

國立臺灣大學生物資源暨農學院森林環境暨資源學系

碩士論文

School of Forestry and Resource Conservation

College of Bio-Resources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis



臺灣中部塔塔加地區臺灣雲杉老熟林樹液流特性

Sap Flux Characteristics of Old-growth Taiwan Spruce

(*Picea morrisonicola* Hayata)

in Tataka Region, Central Taiwan

蔡孜奕 Zi-Yi Tsai

指導教授：關秉宗 博士

久米朋宣 博士

Advisor: Dr. Biing T. Guan

Dr. Tomonori Kume

中華民國 102 年 12 月

December, 2013

國立臺灣大學碩士學位論文

口試委員會審定書

臺灣中部塔塔加地區臺灣雲杉老熟林樹液流特性

Sap Flux Characteristics of Old-growth Taiwan Spruce

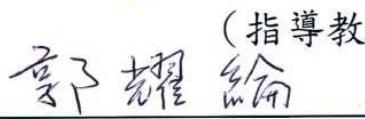
(*Picea morrisonicola* Hayata)

in Tataka Region, Central Taiwan

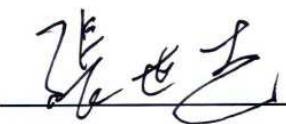
本論文係蔡孜奕君（學號 R98625010）在國立臺灣大學森林環境暨資源學系研究所完成之碩士學位論文，於民國一百零二年一月二十五日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

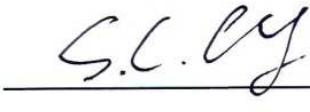
口試委員：

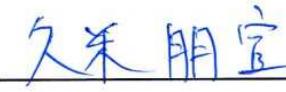

(簽名)


(指導教授)
郭耀綸




張世志


S.C. CY


久木朋宜


T. Kume

系主任、所長


(簽名)



誌謝

漫長的碩士生涯終於結束了，一路走來真的要感謝身邊這麼多人的幫助。

首先要感謝我的指導老師，關秉宗老師和久米朋宣老師，感謝兩位老師對我的包容以及在實驗過程中不計代價地支持，從在野外架設太陽能板開始，就不斷燃燒兩位老師的研究經費，歷經電力不足、電池壞掉、太陽能板壞掉、雷擊等等，還有口試前不斷叨擾久米老師，修改論文時關老師不厭其煩地指正，再次謝謝兩位老師們的用心和耐心。也感謝張世杰老師以及郭耀綸老師對於實驗方法及論文內容的指教，讓這個論文能夠更趨完整。

謝謝實驗室的大家，這麼一個耗費人力的實驗，若沒有你們，一定無法完成。阿康、透抽學長、柏因、永翔、阿焜、小雪、悅心學姊、Juan Blanco、介文學長、育銘、毓苓、警竹學長、小花學姊、思吟學姊、啟浩學長以及和社營林區、對高岳營林區的大哥大姐們，謝謝你們！此外還要感謝出差小幫手：謝小潘、景平、小白、紫晴、彭璿、阿八、Sophie、阿德、政道等等，人數太多若有疏漏請多包涵。還要謝謝我系上的好朋友們，田婕、國王、家宜、小隻、文宜、幼稚洪、小白、景平等，大學、研究所生涯感謝有你們相伴。也謝謝梁小姐，每次出差、申請經費、採購器材等等都因妳的大力幫忙而能順利進行。另外要特別感謝柏因及謝爸爸借我好用的電腦，讓我在寫作論文時更有效率。其中，更要感謝謝爸爸，若不是您鼓勵我去上一整個暑假的英文課，我現在可能還深陷英檢未過的困境，真的，非常謝謝您！

當然，一定要感謝我的家人們，爸爸、媽媽、姊姊、老弟，謝謝你們在我受挫的時候總是給我最大的精神依靠，這兩三年來讓你們擔心了，謝謝你們的包容和無私奉獻，謝謝！最後，再次感謝生活中所有的人、事、物，當然包含那些提醒著我們必須要成長的挫折們，謝謝你們間接、直接地成就現在的我，在此向大家深深一鞠躬，謝謝你們！



中文摘要

林木水分利用是森林生態系水循環中一個重要的途徑，亦可影響植物之光合作用及蒸散作用狀況。臺灣雲杉 (*Picea morrisonicola*) 為雲杉屬中分布於最南端之樹種，為瞭解其水分利用狀況，本實驗於臺灣中部塔塔加鞍部選擇 3 株樣木，從 2010 年 4 月至 2012 年 3 月進行樹液流監測，探究 (1) 不同樹幹方位 (東、西、南及北側) 及邊材深度對樹液流速之影響；(2) 水蒸氣壓差對於林木整體樹液流之影響及 (3) 樹幹底層與頂層之樹液流遲滯時間及儲存水利用情形。

本研究結果顯示：

- (1) 樹幹東側之樹液流速最大，西側則最小，東側約為西側之 1.5-3.6 倍，因此若僅以單側樹液流速估算樣木樹液流量會造成約 19-52 % 之差異。
- (2) 樹液流速隨邊材深度增加而減少之幅度不明顯，自邊材深度 0-2 cm 處到深度 4-6 cm 處有先降後升之現象，使不同邊材深度估算之樣木樹液流量差異普遍在 10 % 以內。
- (3) 臺灣雲杉於春季時月均樹液流速為 $1.33-2.87 \text{ cm}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，夏季時為 $1.01-2.85 \text{ cm}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，冬季為 $0.44-0.92 \text{ cm}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，夏季流速最大值可達 $16.25 \text{ cm}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。
- (4) 樹液流速與水蒸氣壓差之關係為一飽和曲線，藉由非線性混合效應模式分析擬合三株樣木白晝平均樹液流速與白晝平均水蒸氣壓差之結果，可知白晝平均水蒸氣壓差達 0.43 kPa 時，白晝平均樹液流速即達飽和 ($10.74 \text{ cm}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。
- (5) 時間遲滯方面，經交叉相關函數分析後，底層樹液流較頂層樹液流晚約 0-30 分鐘。
- (6) 樣木於夏季每日平均水分消耗量為 $7.86-12.34 \text{ kg}$ ，冬季每日平均消耗量為 $4.7-7.26 \text{ kg}$ 。

由上述結果做討論比較，塔塔加鞍部臺灣雲杉樹液流在樹幹不同方位之變異較不同邊材深度變異大，且每日蒸散之水分與同處於雲霧帶之鴛鴦湖臺灣扁柏

(*Chamaecyparis obtusa* var. *formosana*) 相當。同株林木樹幹兩高度間之樹液流遲滯時間與每日水分消耗量較某些溫帶針葉樹種少。



關鍵字：塔塔加鞍部、臺灣雲杉、樹液流、水蒸氣壓差、儲存水、時間遲滯



Abstract

Tree water usage is an important component in forest ecosystem's water cycle, and is related to plant photosynthesis and transpiration. The main objective of this study is to understand the water usage characteristics of Taiwan spruce (*Picea morrisonicola*), the southernmost distributed species of the genus. The sap fluxes at different stem heights, directions, and sapwood depths of three Taiwan spruces located in the Tatachia area of central Taiwan were monitored from April, 2010 to March, 2012. This study also examined how temperature, solar radiation, and vapor pressure deficit (VPD) influenced the species sap fluxes.

The results showed that:

- (1) The east side had the highest sap flux density, whereas the west had the lowest. The east side sap flux density was 1.5-3.6 times larger than that of west side. Thus, the overall sap flux density would be under-estimated by 19-52 % if based only on the west-side measurements.
- (2) Minor differences in sap flux density at different sapwood depths were found. Thus, the overall sap flux density would be over-estimated by less than 10% if based solely on the outermost sapwood area measurements.
- (3) The monthly average of daily sap flux density was about $1.33-2.87 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in spring, $1.01-2.85 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in summer, and $0.44-0.92 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in winter. In summer, the sap flux density could reach upto $16 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.
- (4) The relationship between the mean daytime sap flux density and the mean daytime VPD resembled a 1st-order asymptotic curve. Based on a nonlinear mixed-effects modeling approach, the mean daytime sap flux density would reach a mean

saturation value of $10.74 \text{ cm}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, when the mean daytime VPD reaches 0.43 kPa.

- (5) Based on cross-correlation function analysis, the sap flux time lag between the basal part and the canopy was about 0-30 minutes.
- (6) Based on the diurnal changes in sap flux density measured in the basal part and the canopy, the average daily water consumption was about 7.86-12.34 kg in summer, and about 4.7-7.26 kg in winter.

Overall, the variations in aspects were higher than in sapwood depths for Taiwan spruce. Compared to the previously documented results for the conifer species located in the temperate regions, the monitored Taiwan spruces consumed less water and had less lagged time between different stem heights, even with larger diameters and taller heights.

Key word : Tatachia area, Taiwan spruce, sap flow, vapor pressure deficit, storage water, time lag

目錄



口試委員審定書.....	i
致謝.....	ii
中文摘要.....	iii
英文摘要.....	v
目錄.....	vii
表目錄.....	x
圖目錄.....	xi
第一章 緒論.....	1
1.1 前言	1
1.2 研究目的.....	2
第二章 前人研究.....	3
2.1 樹液流.....	3
2.2 影響樹液流之因子.....	3
2.2.1 邊材範圍.....	5
2.2.2 木質部狀況對樹液流之影響.....	6
2.2.3 環境因子對樹液流之影響.....	7
2.3 樹液流之時間遲滯.....	8
2.4 儲存水之利用	8
2.5 國內樹液流研究.....	9
2.6 雲杉屬植物之概述.....	10
第三章 研究材料與方法.....	11
3.1 研究材料.....	11



3.2 樣區概述.....	12
3.2.1 地點.....	12
3.2.2 氣候.....	13
3.2.3 植被.....	13
3.3 樹液流測量方式.....	14
3.3.1 樣木選擇及樣點設置.....	14
3.3.2 热消散探針法.....	16
3.3.3 樹液流探針之架設.....	17
3.4 氣象資料之收集與補遺.....	18
3.5 資料處理與統計方法.....	19
3.5.1 資料之整理與取捨.....	19
3.5.2 水蒸氣壓差之計算.....	19
3.5.3 樹液流速之計算.....	20
3.5.4 不同方位樹液流速之比較.....	20
3.5.5 時間遲滯之計算.....	20
3.5.6 不同深度樹液流速之比較.....	21
3.5.7 不同方位及深度對於樹液流量估算之誤差與平均樹液流速計算.....	21
3.5.8 樹液流速與 VPD 之關係.....	25
3.5.9 儲存水利用計算.....	26
第四章 結果.....	28
4.1 樹液流速於不同方位之變異.....	28
4.2 樹液流速於不同深度之變異.....	32
4.3 方位及深度變異與樹液流量估算之誤差.....	38
4.4 不同季節之樹液流狀況.....	40
4.5 樣木 TM1 冠層微氣候概況.....	43



4.6 樹液流速與 VPD 之關係.....	45
4.7 樹液流時間遲滯與儲存水利用狀況.....	48
第五章 討論.....	53
5.1 樹液流速於不同方位角之變異.....	53
5.2 樹液流速於不同深度之變異.....	54
5.3 不同季節之樹液流狀況.....	55
5.4 冠層微氣候概況.....	57
5.5 樹液流速與 VPD 之關係.....	58
5.6 不同高度樹液流之時間遲滯與儲存水之利用狀況.....	59
第六章 結論.....	64
參考文獻.....	65
附錄.....	72



表目錄

表 1、三株樣木基本資料.....	15
表 2、以交叉相關函數(Cross correlation function, CCF)求出之三株樣木 2-4 cm 處與 4-6 cm 處相對於 0-2 cm 處之樹液流於四季遲滯時間.....	33
表 3、相較於以四方位平均樹液流速估算全株樹液流量流速.....	39
表 4、相較於以不同邊材深度之平均樹液流速估算全株樹液流量.....	39
表 5、三株樣木於夏季及冬季之平均每日儲存水消耗量及冠層蒸散量比較.....	49
表 6、塔塔加鞍部與鴛鴦湖樹液流速比較.....	56
表 7、五種針葉樹之每日消耗之儲存水與每日總樹液流量資料.....	61
表 8、四種不同高度針葉樹時間遲滯比較.....	62



圖 目 錄

圖 1、土壤-植物-大氣連續體(soil-plant-atmosphere continuum)水勢變化及阻力分 布	4
圖 2、木質部半徑與邊材深度之關係圖	5
圖 3、雲杉屬植物現今之分布	10
圖 4、臺灣雲杉全省分布。藍色線條代表北回歸線	11
圖 5、臺灣雲杉(a)實體照片及(b)球果及枝葉圖	12
圖 6、樣區地形圖	12
圖 7、中央氣象局阿里山氣象觀測站 2000 至 2012 年平均月均溫與平均月累積降 水	13
圖 8、(a)不同高度探針架設示意圖及(b)不同方向與深度探針架設示意圖	16
圖 9、熱消散探針及其裝置示意圖	17
圖 10、熱消散探針法之探針架設流程圖	18
圖 11、樣木 TM1 頂層及底層樹液流速 CCF 分布	21
圖 12、以不同方位之樹液流速及邊材深度計算之樹液流量示意圖	23
圖 13、以不同深度之樹液流速計算樹液流量之示意圖	24
圖 14、樣木 TM3 夏季及冬季之東、西、南、北四個方位樹液流速標準差日變 化	28
圖 15、樣木 TM1 於不同季節之樹幹四個方位樹液流速比較	29
圖 16、樣木 TM3 於不同季節之樹幹四個方位樹液流速比較	30
圖 17、樣木 TMid 於不同季節之樹幹四個方位樹液流速比較	31
圖 18、樣木 TM3(a)夏季與(b)冬季之 0-2 cm 處與 4-6 cm 處樹液流速日變化分 布	33



圖 19、樣木 TM1 之 2-4cm 處及 4-6 cm 處相較於 0-2 cm 處之樹液流速於春、夏及冬季之分布.....	34
圖 20、樣木 TM3 之 2-4cm 處及 4-6 cm 處相較於 0-2 cm 之樹液流速於春、夏及冬季之分布.....	35
圖 21、樣木 TMid 之 2-4cm 處及 4-6 cm 處相較於 0-2 cm 之樹液流速於春、夏及冬季之分布.....	36
圖 22、樣木 TM1 不同深度 14 筆最大每日白晝樹液流速之平均值於季節之變異.....	37
圖 23、樣木 TM3 不同深度 14 筆最大每日白晝樹液流速之平均值於季節之變異.....	37
圖 24、樣木 TMid 不同深度 14 筆最大每日白晝樹液流速之平均值於季節之變異.....	38
圖 25、樣木 TM1 於不同季節之樹液流速盒鬚圖.....	41
圖 26、樣木 TM3 於不同季節之樹液流速盒鬚圖.....	41
圖 27、樣木 TMid 於不同季節之樹液流速盒鬚圖.....	42
圖 28、三株樣木於 2010 年春、夏及 2012 年冬季之月平均樹液流速.....	42
圖 29、樣木 TM1 冠層於 2010 年夏季連續 5 日之溫度及相對濕度變化.....	44
圖 30、樣木 TM1 冠層於 2010 夏季連續 5 日之 VPD 變化.....	44
圖 31、樣木 TM1 冠層於 2011 冬季連續 5 日之溫度及相對濕度變化.....	44
圖 32、樣木 TM1 冠層於 2011 冬季之 VPD 連續日變化分布.....	45
圖 33、樣木 TM3 於 2010 夏季連續 3 日樹液流速與 VPD 之連續日變化.....	46
圖 34、樣木 TM3 於 2011 年冬季連續 3 日樹液流速與 VPD 之連續日變化...	46
圖 35、三株樣木於生長季每日白晝平均樹液流速與平均 VPD 之關係曲線....	47
圖 36、三株樣木以 NLME 統計方法合併計算之飽和曲線.....	47



圖 37、樣木 TM3 於 2010 年 8 月 1 日之冠層蒸散量與底層樹液流量.....	49
圖 38、樣木 TM3 於 2010 年 8 月 1 日單日儲存水利用狀況.....	50
圖 39、樣木 TM3 於 2011 年 12 月 19 日冠層蒸散量與底層樹液流量.....	50
圖 40、樣木 TM3 於 2011 年 12 月 19 日儲存水利用狀況.....	51
圖 41、各樣木於夏季及冬季底層樹液流與冠層蒸散之時間遲滯.....	52
圖 42、樣木 TM12010 年 7 月 14 日及 15 日太陽輻射與冠層相對濕度之日變化..	58
圖 43、樣木胸徑與每日儲存水消耗量之關係.....	63
圖 44、樣木胸徑與每日總樹液流量之關係.....	63

第一章 緒論



1.1. 前言

植物行光合作用所需之二氧化碳來自大氣，但因大氣內之水蒸氣壓(Water vapor)較植物體低，使植物在吸收二氧化碳的過程中，必須冒著水分流失之代價。因此，植物遂發展適應機制，透過氣孔開闔控制二氧化碳吸收與水分溢散速度(Taiz and Zeiger, 2006)。蒸散作用(Transpiration)為水分從植物地上部向外界溢散的過程，其可透過葉部氣孔、角質層孔隙以及木本植物之皮孔進行。一般成熟葉子之角質層發達，透過角質層蒸散之水分僅占總蒸散量之 5-10 %，透過皮孔蒸散之水僅占總蒸散量之 0.1 %，故水分透過氣孔溢散為蒸散作用之主要形式(柯勇，2002)。

樹液流法(Sap flow method)為測量林木蒸散作用方式之一，透過觀察林木樹液流變化，可直接瞭解水分於邊材中流動的狀態，且因操作較容易並可長時間紀錄觀測，遂廣泛被運用於林木蒸散作用之研究上(Smith and Allen, 1996)。

驅動樹液流動之因子為水勢梯度(Water potential gradient)。當土壤可利用水分充足時，葉肉組織內的水蒸氣壓可視為飽和水蒸氣壓，因而與外界之水蒸氣壓形成水蒸氣壓差(Vapor pressure deficit, VPD)。此 VPD 使葉肉組織內飽和之水分往水蒸氣壓較低之大氣擴散，造成植物體內水勢梯度差異，帶動樹液流動。研究指出，樹液流速與 VPD 之關係為一飽和曲線(saturation curve)，即 VPD 在一定範圍內，樹液流速會隨著 VPD 增加而遞增，然當 VPD 達到某程度後，樹液流速則趨向一常數(Pieruschka *et al.*, 2010)。

林木整體的樹液流量取決於樹液流通量(sap flux density，本文以樹液流速代稱)及邊材斷面積(cross sectional area of sapwood)，即 $Q = FA_S$ ， Q 為樹液流量，指單位時間內流經特定斷面積之樹液量，單位為 cm^3s^{-1} ； F 為樹液流速，指單位時間內流經單位面積之樹液量，單位為 $\text{cm}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ； A_S 為邊材斷面積，單位為 m^2 (Granier, 1987)。



觀測樹液流可瞭解樹液流速於邊材不同方位及深度上之變異狀況，且從樹液流於樹幹不同高度之時間遲滯(time lag)現象，也可得知樹幹兩高度間儲存水(storage water)之利用情形。同一樹幹兩高度之樹液流形成時間遲滯原因為蒸散流(transpiration stream)與樹幹儲存水交換所致(Wullschleger *et al.*, 1998)。儲存水對於林木之重要性在於，當土壤水分供應不足時，可藉由儲存水作為緩衝，避免水分缺乏迫使氣孔關閉影響光合作用(Holbrook and Sinclair, 1992)。儲存水之多寡隨著樹種及生長狀況而不同(Goldstein *et al.*, 1998)，一般而言，胸徑越大之林木，儲存水越多，不同樹種之儲存水及其利用效率亦有所不同(Phillips *et al.*, 2001)。

1.2. 研究目的

雲杉屬植物為廣泛分布於北半球溫帶地區之樹種，最早起源於北美洲，為主要之經濟樹種及許多學者研究之對象。而本研究之目標樹種：臺灣雲杉(*Picea morrisonicola*)，為雲杉屬植物最南端之樹種，在生物地理上極具重要性，然國內對此一樹種之生理生態特性瞭解卻甚有限。本研究利用長時間逐時觀測臺灣雲杉樹液流速之變化，瞭解木質部不同方向及深度對於樹液流速之影響，進一步利用不同方向與深度平均後之樹液流速計算臺灣雲杉之樹液流量，並探討臺灣雲杉樹液流與 VPD 之關係。此外，亦利用林木不同高度之樹液流量差異及時間遲滯現象，瞭解儲存水之晝夜利用狀況。



第二章 前人研究

2.1. 樹液流

木材的橫切面大致可分為深色與淺色兩個區域，顏色淺為邊材(sapwood)，顏色深且分部於木材中心者為心材(heartwood)，邊材主要由活的細胞所構成，其中也含有一些死細胞及纖維，當邊材細胞在多年後管胞漸漸阻塞或死亡，則成為心材(Plomion *et al.*, 2001)。在林木水分的利用上，邊材為水分儲存及運輸的重要部位，Čermák *et al.*(2007)將生長錐鑽出的花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)樹芯以一定長度分段秤重，烘乾後求得樹皮、韌皮部、木質部的含水率。其結果顯示該樹種邊材含水率最高(44 % vol)，其次為韌皮部(32 % vol)。由於心材中的水分大多不可利用，因此木質部水分的傳導主要以邊材中水分的傳導為主，故樹液流(sap flow)為邊材水分的流動。樹液流量可呈現蒸散量之多寡，即樹液流量越大，蒸散量就越大(Saugier *et al.*, 1997)。

2.2. 影響樹液流之因子

Philip(1966)指出，土壤中的水分經由植物吸收，經由植物氣孔以蒸氣方式排出至大氣的過程稱為土壤-植物-大氣連續體(soil-plant-atmosphere continuum, SPAC)。在 SPAC 系統中，植物根部存在著較高的水勢，水分經由植物的維管束運送至水勢更低的葉面，並釋放至大氣中，如此水勢梯度的變化便影響樹液流動的流速(Raviv and Blom, 2001)。在水分的輸送過程中，土壤、根部、維管束、氣孔以及葉面環境均有阻力影響水分之流動(圖 1)。水分在植物體內輸送過程中所受的阻力由維管束狀況所決定，而水分從土壤進入根部以及水分從葉面溢散的阻力均受到環境因子影響。下列章節便說明木質部狀況與環境因子如何影響樹液流。

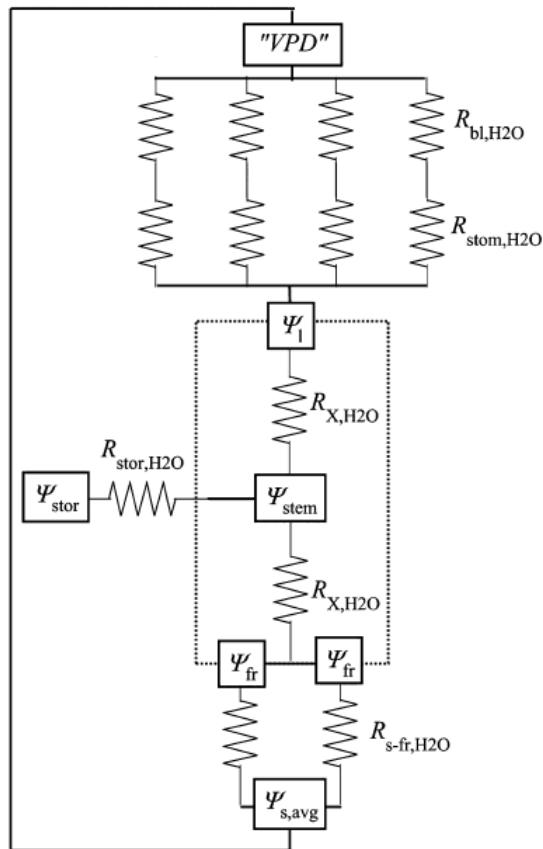


圖 1、土壤-植物-大氣連續體(soil-plant-atmosphere continuum)水勢變化及阻力分布，
 $R_{bl,H2O}$ 為水分通過邊界層(Boundary layer)的阻力， $R_{stom,H2O}$ 為水分通過氣孔時的阻
 力， $R_{x,H2O}$ 為水分在木質部中流動的阻力， $R_{s-fr,H2O}$ 為水分從土壤進入功能良好之根
 的阻力， $R_{stor,H2O}$ 為儲存水流至木質部的阻力， Ψ_1 為葉肉之水勢， Ψ_{stem} 為莖部之水
 勢， Ψ_{fr} 為功能良好之根的水勢， $\Psi_{s,avg}$ 為土壤平均水勢， Ψ_{stor} 為含有儲存水部位之
 水勢。(來源：Deckmyn *et al.*, 2008)



2.2.1. 邊材範圍

觀察木質部狀況對樹液流的影響之前，必須先瞭解邊材的範圍。林木的邊、心材在木質部中分布的比例會因林木尺寸、年齡等而有所不同。Delzon *et al.*(2004)指出海岸松(*Pinus pinaster*)邊材厚度與枝下高直徑(stem diameter below the live crown)成正相關，然此關係僅在枝下高直徑小於18 cm 時方成立，若枝下高直徑大於18 cm 時，邊材厚度和枝下高直徑並無相關，也就是海岸松到一定的年齡之後，儘管林木半徑增加但邊材寬度便不再增加。

Kravka *et al.*(1999)觀察挪威雲杉(*Picea abies*)與歐洲赤松 (*Pinus sylvestris*)100年生之老齡林與50年生之年輕林木發現，挪威雲杉在胸高半徑相同的情況下，年輕林木之邊材寬度較老齡林木寬，且年輕林木之邊材寬度隨木質部半徑增加的程度較老齡林大；歐洲赤松邊材寬度隨木質部半徑增加的趨勢在兩個林分均非常明顯(圖 2)。

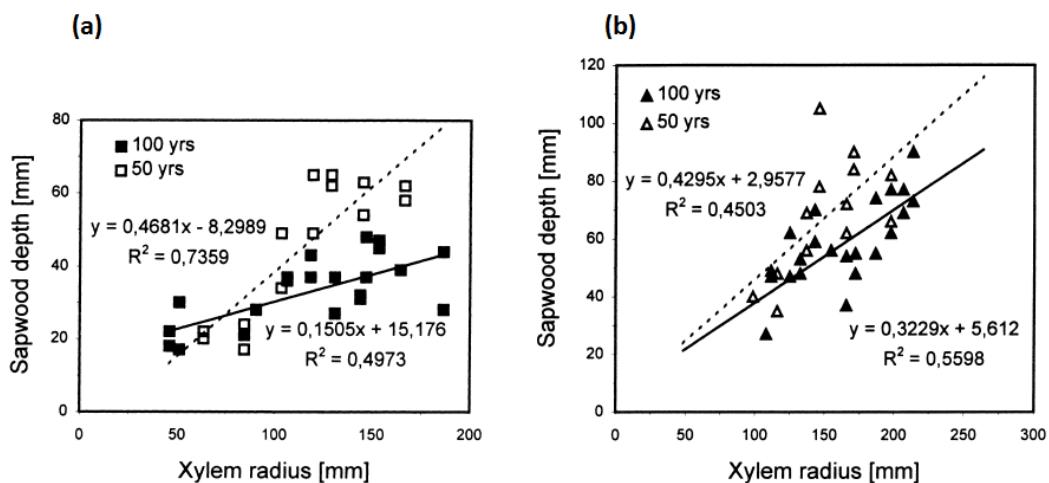


圖 2、木質部半徑與邊材深度之關係圖。(a)為挪威雲杉、(b)為歐洲赤松 (來源：Kravka *et al.*, 1999)。



2.2.2. 木質部狀況對樹液流之影響

木質部狀況對於樹液流的影響是不可忽略的，不同部位與深度之邊材其樹液流速可能不同。因此，探討木質部狀況對於樹液流速的影響，有助於更精準地估算蒸散作用。

(1) 邊材深度對樹液流速的影響

邊材中的樹液流速是不均勻的，隨著邊材管胞老化阻塞，越往心材則樹液流速越小。遞減的趨勢會因林木年齡、樹幹半徑以及林木邊材性質而有所差異。

Xia *et al.*(2008)利用熱消散探針法(thermal dissipation method)對中國西南部檸條(*Caragana korshinskii*)樹液流之季節及日夜的變化研究結果顯示，每日最大樹液流速會因探針插入深度加深而減少。

