

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 Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

溪頭地區柳杉人工林降雨再分佈之研究

Rainfall Redistribution of a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) Plantation in Xitou Area

許祐昇

Hsu, Yu-Sheng

指導教授：陳明杰 博士

Advisor: Chen, Ming-Chieh Ph.D.

中華民國 102 年 7 月

July, 2013



國立臺灣大學 (碩) 博士學位論文
口試委員會審定書



溪頭地區柳杉人工林降雨再分佈之研究
Rainfall Redistribution of a Japanese Cedar (*Cryptomeria japonica*) Plantation in Xitou Area

本論文係 許祐昇 君 (學號 R99625054) 在國立臺灣大學森林環境暨資源學系完成之碩士學位論文，於民國 102 年 7 月 23 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：

陳明杰

(指導教授)

賴彥任

廖學誠

盧惠生

謝秉泉

系主任

誌謝



蘇力颱風來襲的風雨飄搖夜，風聲、雨聲、鍵盤聲中，敲下論文的定稿聲。

論文承蒙恩師陳明杰教授的指導，口試委員臺大實驗林賴彥任博士、臺灣師範大學廖學誠教授和林業試驗所盧惠生組長的指正和建議，讓內容更完整更有價值。

這麼多日子以來，感謝伴我成長的各位，感謝老師在課業、實驗及待人處世上的教導，研究所同學、研究室的學長姊、同學和學弟妹們的協助，特別感謝溪頭營林區洪志遠學長在住宿及實驗上的協助，泓碩和雅筠小倆口幫忙儀器架設和每次的資料收集，以及感謝溪頭溪谷飯店老闆和鹿谷日新五金行老闆娘的照顧。來回溪頭—台北，一個月兩次，轉眼就是一年多，回想剛開始在 3 林班 173 號造林地設樣區架儀器時，心中總是充滿憂慮，觀測上的問題不時出現，經常碰到新的挑戰，後來資料蒐集才漸漸步上軌道，再到分析資料、完成論文、口試，不只有學業上的長進，在作事方法和與人的應對進退上都有所收穫，謝謝這段時間裡的人事物。

接下來，學生生活和在台北的日子終告一段落，是另一個開始，在台北的這七年，感謝爸媽弟妹的支持和關愛，使我能在這裡無後顧之憂的學習和見識人生，我愛你們。

許祐昇

撰於癸巳年季夏 臺大森林系林產館 202 室

中文摘要



為探討降雨經過樹冠層後的再分佈現象，本研究觀測臺大實驗林溪頭營林區第 3 林班柳杉(*Cryptomeria japonica*)人工林之幹流水、穿落水，配合溪頭氣象站的林外降雨資料，估算柳杉樹冠截留量，及分析樹冠結構對降雨再分佈過程中的穿落水、幹流水之影響。觀測期間為 2012 年 2 月至 2013 年 2 月，選定 20×20 m² 的試驗樣區 2 處，分別設置穿落水收集裝置（包括樣區 1 的貯水桶 9 組及樣區 2 的雨量計 5 組）；並於樣區 1 挑選樣木 11 株供設置幹流水收集裝置（包括貯水桶 6 組及雨量計 5 組）；另外，以浸水秤重法估算樣區內林下植物之截留量。

在 2 處樣區之穿落水觀測點，使用魚眼鏡頭拍攝柳杉樹冠影像後進行分析，樹冠孔隙率分析結果，樣區 1 介於 20.08~26.10%，樣區 2 介於 19.54%~22.93%，而樣區 1 樹冠的 LAI 平均為 2.66。其次，以無降雨間隔時間 6 小時以上為基準分割林外降雨事件，對每一場次的降雨事件分析穿落水、幹流水及樹冠截留百分比，統計觀測期間穿落水、幹流水及樹冠截留百分比各為林外降雨量的 84.48%、2.15% 和 13.37%，平均每場降雨事件柳杉樹冠能截留 3.78 mm，可視為柳杉截留飽和點。從觀測期間月降雨量較少（月降雨量 < 100 mm 的 2012 年 2、3、9、10 月及 2013 年 1、2 月），和月降雨量較多（月降雨量 > 100 mm 的 2012 年 4、5、6、7、8、11、12 月）的時段來看，降雨量多月份的穿落水、幹流水、樹冠截留百分比平均分別為 89.99%、3.25%、6.76%，而降雨量較少的月份分別為 77.58%、0.80%、6.76%，顯示穿落水及幹流水受降雨量多寡的影響，故以間隔 15 日或月為單位的觀測資料分析樹冠截留百分比時，在降雨量多的月份忽略幹流水會高估樹冠截留百分比。

另外，幹流量與柳杉之 DBH 無顯著相關，產生幹流水的降雨量門檻值為 1.68 mm，因柳杉的樹皮具有 0.18 mm 的含水能力，其餘 1.50 mm 為枝葉吸收等其他因子造成。而林下植物平均每一場次降雨的最大截留量為 0.25 mm，以 2012 年共計 194 場次的降雨事件估算，林下植物截留量占全年降雨量的 1.53%。

