測定日之平均測值如表 1，淨光合作用率總平均為 5.06 μmol m⁻²s⁻¹，蒸散率為 0.44 mmol m⁻²s⁻¹，氣孔導度為 35.82 mmol m⁻²s⁻¹。淨光合作用率總平均值與王亞男(2000)所測得棲蘭山樟樹陽葉(5.08 μmol m⁻²s⁻¹)及南投和社樟樹陰葉(4.83 μmol m⁻²s⁻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 mmol m⁻²s⁻¹)及王亞男(2000)研究之台大校園樟樹陰葉測值較近(0.43 mmol m⁻²s⁻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。將蒸散率、氣孔導度與淨光合作用率變化以皮耳森相關係數檢定後，並未見到有顯著相關性，12 個測定日平均相關係數為 0.39 及 0.41 (表 2)，而郭耀綸(2000)的研究，光合作用與氣孔導度的 R² 值則為 0.91。

(2) 光量、CO₂ 濃度、葉溫、相對濕度

12 個測定日之光合作用光量子通量密度 (photosynthetic photon flux density, PPFD)，光量為 48 - 682 μmol m⁻²s⁻¹。

比較樟樹 12 個測定日樹冠上層葉淨光合作用率與光量日變化，發現平均的光合作用率多隨著光合作用有效輻射 (Photosynthesis Active Radiation, 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，而淨光合作用率也有相同類似的趨勢。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為負相關 (-0.28)。

2. 樹冠下層葉

(1) 淨光合作用率與蒸散速率、氣孔導度

樹冠下層葉的淨光合作用率總平均值 5.06 μmol m⁻²s⁻¹ 與黃文俊(1999)測得之長葉木薑子(2.91 μmol m⁻²s⁻¹)、王亞男(2000)所測得台大樟樹陰葉(3.03 μmol m⁻²s⁻¹)及郭耀綸(2000)南仁山白榕樹冠中層葉(2.09 μmol m⁻²s⁻¹)相近。蒸散速率日平均測值(0.04 mmol m⁻²s⁻¹)、氣孔導度平均測值(35.82 mmol m⁻²s⁻¹)，兩項皆較其他地區及樹種所測得值為

表 1

表 2 樟樹樹冠上下層葉淨光合作用率與蒸散速率、氣孔導度、PPFD、葉溫、相對濕度及 CO₂ 濃度的皮耳森相關係數Table 2 The Pearson's correlation coefficient between the rates of net photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance, relative humidity and carbon dioxide concentrations on *Cinnamomum camphora* canopy

	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

低。

(2) 光合作用有效輻射、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 PPFD 低至 57-227 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的範圍，日平均受光量為樹冠上層葉的 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 (5.06 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 的 49%。

下層葉白天的淨光合作用率與 PPFD 及 CO₂ 濃度的關係較密切，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，樟樹的光合作用並無發現中午抑制現象，可能是測定日的 PAR 強度均未過高使光合作用發生抑制，另亦有可能是葉溫不太高所致；根據郭耀綸 (2000) 研究指出，當光量高於 1600 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 時，在溫度較低的測定日，白榕的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°C。

本試驗的 12 個測定日中，葉日均溫高於 26°C 的有 2001 年 5 月 26 日 27.72°C、6 月 9 日 27.59°C 及 8 月 24 日 28.72°C，此三天中僅於 8 月 24 日下午 1 時，光量升高至 682 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 時，淨光合作用率由原來的 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°C，其他 2 個測日當光量最大時，葉溫皆低於 29°C，並無出現光合作用中午抑制現象。

若結合樟樹樹冠上層葉與下層葉的 12 個測定日變化資料，將與淨光合作用率相關性較大的環境因子光量及 CO₂ 濃度作分析，可見當光量及 CO₂ 濃度增加時，淨光合作用率也有隨之增加的趨勢 (圖 1、圖 2)。分析 12 個測定日出現最大淨光合作用率的時段，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 個測定日光量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率的時段沒有明顯的季節變化，且光的強度影響著光合作用的效率。