Delzon *et al.*(2004) 觀察法國西南部地區的海岸松，結果指出，樹液流速隨著邊材觀測深度增加而遞減，其中年輕樣木遞減的趨勢較緩，在靠近心材處之樹液流速，不低於外層邊材樹液流速的 60%；反之，成熟樣木樹液流速隨深度增加而遞減的程度較明顯，靠近心材邊界的邊材樹液流速只約為最外層邊材的 20%。因此以樹液流量估算蒸散作用時，如果只偵測單一測點的樹液流速時，成熟樣木的推估誤差會比年輕樣木大；因此要觀測大樹的蒸散作用時，則需多個測點方可有精確的結果 (Tateishi *et al.*, 2008)。

(2) 方位對樹液流的影響

Delzon *et al.*(2004)除觀察深度之影響外，也在樣木枝下高西側及北側架設樹液流探針，結果發現，此兩方位對樹液流速變異並無顯著影響。然其他研究卻指出樹幹基部之樹液流速顯著受方位影響，Loustau *et al.*(1996)的研究分別於樣木之兩處高度的四個方位做樹液流觀測，觀察結果指出枝下高附近四個方位之樹液流速變化差異不大，但在胸高附近則差異明顯。

Tateishi *et al.*(2008)於日本觀測青剛櫟(*Quercus glauca*)樹幹四個方位之樹液流顯示流速大小依序為，東>南>北>西方；在中午樹液流最大時，西方之樹液流速約為東方之 65%。然 Si *et al.*(2007)對胡楊樹(*Populus euphratica*)的觀測卻發現，樹液流在樹幹四個方位上的變化，發現東、西向之平均樹液流速較南、北向之平均樹液流速大。

此外，樹幹不同方位之樹液流速是否受不同冠層方位之蒸散狀況影響，可藉由維管束水分輸導系統來參考。有學者將林木的輸水系統主要分為兩大群，即受約束的傳導系統(relatively constrained, or sectored, vascular connections)又稱 Isolated model，其傳輸水分主要經由管胞軸向的壁孔傳輸，當某一部分水分傳輸中斷時，則無法從其他源頭供給。另一系統為非受約束傳導系統(relatively unconstrained, or integrated, vascular connections)，又稱 Fully-coupled model，其木質部導管的交叉木紋使水分傳輸並非於單一軸向連結之管胞傳輸，因此可以共享其他源頭之水分。闊葉樹環孔材樹種(Ring-porous species)及某些針葉樹為 Isolated model，而單子葉植物及闊葉樹散孔材樹種(Diffuse-porous species)則為 Fully-coupled model(Schulte and Brooks, 2003; Zanne *et al.*, 2006; Nadezhina, 2010)。目前臺灣雲杉為何種系統則還未知。

2.2.3. 環境因子對樹液流之影響

過往研究顯示，相對濕度、氣溫、太陽輻射、土壤熱通量、地下水位、風速、土溫及土壤溼度等，均對樹液流有所影響，而其中以相對濕度、氣溫與太陽輻射對樹液流之影響較明顯(Si *et al.*, 2007; Xia *et al.*, 2008)。

由相對濕度及溫度所共同決定之 VPD，會影響蒸散作用，進而改變樹液流量(Tan *et al.*, 1978)。除 VPD 之外，由氣孔導度與葉面積所影響之冠層導度(canopy conductance)亦可控制蒸散作用。在土壤有效水分不受限的情況下，在一定範圍內葉面積指數(leaf area index)與蒸散作用呈線性遞增關係(Granier *et al.*, 2000)。氣孔



導度與太陽輻射及溫度呈飽和曲線關係，而氣孔導度則與 VPD 呈負相關，其會因 VPD 增加而下降(Lloyd *et al.*, 1995; Waring and Running, 2007)。

2.3. 樹液流之時間遲滯

Goldstein *et al.*(1998)之研究指出，每天清晨蒸散作用開始進行時，冠層枝條的樹液流速會快速增加，並大於樹幹基部的樹液流速；反之，到了下午，樹冠層蒸散速率減緩，使冠層枝條的樹液流速開始減少，但樹幹基部的樹液流卻在冠層枝條樹液流下降一段時間之後才開始變慢，由此可看出樹液流速在林木不同高度的反應時間上有遲滯現象。冠層樹液流反應會比較早乃因樹冠頂層為蒸散作用進行的主要區域，且多暴露在直射陽光、高溫、風吹等的環境下，水分較易流失，冠層頂層枝幹為了補充蒸散作用流失掉的水分，快速帶動此部位的樹液流(Čermák *et al.*, 2007)。

Čermák *et al.*(2007)歸納出樹液流時間遲滯的因素有下列三點：

1. 距離：距離越短則遲滯時間越短。
2. 阻力：當輸導組織的直徑越小以及含有氣泡時，均會增加流動的阻力，增加遲滯時間。
3. 儲存水：當儲存水的量足夠作為蒸散作用所需的水，則下層樹液不用立刻向上傳導補充水分，進而增加遲滯的時間。

2.4. 儲存水之利用

研究指出每日之儲存水為一天內可從主幹及枝條抽取利用並補充之水量，亦有學者對於儲存水之定義為植物根、莖、葉中一些特殊組織間隔中的水分。因此儲存水之定義可為，藉由水勢差異從水分儲存間隔及組織中抽取並補充之水量(Godstein *et al.*, 1998)。基本上，長時間儲存水之利用主要來自木質部中可利用之水分；此外，土壤含水率亦會影響儲存水之利用狀況(Waring and Running, 1976)。

由冠層蒸散量與樹幹基部樹液流量的差值，可知兩者間樹幹儲存水之利用狀況。若為正值則表示樹冠層流失掉的水分大於從樹幹基部補充的水分，此時必須消耗樹幹儲存水以補足蒸散所需的水分；負值則代表樹幹基部注入的水分在供應冠層蒸散之後，仍有剩餘的水分提供林木儲存。通常樹幹會在下午或晚上至隔天清晨蒸散作用重新開始之前，進行儲存水的補充(Goldstein *et al.*, 1998)。

2.5. 國內樹液流研究

羅勻謙(2004)於鴛鴦湖自然保留區以樹液流法估算臺灣扁柏之蒸散量，並調查環境因子，探討樣區內環境因子對於蒸散作用之影響。結果顯示，樹液流分別與日輻射及 VPD 之最大值有時間遲滯現象，且日輻射與樹液流之時間遲滯為 1 至 2 小時；而鴛鴦湖地區因潮濕多雲霧，使當地生態系之蒸散量甚低，僅占輸入水分量之 6%。

張志遠(2008)在墾丁國家公園南仁山保護區，對於當地迎風面、背風面選擇港口木荷(*Schima superba*)、長尾栲(*Castanopsis carlesii*)及小葉赤楠(*Syzygium buxifolium*)等三種優勢樹種觀測樹液流。經由一年多的樹液流連續監測，並記錄光合作用有效光輻射量(Photosynthetic active radiation)、溫度、相對溼度、風向與風速等環境因子，用以檢視上述環境因子對於與不同生育地之三樹種之樹液流之間的關係。結果顯示，相同樹種之樹液流在不同風力環境下有差異，但影響程度較小，而光合作用有效輻射量及溫度則對於樹液流影響最大。

曾涵(2011)在溪頭柳杉造林地，持續監測柳杉樹液流約 7 個月的時間，試圖釐清柳杉木質部內之徑向樹液流分布變異。結果顯示，邊材深度 2-4 cm 處之樹液流速為 0-2 cm 處之 50-60%，而不同方向之樹液流速變異則較無相關性。因此若估算其樣區之柳杉林蒸散量，則必須考慮不同邊材深度樹液流速之變異。



2.6. 雲杉屬植物之概述

雲杉屬植物樹冠為圓錐狀，枝幹輪生，通常 20 m 至 60 m 高，樹皮為黑色至紅棕色，通常有鱗片狀裂紋。芽苞球狀，頂端銳尖，葉環繞生長於枝條周圍，通常可存留十年(Taylor *et al.*, 1994)。

雲杉屬為溫帶主要樹種，其在白堊紀及第三紀已出現(柳橙，1966)，而 Ran *et al.*(2006)對於 33 種雲杉屬植物的研究指出，最早的雲杉屬植物起源於北美洲，並經由白令海峽路徑播遷至亞洲，接著再由亞洲播遷至歐洲。目前雲杉屬植物分布範圍最北可至北極圈，最南可至亞熱帶地區(圖 3)，分布於北美洲的 *P. sitchensis* 以及 *P. breweriana* 被認為是雲杉屬之基礎物種。



圖 3、雲杉屬植物現今之分布(改繪自: <http://www.conifers.org>)。

第三章 研究材料與方法



3.1. 研究材料

本研究以臺灣雲杉為材料。臺灣雲杉適生於涼爽潮濕之環境，主要存在於陰濕之坡面(劉靜榆，1991)，分布範圍為中央山脈海拔 2000 至 3000 m 之間，包括塔塔加鞍部，丹大溪、楠梓仙溪及大甲溪等溪流的上游區域(圖 4)，並常與紅檜、鐵杉及些許闊葉樹種混生(陳正和，2004)。本研究樣區所處臺灣中部塔塔加鞍部之雲杉每年抽芽一次，大約於 5 月抽出當年生枝條並展葉，其針葉長 1 至 1.5 cm，寬 2 至 3 mm，附著於枝條突起之葉枕上，針葉之壽命為 2 至 3 年(藍永翔，2010)，烘乾後易脫落(圖 5)。

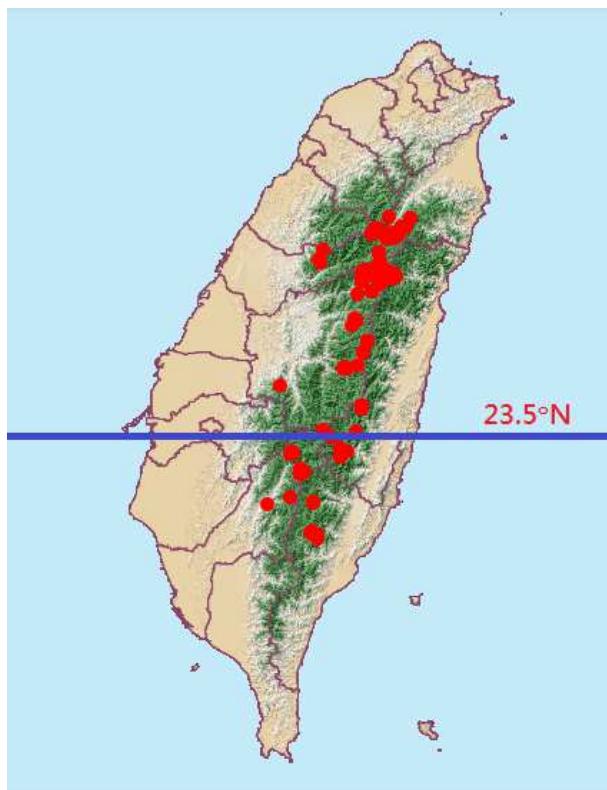


圖 4、臺灣雲杉全省分布。藍色線條代表北回歸線 (資料來源:農委會林務局生態資源資料庫)

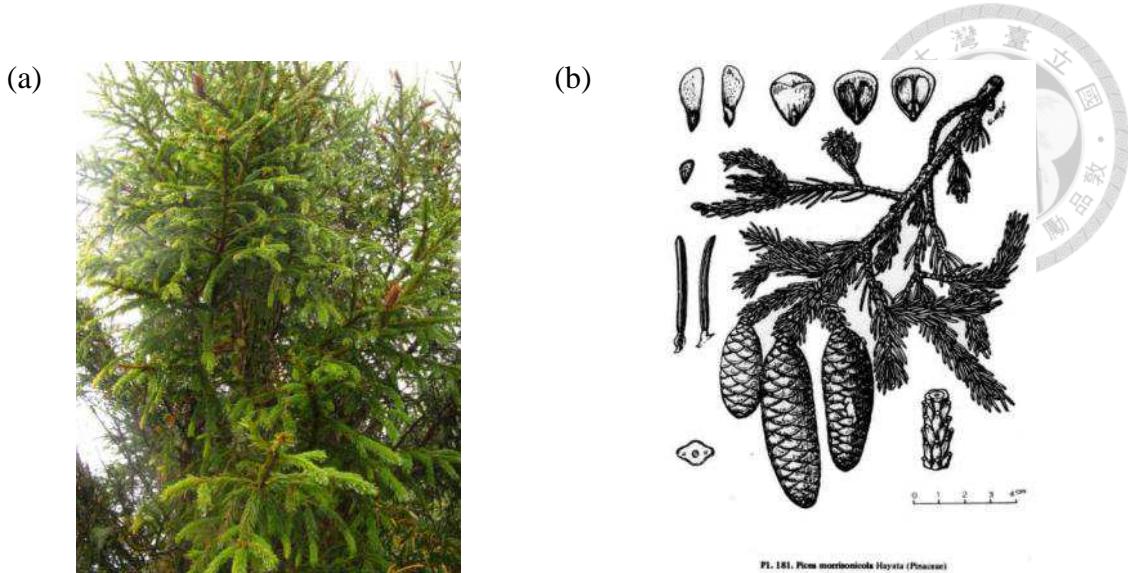


圖 5. 臺灣雲杉(a)實體照片及(b)毬果及枝葉圖(來源：Flora of Taiwan, 2nd ed.)。

3.2. 樣區概述

3.2.1 地點

本研究樣區位於塔塔加長期生態研究雲杉林永久樣區($23^{\circ}29'10''N$, $120^{\circ}52'40''E$)，海拔 2610 m。該永久樣區位於塔塔加鞍西北側，即南投縣信義鄉與嘉義縣阿里山鄉交界處，塔塔加玉山登山口附近(圖 6)。其坡向為東南方，坡度 30-45°，土層多巨石(鍾年鈞，1998)。

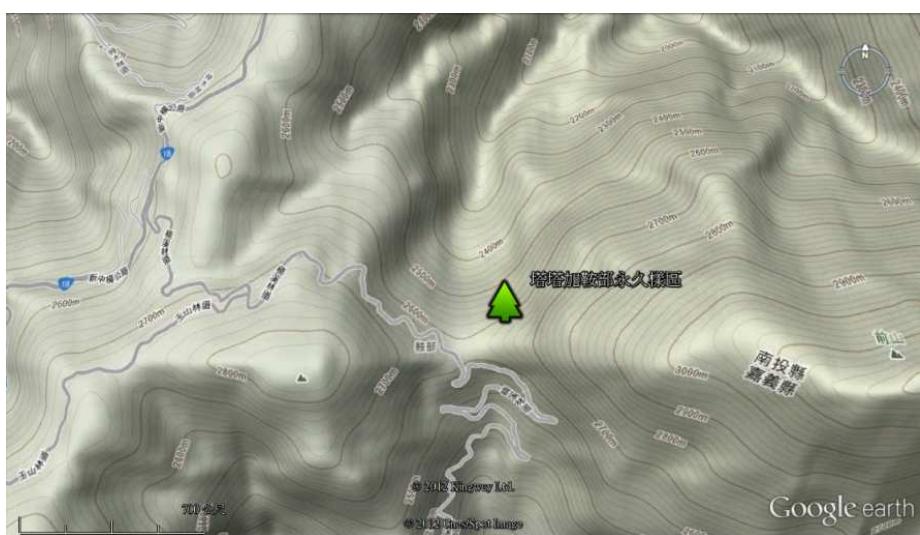


圖 6、樣區地形圖(資料來源：Google Earth)



3.2.2 氣候

距研究地點最近之中央氣象局氣象站為阿里山觀測站。根據該測站自 2000 至 2012 年之觀測，阿里山地區平均年均溫為 11.4°C ，7 月分月均溫為 14.9°C ，1 月分月均溫為 6.4°C ，各年冬季皆有幾日溫度小於 0°C 的情況；平均每月降雨量為 356.1 mm，雨量主要集中在夏季，乾濕季明顯(圖 7)。

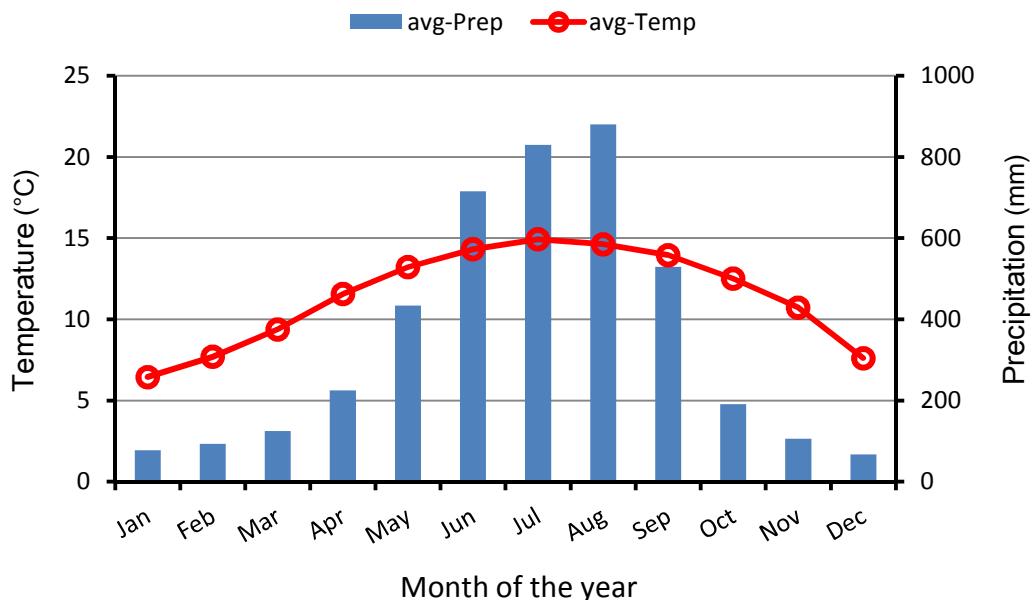


圖 7、中央氣象局阿里山氣象觀測站 2000 至 2012 年平均月均溫與平均月累積降水量。
圖中 avg-Temp 為平均月均溫，avg-Prep 為平均月累積降水量(資料來源:大氣資料庫)

3.2.3 植被

調查樣區為臺灣雲杉之天然老熟林，由生長錐鑽取之樹芯資料推估，其樹齡約 300 年(藍永翔，2010)。本樣區屬臺灣雲杉林型，垂直結構主要分成四層，第一樹冠層以臺灣雲杉為主，並參雜些許華山松(*Pinus armandii*)與臺灣紅檜(*Chamaecyparis formosensis*)，第二層樹冠層以臺灣鐵杉(*Tsuga chinensis*)為主，而中層小徑木有高山新木薑子(*Neolitsea acuminatissima*)、玉山新木薑子(*Litsea*



morrisonensis)、異葉木樨(*Osmanthus heterophyllus*)、狹葉莢蒾(*Viburnum touchanense*)、玉山懸鈎子(*Rubus hayatakoidzumii* Naruh.)等，而下層植被則有高山酢醬草(*Oxalis acetosella*)、冷杉異燕(*Helictotrichon ahietetorum*)、玉山箭竹(*Yushania niitakayamensis*)等，此外臺灣雲杉之小苗並不會出現在林下(曾彥學，1991)。

3.3. 樹液流測量方式

3.3.1. 樣木選擇及樣點設置

本研究樣區內選擇三株樹勢完整、生長狀況良好，平均高度高於 30 m，並且經由生長錐鑽取樹芯確定邊材寬度至少為 6 cm 之老熟木，分別命名為 TM1、TM3 及 TMid，各樣木之基本資料如表 1。

樣木確定後，選定頂層、中層、底層此三個不同高度觀測位置。頂層觀測位置於樹冠頂部直徑大於 25 cm 且上下 30 cm 範圍內無側枝生長之主幹；三株樣木之上層觀測位置大致位於距樹頂 4-6 m 處。中層觀測位置則位於冠層中間點上、下 30 cm 內無側枝生長之處。底層觀測位置因樣木設有 Dendrometer，為避開干擾，基本上設於距地面 2 m 處，若高度下方 30 cm 有 Dendrometer 經過，則將底層觀測位置上移 (表 1 及圖 8)。

分層觀測位置確定後，分別於頂層與中層之南、北兩面設置樹液流觀測樣點，而於底層東、西、南、北四個方位設置樣點。上述樣點主要用以觀測邊材表層 0-2 cm 處之樹液流。為更進一步觀測邊材深層之樹液流速，在各樣木底層東南方處增設一個深層樣點，觀測該樣點邊材 2-4 cm 以及 4-6 cm 之樹液流速(圖 8)。



表 1、三株樣木基本資料

	TM1	TM3	TMid
樹高(m)	32.0	40.3	34.3
枝下高(m)	11.1	7.7	11.4
頂層探針位置高度 (m)	29.1	32.6	30.3
中層探針位置高度 (m)	17.5	27.4	24.5
底層探針位置高度 (m)	2.6	2.7	2.4
頂層探針位置直徑 (m)	0.72	0.86	0.20
中層探針位置直徑(m)	0.95	0.7	0.32
底層探針位置直徑 (m)	1.35	1.24	0.86
頂層探針位置邊材深度 (cm)	20	8	8
底層探針位置邊材深度 (cm)	9	8	6

† TM1 有兩個髓心；TM3 頂層直徑部分因測量點於分枝附近，故較中層大

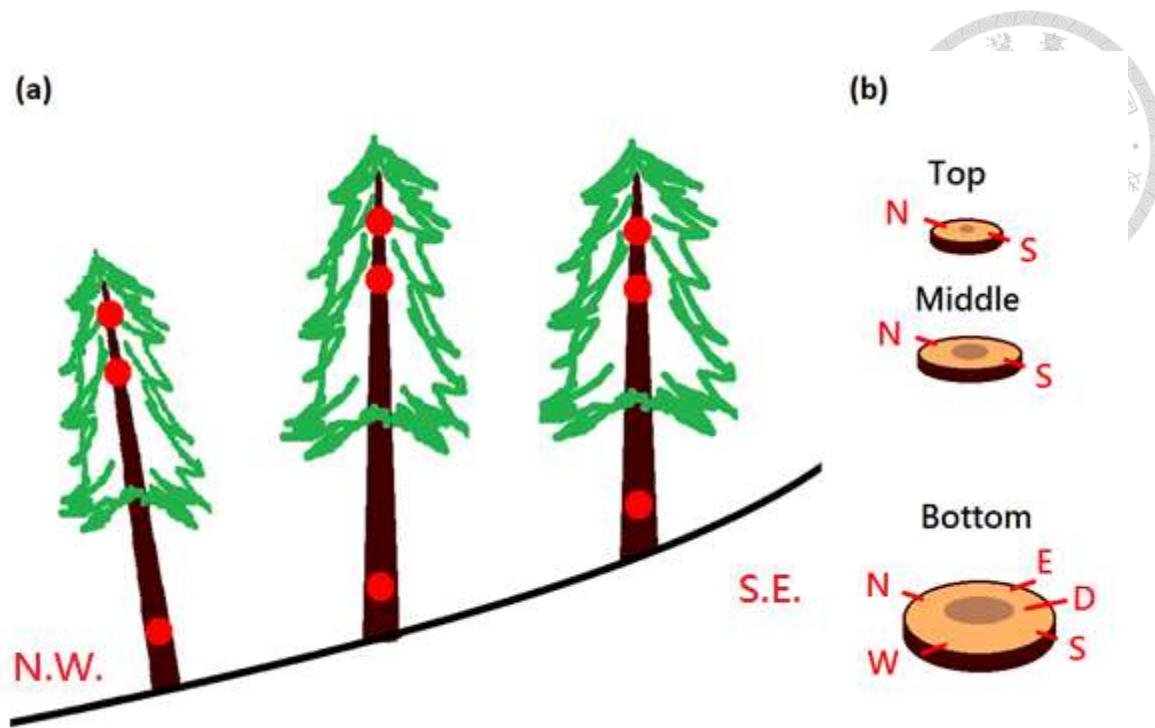


圖 8、(a)不同高度及(b)不同方向與深度探針架設示意圖

3.3.2. 热消散探針法

此樹液流測量方法為 Granier (1987) 實驗中所運用之熱消散探針法，故又稱 Granier 法。此種測量方式需要加熱探針(heater sensor)與比較探針(reference sensor)兩種探針。加熱探針有兩個迴路，其一是加熱迴路，本研究以銅為加熱迴路之導線，在電源調配後使探針發出 0.2 W 之固定熱量；另一個迴路則以銅與鈷兩金屬作為熱電偶(thermal couple)，主要之功能為利用電流經過不同金屬產生之電壓差來測量週遭溫度。比較探針只有熱電偶迴路，而無加熱之迴路，因此比較探針只有探測溫度之功能。

熱消散探針法即是利用兩種探針之間的溫度差得知樹液流速的快慢。加熱探針主要是利用樹液流水分運輸帶走熱量的機制，當樹液流速越快，帶走的熱量越多，則兩探針之間的溫度差越小，反之則越大。探針之配置必須將加熱探針架設於比較探針之上方，以避免樹液流向上流動攜帶之熱量影響比較探針之基礎溫度值(圖 9)。

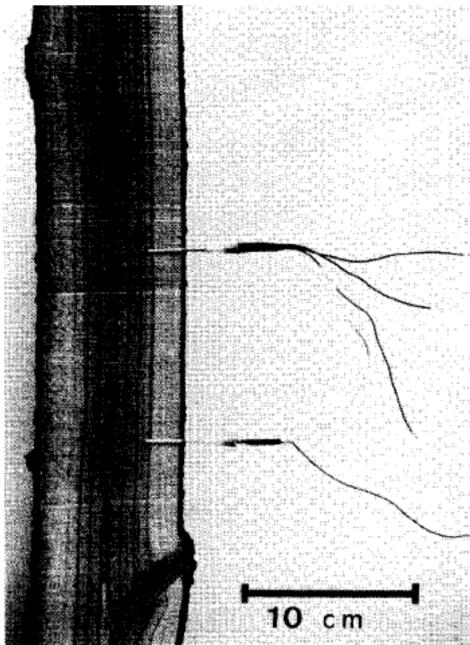


圖 9、熱消散探針及其裝置示意圖(來源：Granier, 1987)

3.3.3. 樹液流探針之架設

本實驗所使用之探針，為手工自製探針。一般樣點之架設，首先以剉刀小心挖取上下兩個面積約 $1.5\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$ 之正方形，並去掉樹皮至邊材表面。此兩個正方形小洞距離約 12-15 cm，避免太近會互相干擾，太遠會影響兩者電線的連結。接著以直徑 0.2 cm 之鑽頭，垂直樹幹在兩正方形內各鑽取深度為 2 cm 之孔洞。並將一加熱探針輕敲置入上方孔洞，而下方之孔洞則輕敲置入一比較探針(圖 10)。架設深層樣點時，則以挫刀挖取三個面積約 $1.5\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$ 之正方形，並去掉樹皮至邊材表面，此三個正方形的配置為一邊長約 12-15 cm 之倒三角形，而倒三角形之下端架設比較探針，另外兩角則架設距邊材表層 2-4 cm 及 4-6 cm 之探針。探針線路架設完畢後，遂以錫盒蓋住，以防止太陽輻射對探針之熱量偵測干擾。探針架設完畢後，遂以資料收集器(Campbell-CR1000)每半小時紀錄 1 筆平均樹液流速資料。