關鍵字：柳杉人工林、降雨再分佈、樹冠截留、穿落水、林下植物截留

ABSTRACT



To investigate the phenomenon of rainfall redistribution through forest canopy, this study measure the throughfall and stemflow in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation at the third compartment in Xitou tract, NTU Experimental Forest, which be used to calculate the canopy interception with rainfall data of Xitou weather station. Meanwhile, canopy structure analysis was involved to understand that influence rainfall redistribution process. Study period was from February 2012 to February 2013. In study area, two 20×20 m² experimental plots were selected and then set 14 throughfall collection devices (including 9 storage bucket type of plot 1 and 5 rain gauge type of plot 2) and stemflow collection devices for 11 selected sample trees in plot 1 (including 6 storage bucket type and 5 rain gauge type). Moreover, wetting method was used to estimate the amount of understory vegetation interception.

Took the canopy image at each throughfall measured point in the two experimental plots by a fish-eye lens and executed image analysis. Gap fraction at each measured points of the plot 1 was from 20.08%~26.10% and plot 2 was from 19.54% to 22.93%, and the canopy LAI of plot 1 were averagely 2.65. Secondly, more than 6 hours without rain occurred was criterion to separate rainfall events during study period. The percentage of throughfall, stemflow and canopy interception in each rainfall event were calculated. From the results, the percentage of throughfall, stemflow and interception for total rainfall of study period was 84.48%, 2.15% and 13.37%, respectively. The canopy inectercption capacity of Japanse cedar for each rainfall event was 3.78 mm, which could be considered as the maximum interception capacity. Moreover, higher rainfall months (monthly rainfall >100 mm, including 2012/2, 3, 9, 10 and 2013/1, 2) and lower rainfall months (monthly rainfall <100 mm, including 2012/4, 5, 6, 7, 8, 11, 12) were distinguished. In higher rainfall months, the average of throughfall, stemflow and canopy interception percentage

was 89.99%, 3.25% and 6.76%, by contrast, in lower rainfall months was 77.58%, 0.80% and 21.62%. Which shows that throughfall and stemflow were obviously influenced by rainfall amount. From the above results, on the basis of 15 days or monthly observed data as to calculate canopy interception percentage, it would be overestimated if stemflow was ignored in higher rainfall month.

Furthermore, stemflow has no significant correlation with Japanese cedar's DBH. The rainfall threshold of stemflow generated was 1.68 mm. Because of the 0.18 mm bark water storage, the remaining 1.50 mm may be caused by other factors like foliage absorbed, etc. In addition, the maximum understory interception in each rainfall event was averagely 0.25 mm. In 2012, there were 194 rainfall events, the estimated understory interception percentage was 1.53% for annual rainfall.

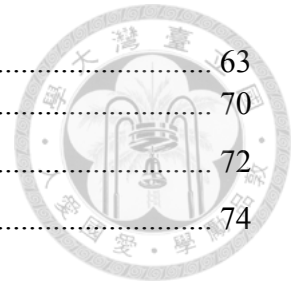
Keyword: Canopy interception, *Cryptomeria japonica* plantation, Rainfall redistribution, Throughfall, Understory interception

目錄



中文摘要	I
ABSTRACT	II
目錄	IV
圖目錄	VI
表目錄	VII
第一章 前言	1
第二章 文獻回顧	4
第一節 降水再分佈	4
第二節 國外的降水再分佈研究	5
第三節 臺灣的降水再分佈研究	10
第三章 研究材料與方法	18
第一節 研究區域概況	18
第二節 樣區設置	22
第三節 資料收集與分析	26
一、 試驗架構圖	26
二、 柳杉樹冠結構分析	26
三、 水文收支項目之資料收集	28
(一) 林外雨量	28
(二) 穿落水	28
(三) 幹流水	30
(四) 水桶之水深—水量迴歸方程式建立	33
(五) 柳杉樹皮含水能力試驗	34
(六) 林下植物截留	34
(七) 柳杉樹冠截留	35
第四章 結果與討論	36
第一節 降雨量與降雨事件	36
第二節 柳杉樹冠結構分析	39
一、 樹冠孔隙率	39
二、 樹冠 LAI	40
第三節 穿落水	41
一、 穿落水資料	41
二、 極端值分析	43
三、 穿落水與降雨量	44
第四節 幹流水	54
一、 幹流水與降雨量	54
二、 柳杉樹皮含水能力	59
三、 幹流量與 DBH 的關係	60