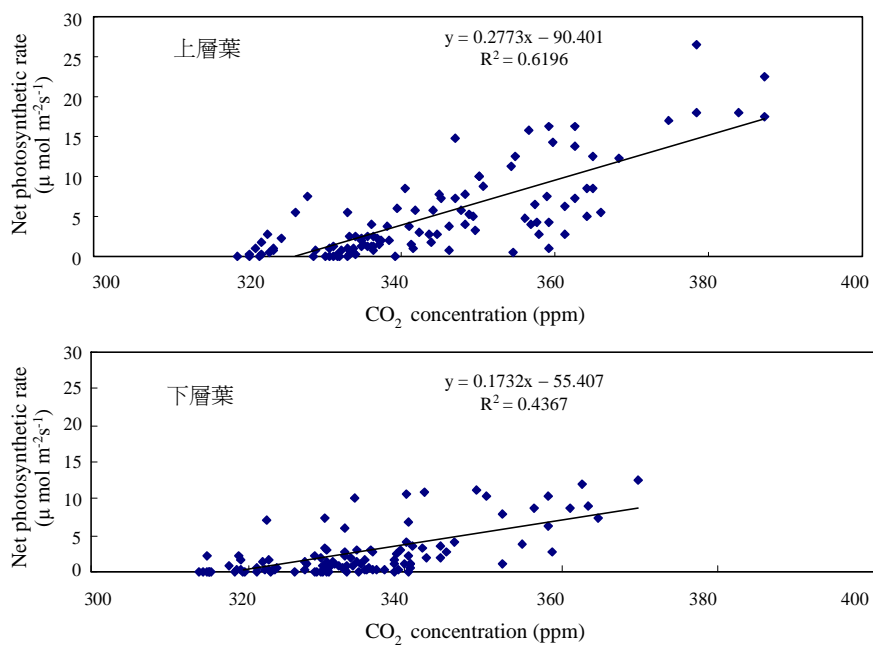


圖 1 樟樹樹冠上下層淨光合作用率與 CO_2 濃度變化之相關圖

Fig. 1 Relation of the net photosynthetic rate and carbon dioxide concentration between the upper- and the lower-leaves on *Cinnamomum camphora* canopy

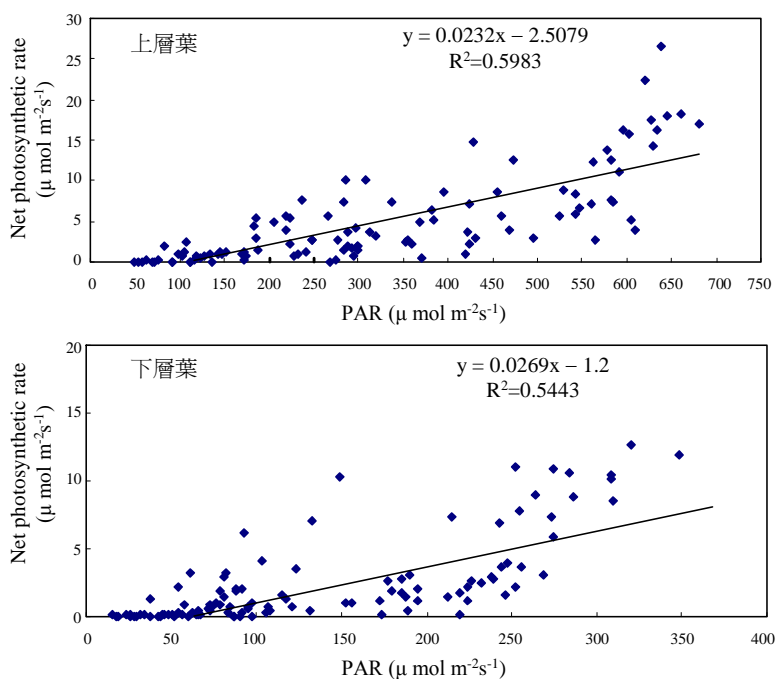


圖 2 樟樹樹冠上下層淨光合作用率與光量變化之相關圖

Fig. 2 Relation of the net photosynthetic rate and PAR between the upper- and the lower-leaves on *Cinnamomum camphora* canopy