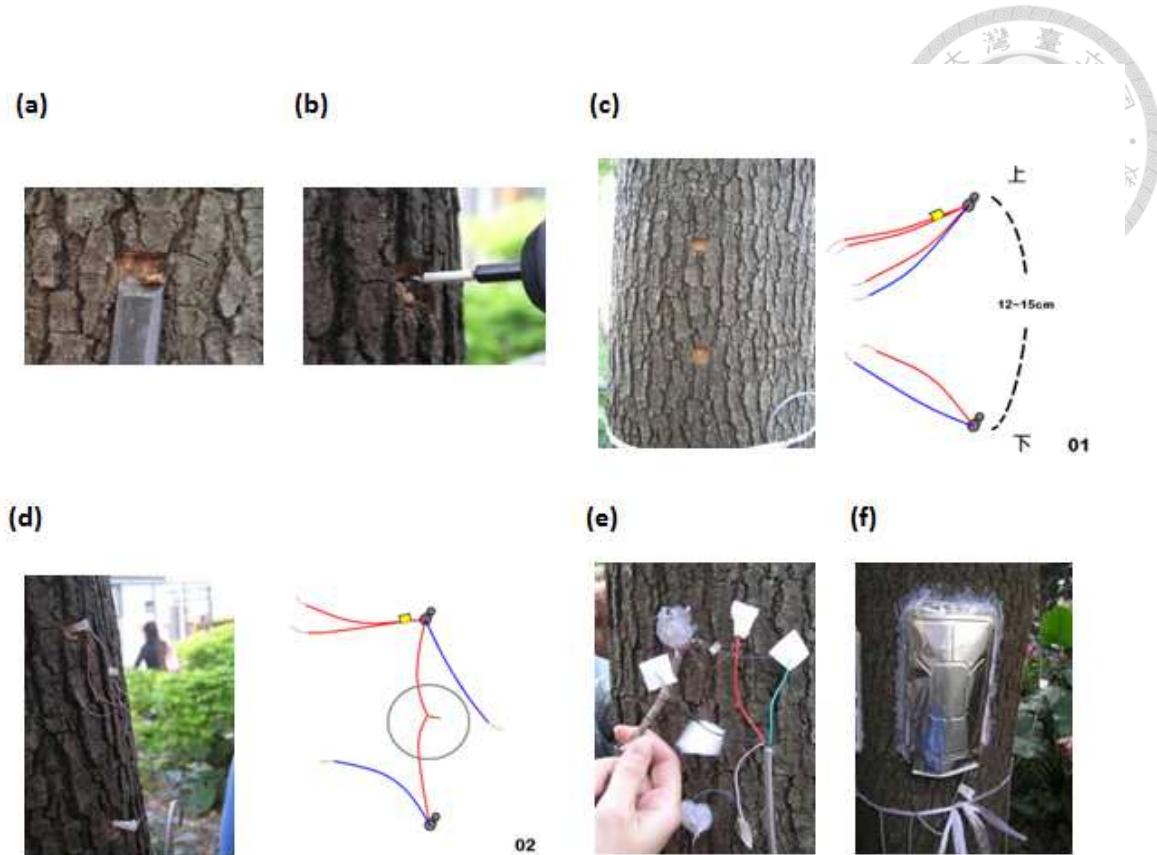


圖 10、熱消散探針法之探針架設流程圖(以楓香樹幹做為架設示範)。

3.4. 氣象資料之收集與補遺

本研究之太陽輻射資料取自臺大實驗林麟趾山簡易氣象觀測站，其距塔塔加鞍部樣區之直線距離約 1 公里，觀測時間自 2010 年 1 月至 2012 年 6 月。樣木溫度與相對濕度資料之取得則來自架設於樣木 TM1 及 TM3 冠層之溫溼度計(HOBO Pro v2)，以及臺大實驗林塔塔加鞍部林內簡易氣象觀測站之溫度及相對濕度資料，該氣象站蒐集距地面 1.5 m 及 20 m 之溫溼度資料。

樣木 TM3 之溫溼度計資料多有缺值，然其資料與樣木 TM1 之溫溼度計資料具高度相關($r^2 = 0.98$)，是以本研究遂以 TM1 之溫溼度資料作為三棵樣木之基準氣象資料。樣木 TM1 之溫溼度計因故障，導致部分 2011 年溫濕度資料蒐集中斷。將樣木 TM1 之溫溼度計溫度與相對溼度資料分別與鞍部林內氣象站資料做比較後，發現該站距地面 1.5 m 所蒐集之溫度與相對濕度資料與 TM1 冠層所蒐集之資料相



關性最高，遂以簡單線性迴歸之方式補遺 TM1 冠層溫濕度資料。補遺溫度之迴歸式為 $y = -0.578 + 0.975x$ ($r^2 = 0.84$)；補遺相對溼度資料之線性迴歸式則為 $y = 23.996 + 0.757x$ ($r^2 = 0.87$) (附圖 2)

本研究根據中央氣象局提供之氣象學四季分法，以 3 月至 5 月為春季，6 月至 8 月為夏季，9 月至 11 月為秋季，12 月至次年 2 月為冬季。

3.5. 資料處理與統計方法

3.5.1. 資料之整理與取捨

由於本研究於資料收集初期，多次長時間中斷。主要因初期使用太陽能為電力來源，而研究區位於北向坡且常有霧，故常有電力不足之情況。資料蒐集期間，設備亦多次因樣區遭落雷之影響而故障。在電力不足到斷電之期間，因電壓下降，使加熱效果不穩定，觀測之樹液流速偏高，因此將電池電壓小於 10V 期間所得資料捨棄。電力回復後，因需 2 至 3 日探針數值方區穩定，是以電力回復後 3 日內之資料亦捨棄不用。此外亦檢視單一探針所得數值每日之波動狀況，若有異常飆升之數值亦捨棄不用。

3.5.2. 水蒸氣壓差之計算

VPD 為飽和蒸汽壓與當時水蒸氣壓的差值，其公式如下：

$$VPD = e_s(T_a) - e(T_a) = e_s(T_a)(1 - h) \quad (1)$$

$$h = \frac{e(T_a)}{e_s(T_a)} \quad (2)$$

當中， $e_s(T_a)$ 乃溫度為 T_a 時之飽和蒸汽壓， $e(T_a)$ 乃溫度為 T_a 時之蒸氣壓， h 為當時之相對濕度 (Campbell and Norman, 1998)。

根據 (Sadler and Evans, 1989) 之飽和蒸汽壓計算公式如下：

$$e_s(T_a) = 0.61078 \times e^{\left(\frac{17.269T_a}{237.3+T_a}\right)} \quad (3)$$



其 e 為自然指數， T_a 為當時之溫度。

3.5.3. 樹液流速之計算

根據 Granier(1987)研究，樹液流量密度的計算方式為：

$$F = 0.0119 \times K^{1.321} \quad (4)$$

其中

$$K = \frac{T_M - T}{T - T_x} \quad (5)$$

$$K = \frac{\Delta T_M - \Delta T}{\Delta T} \quad (6)$$

公式(4)當中 F 為樹液流速，單位為 $\text{cm}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ， K 為熱傳導係數。公式(5)當中 T_M 為單位樹液流量為 0 時之加熱探針溫度， T 為單位樹液流量大於 0 時之加熱探針溫度，而 T_x 為比較探針之溫度。當加熱探針與比較探針開始有溫度差時，則公式(5)又可簡化成公式(6)，其中 ΔT 為探針之瞬間溫度差， ΔT_M 為樹液流速為 0 之探針溫度差，即每日最大溫差。

3.5.4. 不同方位樹液流速之比較

初步資料分析顯示，不同方向之樹液流大致為線性關係。故本研究以西方樹液流為基準（自變數），分別建立其與其他三方位樹液流之線性迴歸式，並以所估算之斜率作為其他三方位樹液流速相較於西方樹液流速快慢之依據，若斜率大於 1 則比西方樹液流速快，而小於 1 則較西方樹液流速慢。

3.5.5. 時間遲滯之計算

本研究中之樹液流速除在不同高度及對於環境因子之反應有遲滯現象之外，在不同深度之樹液流速亦有發現時間遲滯之現象。找出遲滯之時間點的方法，大多數的學者以交叉相關函數(Cross correlation function, CCF)方式，找出兩時間序列相關性最高的時間點。其概念為以時間為移動單位，前後移動兩數列，計算兩者



在不同遲滯時間組合之相關係數，而相關係數最高者，其時間差即為兩序列之遲滯時間（圖 11）。

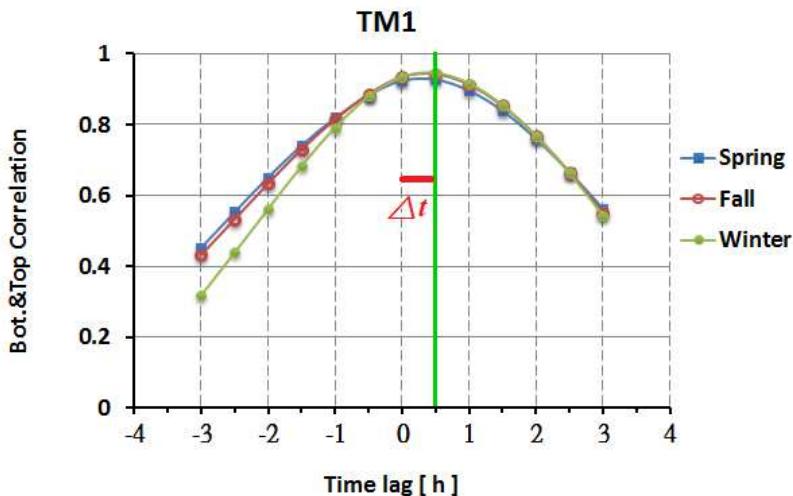


圖 11、樣木 TM1 頂層及底層樹液流速 CCF 分布。 Δt 為頂層與底層之遲滯時間

3.5.6. 不同深度樹液流速之比較

比較不同深度樹液流速之方法與比較不同方位之方法一樣，均以 X-Y 散布圖及線性迴歸線作為比較流速之依據。然因不同深度之樹液流速有時間遲滯之現象，是以需先將其經過時間遲滯校正後，再比較流速快慢。

3.5.7. 不同方位及深度對於樹液流量估算之誤差與平均樹液流速計算

(1) 不同方位估算樹液流量之誤差

本章節以樹幹四方位平均樹液流速估算之樹液流量為方位標準樹液流量，且方位誤差的定義為：用單一方位樹液流速估算之樹液流量，與方位標準樹液流量的差異百分比。表示方式如下：

$$\Delta Q_X = \frac{(Q_X - Q_{avg})100\%}{Q_{avg}} \quad (7)$$

Q_X 為以某方位樹液流速估算之樹液流量， Q_{avg} 為方位標準樹液流量， ΔQ_X 為僅



以某一方位樹液流速估算樹液流量與方位標準樹液流量之差異百分比。

因為本研究僅有東側及西側邊材資料，故計算標準樹液流量所需之邊材面積以東、西兩側邊材深度之平均值計算之。並且結果部分僅分別呈現東側及西側樹液流速對於樹液流量之估算誤差。

Q_{avg} 的計算公式如下：

$$Q_{avg} = (F_{avg} \times A_{Davg}) \quad (8)$$

$$A_{Davg} = \pi[R^2 - (R - D_{avg})^2] \quad (9)$$

F_{avg} 則為東、西、南以及北側之樹液流速平均值， A_{Davg} 為以 D_{avg} 所計算之邊材面積， R 為觀測點之樹幹橫切面半徑， D_{avg} 為東側及西側之邊材深度平均值。

Q_E 及 Q_W 分別為以東側及西側樹液流速所估算之樣木樹液流量，以 Q_E 為例，其計算公式如下：

$$Q_E = (F_E \times A_{DE}) \quad (10)$$

$$A_{DE} = \pi[R^2 - (R - D_E)^2] \quad (11)$$

當中 F_E 為東邊之樹液流速， A_{DE} 為以東邊邊材深度所計算之邊材面積， D_E 為東邊邊材深度， Q_W 之計算與 Q_E 相同(圖 12)。

本研究之方位誤差採 14 個非降雨日(相對濕度小於 90%)之白晝(上午 7：00 至下午 16：30)平均樹液流量計算之。 $\overline{Q_E}$ 、 $\overline{Q_W}$ 及 $\overline{Q_{avg}}$ 為此 14 日之 Q_E 、 Q_W 及 Q_{avg} 資料平均值， $\Delta \overline{Q_X}$ 為此 14 日平均之某方位樹液流量誤差百分比。以 $\Delta \overline{Q_E}$ 為例，計算公式如下， $\Delta \overline{Q_W}$ 計算亦與其相同：

$$\Delta \overline{Q_E} = \frac{(\overline{Q_E} - \overline{Q_{avg}})100\%}{\overline{Q_{avg}}} \quad (12)$$

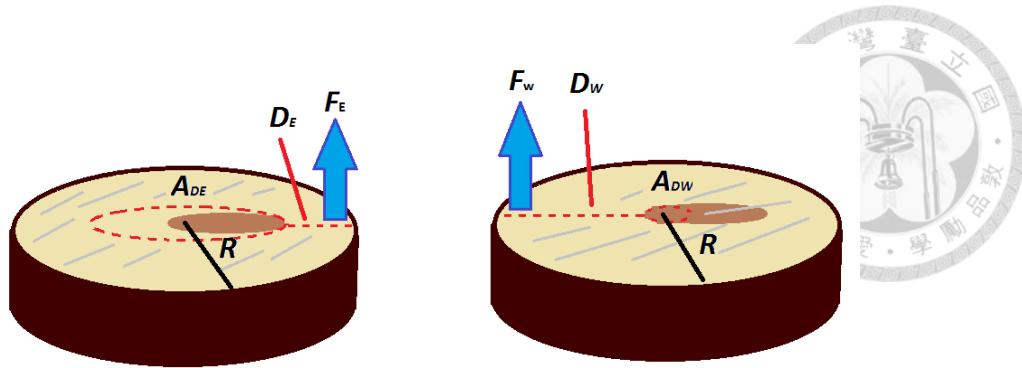


圖 12. 以不同方位之樹液流速及邊材深度計算之樹液流量示意圖，左圖虛線圓圈為以 D_E 推算之邊、心材界線

(2) 深度差異之誤差計算

本章節以考慮不同深度樹液流速所估算之樹液流量為深度標準樹液流量，而深度誤差之定義為：僅以邊材深度 0-2 cm 樹液流速估算之樹液流量，與深度標準樹液流量的差異百分比，表示方式如下：

$$\Delta Q_s = \frac{(Q_s - Qd)100\%}{Qd} \quad (13)$$

Qd 為深度標準樹液流量， Q_s 則是僅以邊材深度 0-2 cm 處樹液流速估算之樹液流量， ΔQ_s 為僅以邊材深度 0-2 cm 處樹液流速估算之樹液流量誤差百分比。

計算 Qd 時，需分別求出邊材深度 0-2 cm、2-4 cm 及 4-6 cm 處之樹液流量，再將其加總，計算公式如下：

$$Qd = (F_{0-2} \times A_{0-2}) + (F_{2-4} \times A_{2-4}) + (F_{4-6} \times A_{4-6}) \quad (14)$$

F_{0-2} 、 F_{2-4} 及 F_{4-6} 分別為邊材深度 0-2 cm 處、2-4 cm 處及 4-6 cm 處之樹液流速， A_{0-2} 、 A_{2-4} 及 A_{4-6} 分別為邊材深度 0-2 cm 處、2-4 cm 處及 4-6 cm 處之邊材面積，若觀測點之樹幹橫切面半徑為 R ，則 A_{0-2} 、 A_{2-4} 及 A_{4-6} 之計算分別為：

$$A_{0-2} = \pi[R^2 - (R - 0.02)^2] \quad (15)$$



$$A_{2-4} = \pi[(R - 0.02)^2 - (R - 0.04)^2] \quad (16)$$

$$A_{4-6} = \pi[(R - 0.04)^2 - (R - 0.06)^2] \quad (17)$$

Q_s 之計算公式為：

$$Q_s = (F_{0-2} \times A_{0-6}) \quad (18)$$

F_{0-2} 為邊材深度 0-2 cm 處之樹液流速 A_{0-6} ，為邊材深度 0-6 cm 處之邊材面積， A_{0-6} 之計算為：

$$A_{0-6} = \pi[R^2 - (R - 0.06)^2] \quad (19)$$

深度誤差之計算與方向誤差之計算相似，以 $\overline{Q_d}$ 及 $\overline{Q_s}$ 為 14 個非降雨日之白晝 Q_d 及 Q_s 資料平均，並以 $\Delta \overline{Q_s}$ 為此 14 日之平均 ΔQ_s ，而計算公式如下：

$$\Delta \overline{Q_s} = \frac{(\overline{Q_s} - \overline{Q_d})}{\overline{Q_d}} \times 100\% \quad (20)$$

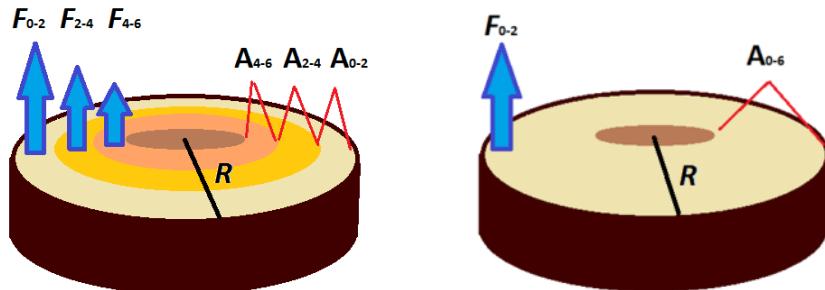


圖 13、以不同深度之樹液流速計算樹液流量之示意圖，左圖為考慮不同深度樹液流速變異，右圖為僅以考慮邊材深度 0-2 公分處



(3) 頂層與底層樹液流量之計算

底層樹液流量之計算考慮不同方向之流速變異，遂將底層四個方位之單位樹液流速作平均，並且乘以底層東西兩側之平均邊材深度所計算之邊材面積，底層樹液流量計算之公式如下：

$$Q_{Bavg} = (F_{Bavg} \times A_{BDavg}) \quad (21)$$

F_{Bavg} 為底層四方位樹液流速平均值， A_{BDavg} 為以底層東、西側平均邊材深度計算之邊材面積。

頂層樹液流量之計算則以頂層南、北兩側樹液流速之平均值，乘以頂層南、北兩側平均邊材深度所計算之邊材範圍，其公式如下：

$$Q_{Tavg} = (F_{Tavg} \times A_{TDavg}) \quad (22)$$

F_{Tavg} 為頂層南、北側樹液流速平均值， A_{TDavg} 為以底層南、北側平均邊材深度計算之邊材面積。

3.5.8. 樹液流速與 VPD 之關係

由於樹液流速與 VPD 之關係為飽和曲線，故本研究利用第一級漸近線非線性混合效應模式(First-order asymptotic nonlinear mixed-effects model)之分析方法擬合。使用之函數為 R 統計軟體 nlme package 中之 SSasympOrig 函數(Pinheiro and Bates, 2000)，以每日白晝(7-16 時)平均 VPD 為自變數，每日白晝平均樹液流速為應變數。該模式共有 2 參數，即漸近線數值(Asymptote)代表達飽和值之白晝平均樹液流速，以及白晝平均樹液流速上升速率常數之自然對數(natural log of rate constant, lrc)。



3.5.9. 儲存水利用計算

儲存水利用之計算為冠層蒸散量與底層樹液流量差值，公式如下：

$$\Delta Q = (Q_C - Q_B) \quad (23)$$

ΔQ 為儲存水之利用狀況， Q_C 為冠層蒸散量， Q_B 為底層之樹液流量。

由於本研究所測得之頂層樹液流量(公式中以 Q_T 表示)僅代表探針上方枝條蒸散量，無法代表全部冠層蒸散量，因此必須先估算冠層蒸散量。由於頂層樹液流量為部分冠層蒸散量，故冠層蒸散量為 a 倍之頂層樹液流量，即：

$$Q_C = a \times Q_T \quad (24)$$

根據 Goldstein *et al.* (1998) 之假設：長時間之冠層蒸散量總和與底層樹液流量總和相當。換句話說，長時間尺度下， a 倍之頂層樹液流量總和會等於底層樹液流量。而係數 a 的推導如下：

$$\sum_i^n Q_C = \sum_i^n a \times Q_T = \sum_i^n Q_B$$

$$a \times \sum_i^n Q_T = \sum_i^n Q_B$$

$$a = \frac{\sum_i^n Q_B}{\sum_i^n Q_T} \quad (25)$$

i 與 n 分別為長時間累積計算之起始與結束時間點。

則冠層蒸散量的估計式為：

$$Q_C = \frac{\sum_i^n Q_B}{\sum_i^n Q_T} \times Q_T \quad (26)$$

綜合上述，儲存水利用計算公式如下：

$$\Delta Q = \left(\frac{\sum_i^n Q_B}{\sum_i^n Q_T} \times Q_T - Q_B \right) \quad (27)$$

ΔQ 為儲存水之利用狀況，因本章節以1小時為單位，必須將原始資料中以半



小時平均值做紀錄之頂層與底層樹液流量，換算成 1 小時之平均值，並將單位換算成 kg h^{-1} ，值為正則是儲存水之消耗，反之則為儲存水之補充。

不同季節之平均每日儲存水消耗量計算方法為：選取該季節取樣期間 Q_C 減去 Q_B 後大於 0 之數值，便將其相加，算出儲存水消耗為正值之面積總和，其便是此段期間內總共消耗之儲存水含量。求得取樣期間之儲存水總消耗量後，再除以該期間之日數，便是該期間之平均每日儲存水消耗量，其單位為 kg day^{-1} 。

因每日冠層蒸散量幾乎等同於林木每日總樹液流量，不同季節平均每日總樹液流量之計算方法則是：先將冠層蒸散量以 1 小時取平均值，且單位換算成 kg h^{-1} ，並從凌晨 1 時累加到午夜 24 時，計算出每日之冠層總蒸散量，即每日總樹液流量。隨後再將此季節取樣期間之每日總樹液流量取平均值，其單位為 kg day^{-1} 。

第四章 結果

4.1. 樹液流速於不同方位之變異

樹幹四方位樹液流速夏季及冬季日變化以 TM3 為例，2010 年 7 月 21 日之樹液流速呈現倒 V 字型波動趨勢，於上午 11 時到達高峰，四個方位樹液流速之標準差隨流速增加而變大，故白天標準差較晚上大；2011 年 12 月 20 日之樹液流速普遍小於 $2 \text{ cm}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，波動趨勢較平緩，且全日之標準差均很小(圖 14)。

以相較於西側樹液流速之迴歸線斜率為基準，三株樣木不同季節中樹幹四個方位樹液流速以東側樹液流速最快。樣木 TM1 部分，夏季東側樹液流速到達最大值 $22.82 \text{ cm}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 時，西側樹液流速為 $15.73 \text{ cm}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，夏季東側樹液流速約為西側樹液流速之 1.54 倍(迴歸式 $y = 1.02 + 1.54x$)，秋季約為 1.77 倍，冬季約為 1.58 倍(圖 15)；樣木 TM3 部分，夏季東側樹液流速到達最大值為 $23.37 \text{ cm}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 時，西側樹液流速為 $10.60 \text{ cm}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，夏季東側樹液流速約為西側樹液流速之 2.33 倍，春季約為 1.98 倍，秋季約為 2.23 倍，冬季約為 2.50 倍(圖 16)；樣木 TMid 部分，夏季東側樹液流速約為西側樹液流速之 3.17 倍，春季約為 3.65 倍，秋季約為 2.32 倍，冬季約為 3.01 倍(圖 17)。

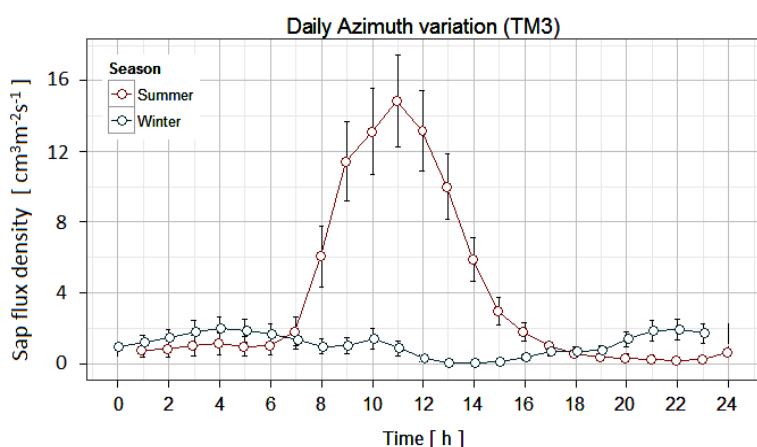


圖 14、樣木 TM3 夏季及冬季之東、西、南、北四個方位樹液流速標準差日變化，夏季以 2010 年 7 月 21 日，冬季以 2011 年 12 月 20 日為例，黑色直槓為東、西、南、北四個方位樹液流速標準差。

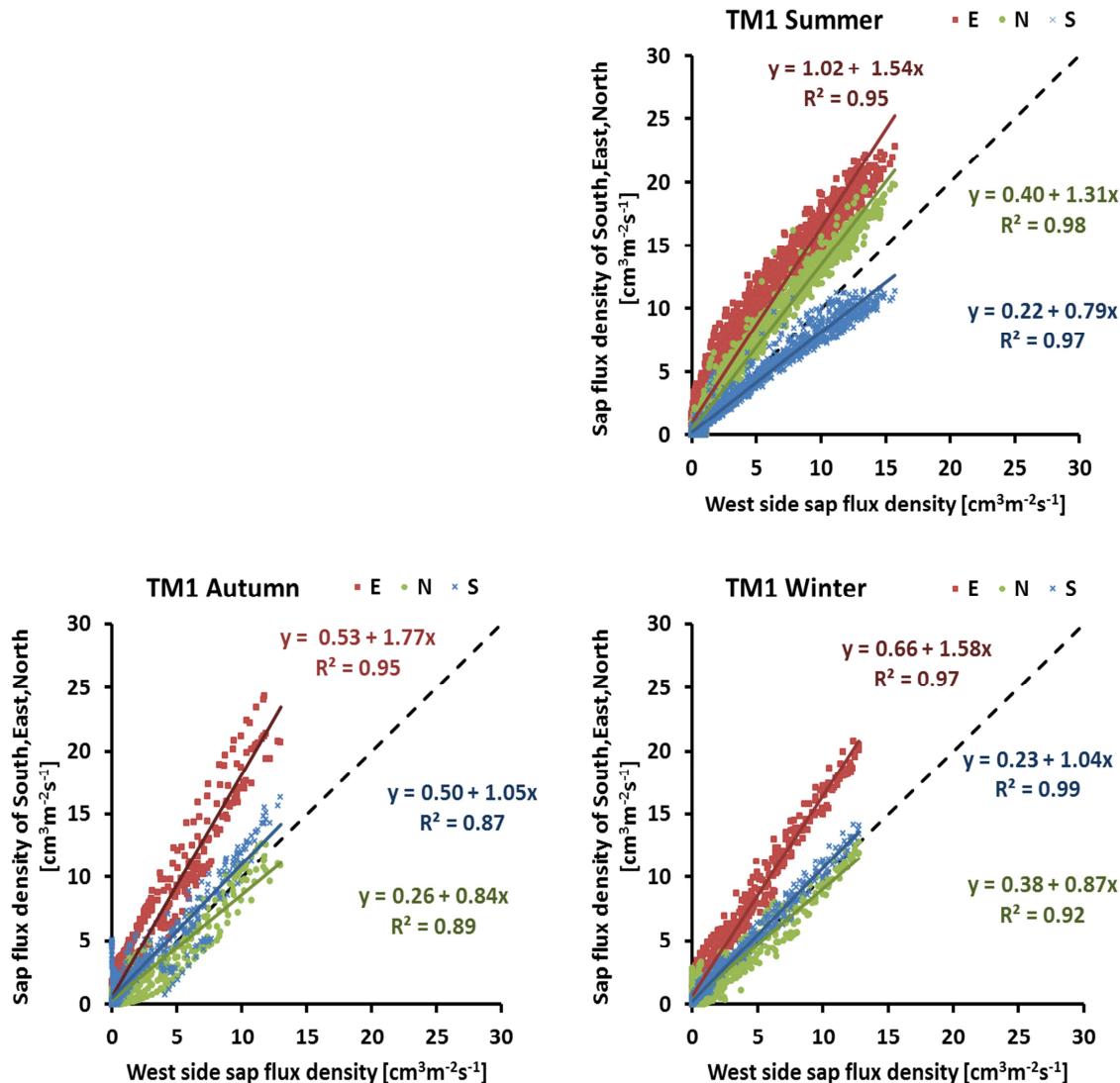


圖 15、樣木 TM1 於不同季節之樹幹四個方位樹液流速比較(春季資料從缺)。西側樹液流速為橫軸，縱軸 E，N 及 S 分別為東側，北側及南側之樹液流速，虛線為 1:1 線。