第五節 柳杉樹冠截留.....	63
第六節 林下植物截留.....	70
第五章 結論.....	72
參考文獻.....	74



圖目錄



圖 3.1	溪頭地區的地形圖 (經建三版 9520-II NW 溪頭)	18
圖 3.2	溪頭氣象站 1941~2005 年月平均降雨量及 1963~2005 年月平均蒸發量 (鄭森松、陳信佑, 2009)	20
圖 3.3	溪頭氣象站 1941~2005 年月平均溫度及相對濕度	20
圖 3.4	樣區之柳杉林分狀態及林內降水再分佈觀測	22
圖 3.5	樣區位置圖	23
圖 3.6	樣區 1 穿落水裝置配置圖	24
圖 3.7	樣區 2 穿落水裝置配置圖	24
圖 3.8	173 號造林地取樣調查之 DBH 徑級分布圖	25
圖 3.9	試驗架構圖	26
圖 3.10	穿落水裝置圖 (左:水桶, 右:雨量計)	29
圖 3.11	幹流水塑膠水管纏繞及裝置圖	31
圖 3.12	雨量計基座設置圖	31
圖 3.13	幹流水雨量計連接示意圖	31
圖 3.14	幹流水承接裝置圖 (左:水桶, 右:雨量計)	32
圖 3.15	46 L 水桶水量與水深的關係	33
圖 3.16	86 L 水桶水量與水深的關係	34
圖 4.1	溪頭苗圃及大學坑氣象站的雨量資料關係圖(2012/01/01~06/30)	36
圖 4.2	溪頭氣象站 2012 年月降雨量及 1941~2005 年月平均降雨量分佈圖	37
圖 4.3	不同分割時間之不同等級降雨事件百分比	38
圖 4.4	天頂角夾角示意圖	39
圖 4.5	樣區 2 穿落水桶與雨量計資料之關係	43
圖 4.6	穿落水量與降雨量的關係	44
圖 4.7	穿落水百分比與降雨量的關係	45
圖 4.8	穿落水百分比與降雨量大小的關係	46
圖 4.9	編號 187 林外降雨事件對應之林內降雨情況	48
圖 4.10	編號 168、169 林外降雨事件對應之林內降雨情況	49
圖 4.11	編號 184 林外降雨事件對應之林內降雨情況	50
圖 4.12	編號 193 林外降雨事件對應之林內降雨情況	50
圖 4.13	幹流水量與降雨量的關係	54
圖 4.14	幹流水百分比與降雨量的關係	55
圖 4.15	幹流量與樣木的 DBH 的關係	61
圖 4.16	樹冠截留百分比與降雨量的關係	63
圖 4.17	穿落水、幹流水及樹冠截留百分比時序圖(2012/02/07~2012/06/08)	66
圖 4.18	穿落水、幹流水及樹冠截留百分比時序圖(2012/06/26~2012/10/04)	67
圖 4.19	穿落水、幹流水及樹冠截留百分比時序圖(2012/10/24~2013/02/21)	68
圖 4.20	截留水量與植物體氣乾重的關係	71

表目錄

表 2.1	美國東部闊葉樹季節性樹冠截留損失量公式 ^a (Helvey and Patric, 1965)	6
表 2.2	不同降雨量的樹冠截留量及截留百分比 (服部等, 1982)	6
表 2.3	日本地區柳杉樹冠截留試驗結果	7
表 2.4	美國華盛頓州中西部年輕的 (25 年生) 與老熟的 (大於 450 年生) 花旗松林分特徵 (Pypker et al., 2005)	8
表 2.5	影響事件尺度穿落水之時間與空間變異性的生物性及非生物性因子 (Levia and Frost, 2006)	9
表 2.6	台灣地區不同林型之穿落水、幹流水及樹冠截留百分比比較	15
表 2.7	蓮華池地區不同林分密度及撫育之樹冠截留研究成果	16
表 3.1	幹流水觀測之樣木及其 DBH	25
表 4.1	不同分割時間降雨事件場次數	39
表 4.2	樣區 1 九個穿落水觀測點樹冠孔隙率	40
表 4.3	樣區 2 五個穿落水觀測點的樹冠孔隙率	40
表 4.4	樣區 1 九個穿落水觀測點之樹冠的 LAI	41
表 4.5	樣區 1 及樣區 2 穿落水資料 (2012/10/24~2013/6/7)	42
表 4.6	穿落水樣區 1 及樣區 2 水桶資料 T 檢定	42
表 4.7	穿落水極端值資料	43
表 4.8	林外降雨與林內降雨發生時間差	47
表 4.9	樣區 2 的五個雨量計水平降水發生頻率	52
表 4.10	利用樣區 2 的雨量計統計水平降水發生時間及百分比 (依發生時間)	53
表 4.11	利用樣區 2 的雨量計統計水平降水發生時間及百分比 (依發生月份)	53
表 4.12	各場次降雨量及降雨事件數與幹流水百分比	55
表 4.13	各場次降雨事件之幹流產生的降雨量門檻值	57
表 4.14	樹皮含水能力試驗結果	60
表 4.15	幹流量 (mL) 與樣木 DBH (cm) 之線性迴歸分析結果	61
表 4.16	觀測期間 (2012/02~2013/02) 柳杉穿落水、幹流水及樹冠截留百分比	69
表 4.17	月降雨量大於及小於 100 mm 條件下穿落水、幹流水及樹冠截留百分比	70
表 4.18	林下植物截留試驗結果	71