(3)一日的平均光合作用與 CO₂ 固定量

樟樹樹冠上層葉各測定日的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 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。累計白天 9 個小時的碳收穫量，12 個測定日的平均為 164 mmol CO₂ $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，換算成重量則為 7.2g $\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ (表 3)。

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。

(II) 台灣樟

1. 樹冠上層葉

(1)淨光合作用率、蒸散率、及氣孔導度

台灣樟蒸散率淨光合作用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。蒸散率日平均測值

(0.74 mmol $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 與黃文俊 (1999) 所測得福山常綠闊葉樹 (0.5-0.8 mmol $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 相似。氣孔導度的平均測值 (30.62 mmol $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)，皆較其他地區及樹種為低 (表 4)。

(2)光量、CO₂ 濃度、葉溫、相對濕度

台灣樟樹冠上層葉蒸散率淨光合作用率也皆隨著光量的變化而改變，光量在上午 10 時上升至下午 1 時開始下降，蒸散率淨光合作用率大致亦有相同趨勢；但兩者皆達到最大値之時段，除了 1 月 27 日、2 月 3 日外，皆不相同，其中有 8 個測日蒸散率淨光合作用率最大値時間較光量最大値出現的時間晚。兩者之間的皮耳森相關係數在 0.56-0.95 間，平均為 0.82 (表 5)。而蒸散率淨光合作用率是否如樟樹樹冠上層葉般與 CO₂ 有同樣的相關性？發現兩者相關係數在 0.33-0.78 之間，平均為 0.60，不若樟樹的相關性大，尤其在 12 月及 2 月，相關係數僅為 0.33、0.34。在葉溫與光和作用的相關性亦較樟樹上層葉不明顯，為 0.43。相對濕度與光和作用之相關性呈現為負相關 (-0.01)。

表 3 樟樹樹冠上下層葉 CO₂ 固定量Table 3 The amount of carbon dioxide fixation on the twelve upper- and lower-leaves on *Cinnamomum camphora* canopy

	淨光合作用率日平均值 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)		CO ₂ 固定量 ($\text{mmol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)			
	上層葉	下層葉	上層葉	下層葉	上層葉	下層葉
2001 年 5 月 26 日	5.51	2.19	173	71	7.86	3.12
2001 年 6 月 9 日	10.43	4.15	33.8	134	4.87	5.92
2001 年 7 月 11 日	11.26	5.74	365	186	16.05	8.18
2001 年 8 月 24 日	12.87	8.31	417	269	18.35	11.85
2001 年 9 月 23 日	6.13	4.26	199	138	8.74	6.07
2001 年 10 月 20 日	1.87	0.73	61	24	2.67	1.04
2001 年 11 月 23 日	1.27	0.46	41	15	1.81	0.66
2001 年 12 月 16 日	0.26	0.01	8	0	0.37	0.01
2002 年 1 月 26 日	2.9	1.06	94	34	4.13	1.51
2002 年 2 月 2 日	2.28	0.73	74	24	3.25	1.04
2002 年 3 月 30 日	2.55	0.91	83	29	3.64	1.30
2002 年 4 月 12 日	3.41	1.18	110	38	4.86	1.68
平均	5.06	2.48	164	80	7.21	3.54

表 4

表 5 台灣檫樹冠上下層葉淨光合作用率與蒸散速率、氣孔導度、PPFD、葉溫、相對濕度及 CO₂ 濃度的皮耳森相關係數Table 5 The Pearson's correlation coefficient between the rates of net photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance, relative humidity and carbon dioxide concentrations on *Zelkova serrata* canopy