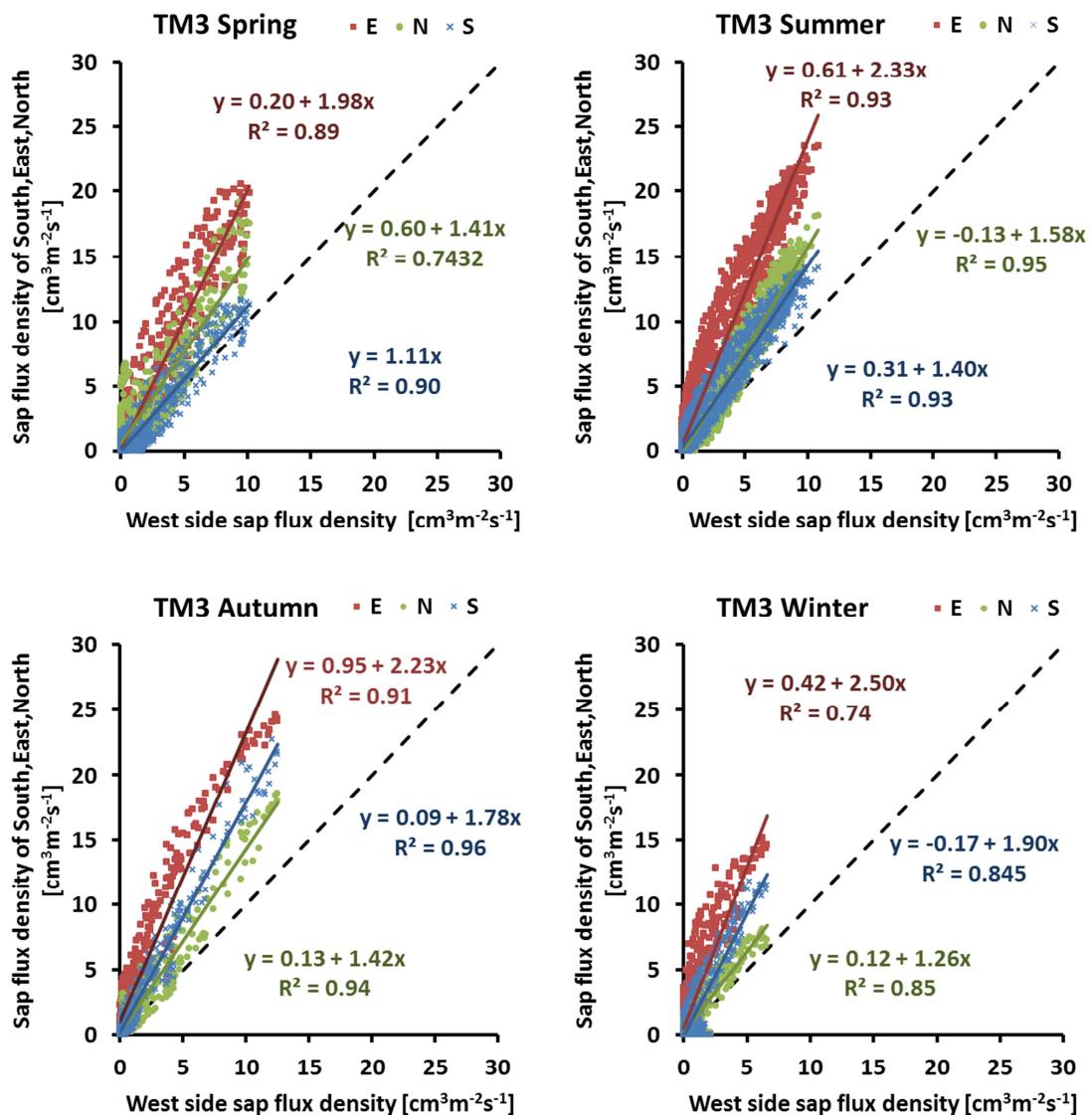


圖 16、樣木 TM3 於不同季節之樹幹四個方位樹液流速比較。西側樹液流速為橫軸，縱軸 E, N 及 S 分別為東側，北側及南側之樹液流速，虛線為 1:1 線。

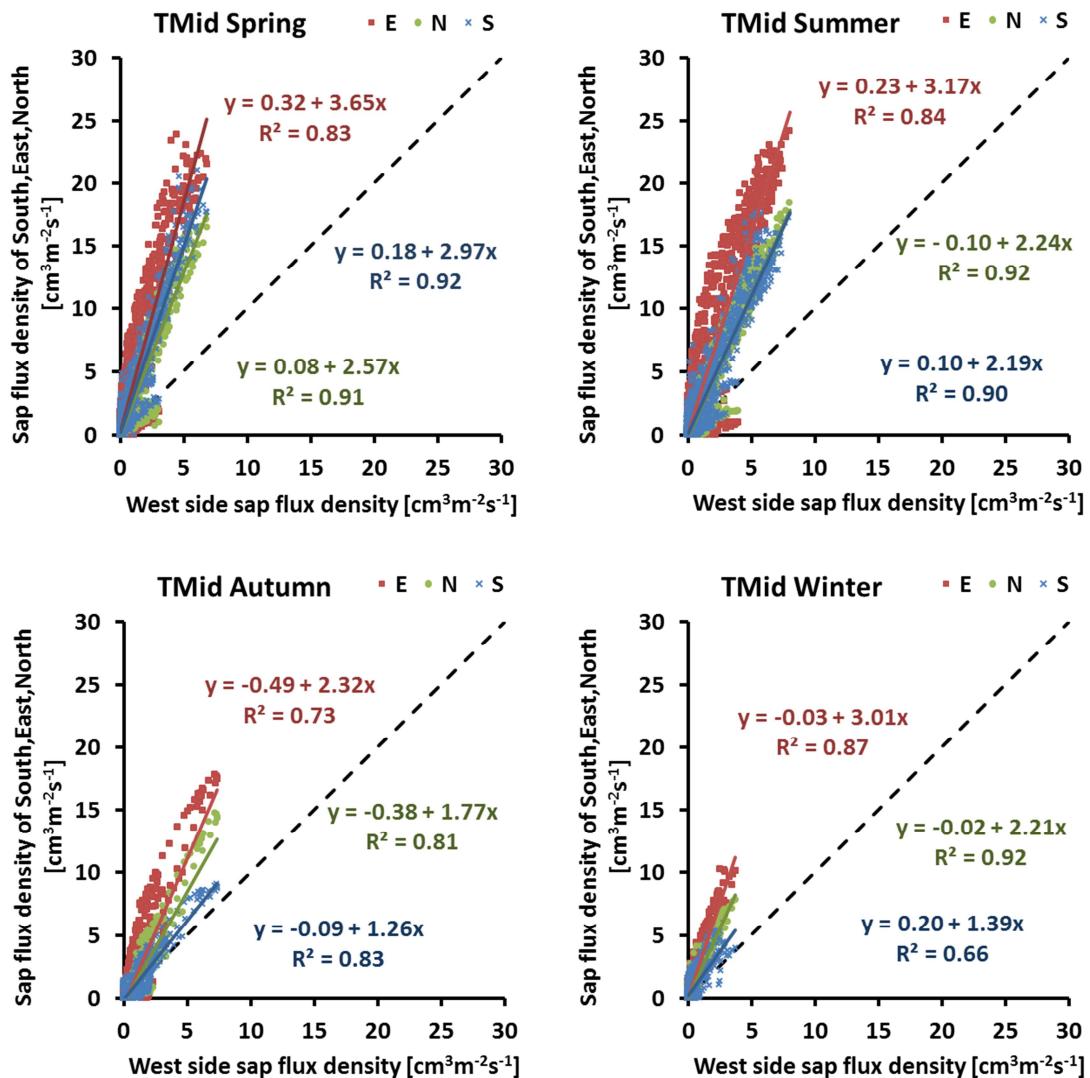
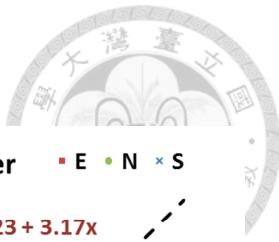
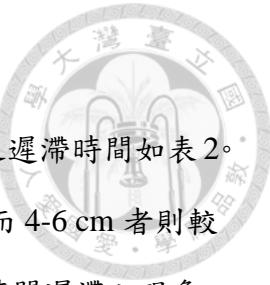


圖 17、樣木 TMid 於不同季節之樹幹四個方位樹液流速比較西側樹液流速為橫軸，縱軸 E，N 及 S 分別為東側，北側及南側之樹液流速，虛線為 1:1 線。



4.2. 樹液流速於不同深度之變異

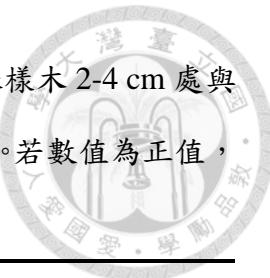
本研究對於邊材往髓心 2-4 cm 及 4-6 cm 處相對於 0-2 cm 處之遲滯時間如表 2。三株樣木 2-4 cm 處之樹液流速大致較 0-2 cm 處慢 0 至 1 小時，而 4-6 cm 者則較 0-2 cm 處慢 0.5 至 2.5 小時；遲滯時間於夏季較長，冬季時幾乎無時間遲滯之現象。

一日之時間遲滯狀況可由時間遲滯迴圈圖瞭解。以 TM3 為例，夏季之 4-6 cm 處樹液流速與 0-2 cm 處者有一明顯之逆時針時間遲滯迴圈，且在凌晨至下午 1 點，4-6 cm 處之樹液流速比 0-2 cm 處慢，下午 1 點過後至晚上 24 點，4-6 cm 處之樹液流速比 0-2 cm 處快。冬季時，4-6 cm 處樹液流速與 0-2 cm 處之時間遲滯迴圈不明顯，表示兩者間幾乎無時間遲滯，其資料點多散布於 45° (亦即 1:1) 線附近(圖 18)。

整體而言，無論春、夏或冬季，邊材往髓心 2-4 cm 處之樹液流速慢於 0-2 cm 處，4-6 cm 處之樹液流速較 2-4 cm 處快，並且與 0-2 cm 處之樹液流速相當。樣木 TM1 部分，邊材 0-2 cm 處至 2-4 cm 處樹液流速降低幅度不明顯，使 2-4 cm 處樹液流速為 0-2 cm 處之 73-87 %，邊材 4-6 cm 處樹液流速則為 0-2 cm 處之 96-116 % (圖 19)。樣木 TM3 部分，邊材 2-4 cm 處樹液流速約為 0-2 cm 處之 62-77 %，邊材 4-6 cm 處樹液流速則為 0-2 cm 處之 69-83 % (圖 20)。樣木 TMid 部分，邊材 2-4 cm 處樹液流速為 0-2 cm 處之 35-75%，邊材 4-6 cm 處樹液流速則為 0-2 cm 處之 45-70 % (圖 21)。

為更清楚瞭解邊材往髓心三個深度樹液流速在不同季節之變化情形，本研究選取各樣木於不同季節中，每日白晝(7-16 時)平均樹液流速較大之 14 天繪製不同邊材深度之樹液流速變異圖(圖 22、23 及 24)。整體而言，以 2-4 cm 處之樹液流速最慢，4-6 cm 處有回升之現象；樹液流速於邊材深度之變異趨勢，以春夏較明顯，秋冬則變異不大。

表 2、以交叉相關函數(Cross correlation function, CCF)求出之三株樣木 2-4 cm 處與 4-6 cm 處相對於 0-2 cm 處之樹液流於四季遲滯時間 (單位:小時)。若數值為正值，則為延遲，為負值則為提早。



Tree	(TM1)2-4	(TM1)4-6	(TM3)2-4	(TM3)4-6	(TMid)2-	(TMid)4-6
	cm	cm	cm	cm	4 cm	cm
春季	0.0	0.5	0.5	0.5	1.0	2.0
夏季	0.0	0.5	0.5	1.0	0.5	2.5
秋季	-	-	-	-	0.5	1.5
冬季	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.5

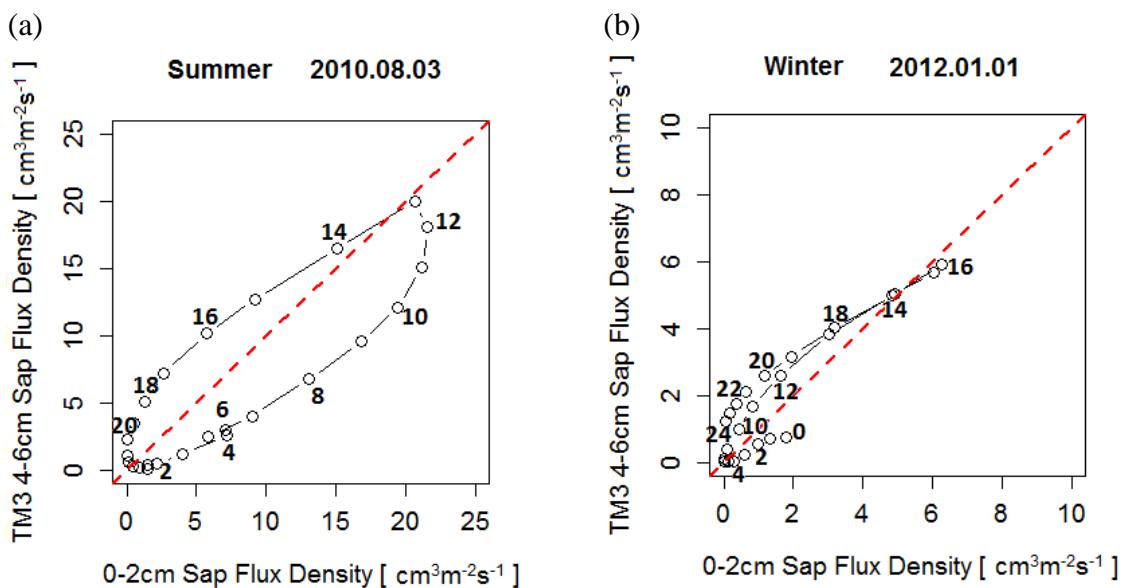


圖 18、樣木 TM3(a)夏季與(b)冬季之 0-2 cm 處與 4-6 cm 處樹液流速日變化分布，虛線為 1:1 線。

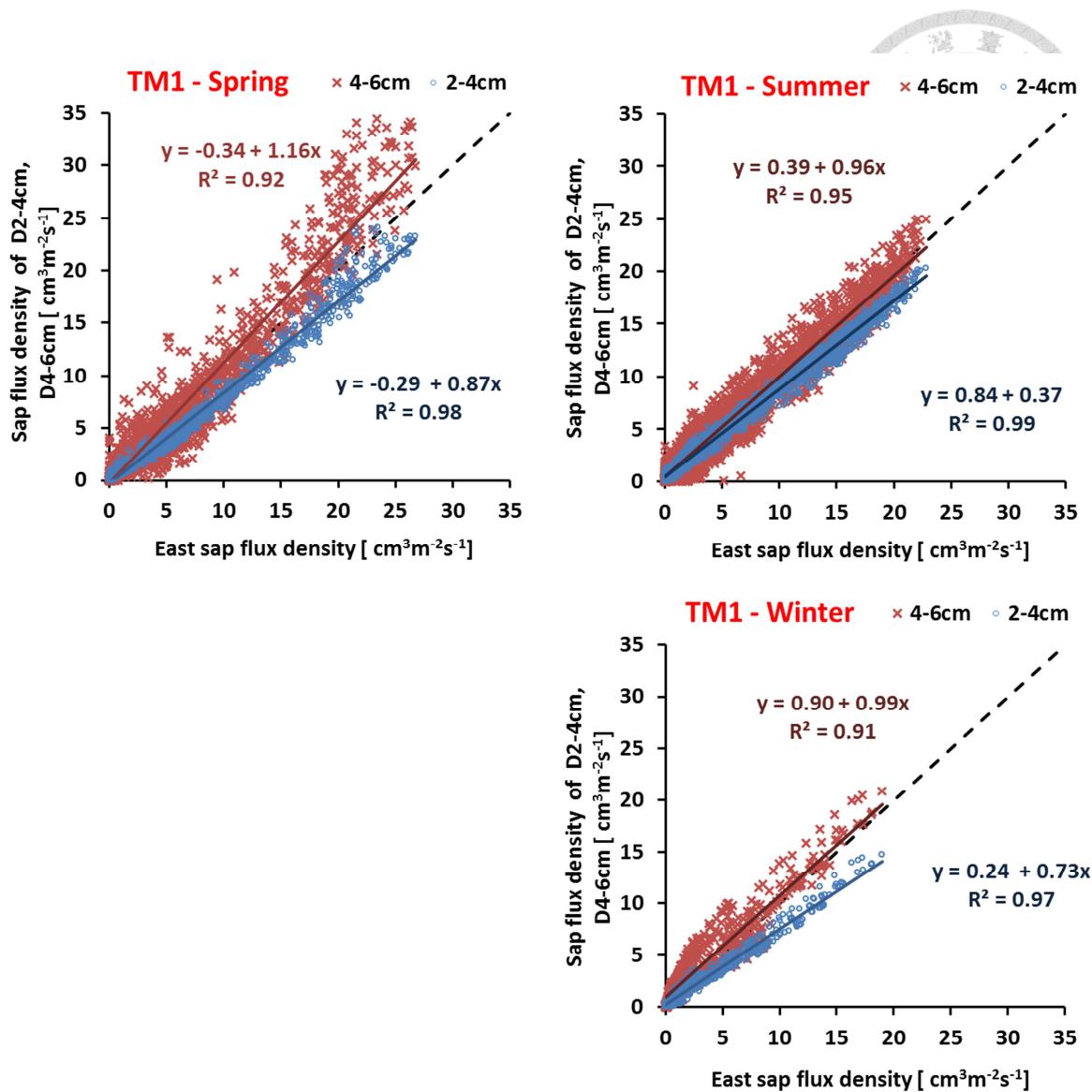


圖 19、樣木 TM1 之 2-4cm 處及 4-6 cm 處相較於 0-2 cm 處之樹液流速於春、夏及冬季之分布狀況。虛線為 1:1 線。

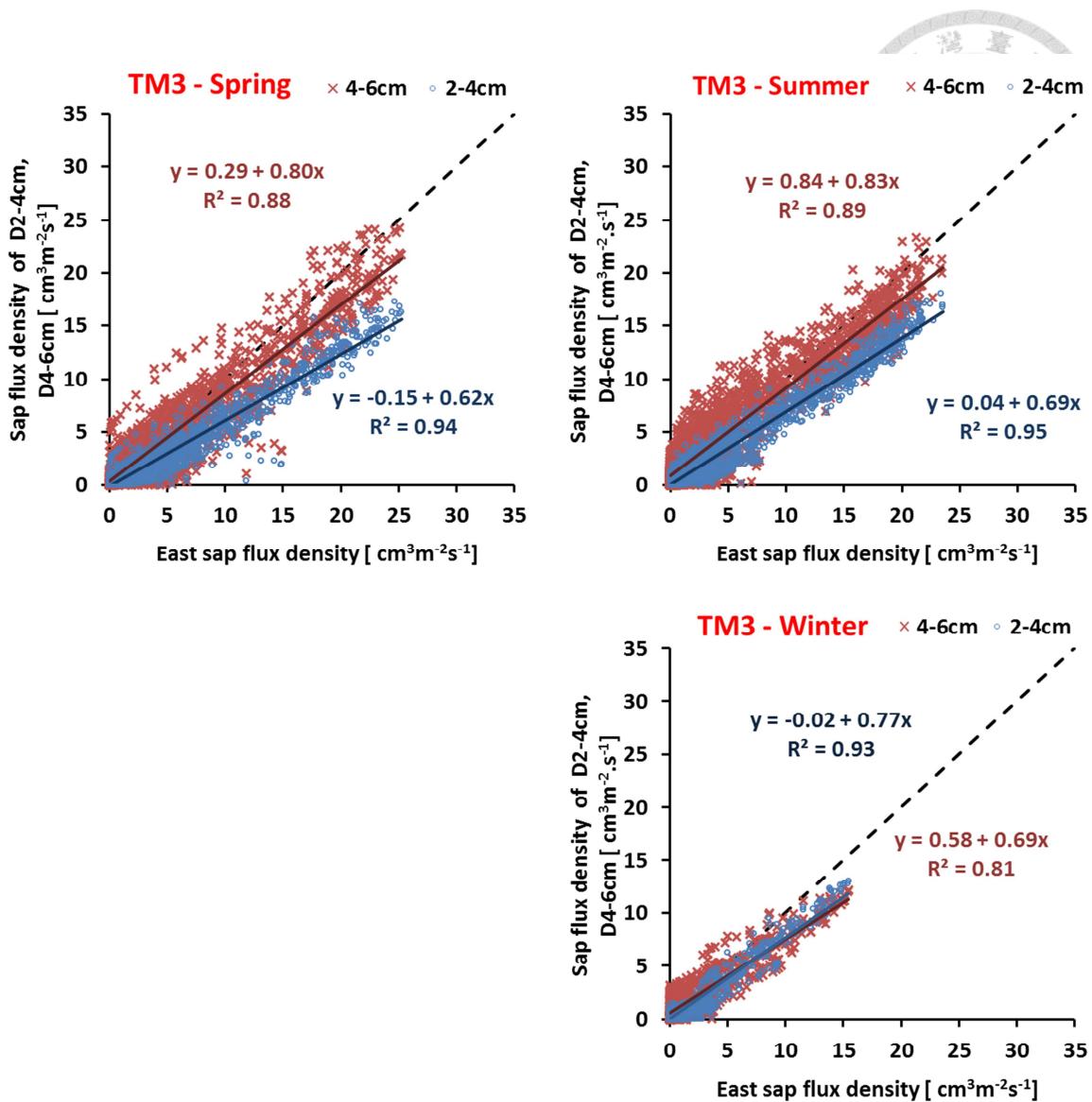


圖 20、樣木 TM3 之 2-4cm 處及 4-6 cm 處相較於 0-2 cm 之樹液流速於春、夏及冬季之分布狀況。虛線為 1:1 線。

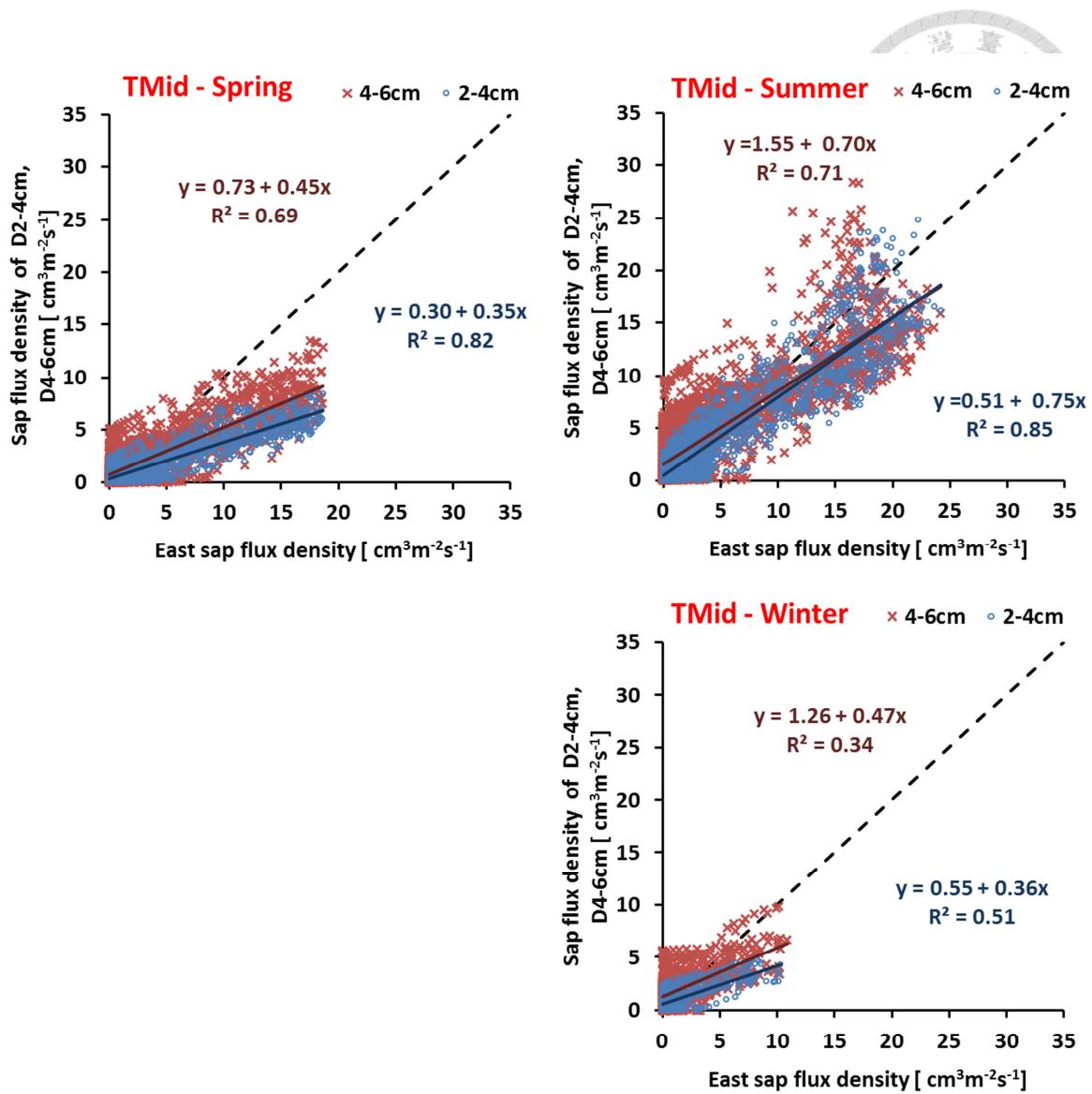


圖 21、樣木 TMid 之 2-4cm 處及 4-6 cm 處相較於 0-2 cm 之樹液流速於春、夏及冬季之分布狀況。虛線為 1:1 線。

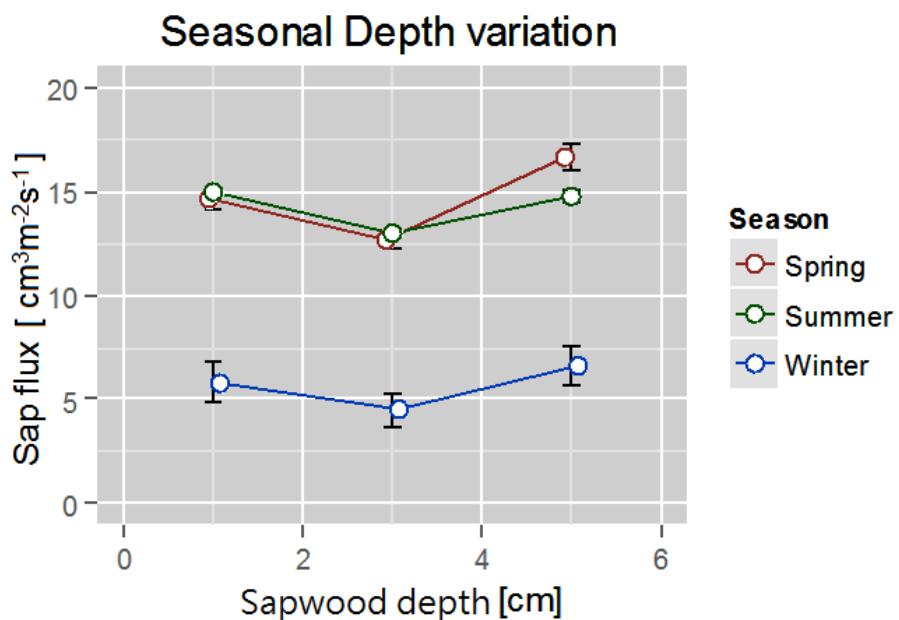


圖 22、樣木 TM1 不同深度 14 筆最大每日白晝樹液流速之平均值於季節之變異，
黑直槓為平均樹液流速土標準機差 (mean \pm se)