第一章 前言



森林地區的降水再分佈

森林為主要的陸地生態系，在探討森林水文循環時，降水的再分佈現象 (redistribution) 是不可或缺的一環，因森林生態系的多層次性，降水抵達地表前，會先被森林的各層次截留，從樹冠層到林下植群、枯落物等，具有降低雨滴衝擊及減少土壤沖蝕的作用。降水經過森林後的再分佈主要分為樹冠截留、幹流水、穿落水三大部分，由於受到林分密度、樹冠結構等因子的影響，使林內降水在空間及時間上與林外有差異。

在森林地上部水文收支上，樹冠截留量的估計可由林外總降水量減去穿落水量與幹流水量得到，樹冠截留量與林外降水量的比值，稱為樹冠截留百分比 (canopy interception rate)，降水在樹冠貯留過程中蒸發的部分稱為樹冠截留損失 (canopy interception loss)。穿落水 (throughfall) 定義為直接穿過樹冠的降水，或先經樹冠及地表植被攔截再滴落至地表者；幹流水 (stem flow) 則是指降水經植物延伸的枝條或樹葉匯集後經過樹幹流至地表的部份 (Levia et al., 2011)，兩者合稱林內降水。森林地表有林下植物與枯枝落葉層存在時，少部份的穿落水在到達地表之前被攔截，為林下植物截留 (understory interception) 及枯枝落葉截留 (forest floor interception)。

截留的影響因子及研究現況

截留 (interception)，是降水接觸陸地後首先發生的現象，截留可在任何型態的地面發生，如植群、農田、道路、建築物等，降水經截留後藉蒸發回到大氣，而不形成逕流或入滲，為降水事件的損失量，這個截留—蒸發的過程在降水開始不久後即開始進行，能在整場降水事件中重複發生 (Gerrits and Savenije, 2011)。

森林地區降水時，樹冠截留是森林的形態、組成，以及降水、大氣條件等綜合作用的結果，相關的研究結果顯示，影響樹冠截留的因子包括樹種 (Hall, 2003)、樹齡 (Pypker et al., 2005)、風 (Staelens et al., 2008)、林分密度 (潘家聲, 1974c)、降雨量 (Komatsu et al., 2008)、降雨型態 (林登秋等, 1996; Marin et al, 2000)、樹冠結構 (Deguchi et al., 2006)、樹冠孔隙率 (Marin et al, 2000)、海拔高

(Gomez-Peralta et al., 2008)、霧水(McJannet et al., 2007；Gomez-Peralta et al., 2008)、附生植物(Pypker et al., 2006a；2006b)、森林經營方式(Asdak et al., 1998)等。

自 19 世紀初起，許多研究者針對樹冠截留(Horton, 1919)、枯枝落葉層截留(陸象豫、唐凱軍, 1995；佐藤等, 2003b；Gerrits et al., 2007)發展了各自的觀測方式，範圍涵蓋各種氣候帶，包括熱帶(Lloyd and Marques ó, 1988；Holder, 2004)、亞熱帶(林登秋等, 1996；賴彥任等, 2007)、溫帶(Helvey and Patric, 1965；Link, 2004)、地中海型氣候(Llorens and Domingo, 2007)等，因降雪截留量測不易，故較缺乏寒帶或有降雪地區的截留研究。而關於林下植物截留的研究，則少見於國內外文獻中。

此外，在森林生態系研究上，森林水文循環與養分循環息息相關，降水在森林截留過程中的養分變化，也是越來越來多國內外研究者研究課題(Germer et al., 2012；林登秋等, 1996；金恒鑣等, 2003)，但探討養分循環前，需先瞭解樹冠及林下植群等的截留作用。

臺灣柳杉人工林降水再分佈的研究情形

柳杉(*Cryptomeria japonica*)分類上隸屬杉科柳杉屬，原產日本，1906 年首次引進，曾是臺灣海拔 500-1800 m 主要的造林樹種。由於氣候條件與日本生育地類似，臺大實驗林自日據演習林時期即引進柳杉種植，試驗地之栽植始於 1913 年，於溪頭保護所蕃仔寮坑試植柳杉、扁柏 1.73 ha，即現在溪頭營林區第 6 林班第 1 號造林地，爾後又多次造林，迄今累計造林面積 2506.73 ha，為針葉樹人工林面積最高者(臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處, 2008)。