	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

2. 樹冠下層葉

(1) 蒸散率淨光合作用率與蒸散率、氣孔導度

在樹冠下層蒸散率淨光合作用率、蒸散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) 光合作用有效輻射、CO₂ 濃度、葉溫、相對濕度

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。台灣檫樹冠下層葉所受到光量，12 個測日之平均值為 236 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，日平均光量是樹冠上層葉 57%，較樟樹樹冠下層葉的光量比例為高，乃因台灣檫樹冠較樟樹開闊，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。台灣檫下層葉的蒸散率淨光合作用率日平均值為 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，都有出現蒸散率淨光合作用率的高峰值，表示 CO₂ 濃度在 348

ppm 不會成為其限制因子。

結合台灣檫樹冠上層葉及下層葉蒸散率淨光合作用率，與較有相關性的環境因子光量及 CO₂ 濃度作分析 (圖 3、4)，所得的結果與樟樹相似。

至於台灣檫是否會受到強光的抑制？12 個測定日的蒸散率淨光合作用率最大值多出現在上午 11 時至下午 1 時，而光量的最大值則在 10 時至下午 1 時出現。當光量在 672 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以下時，皆會出現最大的淨光合作用率，只有於 8 月 25 日，當光量升高至 691 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 時，淨光合作用率不升反降 (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言此情形僅出現一次，強光之抑制情形並不嚴重。

在葉溫方面，12 個測定日的日均溫在 26 °C 以上的有 5 月 27 日 26.26 °C、6 月 10 日 28.94 °C 以及 7 月 12 日 28.82 °C。此三天在葉溫高於 26 °C 的時段同時也會出現一日中最大的蒸散率淨光合作用率，表示台灣檫在葉溫 29 °C 以下並不會抑制淨光合作用率。

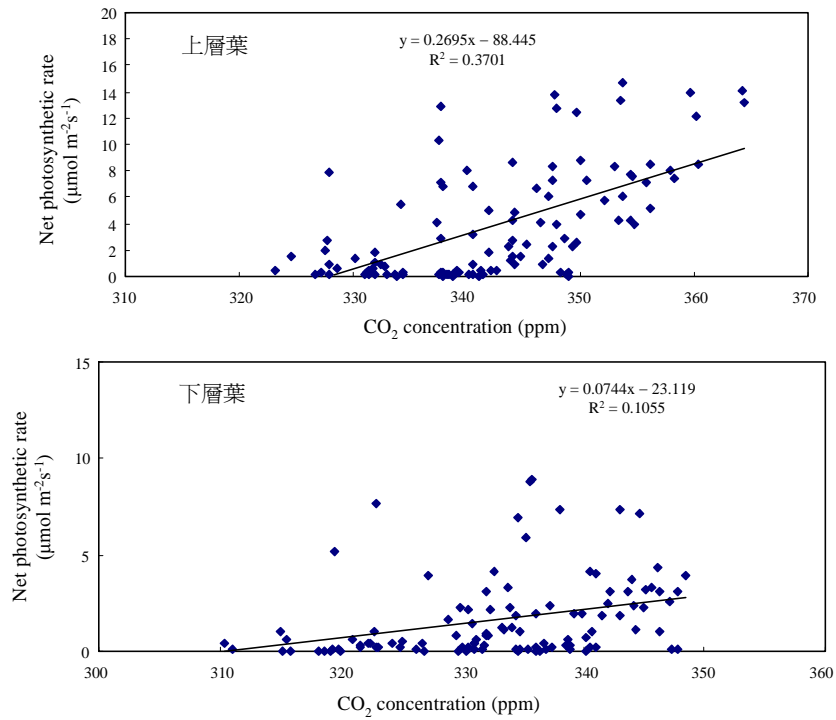


圖 3 台灣檫樹冠上下層蒸散率淨光合作用率與 CO_2 濃度變化之相關圖

Fig. 3 Relation of the net photosynthetic rate and carbon dioxide concentration between the upper- and the lower-leaves on *Zelkova serrata* canopy