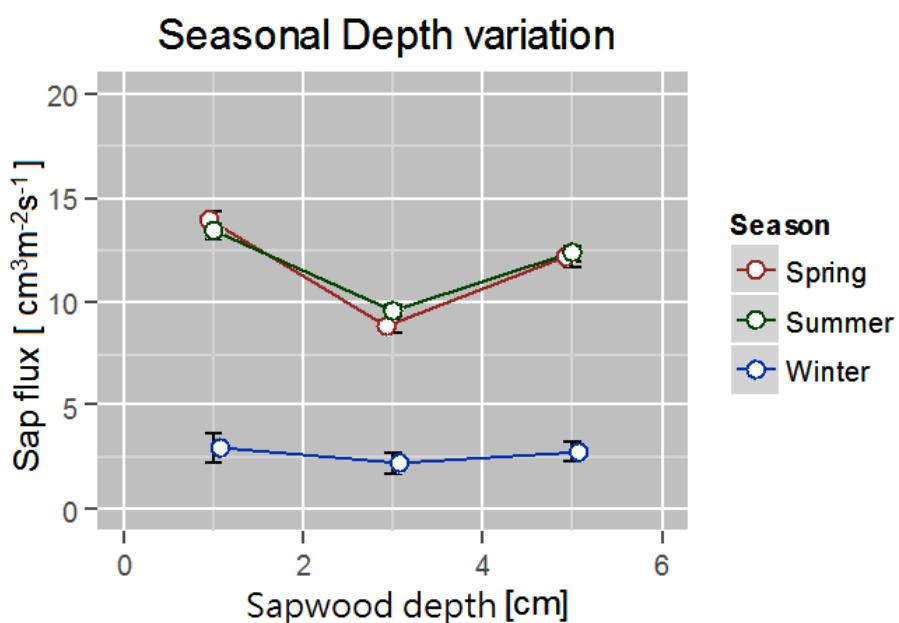


圖 23、樣木 TM3 不同深度 14 筆最大每日白晝樹液流速之平均值於季節之變異，
黑直槓為平均樹液流速土標準機差

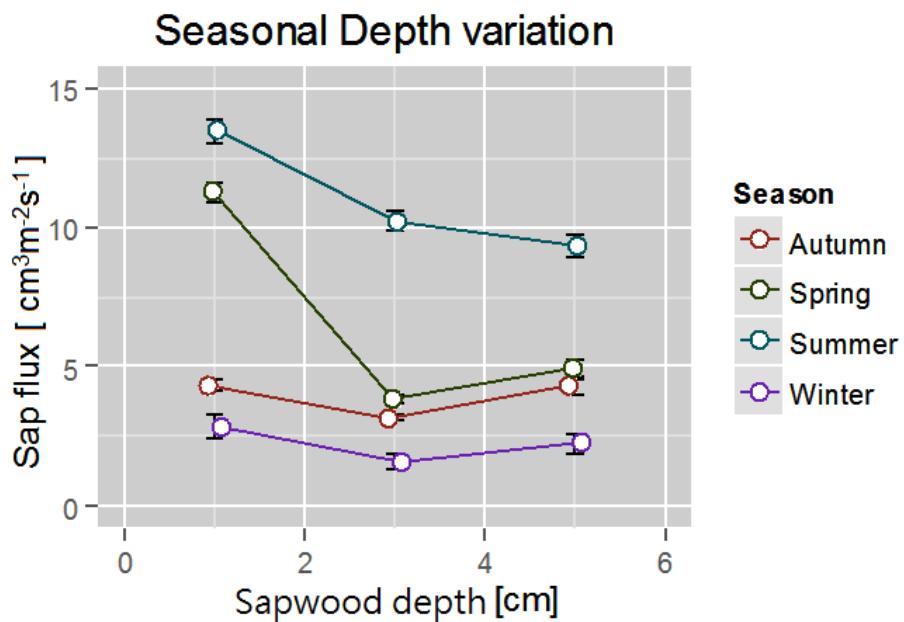


圖 24、樣木 TMid 不同深度 14 筆最大每日白晝樹液流速之平均值於季節之變異，
黑直槓為平均樹液流速土標準機差

4.3. 方位及深度變異與樹液流量估算之誤差

樹幹方位對樹液流量估算之影響，以樣木 TMid 為例，相較於以四個方位平均樹液流速估算之全株樹液流量，若僅以樹幹東側樹液流速估算，除春季僅高估 7.4%，其他季節高估約 30-46%；而若僅以樹幹西側樹液流速估算，則低估了 19-52%（表 3）。

忽略深度變異而僅以邊材往髓心 0-2 cm 處估算全株樹液流量，除於春季時樣木 TM3 與 TMid 分別高估約 21% 及 66%，以及冬季時樣木 TMid 高估約 21% 外，其他季節之誤差範圍均小於 10%（表 4）。

綜合上述，可見樹幹不同方位之樹液流速變異對於樹液流量之估算誤差較大，故本研究估算之全株樹液流速與樹液流量，均以四個方位平均樹液流速為基準。



表 3、相較於以四方位平均樹液流速估算全株樹液流量流速，僅以東或西側流速估算 TMid 樣木全株樹液流量之誤差百分比。

季節	東側(%)	西側(%)
春季	7.44	-52.22
夏季	39.16	-46.59
秋季	30.41	-19.87
冬季	46.32	-42.58

表 4、相較於以不同邊材深度之平均樹液流速估算全株樹液流量，僅以邊材往髓心 0-2 cm 處之樹液流速估算全株樹液流量之誤差百分比。

季節	TM1 (%)	TM3 (%)	Tmid (%)
春季	0.02	21.38	66.08
夏季	3.82	8.64	6.27
秋季	-	-	0.10
冬季	0.37	6.57	21.49



4.4. 不同季節之樹液流狀況

由於每日之樹液流會隨氣象狀況而改變，因此本研究分別於 2010 年夏季(7、8 月)、2012 年冬季(1 月)以及 2012 年春季(3 月)，將此三株樣木之逐時樹液流速(單位 $\text{cm}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，本節內均同，故省略)資料製作盒鬚圖(圖 25-27)。整體而言，春季及夏季樹液流速散布情形相當，冬季則分布較集中，表示春、夏季樹液流速日波動幅度較冬季大；界外值(Outliers)之數量以夏季較少，冬季較多，表示樹液流速之波動狀況於冬季較不穩定。

樣木 TM1 春季樹液流速最大值為 16.25，中位數為 2.87，25% 及 75% 百分位數分別為 7.07 及 0.89；夏季樹液流速最大值為 16.48，中位數為 2.85，25% 及 75% 百分位數分別為 7.18 及 0.92；冬季樹液流速最大值為 8.90，中位數為 0.92，25% 及 75% 百分位數分別為 3.78 及 0.30(圖 25)。

樣木 TM3 春季樹液流速最大值為 12.30，中位數為 1.91，25% 及 75% 百分位數分別為 5.27 及 0.56；夏季樹液流速最大值為 11.17，中位數為 1.41，25% 及 75% 百分位數分別為 4.73 及 0.36；冬季樹液流速最大值為 3.48，中位數為 0.44，25% 及 75% 百分位數分別為 1.50 及 0.17(圖 26)。

樣木 TMid 春季樹液流速最大值為 11.71，中位數為 1.33，25% 及 75% 百分位數分別為 5.05 及 0.57；夏季樹液流速最大值為 11.89，中位數為 1.01，25% 及 75% 百分位數分別為 5.00 及 0.40；冬季樹液流速最大值為 3.92，中位數為 0.58，25% 及 75% 百分位數分別為 3.92 及 0.28(圖 27)。

若忽略晴天、雨天樹液流之差異，平均整個取樣月份之樹液流速之結果如圖 28。夏季部分，2010 年 8 月之 TM1 月平均樹液流速為 4.44，TM3 為 3.25，TMid 為 3.17。冬季部分，2012 年 1 月之 TM1 月平均樹液流速為 3.11，TM3 為 1.80，TMid 為 1.61。春季部分，2012 年 3 月 TM1 月平均樹液流速為 4.72，TM3 為 3.88，TMid 為 3.44，可看出冬季之月平均樹液流速最小，而春季之月平均樹液流速則略大於夏季，其可能與不同年份之氣候狀態有關。

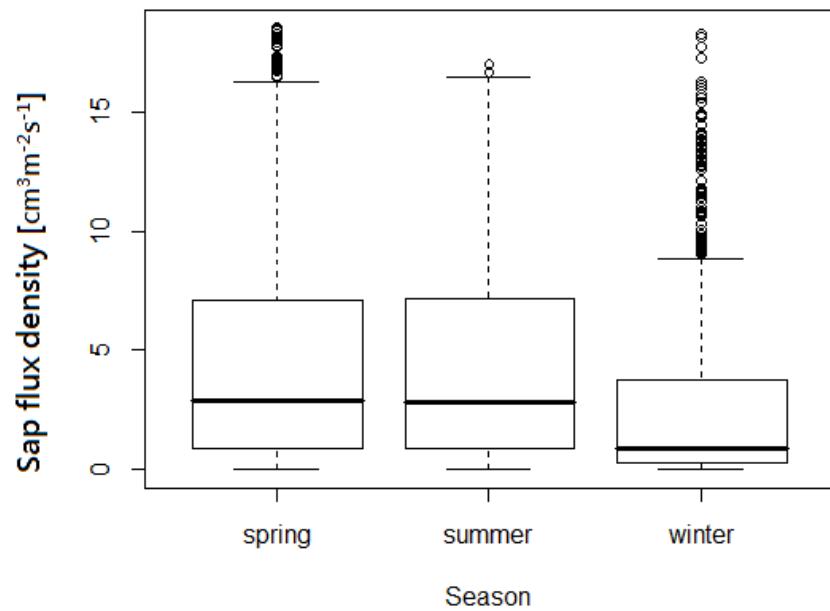


圖 25、樣木 TM1 於不同季節之樹液流速盒鬚圖

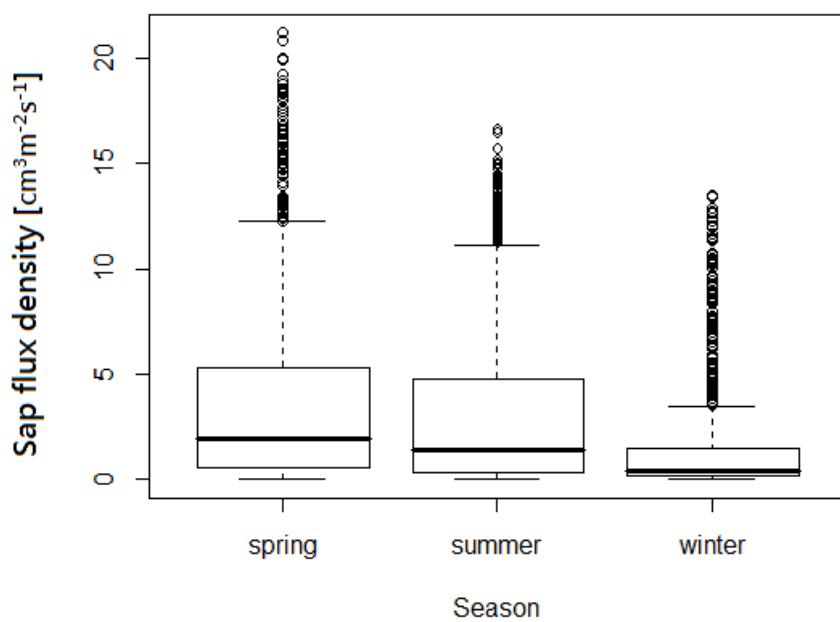


圖 26、樣木 TM3 於不同季節之樹液流速盒鬚圖

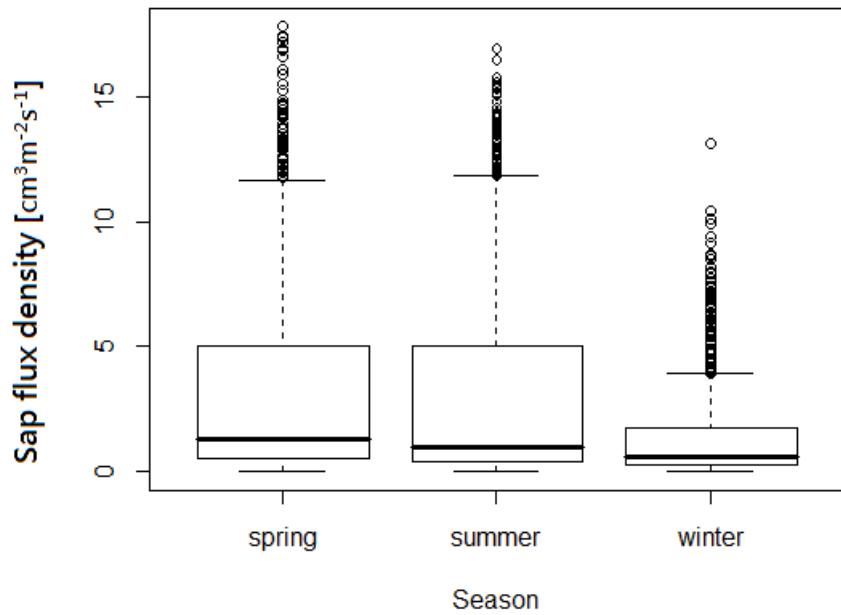


圖 27、樣木 TMid 於不同季節之樹液流速盒鬚圖

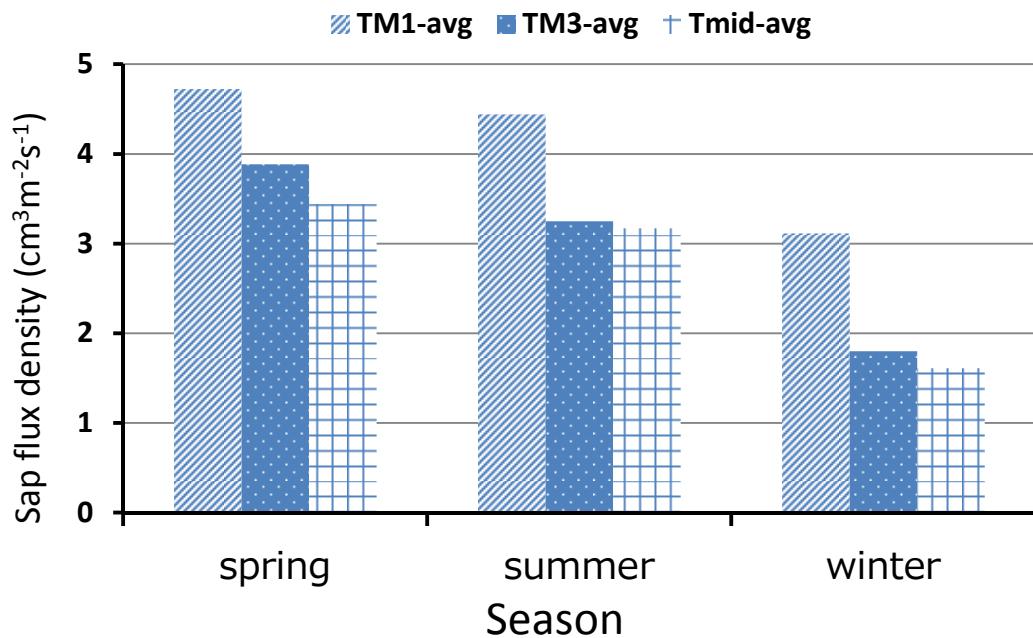


圖 28、三株樣木於 2010 年春、夏及 2012 年冬季之月平均樹液流速



4.5. 樣木 TM1 冠層微氣候概況

從 2010 年夏季連續 5 日之冠層氣溫與相對溼度圖來看(圖 29)，氣溫於上午 6 時至 8 時之間達到最大值，而後開始下降並於晚上或是凌晨時段達到最低；相對溼度方面，每日最低相對濕度時間點與每日最高氣溫時間點一致。以 7 月 13 日為例，其氣溫從清晨 6 時達到最高溫 17.5°C ，而後開始下降至晚上 7 時達到最低溫 9.0°C ，日溫差 8.5°C ；相對濕度於 0 時為 99%，而後開始下降，於清晨 6 時達到相對濕度最低值，其值為 72%，而後開始上升，於上午 10 時達到相對濕度 98.6%，而後均保持在相對濕度 99% 以上，至晚上 21 時候才開始下降(圖 29)。VPD 之日波動明顯受相對濕度與氣溫之影響，由於清晨之氣溫高與相對濕度低，使 VPD 於清晨達到最大值而後開始下降，至下午或晚上才回升。例如，7 月 13 日之 VPD 於清晨 6 時為 0.43 kPa ，為當日最大值，而後便開始下降，於上午 9 時小於 0.05 kPa ，直至 7 月 13 日晚上 23 時回升至 0.05 kPa ，接著便持續上升，至 7 月 14 日清晨 6 時達最大值 0.48 kPa (圖 30)。

2011 年冬季連續 5 日之冠層氣溫與相對濕度如圖 31，其全日氣溫於 6°C 上下，白天時氣溫略微上升，但日夜溫差小，不似夏季氣溫有明顯之日波動趨勢。而某些日期有連續兩日氣溫持續下降的狀況，可能為寒流來襲。相對濕度方面，基本上無明顯之日波動趨勢，且大致維持在 80% 以上，僅在 12 月 18 日晚上 19 時至 12 月 19 日凌晨 2 時之相對濕度降至 40-60%，使 VPD 升至接近 0.5 kPa 。除了 12 月 18 日之特殊狀況，整體而言，因氣溫低與相對濕度高，使其冬季 VPD 大致分布於 0.1 kPa 上下 (圖 32)。

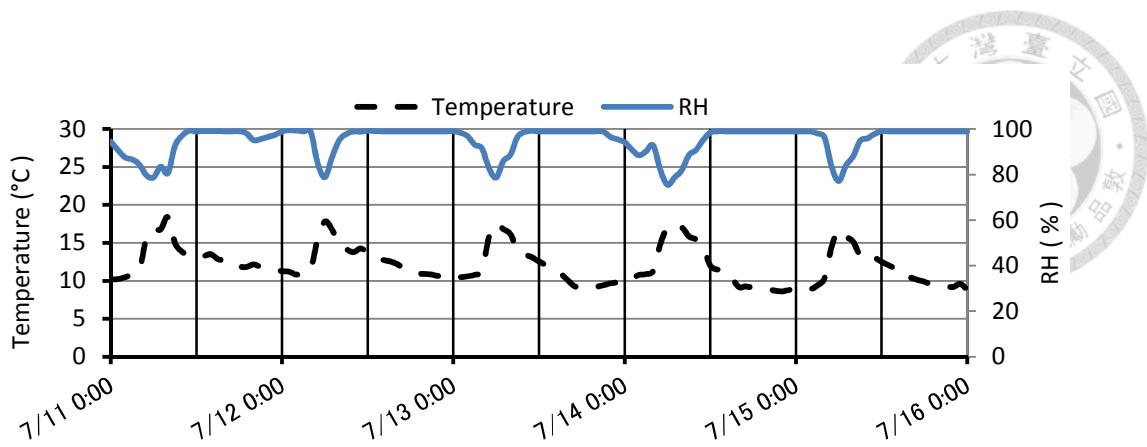


圖 29、樣木 TM1 冠層於 2010 年夏季連續 5 日之溫度及相對濕度變化

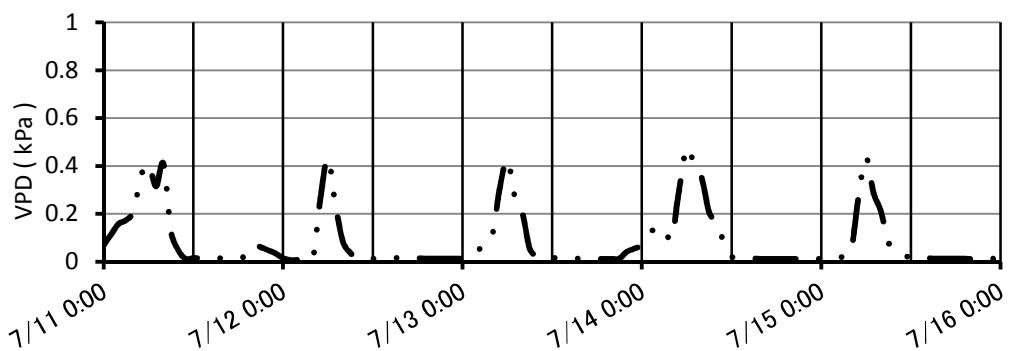


圖 30、樣木 TM1 冠層於 2010 夏季連續 5 日之 VPD 變化

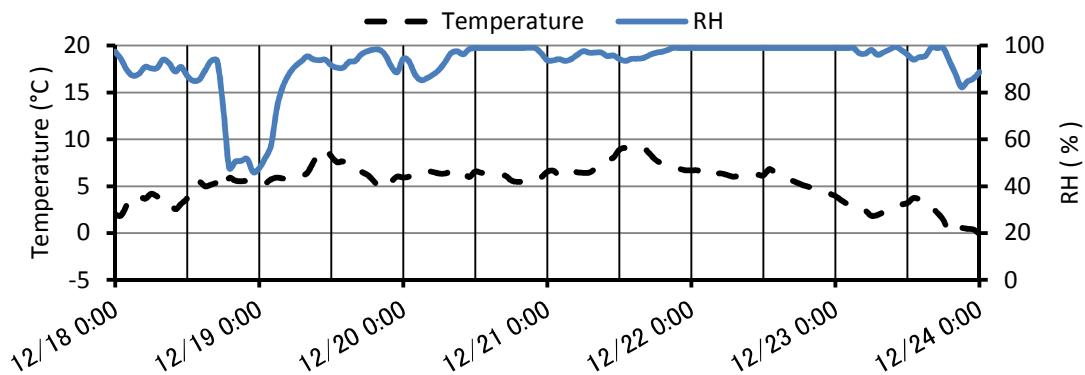


圖 31、樣木 TM1 冠層於 2011 冬季連續 5 日之溫度及相對濕度變化

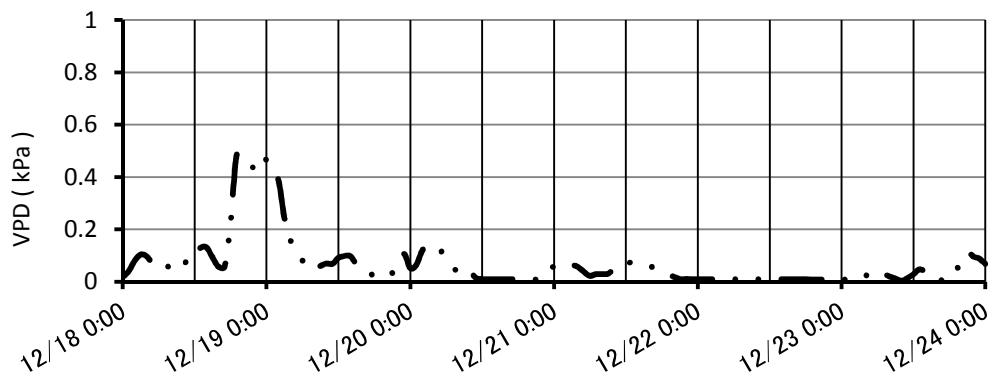


圖 32、樣木 TM1 冠層於 2011 冬季之 VPD 連續日變化分布

4.6. 樹液流速與 VPD 之關係

從樣木 TM3 於 2010 年夏季其中連續 3 日之樹液流速與 VPD 的日變化來看(圖 33)，VPD 分別於凌晨 3 時、0 時以及晚上 20 時開始上升，清晨 6 時一致達到最大值後開始下降，並於中午 11 時至下 13 時之間降至低點；而此 3 日之樹液流速分別於清晨 7 時、5 時以及 5 時開始急遽上升，而於中午 11 時一同達到最大值後開始下降，並於晚上 18 時或 19 時降至低點。由上述可知，樹液流速與 VPD 之日波動變化有相似的趨勢，但 VPD 比樹液流速提早 5 個小時達到最大值，而樹液流速達到最大值時，正逢 VPD 降至低點。樹液流速在晚上並不會全部停止，而是保持著大約 $0.028 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的流動速率。

從樣木 TM3 於 2011 年冬季其中 3 日之樹液流速與 VPD 的日變化圖來看(圖 34)，VPD 與樹液流速並無規律的日波動趨勢。此三天之 VPD 維持在 1.45 kPa 以下，而樹液流速則不超過 $5 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

從樹液流速與 VPD 的關係圖 (圖 35、36) 可知，在達到特定 VPD 之前，樹液流速會隨著 VPD 增加而增加，但到達該 VPD 之後，樹液流速趨向穩定，不再增加。本研究以每日白晝平均 VPD 與樹液流速做計算。結果如圖 35，從 2010 年生長季(4-9 月)每日白晝平均 VPD 與每日白晝平均樹液流速之飽和曲線圖來看，TM1 在 VPD 為 0.35 kPa 時達到樹液流速之飽和值 $10.58 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，TM3 在 VPD

為 0.50 kPa 時達到樹液流速之飽和值 $10.43 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，TMid 在 VPD 為 0.53 kPa 時達到樹液流速之飽和值 $11.07 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。三株樣木經由合併計算之樹液流速與 VPD 之關係如圖 36，當 VPD 為 0.43 kPa 時，樹液流速達到飽和值 $10.74 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，上升速率常數之自然對數為 2.73。