柳杉人工林的樹冠截留研究始於邱永和(1972)以溪頭之 43 年生柳杉及 34 年臺灣杉為對象，結果認為截留量受降雨持續時間和降雨量同時影響，試驗期間樹冠年截留百分比 20.40%，幹流量占總雨量 3.85%，亦發現有霧日時的幹流百分比高於無霧日。吳文統(1994)於溪頭第 3 林班 173 號造林地 44 年生柳杉林觀測穿落水，樹冠截留百分比為 15.90-88.22% (本文作者自行換算)，並分析影響樹冠截留的因子，得出就單場降雨而言，影響林內降雨量及樹冠截留的主要因子為：林外總降雨量及開始第 1 小時林內外降雨量比值，可解釋為樹冠的濕潤狀態

會影響樹冠截留量，但此試驗的觀測時間僅 2 個月，且因未測量幹流量，在計算樹冠截留百分比時仍忽略幹流。陳怡妙（2010）在溪頭第 3 林班 60-4 號造林地 36 年生柳杉人工林設置樣區，觀測塊狀皆伐前後柳杉林分之養分、水量及土壤水化學變化，試驗結果認為柳杉樹冠截留百分比為 15%，由於此研究著重養分循環，柳杉樹冠截留百分比定義為疏伐區與未疏伐區穿落水百分比的差，與樹冠截留之一般定義不同。

綜觀溪頭柳杉樹冠截留作用研究結果，截留量受降雨量、降雨持續時間及樹冠的濕潤狀態影響，但也發現一些問題：（1）幹流量的觀測僅有邱永和（1972）的部分資料，也因此缺乏含幹流量資料的樹冠截留百分比，（2）林外降雨資料多來自自行觀測結果，溪頭有長期的氣象觀測資料，若能以此配合適當之幹流水、穿落水等的時序變化量，可得到更詳細的研究結果，（3）三篇相關研究都是針對 40 年生左右的柳杉林分，對日據時代造林至今逾 70 年的老熟林分尚無研究，（4）缺乏以降雨事件為單位的截留研究，（5）除了柳杉樹冠截留外，缺乏柳杉林分其他層次的截留研究，（6）以溪頭的氣候型態而言，除了降雨之外，尚缺乏霧等水平降水影響截留的相關研究。

本論文研究目的

根據第三次森林資源調查資料統計，全國森林面積約 210 萬 ha，占全島面積 58.53%，其中 20.1%為人工林，大部分(58.13%)為人工針葉林，其中，柳杉人工林面積近 42000 ha（台灣省農林廳林務局，1995；臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處，2008）。臺灣的柳杉面積為人工針葉林中面積最大者，其降水再分佈的相關研究仍然欠缺完整性。本研究選擇臺大實驗林溪頭營林區 1950 年造林之老熟柳杉林分，進行穿落水、幹流水觀測，林外雨量資料取自溪頭苗圃和大學坑氣象站，計算穿落水、幹流水百分比與樹冠截留百分比，並以降雨事件為單位分析樹冠截留作用，此外，因臺灣對林下植被的截留作用因尚無人研究，本研究將加入此部份，以瞭解林下植被截留對森林水文循環的重要性，並完整觀測柳杉人工林地上部的降水再分佈。

第二章 文獻回顧



第一節 降水再分佈

森林樹冠會使降水產生再分佈(redistribution)現象。在大部分地區，降水的主要型態為降雨，降雨通過樹冠時，有些被樹冠的枝葉攔截，其中部分蒸發回到大氣，這個攔截—蒸發的過程即截留作用，因發生在樹冠，故稱為樹冠截留，部分截留的降水被樹皮吸收，剩餘的雨水沿樹枝、樹幹向地表流動，為幹流水，還有一部分則在枝葉短暫停留後滴落，與直接穿過樹冠孔隙的降水合稱穿落水，而當地表有林下植物、枯枝落葉層存在時，可再度截留穿落水，為林下植物截留及枯枝落葉截留。

樹冠截留作用的研究方法，主要有水收支、微氣象學方法及模式法（塚本，1992）。水收支法為本試驗採用的方法，將於下一段詳述。微氣象學方法使用 Penman-Monteith 公式估算，因降雨後樹冠完全濕潤，將其中的樹冠阻抗視為 0，推算出降雨期間樹冠的潛在蒸發量，可視為樹冠貯留量(storage capacity)；模式法以 Horton (1919)所提的截留公式為基礎，Rutter(1971)首度推導出具有物理意義的模式，將截留視為一連串的水平衡過程，由降水輸入項，貯留項及排水、蒸發兩種輸出項組成，運用小時單位的降雨量及氣象資料即可推算截留量，Gash (1979)延伸並簡化 Rutter 模式，把降水輸入項分割一系列樹冠與樹幹濕潤—完全乾燥的降水事件，每個降水事件分為樹冠濕潤、飽和與乾燥三個階段，因樹冠結構會影響前述三階段過程，此模型強調了樹冠結構對截留的重要性。大部分的截留模式皆由此二種所衍生(Muzylo et al., 2009)。