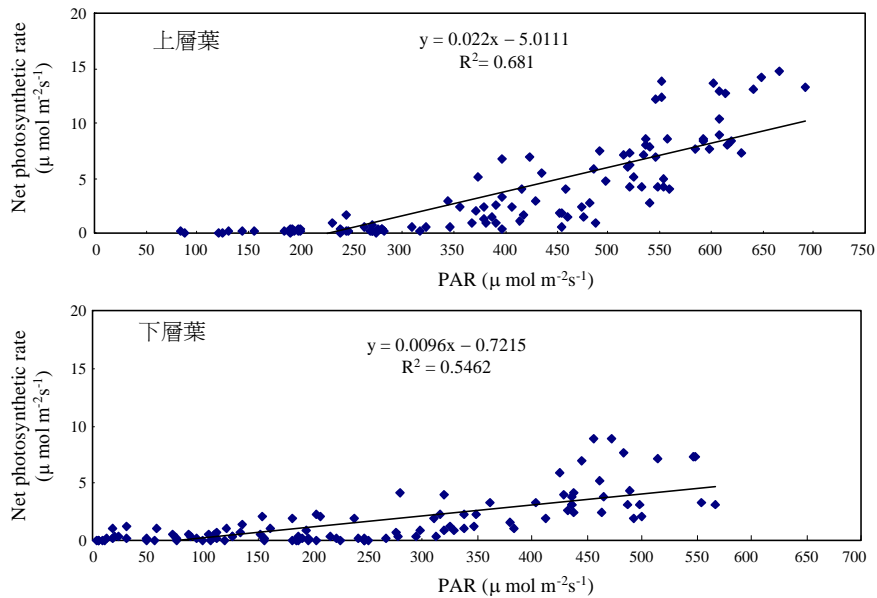


圖 4 台灣檫樹冠上下層蒸散率淨光合作用率與光量變化之相關圖

Fig. 4 Relation of the net photosynthetic rate and PAR between the upper- and the lower-leaves on *Cinnamomum camphora* canopy

(3) 一日的平均淨光合作用率與 CO₂ 固定量

台灣欒樹冠上層葉 12 個測定日平均蒸散率淨光合作用率介於 0.11 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ -9.53 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，平均為 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 5.52 $\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 的 CO₂ (表 6)；下層葉累計一天碳收穫量為 54 $\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 或 2.38 $\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 的 CO₂。

季節的變化對台灣欒樹冠上層葉的光合作用有較大的影響，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率較大，春季次之，冬季最低。

樟樹 12 個測定日所測得之淨光合作用率日平均值較台灣欒為高，累計一日 9 個小時，樟樹每 m^2 葉面積可固定 7.2 g 的 CO₂，而台灣欒則為 5.52 g 的 CO₂。除此差別外，分別檢視一年中每個月份所測得的蒸散率淨光合作用率日平均值，台灣欒在 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、二月時更低；當三、四月份春季的來臨，台灣欒葉片開始生長，此時生理活動非常旺盛，所以可合理解釋其淨光合作用率有很高的效率。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。台灣欒為落葉性樹種，試驗期間觀察到台灣欒自 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，測得之蒸散率淨光合作用率值亦相當低，以這些所測得的低值累計一天 9 個小時的 CO₂ 固定量，因整株樹的葉總面積低，故計算出的 CO₂ 固定量亦相對為低。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欒明顯，所以在推估 CO₂ 固定量時，其累計的固定效果較佳。

表 6 台灣欒 12 個測定樹冠上下層葉 CO₂ 固定量Table 6 The amount of carbon dioxide fixation on the twelve upper-and lower-leaves on *Zelkova serrata* canopy