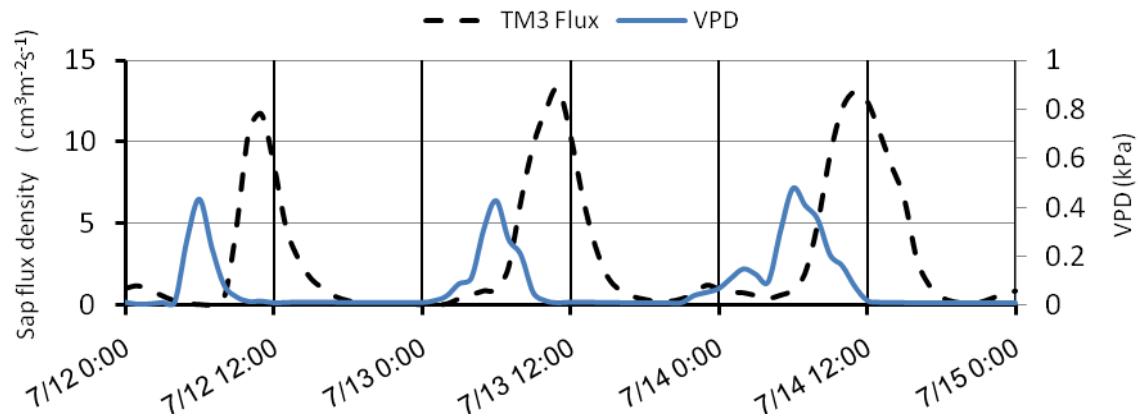


圖 33、樣木 TM3 於 2010 夏季連續 3 日樹液流速與 VPD 之連續日變化

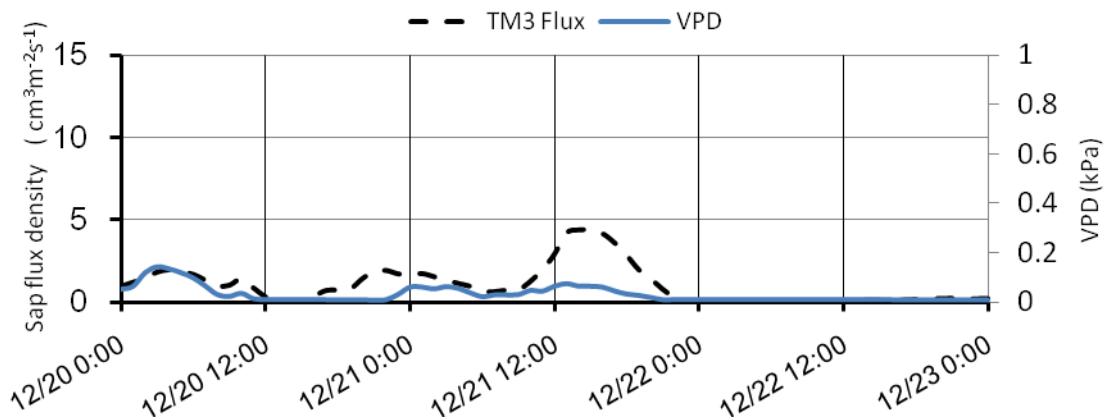


圖 34、樣木 TM3 於 2011 年冬季連續 3 日樹液流速與 VPD 之連續日變化

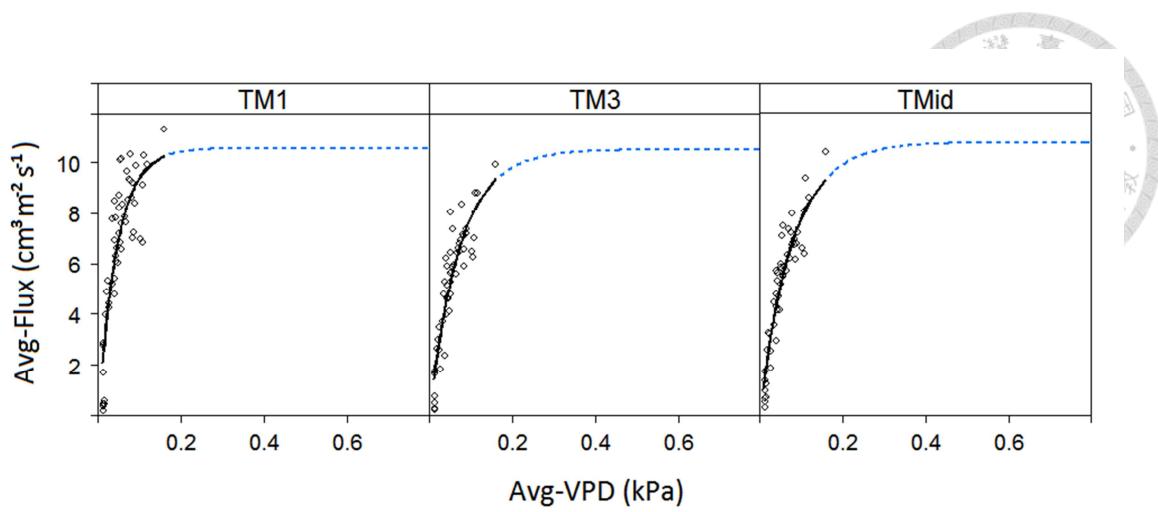


圖 35、三株樣木於生長季每日白晝平均樹液流速與平均 VPD 之關係曲線。圖中圓圈為實際觀測之每日白晝平均樹液流速與每日白晝平均 VPD 分布，實線為利用 NLME 統計方法擬合之曲線，虛線為擬合曲線於實際觀測值外之預估數值。

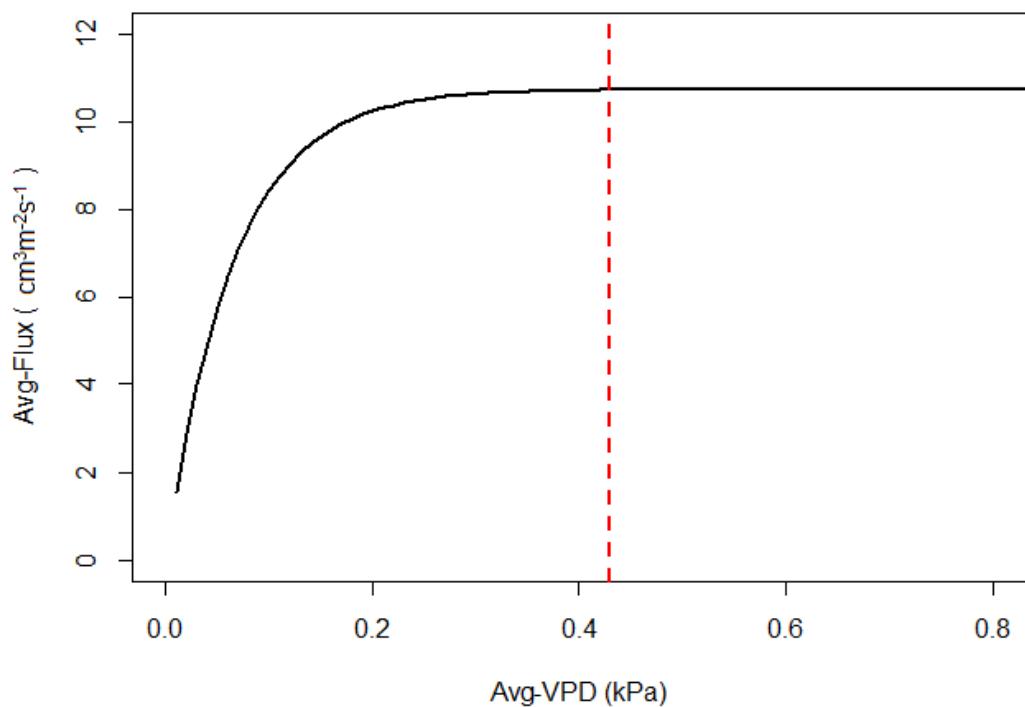


圖 36、三株樣木以 NLME 統計方法合併計算之飽和曲線。虛線與橫軸之交點為樹液流速達到飽和時對應之 VPD。



4.7. 樹液流時間遲滯與儲存水利用狀況

以樣木 TM3 於夏季 2010 年 8 月 1 日為例，其冠層蒸散量與底層樹液流量在午夜 0 時仍分別有 0.07 及 $0.02 \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ 之流量，之後冠層蒸散量持續上升至上午 9 時到達最大值 $3.86 \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ ，底層樹液流量自午夜 0 時上升，於清晨 4-6 時稍微減慢後隨即持續上升至中午 11 時才達最大值 $3.78 \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ ，較冠層蒸散量到達最大值之時間延遲 2 小時。凌晨 3 時至上午 9 時以及下午約 14 時至 18 時之冠層蒸散量大於底層樹液流量，使當日儲存水消耗量為 9.91 kg ；凌晨 0 時至 3 時、上午 9 時至下午 14 時以及晚上 18 時至 24 時之底層樹液流量大於冠層蒸散量，使當日儲存水補充量為 18.6 kg ，全日儲存水總共補充 8.69 kg (圖 37、38)。冬季 2011 年 12 月 19 日之冠層與底層樹液流於夜晚時還有約 $0.1 \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ 的流量，且均於上午 8 時開始上升，冠層蒸散量於下午 13 時到達最大值 $2.28 \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ ，而底層樹液流量於下午 14 時才到達最大值 $2.56 \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ ，較冠層蒸散量延遲 1 個小時。午夜 0 時至中午 12 時冠層蒸散量均大於底層樹液流量，使當日儲存水消耗量為 9.03 kg ；中午 12 時至午夜 24 時，底層樹液流量大於冠層蒸散量，使當日儲存水補充量為 7.16 kg ，全日儲存水總共消耗 1.87 kg (圖 39、40)。

為了方便比較，本研究之每日冠層蒸散量即為每日總樹液流量，而夏季及冬季平均每日儲存水消耗量及平均每日總樹液流量之關係如表 5。冠層平均每日蒸散出的水分中，儲存水即占了 $10-29\%$ 。樣木 TMid 在冬季時，儲存水占平均每日蒸散出水分中 28.21% ，比例相當高。夏季之平均每日儲存水消耗量及平均每日總樹液流量大於冬季。樣木 TM1 因胸徑較樣木 TM3 及樣木 TMid 大，冬季平均每日儲存水之消耗及平均每日樹液流量相對較高。

在時間遲滯方面，雖然在上述例子中夏季及冬季單日樹液流量達到最大值的時間點，底層樹液流較冠層蒸散延遲約 1-2 個小時 (圖 37、39)，然 CCF 結果顯示，TM1 冬季底層樹液流較冠層蒸散遲滯時間 0.5 小時；TM3 夏季底層樹液流較冠層蒸散遲滯 0.5 小時，冬季則無遲滯現象；TMid 夏季與冬季季底層樹液流較冠層蒸



散遲滯時間均為 0.5 小時 (圖 41)。

表 5、三株樣木於夏季及冬季之平均每日儲存水消耗量及冠層蒸散量比較

樣木	季節	儲存水	冠層蒸散量	儲存水消耗/
		消耗量 (kg)		冠層蒸散量 (%)
TM1	冬	7.26	66.85	10.86
TM3	夏	12.34	70.49	17.50
	冬	5.34	42.09	12.68
Tmid	夏	7.86	38.61	20.35
	冬	4.70	16.65	28.21

本研究因之各季節資料選取日期：

樣木 TM1 冬季：2011/12/18-2012/1/12，夏季因無資料，故不列入比較。

樣木 TM3 夏季：2010/8/1-8/30、冬季：2011/12/17-2012/1/12；

樣木 TMid 夏季：2010/8/1-8/30、冬季：2011/12/16-2012/1/12

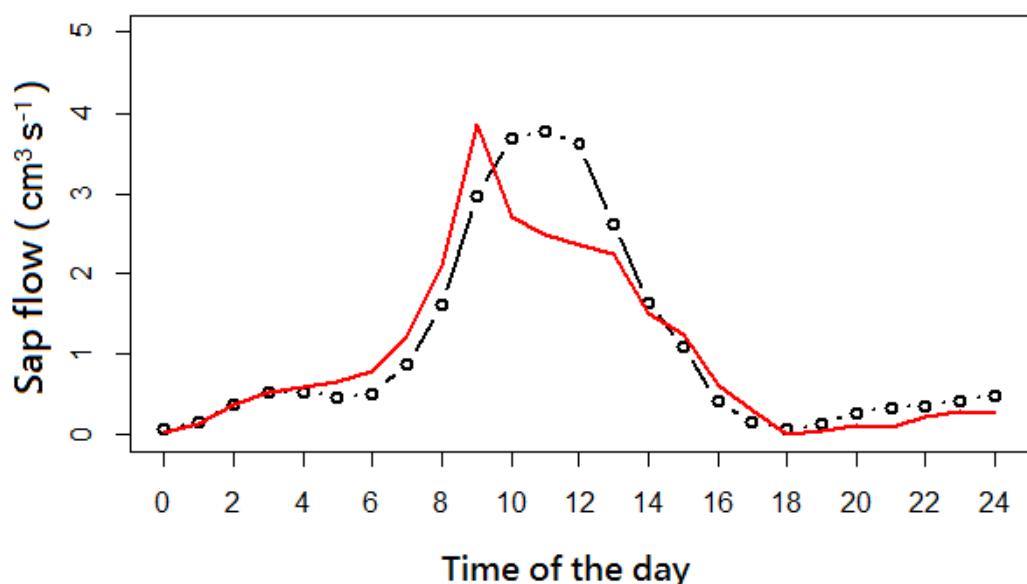


圖 37、樣木 TM3 於 2010 年 8 月 1 日之冠層蒸散量與底層樹液流量。實線為冠層蒸散量，圓點虛線為底層樹液流量

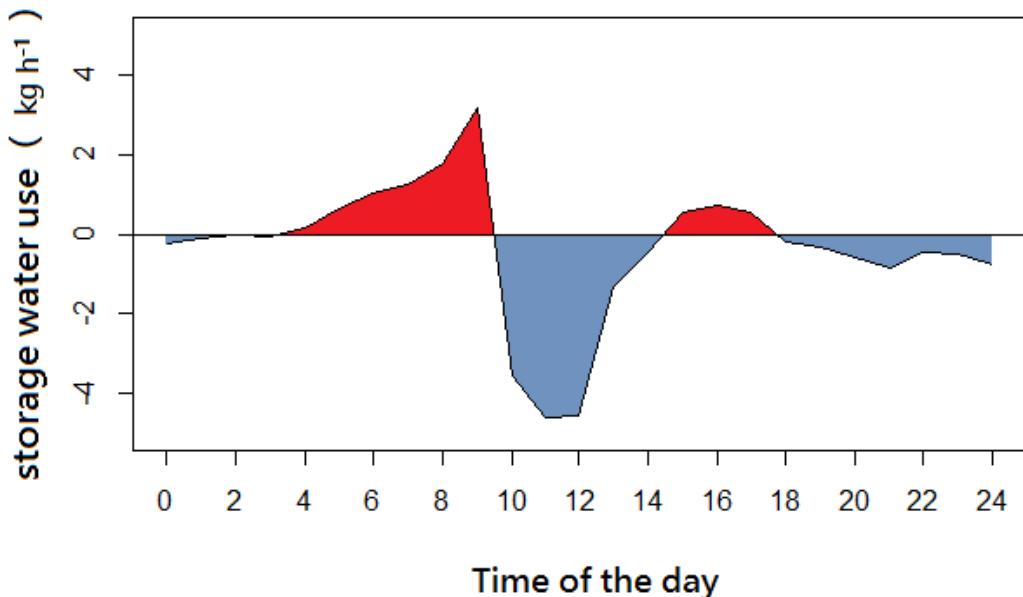


圖 38、樣木 TM3 於 2010 年 8 月 1 日單日儲存水利用狀況。正值面積為儲存水之消耗，負值面積為儲存水之補充

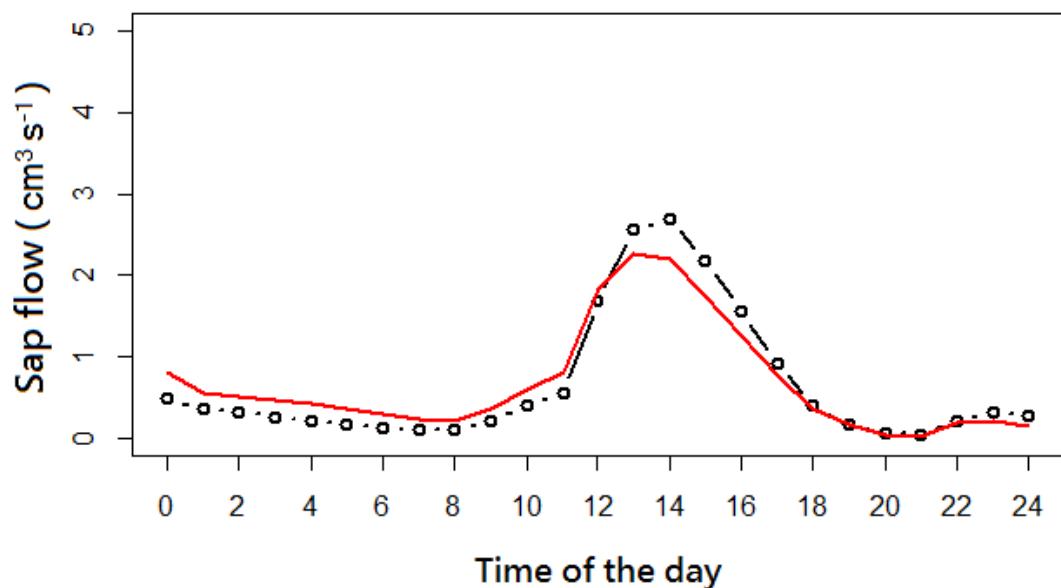


圖 39、樣木 TM3 於 2011 年 12 月 19 日冠層蒸散量與底層樹液流量。實線為冠層蒸散量，圓點虛線為底層樹液流量

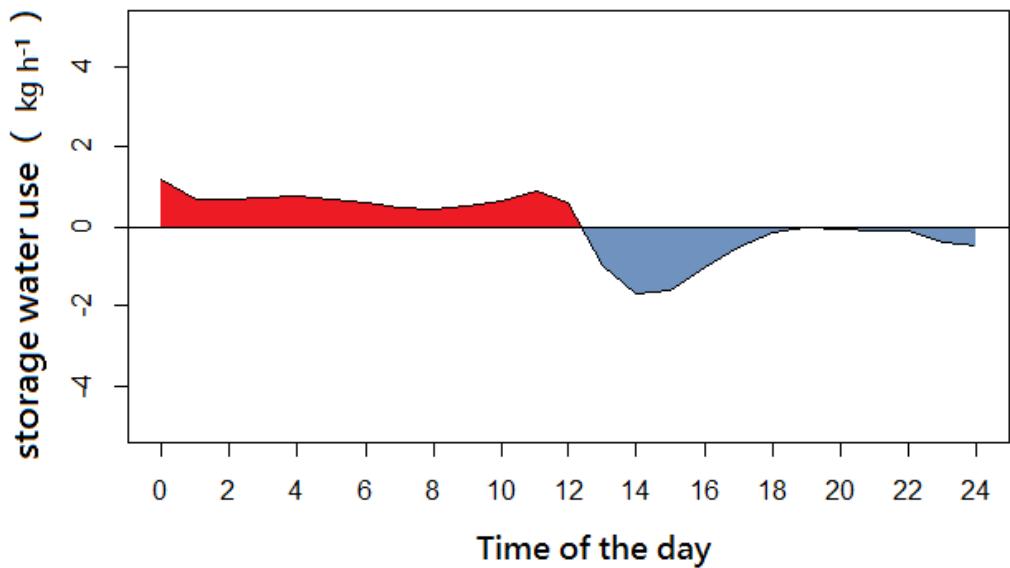


圖 40、樣木 TM3 於 2011 年 12 月 19 日儲存水利用狀況。正值面積為儲存水之消耗，負值面積為儲存水之補充

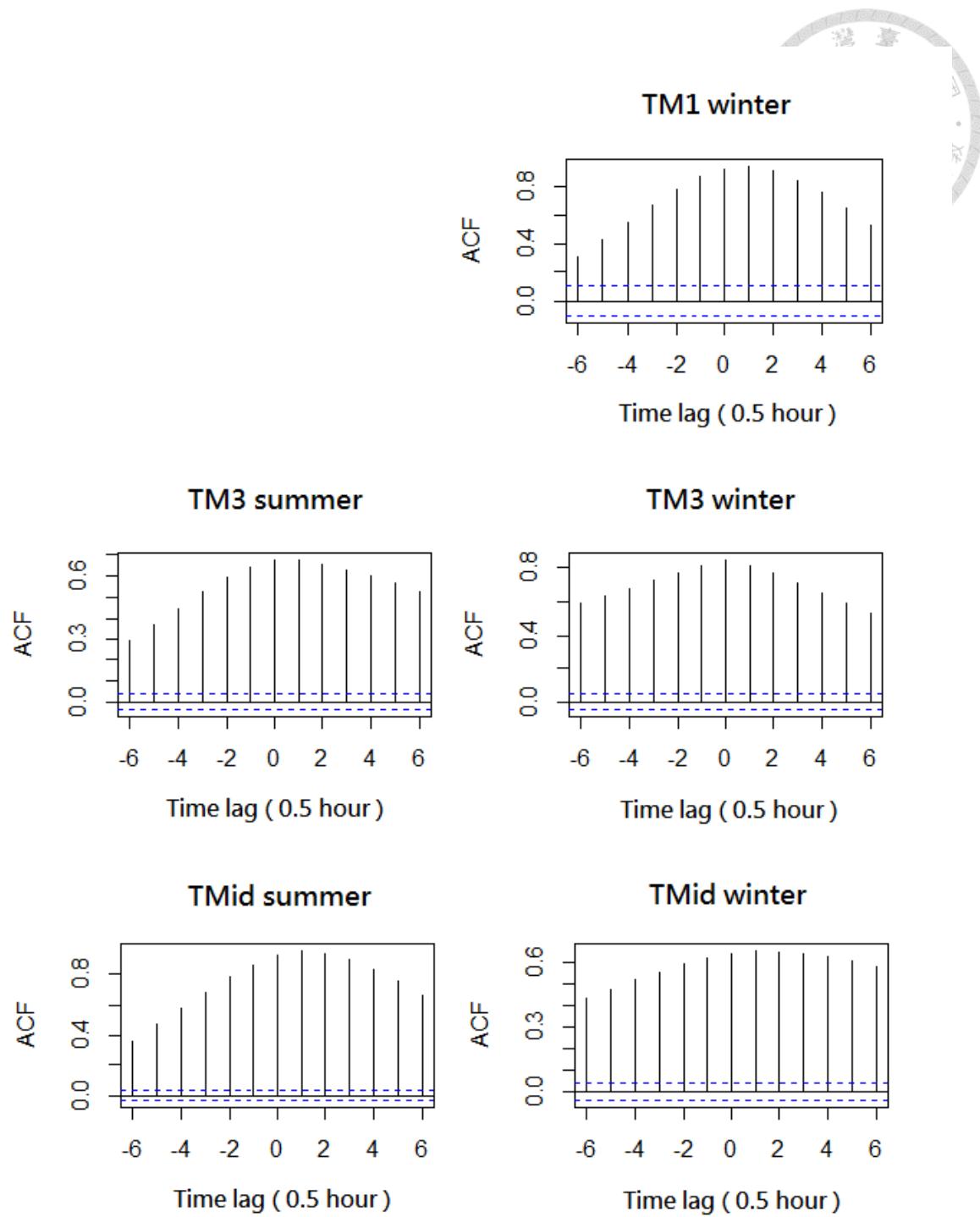


圖 41、各樣木於夏季及冬季底層樹液流與冠層蒸散之時間遲滯。橫軸為遲滯時間，縱軸為相關係數，TM1 夏季缺資料故不列入比較

第五章 討論

5.1. 樹液流速於不同方位角之變異

本研究結果顯示，此三株樣木在不同季節均有東邊樹液流速最快，西邊樹液流速普遍較慢之情況。從前人研究中可知不同方位之樹液流速確有其變異，但卻沒有一定的規律，而造成此變異的原因主要受何種因子影響目前仍未知。本研究試著以兩種可能性作解釋，其一為不同邊材密度及管胞水分輸導效率所造成的影响，另外則為冠層蒸散狀況之影響。

管胞水分輸導效率方面，以反應材做為探討。闊葉樹的反應材會出現在林木之上坡處，或是枝條之上端，稱為引張材(tension wood)，而針葉樹之反應材會出現在林木下坡處，或是枝條下側，稱為壓縮材(compression wood)(Wilson and Archer, 1977)。壓縮材的管胞孔徑較狹短小，具較厚的細胞壁，且樹輪寬度較寬(Lee and Eom, 1988)。由於管胞孔徑大小可影響林木水分輸導之效率，管胞孔徑越大者，水分傳導越快，反之則傳導越慢(Lange *et al.*, 1982)，因此壓縮材之疏導水分效率較對向正常邊材差。此樣區坡向為東南往西北傾斜，且樣木 TM1 及 TM3 之上坡處均在東方，樣木 TMid 之上坡處在東南處，因此可能使樣木基部西側有反應材生成。由於樣木 TM1、TM3 及 TMid 西側探針位置在會形成壓縮材之下坡處，因此有機會測得受壓縮材影響之樹液流，而得到樹幹西側樹液流速較慢，東側樹液流速較快之結果。

若欲以冠層蒸散狀況來解釋，首先可以從枝葉茂密程度來探討，通常蒸散作用速率與葉面積成正相關，因此使代表葉面積之葉面積指數在一定範圍內且於土壤水充足時，與蒸散作用呈線性遞增關係(Granier *et al.*, 2000)，但本研究三株樣木枝葉茂密處並非在東側，因此東側樹液流速為最快之結果並非直接受其影響。若由光環境對冠層之影響來解釋，可以晴天與陰雨天之樹幹四個方位樹液流速差異程度來探討。如果受光環境影響，晴天時，冠層東側受光照較多則樹幹東側樹液流速較其他方位快則為合理之現象；陰雨天時，受陽光散射之影響，樹幹四個方



位樹液流速則無明顯差異(Tsuruta *et al.*, 2010)。但本研究發現無論晴天或陰雨天，樹幹不同方位間樹液流速比例並無太大變化，即東側樹液流速較快之現象並不受到冠層東側光照狀況影響。葉面積與光環境對於冠層蒸散作用之影響是否直接干涉樹幹基部樹液流速於方向上之變異，可以兩種管胞傳導模式來探討，即 Fully-coupled model 與 Isolated model。如前言所示，需為 Isolated model 之樹種才得以直接從樹幹基部某方位的樹液流狀況得知冠層某方位之蒸散情形(Nadezhina, 2010)，臺灣雲杉之管胞傳導模式目前雖仍未知，然綜合上述，可推測為 Fully-coupled model，但需再經由進一步實驗才能確認。

5.2. 樹液流速於不同深度之變異

James *et.al* (2002)對於四種不同直徑之闊葉樹進行不同邊材深度之樹液流速觀測顯示直徑 0.34 m 及 0.2 m 之樣木，其樹液流速於邊材深度的變化與一般趨勢相同，即在邊材往髓心 0-2 cm 處樹液流速最快，而後便隨著深度增加而流速減少；但在直徑 0.98 m 與 0.65 m 之樣木上，則發現最大樹液流速發生於邊材往髓心 5-10 cm 處。

從上述例子中可發現，直徑較大者之邊材樹液流速並非隨著深度增加而遞減，反而能於某個深度範圍內保持著較高之樹液流速。本研究之樣木直徑均大於 0.86 m，且樹液流速於 4-6 cm 有回升現象，其原因或許可以樣木直徑大小作解釋。部分學者以不同相對邊材深度(relative depth)之樹液流速來表示樹液流速隨著邊材深度遞減之現象(Delzon *et al.*, 2004)，相對邊材深度為邊材深度與樹幹半徑之百分比，從最外層邊材至髓心為 0-100%。因樹液流速隨著絕對邊材深度遞減之狀況因林木大小與邊材範圍而改變，所以相對邊材深度更可以表示林木在不同胸徑範圍之樹液流速遞減狀況。而本研究之樣木因為樹徑很大(直徑 > 0.85 m)，但邊材深度範圍只有 6-8 cm，因此靠近心材之邊材相對邊材深度較小，僅約 12%，因此在如此小之相對邊材範圍內，樹液流速遞減狀況便顯得不明顯。



由於樹液流速受邊材傳導效率、樹輪輪寬及邊材含水率影響，這些因素反應在不同邊材深度上，遂造成其樹液流速之變化(Delzon *et al.*, 2004；James *et al.*, 2002)。由於晚材具有較厚之細胞壁及較狹窄之細胞腔，因此晚材之樹液流速較早材小，若晚材密度較高，則該範圍之樹液流速便較晚材密度較低者小(Dye *et al.*, 1991)。而本研究之樣木，從樹芯資料來看，TM1 之 0-2 cm、2-4 cm 及 4-6 cm 之年輪數分別為 19、22 及 14 條；TM3 之 0-2 cm、2-4 cm 及 4-6 cm 之年輪數分別為 37、17 及 16 條；TMid 之 0-2 cm、2-4 cm 及 4-6 cm 之年輪數分別為 46、47 及 26 條。因此，如果臺灣雲杉邊材管胞之水分傳導效率隨著深度增加而減少之影響，少於晚材密度之影響的話，則晚材密度造成樹液流速差異便是對於本研究 4-6 cm 處樹液流速回升情況之可能原因。

此外，邊材往髓心 2-4 cm 處與 4-6 cm 處樹液流速與 0-2 cm 處樹液流速存在著時間遲滯現象，且以夏季較明顯，冬季則幾乎無時間遲滯，究其原因可能與儲存水之供給順序有關，但仍需進一步證實。

5.3. 不同季節之樹液流狀況

從盒鬚圖(圖 25、26、27)結果可見臺灣雲杉樹液流速主要集中於流速較低之範圍，使最大值與中位數相差甚大，亦使平均值與中位數有偏離之情形。樹液流速最大值於春季為 $11.71-16.25 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，夏季為 $11.17-16.48 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，冬季為 $3.92-8.90 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ；中位數於春季為 $1.33-2.87 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，夏季為 $1.01-2.85 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，冬季為 $0.58-0.92 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ；月平均值，則春季為 $3.44-4.72 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，夏季為 $3.17-4.44 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，冬季為 $1.61-3.11 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