水收支法以現地試驗為主。依水文收支原理，從降雨開始至停止後到樹冠乾燥為止期間內，水文收支可表示為（塚本，1992）：

$$I_C = P_G - P_T - P_S - P_a - P_o \quad (2.1)$$

其中， I_C 為樹冠截留量， P_G 為林外降水量， P_T 為穿落水量， P_S 為幹流水量， P_a 為枝葉的吸收量， P_o 為樹冠層的貯留變化量。由於 P_o 和 P_a 變動很小，通常忽略不計，因此， I_C 是由 P_G 、 P_T 、 P_S 實測值估算，即樹冠截留量等於林外降水量與林

內降水量（林內降水量等於穿落水量與幹流水量的和）之差。觀測時須注意降水量或穿落水量的觀測誤差，避免估算截留量時誤差太大。在臺灣，除了高海拔山區於冬季會降雪外，降水型態以降雨為主，部分多霧地區則因霧水而有額外的降水收入(Chang et al., 2006)。

季、年為單位的樹冠截留量，以線性方程式推估樹冠截留量（ I_C ）與林外降水量（ P_G ）的經驗公式（empirical formula），表示如下：

$$I_C = a + b \cdot P_G \quad (2.2)$$

截距 a 值表示為降雨停止時，雨水停留於樹冠的貯留量；迴歸係數 b 值相當於樹冠截留雨水的平均蒸發百分比。一般而言，上述的線性方程式主要用以表示以年、季為單位的樹冠截留量與降雨量間的關係。對單場降水之水文收支量測，截留易受降水之時間和空間變化影響，需增加樣本數避免取樣不均，描述單場的樹冠截留量與降雨量關係時，由於存在截留飽和點，在未達截留飽和點時兩者呈線性關係，但達到飽和後則為一定值，故整體而言為非線性關係，這部份目前尚缺乏相關研究。

第二節 國外的降水再分佈研究

Helvey and Patric (1965)整理在美國東部進行的樹冠截留試驗報告，對象以闊葉樹種為主，穿落水量及幹流水量都分布在狹窄範圍內，依成長季節可分為生長期（夏天）和休眠期（冬天）來歸納穿落水量及幹流水量與降水的迴歸式，如表 2.1，在相同的 5% 誤差範圍內，穿落水測量成長期所需樣本數（15 個）大於休眠期（6 個），由於這些試驗樹種多為溫帶落葉樹種，於冬季落葉，春季重新生長，又枝葉量的多寡是影響樹冠截留量的重要因子，因此對溫帶地區而言，依生長季節分析樹冠之截留作用是相當合適的。

表 2.1 美國東部闊葉樹季節性樹冠截留損失量公式^a (Helvey and Patric, 1965)

(單位:英寸)	生長期	休眠期
穿落水(T)	$\Sigma T = 0.901(\Sigma P) - 0.031(n)^b$	$\Sigma T = 0.914(\Sigma P) - 0.015(n)$
幹流水(S)	$\Sigma S = 0.041(\Sigma P) - 0.005(n)$	$\Sigma S = 0.062(\Sigma P) - 0.005(n)$
枯枝落葉截留損失(L)	$\Sigma L = 0.025(\Sigma P)$	$\Sigma L = 0.035(\Sigma P)$
淨降水(Net rainfall)(R)	$\Sigma R = 0.917(\Sigma P) - 0.036(n)$	$\Sigma R = 0.941(\Sigma P) - 0.020(n)$
樹冠截留損失(I)	$\Sigma I = 0.083(\Sigma P) + 0.036(n)$	$\Sigma I = 0.059(\Sigma P) + 0.020(n)$

^a: 為該篇文章先前整理的前人研究推導而來

^b: P 表示降水量, n 為每季暴雨(storm)次數

降雨量直接影響樹冠截留量, 服部等 (1982) 針對日本茨城縣檜木人工林測定穿落水、幹流水量, 並依林外降雨量階級排序如表 2.2, 發現隨著降雨階級增加, 穿落水百分比、幹流水會隨之增加, 但截留百分比則會逐漸減少。

表 2.2 不同降雨量的樹冠截留量及截留百分比 (服部等, 1982)

降雨階級(mm)	降雨事件數	平均降雨量(mm)	穿落水量(mm)	幹流水量(mm)	樹冠截留量(mm)	穿落水百分比(%)	幹流水百分比(%)	截留百分比(%)
0~5	23	2.9	1.6	0.0	1.3	55.2	0.0	44.8
5~10	12	7.5	4.4	0.3	2.8	58.7	4.0	37.3
10~15	9	11.7	7.9	1.1	2.7	67.5	9.4	23.1
15~20	8	17.2	11.8	1.8	3.6	68.6	10.5	20.9
20~25	10	22.8	15.1	2.4	5.3	66.2	10.5	23.2
25~30	5	27.4	18.4	3.3	5.7	67.2	12.0	20.8
30~40	6	34.2	23.9	4.2	6.1	69.9	12.3	17.8
40~50	4	41.1	28.7	5.6	6.8	69.9	13.6	16.5
50~60	2	56.1	40.4	7.2	8.5	72.0	12.8	15.2
60~70	3	83.8	56.0	11.9	15.8	66.9	14.2	18.9