	淨光合作用率日平均值 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)		CO ₂ 固定量 ($\text{mmol m}^{-2}\text{d}^{-1}$) ($\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$)			
	上層葉	下層葉	上層葉	下層葉	上層葉	下層葉
2001 年 5 月 27 日	5.28	1.87	171	61	7.53	2.67
2001 年 6 月 10 日	7.30	2.04	237	66	0.41	2.91
2001 年 7 月 12 日	7.90	4.88	256	158	11.26	6.96
2001 年 8 月 26 日	9.53	4.70	309	152	13.59	6.70
2001 年 9 月 24 日	4.75	1.65	154	53	6.77	2.35
2001 年 10 月 26 日	3.43	0.83	111	27	4.89	1.18
2001 年 11 月 24 日	0.21	0.12	7	4	0.30	0.17
2001 年 12 月 19 日	0.11	0.07	4	2	0.16	0.10
2002 年 1 月 27 日	0.19	0.12	6	4	0.27	0.17
2002 年 2 月 3 日	0.80	0.44	26	14	1.14	0.63
2002 年 3 月 31 日	2.64	1.27	86	41	3.76	1.81
2002 年 4 月 13 日	4.30	2.01	139	65	6.13	2.87
平均	3.87	1.67	125	54	5.52	2.38

(III) 以全株葉面積推算全株 CO₂ 固定量

1. 樟樹

(1) 測全株葉面積

得樟樹大型葉片平均葉面積為 3.35 cm²，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。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 60.73 m²。

(2) 累計全株 CO₂ 固定量

一天 9 小時單位葉面積平均 CO₂ 固定量約為 2.56 g m⁻²d⁻¹，整株一日 9 小時之 CO₂ 固定量為 329.43 g。

2. 台灣欒

(1) 測全株葉面積

得台灣欒大型葉片平均葉面積為 19.73 cm²，中型葉片平均葉面積為 15.36 cm²，小型葉片平均葉面積為 7.611 cm²。計算台灣欒總枝條樹為 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 66.68 m²。

(2) 累計全株 CO₂ 固定量

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

在全株葉總面積方面，樟樹的面積少於台灣欒 (60.73 m² vs 66.68 m²)，但因樟樹有高的蒸散率淨光合作用率，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，加上台灣欒又有約 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。

IV、結論

林下栽植之樟樹與台灣欒整體而言其淨光

合作用率皆低於前人研究所測得之值，最明顯的差異在於光量明顯為低，進而影響到其光合作用率。本試驗所測得之樟樹及台灣欒於林下栽植時，雖然林下栽植的情況是受限於較低的光量，所測得的淨光合作用率並不會比一般栽植情況的樟樹和台灣欒差，可見樟樹與台灣欒的幼齡期在林下栽植之二氧化碳固定量尚佳；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，其中樟樹較台灣欒為佳。

V、引用文獻

- 王亞男 (2000) 柳杉、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) 柳杉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。pp.227-268。
- 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。pp.108-121。
- 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。pp.108-329。
- Baure, H., W. Larcher and R. B. Walker (1975) Photosynthesis and productivity in different environments. Cambridge University Press pp.557-589.
- 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.
- Kozłowski, T. T., P. J. Kramer and S. G. Pallardy (1991) The physiological ecology of woody plants. Academic Press, Inc. New York, 376-400 pp.
- 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 ed. The Wadsworth Publishing Company, Inc. New York, 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 pp.8-33.
- 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.

表 1 樟樹樹冠上下層葉 12 個月測定日之平均測值

Table 1 *Cinnamomum camphora* crown upper-leaf and lower-leaf 12 month to survey average data

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

* Data are expressed as mean \pm SD.

表 4 台灣樺樹冠上下層葉 12 個月測定日之平均測值

Table 4 The mean value of the upper- and the lower-leaves on the *Zelkova serrata* canopy within twelve months

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