若將三株樣木之月平均樹液流速取平均，則春季之月平均樹液流速為 $4.02 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，夏季為 $3.62 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，冬季為 $2.17 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，與羅勻謙(2004)鴛鴦湖地區的臺灣扁柏月平均樹液流速比較，且將單位一致化為 $\text{cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，發現臺灣雲杉與臺灣扁柏之樹液流速相近，但略有差異(表 6)。其差異原因可能與氣候有關。



表 6、塔塔加鞍部與鶯鶯湖月均樹液流速(單位: $\text{cm}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 比較

	2012 年	2010 年	2012 年
塔塔加鞍部	3 月	8 月	1 月
	4.02	3.62	2.17
	2004 年	2003 年	2004 年
鶯鶯湖	3 月	8 月	1 月
	1.97	5.49	1.24

鶯鶯湖地區因東北季風影響，無明顯乾季，塔塔加鞍部則乾濕季明顯，且兩地區夏季降雨受颱風影響甚鉅（羅勻謙，2004）。本章節氣象資料的參考上，鶯鶯湖地區以太平山測站資料作參考，塔塔加鞍部則參考阿里山測站。由於降水時 VPD 較小，使樹液流速偏低，從降雨多寡可窺見月平均樹液流速較少之原因。除此之外，亦可從晴天時影響樹液流大小的因子探討。因 VPD 由氣溫與相對濕度共同決定，從兩者之大小可探知樹液流變動之原因。太平山測站 2003、2004 年無相對濕度資料，若假設鶯鶯湖與塔塔加鞍部之夏季相對濕度差異不大，則溫度便成為影響樹液流之參考因子。

春季部分，2004 年 3 月份太平山測站降水量為 134.5 mm，降水日數為 20 日，月均溫為 9.66°C ，其中有 4 日出現氣溫小於 0 之情形；2012 年 3 月份阿里山測站降水量為 35.2 mm，降水日數為 4 日，月均溫為 10.2°C 。在降水極少且平均溫度較高之情形下，使得 2012 年 3 月份塔塔加鞍部月平均樹液流速較鶯鶯湖於 2004 年 3 月者大。

夏季部分，2003 年 8 月份太平山測站降水量為 293.0 mm，降水日數為 21 日，月均溫為 17.5°C ；2010 年 8 月份阿里山測站降水量為 366.3 mm，降水日數為 22 日，月均溫為 14.9°C 。可見 2003 年 8 月鶯鶯湖地區與 2010 年 8 月塔塔加地區之降水狀況差不多，但 2003 年 8 月鶯鶯湖地區月均溫度則較 2010 年 8 月塔塔加地



區高 2.5°C 。在降水狀況相似但溫度較高之情形下，使得 2003 年 8 月鴛鴦湖地區月平均樹液流速較 2010 年 8 月塔塔加地區大。

冬季部分，2004 年 1 月份太平山測站降水量為 61.0 mm，降水日數為 22 日，月均溫為 4.9°C ；2012 年 1 月份阿里山測站降水量為 114.4 mm，為 14 日，月均溫為 6.5°C 。2004 年 1 月塔塔加鞍部雖然降水較多，但降水日集中，使降水日較 2004 年 1 月鴛鴦湖少，以致天晴樹液流大的日數較多，且 1 月份月均溫又較高，使得 2012 年 1 月塔塔加鞍部月平均樹液流速較鴛鴦湖於 2004 年 1 月者大。

以上討論為表 6 夏季及冬季樹液流速差異形成原因之粗略探討，由於影響樹液流之因子還有樹種特性及其他環境因子如雲霧時間、土壤含水率等等，因此若欲更深入探知兩地區此二樹種之樹液流差異狀況，則需進一步研究。

5.4. 冠層微氣候概況

樣木 TM1 冠層 VPD 於清晨達到最大值後開始下降，不似部分文獻在中午時達到最大值，例如 Tognetti *et al.*(2004)於橄欖林內之 VPD 普遍於上午 10 至下午 14 時達到最大值，O'Brien *et al.* (2004)樣區於 1997-2000 年之平均 VPD 亦於下午 14 時達到最大值，Herzog *et al.* (1998)於 1992 年夏季之 VPD 也普遍於下午 14 時達到最大值。塔塔加鞍部於清晨時 VPD 達到最大值之狀況並非特例，根據羅勻謙(2004)之研究，鴛鴦湖地區 2003 年 7 月 26 日之 VPD 於凌晨開始增加，於清晨 7 時達到最大值後下降，於下午 13 時接近 0，與塔塔加鞍部之狀況相似。推測其可能原因為此兩地區均為雲霧帶，潮濕之環境於日出之後除了蒸散作用排出的水分外，地表也因陽光照射開始蒸發，使空氣中水分增加以致 VPD 於日出一段時間後開始下降。例如，塔塔加鞍部於 2010 年 7 月 14 日及 15 日之相對濕度於凌晨即開始下降，表示此段時間空氣中的水分含量漸漸減少，清晨 6 時太陽輻射開始上升，相對濕度亦隨之變大，表示空氣中水分開始增加，到中午 12 時相對濕度接近 100 %，空氣中水分近於飽和(圖 42)。

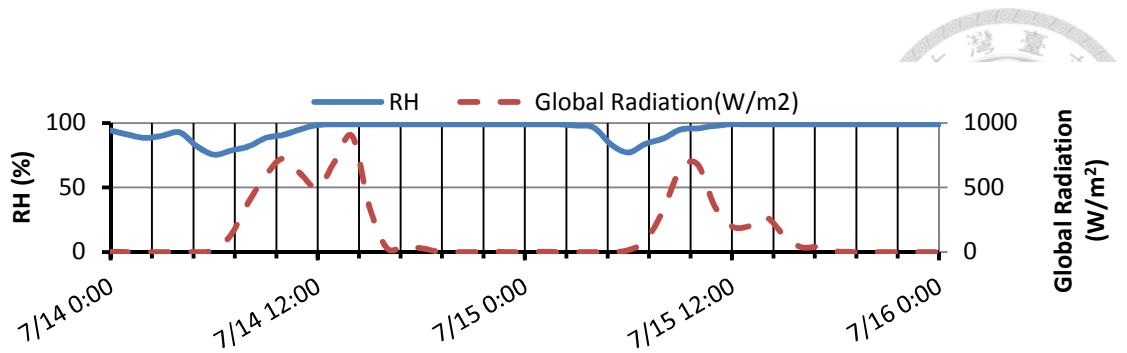


圖 42、樣木 TM12010 年 7 月 14 日及 15 日太陽輻射與冠層相對濕度之日變化

5.5. 樹液流速與 VPD 之關係

從結果中，可知塔塔加鞍部 VPD 開始上升之時間比臺灣雲杉樹液流變快時間提前 2 小時以上，甚至提前 8 的小時之久；而 VPD 達到最大值的時間比樹液流提早 5 個小時。而鴛鴦湖地區之臺灣扁柏樹液流與 VPD 之時間遲滯亦很長，2003 年 7 月 26 日之 VPD 比樹液流速早 7 小時開始上升，並提早 6 小時達最大值(羅勻謙，2004)。有如此長之時間遲滯，可從 VPD 之波動狀況解釋。由上一節可知此兩地區之 VPD 因相對濕度之關係，於夜間開始上升並於清晨太陽出來達最大值後開始下降。但影響樹液流之因子除了 VPD 之外，還有太陽輻射，植物必須在太陽出來之後才會張開氣孔行光合作用，而樹液流也只能在此時開始急遽增加，即空氣中 VPD 很高，但若氣孔不開亦無法使樹液流流速變快。

本研究之臺灣雲杉每日白晝平均樹液流速在每日白晝平均 VPD 達 0.43 kPa 時達到飽和，而 Clausnitzer *et al.*(2011)，在德國對於挪威雲杉之樹液流與其環境因子進行 7 年觀測結果，其蒸散量於每日平均 VPD 達 0.70 kPa 時達飽和。雖然 Clausnitzer *et al.*(2011)使用日平均 VPD 與本篇研究之每日白晝平均 VPD 不同，但若本篇研究若採用日均 VPD 做計算，其結果只會比 0.43 小，更突顯兩地之差異。

從氣候環境來看，塔塔加鞍部之夏季月均溫為 15°C 左右，冬季月均溫為 6.4°C 左右，年平均 VPD 為 0.16 kPa，整體環境為夏、冬溫差小，且較潮溼之氣候。然德國之挪威雲杉林樣區之夏季月均溫於 15-20°C 之間，而冬季月均溫則在 0°C 左右，夏季最大日平均 VPD 為 1.5-2 kPa，年平均 VPD 為 0.36-0.49 kPa，整體環境夏、



冬溫差大，且較乾燥(附圖 5)。

此外，劉靜榆 (1991)指出，塔塔加鞍部所屬之沙里仙集水區之集水區方向整體向北，環境較陰濕。除了環境潮濕外，本研究樣區為一崩塌地形，土壤中岩石含量高，使得可利用的水分較少。Lu *et al.*(1995)於法國東北邊之樣區進行土壤乾燥與否對於挪威雲杉影響之試驗，其結果為在 7、8 月同樣氣候條件下，乾燥樣區使其氣孔導度下降了 75%，蒸散量隨之下降；含水率較高之樣區則氣孔導度僅些微波動，蒸散量較乾燥樣區高。

德國挪威雲杉林之 VPD 比塔塔加鞍部雲杉林高，以及塔塔加鞍部土壤岩石含量高的情況下，可能為臺灣雲杉樹液流速達飽和之 VPD 較德國挪威雲杉樹液流速達飽和之水蒸氣壓小之原因之一。

5.6. 不同高度樹液流之時間遲滯與儲存水之利用狀況

本研究顯示灣雲杉儲存水主要於上午消耗而於下午補充，且同一天之消耗量通常不會等於補充量，即儲存水之消耗與補充，通常無法於一日內完成平衡。

Loustau *et. al*(1996)的研究中，其法國濱海松(*Pinus maritima*)在夏季土壤含水較少的時候，其晚上儲存水之補充要至隔天早上才能完成。若環境適當，則植物便可經由白天消耗晚上補充此連續動態循環達成儲存水之平衡，如果環境持續乾燥則會使儲存水耗盡而影響植物之光合作用等生理狀態。可見儲存水之消耗與補充與氣候及土壤水分有關。

在不同樹種間儲存水的利用及每日總樹液流量比較上，Goldstein *et. al.* (1998)利用不同樹種之邊材面積、儲存水以及每日總樹液流量建構出兩條線性圖形，即林木之每日之蒸散量與儲存水會隨著邊材面積增加而遞增(附圖 6)。雖然不知各樣木之確切儲存水含量是多少，但從圖 43 可知，除了花旗松之外，臺灣雲杉雖然胸徑較其他樹種大，但儲存水使用量與其他小胸徑樹種相當，甚至更少。而在胸徑大小與每日總樹液流量關係上，臺灣雲杉亦無(Goldstein *et. al.* ,1998)所提及胸徑大之林木其每日總樹液流量亦較多其之現象；而是胸徑較大之樣木，其每日總樹液



流量並沒有相對較大，反而與其他胸徑小者相當或更少(圖 44)。其可能原因與塔塔加鞍部於生長季時潮濕之氣候有關。

每日儲存水與每日總樹液流量之比例關係因樹種而異，故在表 7 中，儲存水占其樹液流總量之比例在該五種樹種樣木大小及樹齡間均無規律性。Phillips *et al.* (2003)對於花旗松、美國西部黃松 (*Pinus ponderosa*) 以及白橡樹 (*Quercus garryana*) 之研究指出，同一樹種之每日儲存水使用量與總樹液流量之比例隨著樣木之大小而改變，即樣木越大，比例越大。但胸徑較大之臺灣雲杉 TM3 樣木每日儲存水使用量與每日總樹液流量之比例卻比胸徑較小之 TMid 樣木少。其原因可能為少數個體間的差異。若要更明確地瞭解臺灣雲杉林木大小與每日儲存水使用量及每日總樹液流量之關係，則必須以較再增加臺灣雲杉樣本數。

比較四種針葉樹之高度差與時間遲滯之關係，結果並不規律。本研究之臺灣雲杉樣木 TM3 樹高 41 m，頂層與底層高度相差約 30 m，樹液流之時間遲滯僅約 30 分鐘，與高度差為 12 m 及樹高 7 m 之法國濱海松及火炬松 (*Pinus taeda*) 相當。

若以同一種針葉樹之儲存水使用狀況與時間差的關係來看，法國濱海松之儲存水用量在春季為每日 10 kg，而夏季則為每日 13 kg，對應至其春、夏之樹幹兩高度樹液流時間遲滯表，發現其春天之樹液流遲滯為 0.43 小時(26 分鐘)，夏季之樹液流遲滯為 0.67 小時(40 分鐘)，儲存水使用量與兩高度之樹液流時間遲滯可能相關(表 7、8)；而臺灣雲杉不同季節之每日儲存水用量與時間遲滯，亦與上述例子相似，樣木 TM3 之夏季與冬季儲存水使用量分別為每日 12.34 kg 與 5.41 kg，對應之遲滯時間分別為 0.5 小時即 0 小時，樣木 TMid 之夏季及冬季時儲存水使用量分別為每日 7.86 kg，與 4.70 kg，而對應之遲至時間接為 0.5 小時。從樣木 TM3 可見儲存水使用量越大則遲至時間則越長；樣木 TMid 於冬季之遲滯時間與夏季一樣為 0.5 小時，可能為本研究之資料紀錄時間以 0.5 小時為單位，故遲滯時間僅能以 0.5 小時做為間隔，若樣木不同季節之遲滯時間差異若小於 0.5 小時，則無法突顯出。

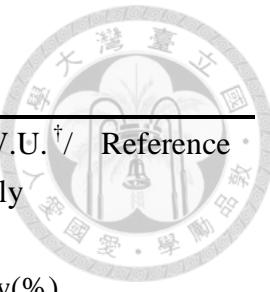


表 7、種針葉樹之每日消耗之儲存水與每日總樹液流量資料

Species	S.D. [†] (m)	year	Height (m)	S.W.U. [†] (kg)	Daily sap flow(kg)	S.W.U. [†] / Daily sap flow(%)	Reference
<i>Picea morrisonicola</i> (TM1)	1.35	300	31.9	7.26 (冬)	66.85 (冬)	10.86 (冬)	本研究
<i>P. morrisonicola</i> (TM3)	1.24	300	41.3	12.34 (夏)	70.49 (夏)	17.50 (夏)	本研究
<i>P. morrisonicola</i> (TMid)	0.86	200-300	34.3	7.86 (夏)	38.61 (夏)	20.35 (夏)	本研究
<i>Picea abies</i>	0.28	72	25	8.7 (夏)	63.1 (夏)	14 (夏)	Schulze <i>et al.</i> , 1985
<i>Picea abies</i>	-	220	25	6.5 (夏)	42.6 (夏)	15.3 (夏)	Herzog <i>et al.</i> , 1998*
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	1.29	450+	57	40-70	134-150	20-30 (夏-秋)	Čermák <i>et al.</i> , 2007
<i>Larix hybrid</i>	0.26	33	20	17.8	74.4	24 (夏)	Schulze <i>et al.</i> , 1985
<i>Pinus maritima</i>	0.32	64	24	10(春) 13(夏)	83 52	12 (春) 25 (夏)	Loustau <i>et al.</i> , 1996

† S.D 為樹幹直徑，S.W.U(storage water use)每日為儲存水之用量。

* Herzog *et al.*(1998)之 *Picea abies* 樣木為從高 1m 處分岔之雙樹冠樣木。

本研究因之各季節資料選取日期：

樣木 TM1 冬季：2011/12/18-2012/1/12，夏季因無資料，故不列入比較。

樣木 TM3 夏季：2010/8/1-8/30、冬季：2011/12/17-2012/1/12；

樣木 TMid 夏季：2010/8/1-8/30、冬季：2011/12/17-2012/1/12



表 8、種不同高度針葉樹時間遲滯比較

Species	S.D. [†]	Year	Height	Δh^{\dagger}	$\Delta T(h)^{\dagger}$	Reference
	(m)		(m)	(m)		
<i>P.</i>	1.35	300	32	26.5	0.5	本研究
<i>morrisonicola</i>					(冬)	
(TM3)						
<i>P.</i>	1.24	300	41.3	30	0.5	本研究
<i>morrisonicola</i>					(夏)	
(TM3)					0	
					(冬)	
<i>P.</i>	0.86	200-	34.3	28	0.5	本研究
<i>morrisonicola</i>		300			(夏)	
(TMid)					0.5	
					(冬)	
<i>Pinus taeda</i>	0.09	12	7.1	-	0.5	Phillips <i>et al.</i> , 1997
<i>P. maritima</i>	0.32	64	24	12	0.43	Loustau <i>et al.</i> , 1996
					0.67	
					(夏)	
<i>Pseudotsuga</i>	1.29	450	57	47	1-2	Čermák <i>et al.</i> , 2007
<i>menziesii</i>			+			

[†] S.D.為樹幹直徑， Δh 為上下兩測點之高度差， ΔT 為以CCF找出相關係數最高時之遲滯時間，本研究之夏季及冬季與表5同

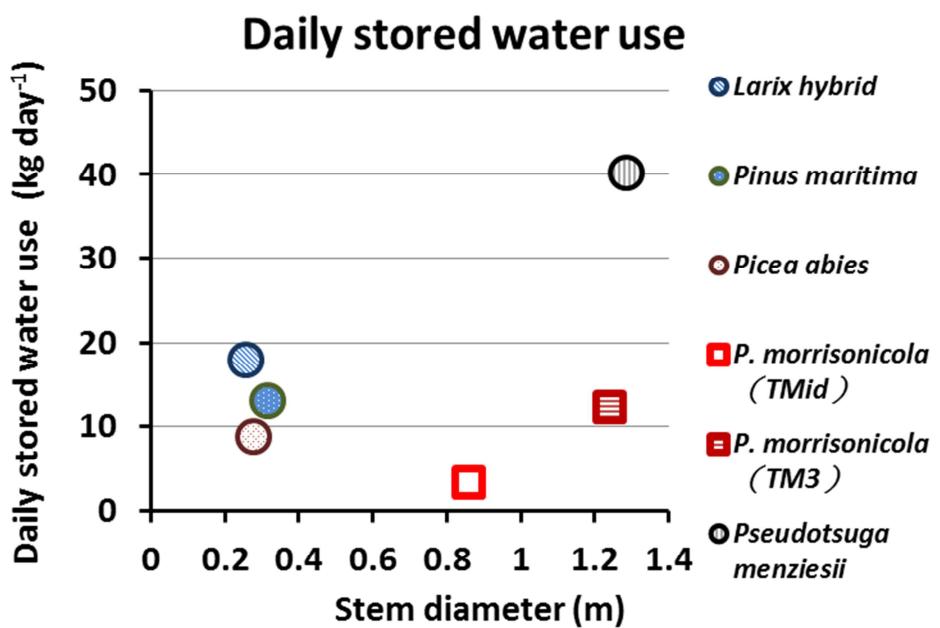


圖 43、木胸徑與每日儲存水消耗量之關係(資料來源：表 7)

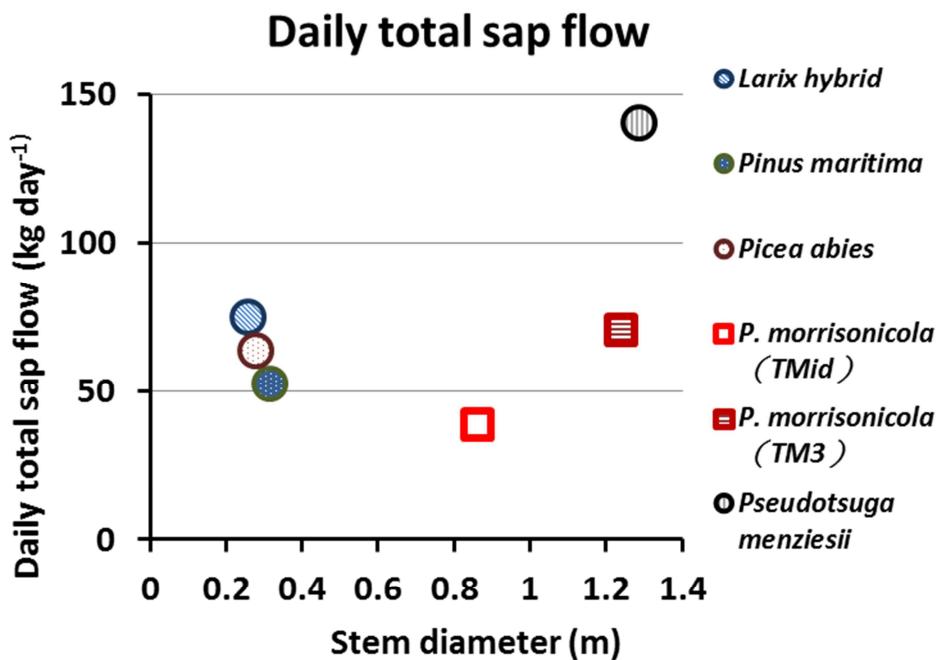


圖 44、木胸徑與每日總樹液流量之關係(資料來源：表 8)

第六章 結論



本研究顯示塔塔加鞍部臺灣雲杉不同方位之樹液流速有明顯差異，均以上坡處之樹液流速最快；深層樹液流速之差異隨著邊材深度增加有先降後升之現象，使得樹液流速隨邊材深度增加而減少之現象不明顯。因此在估算樹液流量上，忽略樹液流之邊材方向變異所造成之樹液流量估算差異較忽略邊材深度影響來的大，與一般研究結果不同。

臺灣雲杉夏季流速最大值可達 $16.25 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ；春、夏月均樹液流速差異不大。與鴛鴦湖臺灣扁柏樹液流速比較結果，發現月均溫為造成兩地月平均樹液流速差異之原因之一。在冠層環境上，塔塔加鞍部臺灣雲杉冠層之 VPD 於午夜至凌晨間增加，至清晨 6 時左右達最大值後開始下降，並於中午接近 0，此狀況與鴛鴦湖地區相似，推測皆為雲霧帶環境造成之結果。在樹液流速與 VPD 之關係方面，可能因生長環境較潮溼，使臺灣雲杉之白晝平均樹液流速達到飽和之 VPD 較德國地區之挪威雲杉來的小。

基本上，臺灣雲杉儲存水之消耗主要在上午，而下午開始為儲存水之補充。夏季之儲存水使用量較冬季大，每日平均儲存水消耗量較其他文獻中胸徑較小之針葉樹種相似或較少，每日儲存水消耗量與總樹液流量之比例也有相似狀況。經過時間遲滯之比較，臺灣雲杉之遲滯時間亦較其他研究之針葉樹種為短，且遲滯時間通常以夏季較大，冬季較小，可能與儲存水之消耗有關。

參考文獻



- 柯勇 (2002) 植物生理學。
- 柳晉 (1966) 臺灣產松柏類植物地理之研究。臺灣省林業試驗所研究報告。122：35 頁。
- 張志遠 (2008) 臺灣南仁山亞熱帶雨林三種樹種的樹液流通量與風速及其他環境因子之關係。國立臺灣大學生態學與演化生物學研究所碩士論文。
- 陳正和 (2004) 臺灣地區三種具代表性的杉樹-臺灣杉、臺灣雲杉和臺灣冷杉。臺灣林業 30：73-77。
- 曾彥學 (1991) 臺灣中部沙里仙溪集水區職群生態之研究 II 臺灣雲杉森林動態及族群結構之研究。國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。
- 曾涵 (2011) 利用樹液流法測量溪頭柳杉人工林之蒸散狀況及變異。國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。
- 劉靜榆 (1991) 臺灣中部沙里仙溪集水區職群生態之研究 I 植群分析與森林演替之研究。國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。
- 鍾年鈞 (1998) 全球變遷：塔塔加高山生態系長期生態研究-塔塔加高山植群之研究(二)。行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。
- 藍永翔 (2010) 臺灣雲杉葉部碳氮之分布與動態。國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文。
- 羅勻謙 (2004) 鴛鴦湖地區臺灣扁柏森林生態系蒸散作用之研究。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文。

Campbell, G. S. and Norman, J. M. (1998). An introduction to environmental biophysics.

Čermák, J., Kučera, J., Bauerle, W. L., Phillips, N. and Hinckley, T. M. (2007). Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees. *Tree Physiology* 27: 181-198.

Clausnitzer, F., Köstner, B., Schwärzel, K. and Bernhofer, C. (2011). Relationships between canopy transpiration, atmospheric conditions and soil water availability—Analyses of long-term sap-flow measurements in an old Norway spruce forest at the Ore Mountains/Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 1023-1034.

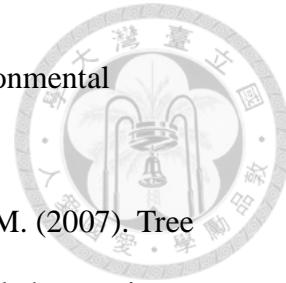
Deckmyn, G., Verbeeck, H., Op De Beeck, M., Vansteenkiste, D., Steppe, K. and Ceulemans, R. (2008). ANAFORE: a stand-scale process-based forest model that includes wood tissue development and labile carbon storage in trees. *Ecological Modelling* 215: 345-368.

Delzon, S., Sartore, M., Granier, A. and Loustau, D. (2004). Radial profiles of sap flow with increasing tree size in maritime pine. *Tree Physiology* 24: 1285-1293.

Dye, P., Olbrich, B. and Poulter, A. (1991). The influence of growth rings in *Pinus patula* on heat pulse velocity and sap flow measurement. *Journal of Experimental Botany* 42: 867-870.

Goldstein, G., Andrade, J., Meinzer, F., Holbrook, N., Cavelier, J., Jackson, P. and Celis, A. (1998). Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees. *Plant, Cell and Environment* 21: 397-406.

Granier, A. (1987). Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology* 3: 309-320.





- Granier, A., Loustau, D. and Bréda, N. (2000). A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. *Annals of Forest Science* 57: 755-765.
- Herzog, K., Thum, R., Kronfus, G., Heldstab, H. J. and Hässler, R. (1998). Patterns and mechanisms of transpiration in a large subalpine Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Ecological Research* 13: 105-116.
- Holbrook, N. and Sinclair, T. (1992). Water balance in the arborescent palm, *Sabal palmetto*. II. Transpiration and stem water storage. *Plant, Cell and Environment* 15: 401-409.
- James, S. A., Clearwater, M. J., Meinzer, F. C. and Goldstein, G. (2002). Heat dissipation sensors of variable length for the measurement of sap flow in trees with deep sapwood. *Tree Physiology* 22: 277-283.
- Kravka, M., Krejzar, T. and Čermák, J. (1999). Water content in stem wood of large pine and spruce trees in natural forests in central Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology* 98: 555-562.
- Lange, O. L., Nobel, P. S., Osmond, C. B. and Ziegler, H. (1982). *Physiological Plant Ecology II. Water Relations and Carbon Assimilation*.
- Lee, P. W. and Eom, Y. (1988). Anatomical comparison between compression wood and opposite wood in a branch of Korean pine (*Pinus koraiensis*). *IAWA Bulletin* 9: 275-284.
- Lloyd, J., Grace, J., Miranda, A., Meir, P., Wong, S., Miranda, H., Wright, I., Gash, J. and McIntyre, J. (1995). A simple calibrated model of Amazon rainforest productivity based on leaf biochemical properties. *Plant, Cell and Environment* 18: 1129-1145.