Komatsu et al. (2008)研究日本不同地區的闊葉樹及針葉樹樹冠截留百分比，發現年降雨量是影響樹冠截留百分比的重要因子，且在考慮各地區不同年降雨量的前提下，針葉樹和闊葉樹的樹冠截留百分比沒有明顯差異，而針葉樹的樹冠截留量和立木密度(stem density)有正相關性。Komatsu et al. (2008)；小松 (2007) 整理前人的研究成果，關於柳杉(*Cryptomeria japonica*)的截留百分比資料如表 2.3。

表 2.3 日本地區柳杉樹冠截留試驗結果

立木 密度 (株 ha ⁻¹)	樹 高 (m)	樹 齡 (年)	平均 胸高 直徑 (cm)	計測 期間 (月)	年降 水量 (mm y ⁻¹)	穿落 水百 分比 (%)	幹流 水百 分比 (%)	截留 百分 比 (%)	文獻
1467	15.2	30	23.2	12	1584	63.7	10.2	26.1	佐藤等 (2003a)；佐 藤等 (2002)
750	25	71	29	12	1150	84.2	4.0	11.8	生原、相場 (1982)
513	26.5	70	38.5	41	2304	78.6	5.6	15.8	田中等 (2005)

由表 2.3 可看出年輕的柳杉林分較老熟林分具有較高的截留能力，較低的穿落水百分比與幹流水百分比，Pypker et al. (2005)的研究也指出，年輕的（25 年生）的花旗松(Douglas-fir)林分較老熟的（大於 450 年生）的林分有較低的穿落水百分比以及樹冠貯留量(canopy water storage capacity)，如表 2.4；此外密度也是影響截留的因子之一，密度高的柳杉林也有較高的截留百分比。

表 2.4 美國華盛頓州中西部年輕的（25 年生）與老熟的（大於 450 年生）花旗松林分特徵(Pypker et al., 2005)

項目	年輕林分	老熟林分
林齡(年)	25	>450
樹高(m)	20	65
LAI(m ² /m ⁻²)	10.2 ± 1.1	9.6 ± 0.52
樹冠貯留量(S)(mm)	1.4 ± 0.27 ^{a,b}	3.32 ± 0.35 ^a
穿落水百分比(p)(%)	12 ± 7 ^a	42 ± 7 ^a
截留百分比(%)	25 ± 1 ^{a,c}	24 ± 8 ^a
	20 ± 1 ^{a,d}	
樹冠飽和點(P _G)(mm)	1.75 ± 0.23 ^a	

^a 年輕林分單場降水 > 5 mm，老熟林分單場降水 > 10 mm

^b 以 S_w （假設降雨期間樹冠層有發生蒸發之樹冠貯留量）和 S_{wo} （假設降雨期間樹冠層未發生蒸發之樹冠貯留量）的平均值計算， $S_w = (1 - p)P'_G - I_w$ ， $S_{wo} = (1 - p)P'_G$ ， I_w 為降雨期間冠層蒸發量

^c 假設無幹流；^d 假設 5% 幹流

以水收支法探討樹冠截留作用時，將林內降雨分為穿落水、幹流水兩部分觀測，林外降雨量減掉穿落水量和幹流水量即為樹冠截留量。穿落水具有時間上和空間上的變異性，Levia and Frost (2006) 將影響事件尺度穿落水時空變異性的因子分為生物性及非生物性因子（表 2.5），非生物性因子傾向於和氣象因子相關，而生物因子則包括物種組成、截留貯留量(interception storage)、樹冠疏水性和樹冠結構等，同時也強調生物因子與非生物因子二者的交互作用，相較於其他因子而言對穿落水的時空變異性更具影響力。



表 2.5 影響事件尺度穿落水之時間與空間變異性的生物性及非生物性因子


(Levia and Frost, 2006)

	變異性	
	時間	空間
非生物性	降水事件大小(mm) 降水事件延時(h) 降水事件強度(mm h ⁻¹) 風速(ms ⁻¹) 風向(°)	降水事件大小(mm) 降水事件延時(h) 降水事件強度(mm h ⁻¹) 風速(ms ⁻¹) 風向(°)
生物性	截留貯留量(l m ⁻²) 植物面積指數(m ² m ⁻²) ^{a,b}	物種組成 截留貯留量(l m ⁻²) 樹冠疏水性 3-D 樹冠結構 植物面積指數(m ² m ⁻²) ^a