- Loustau, D., Berbigier, P., Roumagnac, P., Arruda-Pacheco, C., David, J., Ferreira, M., Pereira, J. and Tavares, R. (1996). Transpiration of a 64-year-old maritime pine stand in Portugal. *Oecologia* 107: 33-42.
- Lu, P., Biron, P., Breda, N. and Granier, A. (1995). Water relations of adult Norway spruce (*Picea abies* (L) Karst) under soil drought in the Vosges mountains: water potential, stomatal conductance and transpiration. In *Annales des sciences forestières*, Vol. 52, 117-129: EDP Sciences.
- Nadezhina, N. (2010). Integration of water transport pathways in a maple tree: responses of sap flow to branch severing. *Annals of Forest Science* 67: 107.
- O'Brien, J., Oberbauer, S. and Clark, D. (2004). Whole tree xylem sap flow responses to multiple environmental variables in a wet tropical forest. *Plant, Cell and Environment* 27: 551-567.
- Philip, J. R. (1966). Plant water relations: some physical aspects. *Annual Review of Plant Physiology* 17: 245-268.
- Phillips, N., Bergh, J., Oren, R. and Linder, S. (2001). Effects of nutrition and soil water availability on water use in a Norway spruce stand. *Tree Physiology* 21: 851-860.
- Phillips, N., Nagchaudhuri, A., Oren, R. and Katul, G. (1997). Time constant for water transport in loblolly pine trees estimated from time series of evaporative demand and stem sapflow. *Trees* 11: 412-419.
- Phillips, N., Ryan, M., Bond, B., McDowell, N., Hinckley, T. and Čermák, J. (2003). Reliance on stored water increases with tree size in three species in the Pacific Northwest. *Tree Physiology* 23: 237-245.

Pieruschka, R., Huber, G. and Berry, J. A. (2010). Control of transpiration by radiation.

Proceedings of the National Academy of Sciences 107: 13372-13377.

Pinheiro, J. C. and Bates, D. M. (2000). Mixed-effects models in S and S-PLUS

Plomion, C., Leprovost, G. and Stokes, A. (2001). Wood formation in trees. Plant

Physiology 127: 1513-1523.

Ran, J.H., Wei, X.X. and Wang, X.Q. (2006). Molecular phylogeny and biogeography

of *Picea* (Pinaceae): Implications for phylogeographical studies using

cytoplasmic haplotypes. Molecular Phylogenetics and Evolution 41: 405-419.

Raviv, M. and Blom, T. J. (2001). The effect of water availability and quality on

photosynthesis and productivity of soilless-grown cut roses. Scientia

Horticulturae 88: 257-276.

Sadler, E. J. and Evans, D. E. (1989). Vapor pressure deficit calculations and their effect

on the combination equation. Agricultural and Forest Meteorology 49: 55-80.

Saugier, B., Granier, A., Pontailler, J., Dufrene, E. and Baldocchi, D. (1997).

Transpiration of a boreal pine forest measured by branch bag, sap flow and

micrometeorological methods. Tree Physiology 17: 511-519.

Schulte, P. J. and Brooks, J. R. (2003). Branch junctions and the flow of water through

xylem in Douglas-fir and ponderosa pine stems. Journal of Experimental Botany

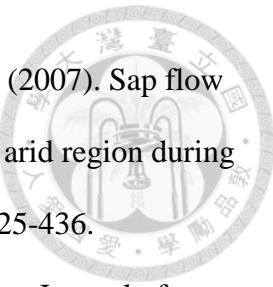
54: 1597-1605.

Schulze, E. D., Čermák, J., Matyssek, M., Penka, M., Zimmermann, R., Vasicek, F.,

Gries, W. and Kučera, J. (1985). Canopy transpiration and water fluxes in the

xylem of the trunk of *Larix* and *Picea* trees—a comparison of xylem flow,

porometer and cuvette measurements. Oecologia 66: 475-483.



- Si, J. H., Feng, Q., Zhang, X. Y., Chang, Z. Q., Su, Y. H. and Xi, H. Y. (2007). Sap flow of *Populus euphratica* in a desert riparian forest in an extreme arid region during the growing season. *Journal of Integrative Plant Biology* 49: 425-436.
- Smith, D. and Allen, S. (1996). Measurement of sap flow in plant stems. *Journal of Experimental Botany* 47: 1833-1844.
- Taiz, L., and Zeiger, E. (2006). *Plant Physiology*.
- Tan, C., Black, T. and Nnyamah, J. (1978). A simple diffusion model of transpiration applied to a thinned Douglas-fir stand. *Ecology*: 1221-1229.
- Tateishi, M., Kumagai, T. o., Utsumi, Y., Umebayashi, T., Shiiba, Y., Inoue, K., Kaji, K., Cho, K. and Otsuki, K. (2008). Spatial variations in xylem sap flux density in evergreen oak trees with radial-porous wood: comparisons with anatomical observations. *Trees* 22: 23-30.
- Taylor, R. J., Patterson, T. F. and Harrod, R. J. (1994). Systematics of Mexican spruce: revisited. *Systematic Botany* 19.
- Tognetti, R., d'Andria, R., Morelli, G., Calandrelli, D. and Fragnito, F. (2004). Irrigation effects on daily and seasonal variations of trunk sap flow and leaf water relations in olive trees. *Plant and Soil* 263: 249-264.
- Tsuruta, K., Kume, T., Komatsu, H., Higashi, N., Umebayashi, T., Kumagai, T. o. and Otsuki, K. (2010). Azimuthal variations of sap flux density within Japanese cypress xylem trunks and their effects on tree transpiration estimates. *Journal of Forest Research* 15: 398-403.
- Waring, R. and Running, S. (1976). Water uptake, storage and transpiration by conifers: A physiological model. In *Water and Plant Life*.

Waring, R. H. and Running, S. W. (2007). Forest ecosystems: analysis at multiple scales.

Wilson, B. F. and Archer, R. R. (1977). Reaction wood: induction and mechanical action. Annual Review of Plant Physiology 28: 23-43.

Wullschleger, S. D., Meinzer, F. and Vertessy, R. (1998). A review of whole-plant water use studies in tree. Tree Physiology 18: 499-512.

Xia, G., Kang, S., Li, F., Zhang, J. and Zhou, Q. (2008). Diurnal and seasonal variations of sap flow of *Caragana korshinskii* in the arid desert region of north-west China. Hydrological Processes 22: 1197-1205.

Zanne, A., Sweeney, K., Sharma, M. and Orians, C. (2006). Patterns and consequences of differential vascular sectoriality in 18 temperate tree and shrub species. Functional Ecology 20: 200-206.

附錄



附表 1 樣木 TM1 樹液流時間遲滯數值表。時間遲滯之單位為小時，數值為不同高度單位樹液流之相關係數。

Tm1	-3	-2.5	-2	-1.5	-1	-0.5	0
Spring	0.45	0.55	0.65	0.74	0.82	0.88	0.92
Fall	0.43	0.53	0.63	0.73	0.82	0.89	0.94
Winter	0.32	0.44	0.56	0.68	0.79	0.88	0.94
Tm1	0.5	1	1.5	2	2.5	3	
Spring	0.93	0.90	0.84	0.76	0.67	0.56	
Fall	0.94	0.91	0.85	0.77	0.67	0.55	
Winter	0.95	0.92	0.86	0.77	0.66	0.54	

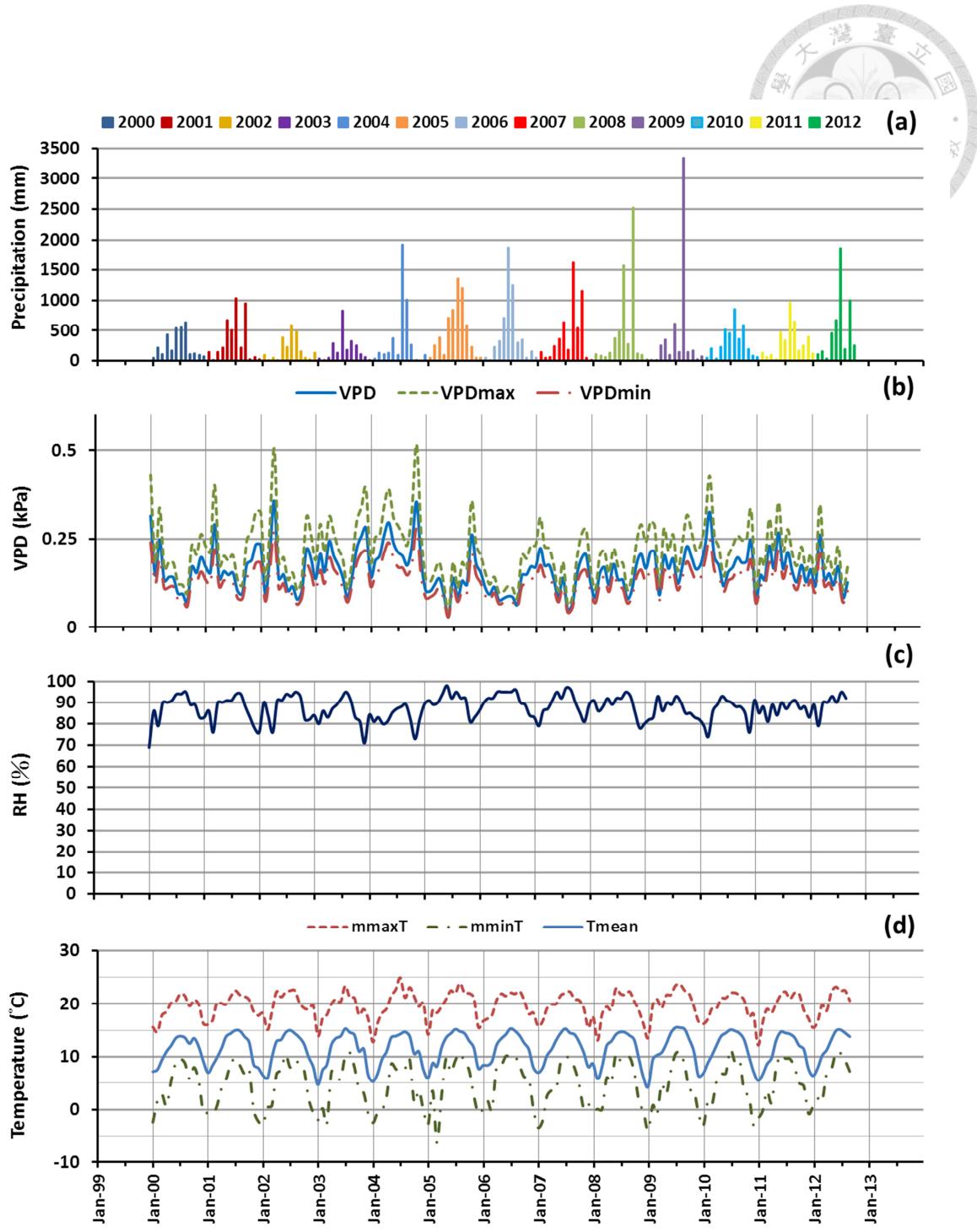
附表 2 樣木 TM3 樹液流時間遲滯數值表。時間遲滯之單位為小時，數值為不同高度單位樹液流之相關係數

Tm3	-3	-2.5	-2	-1.5	-1	-0.5	0
Spring	0.41	0.51	0.62	0.73	0.82	0.90	0.96
Summer	0.30	0.38	0.46	0.53	0.60	0.65	0.68
Fall	0.57	0.67	0.76	0.84	0.90	0.94	0.95
Winter	0.40	0.49	0.59	0.68	0.77	0.85	0.90
Tm3	0.5	1	1.5	2	2.5	3	
Spring	0.97	0.95	0.89	0.82	0.72	0.62	
Summer	0.68	0.66	0.64	0.61	0.57	0.53	
Fall	0.92	0.86	0.77	0.67	0.56	0.45	
Winter	0.91	0.89	0.85	0.77	0.69	0.59	

附表 3 樣木 TMid 樹液流時間遲滯數值表。時間遲滯之單位為小時，數值為不同高度單位樹液流之相關係數



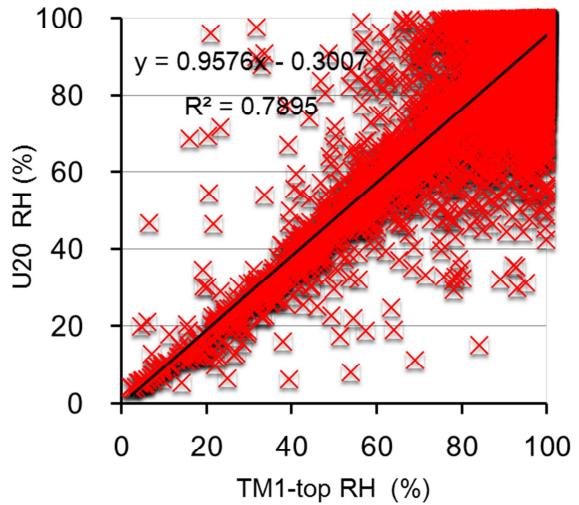
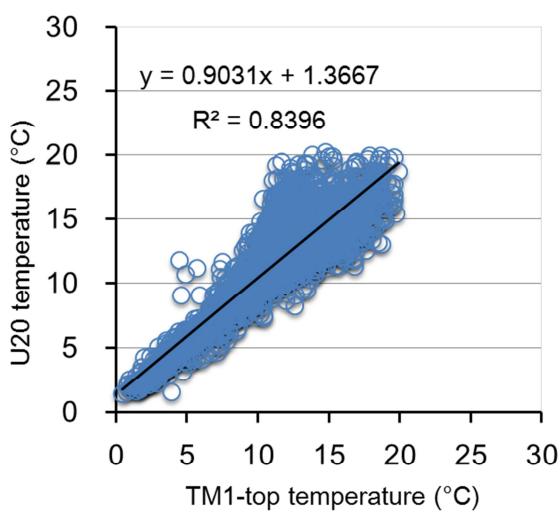
Tmid	-3	-2.5	-2	-1.5	-1	-0.5	0
Spring	0.41	0.52	0.62	0.72	0.81	0.89	0.94
Summer	0.37	0.48	0.59	0.69	0.79	0.87	0.94
Fall	0.27	0.37	0.47	0.57	0.67	0.76	0.84
Winter	0.44	0.48	0.52	0.56	0.59	0.62	0.65
Tmid	0.5	1	1.5	2	2.5	3	
Spring	0.97	0.96	0.93	0.88	0.81	0.73	
Summer	0.96	0.95	0.91	0.84	0.76	0.67	
Fall	0.89	0.91	0.91	0.89	0.84	0.77	
Winter	0.65	0.65	0.64	0.63	0.61	0.58	



附圖 1. 阿里山地區自 1999-2012 之環境因子時間動態

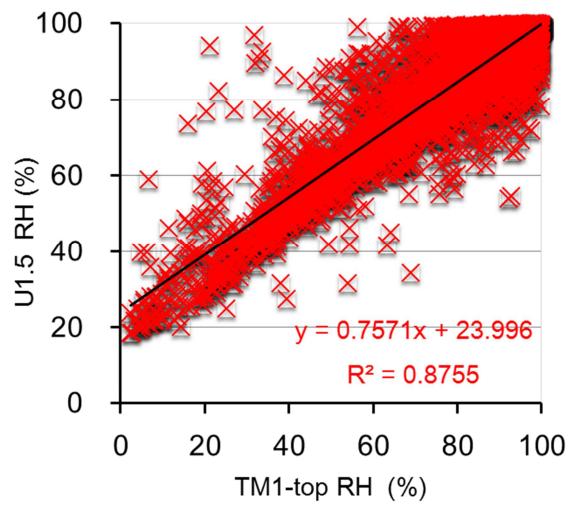
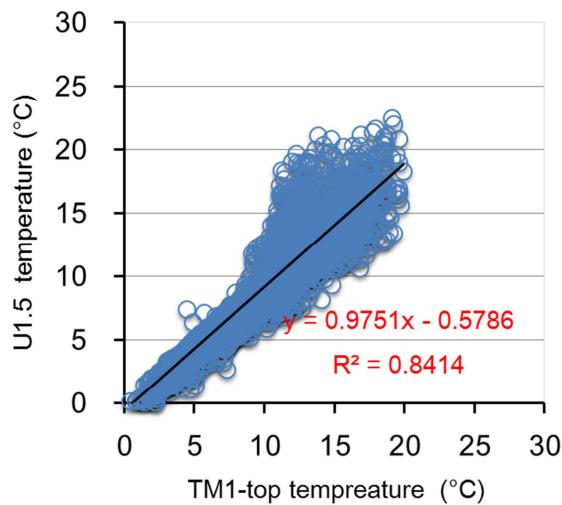
(a)

(b)

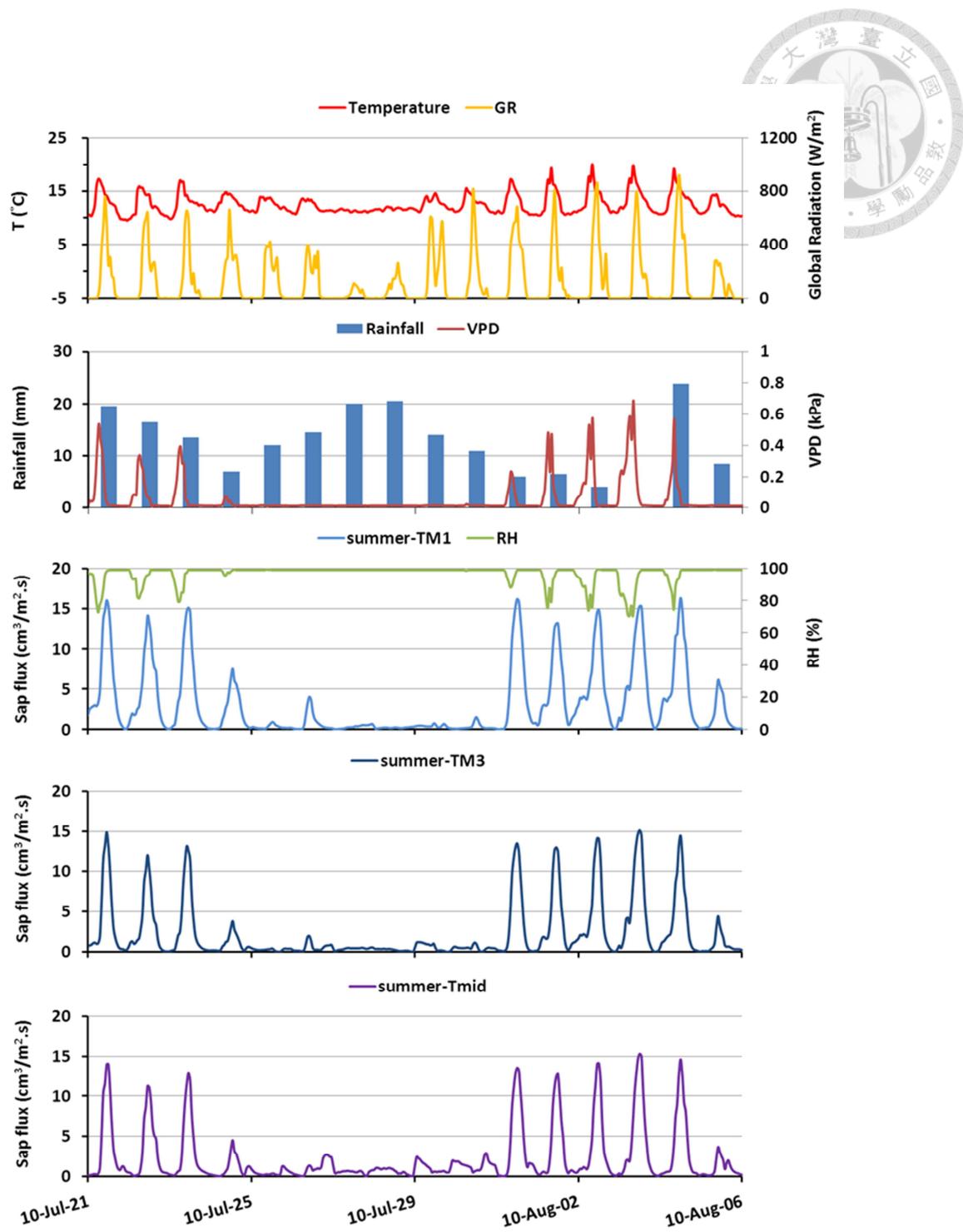


(c)

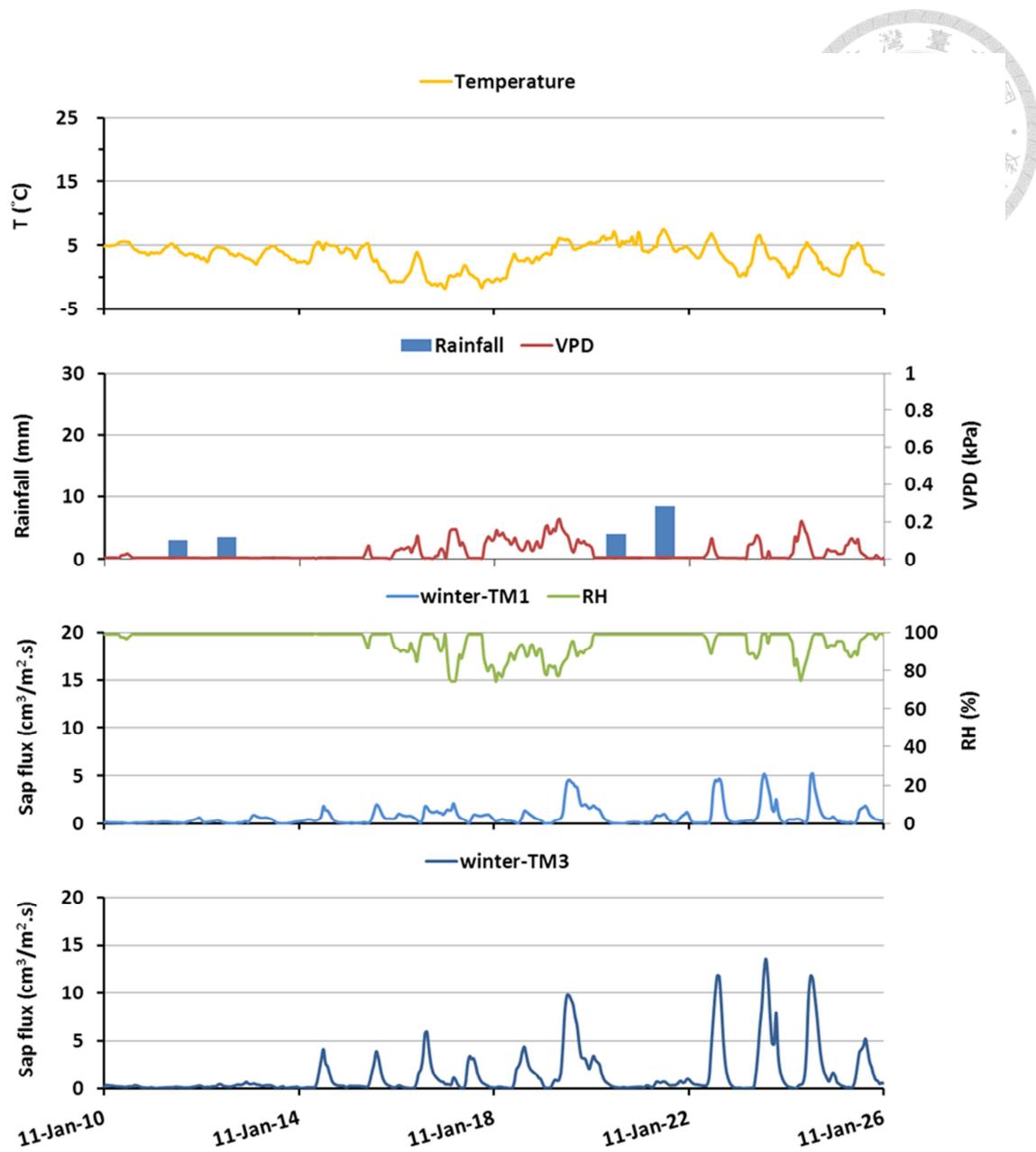
(d)



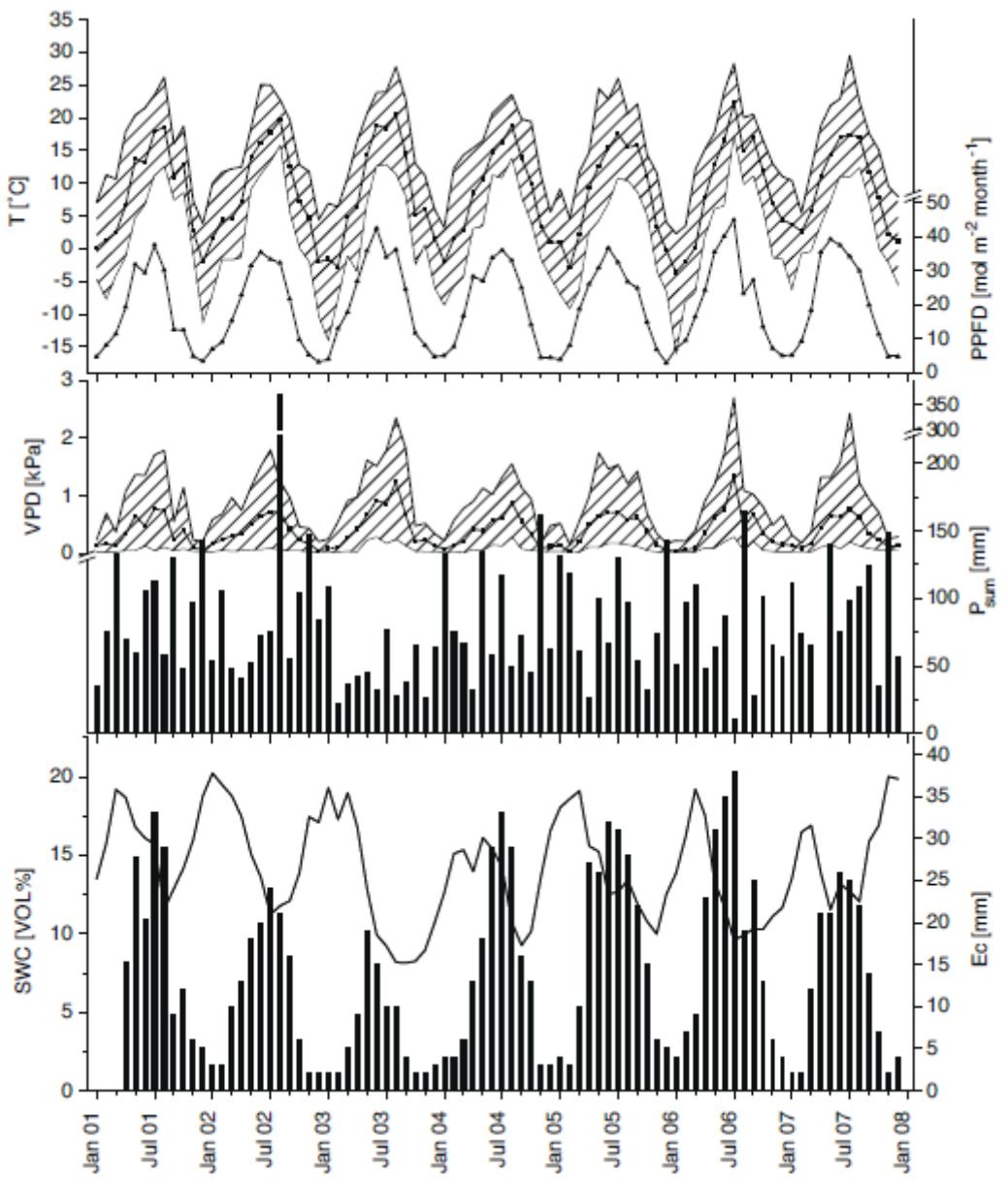
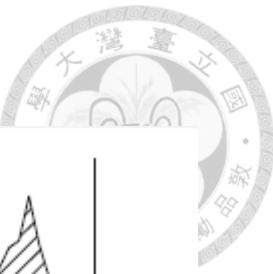
附圖 2. TM1 冠層與林內氣象站與 TM1 冠層 HOBO 溫、濕度之線性迴歸，(a) 20 m 測點與 TM1 冠層 HOBO 溫度線性迴歸，(b) 20 m 測點與 TM1 冠層 HOBO 相對濕度線性迴歸，(c) 1.5 m 測點與 TM1 冠層 HOBO 溫度線性迴歸，(d) 1.5 m 測點與 TM1 冠層 HOBO 相對濕度線性迴歸



附圖 3. 夏季樹液流與各環境因子之時間動態



附圖 4. 冬季樹液流與各環境因子之時間動態



附圖 5. Clausnitzer 等人 (2011) 之挪威雲杉樣區環境因子時間動態