^a 植物面積指數(plant area index)為葉面積指數與木材面積指數(woody area index)的和

^b 植物面積指數可能在單一事件（以年為單位的降水事件）尺度下，因強風造成葉或枝條掉落而變化

一般認為幹流水僅占總降雨量的一小部分，根據統計，依照地區的不同，幹流水占年降雨量的百分比為 0.07-22% (年雨量 600-7100 mm)，但幹流水在過程中經過樹冠和根系，帶走其表面的乾沉降物質，對根系周圍的土壤有生物、水文及化學分子層級的作用，稱為「double-funneling」(Johnson and Lehmann, 2006)。Levia and Frost (2003)整理前人研究，熱帶、溫帶及半乾燥與乾燥地區的幹流百分比平均值分別為 3.5%、11.3%和 19.0%，變異大小則是乾燥與半乾燥地區>溫帶地區>熱帶地區，影響因子包括樹冠結構(Herwitz, 1987)、附生植物(Pypker et al., 2006a; Pypker et al., 2006b; Veneklaas et al., 1990)、樹皮結構(Herwitz, 1985; Koichiro et al., 2001; Levia and Herwitz, 2005)、海拔高(Gomez-Peralta et al., 2008)等，有趣的是樹皮的水貯留量在熱帶雨林甚至能達到 1.3~5.9 mm(Herwitz,




1985)，此外，降雨型態也是影響幹流水量百分比的重要因子，包括降雨頻率、乾濕季等，降雨強度高使雨滴從樹枝滴落的機率增加(Crockford and Richardson, 2000)，而此亦可能是造成前述熱帶地區幹流水量百分比相較於其他地區來的低的原因。

第三節 臺灣的降水再分佈研究

早期多著重於式(2.2)之迴歸式的研究，求出係數a、b值以瞭解穿落水量、幹流水量—樹冠截留量與降雨量的關係，及推估不同降雨量時的樹冠截留量。江永哲（1972）在試驗中導入樹冠臨界截留量的概念，以相思樹、馬尾松、杉木及四種竹類為對象，收集幹流水、穿落水及林外雨量觀測資料，計算樹冠截留量，以降雨量為自變數，樹冠截留量為依變數，作一次或二次迴歸方程式求其關係，並預測100、200 mm林外降雨時的樹冠截留量。潘家聲分別對杉木、臺灣檫、大葉桉、肖楠等人工林及天然闊葉林研究樹冠截留量，降雨量為樹冠截留量的重要影響因子，林內雨量、幹流量、樹冠截留量皆隨降雨量增加而遞增，但樹冠截留百分比隨降雨量增加遞減（潘家聲，1964；潘家聲，1965；潘家聲，1966；潘家聲，1974a；潘家聲，1974c）。孫正春（1995）在蓮華池集水區的試驗結果顯示，樹冠截留量受降雨強度影響，也會因樹種而有不同。


臺灣山脈海拔高度起伏大，垂直溫度差異使植被呈現垂直分佈，海平面到海拔4000 m的高山可見海岸林、熱帶闊葉林到溫帶針葉林等的植物群落（劉崇瑞、蘇鴻傑，1983），以下先就針、闊葉樹種說明歷來的樹冠截留研究成果，再詳述溪頭地區柳杉的樹冠截留研究現況。

針葉樹方面，陳財輝等（1999）於雲林縣四湖海岸線木麻黃林分觀測降雨、穿落水、幹流水的輸入及養分含量，把1996年10月到1997年9月觀察到的20場降雨資料，分為乾季（10~5月）和濕季（6~9月），乾季時幹流水及穿落水量各為



林外雨量之2.9%及70.4%，濕季則各為4.3%及70.7%，總計全年幹流水及穿落水量各為林外總雨量的4.1%及78.2%；賴鴻寬（2002）與賴彥任等（2007）在塔塔加地區研究台灣雲杉天然林，記錄台灣雲杉林的樹冠截留飽和點為6.6 mm，並採用修正Rutter模式進行樹冠水分平衡分析，發現在樹冠厚度、樹冠滴落與集水面積和遮蔽效應等因子綜合影響下，樹冠截留現象造成林內降雨量有-12%~12%的再分佈情形。魏聰輝等（2009）研究塔塔加地區臺灣鐵杉樹冠截留量，於林內置大型水桶收集林內降雨，未量測幹流量，記錄鐵杉林樹冠截留飽和點為1.5~8 mm。薛美莉（2009）以烏石坑地區18年生台灣杉人工林為對象，分析雨水經過林分時的水量及水質變化，結果台灣杉人工林穿落水百分比為86.39%、幹流水百分比為1.15%、樹冠截留百分比為12.46%。金佐蒔（2012）在合歡山小風口附近研究臺灣冷杉樹冠截留作用，2011年3月到2012年2月，穿落水、幹流水及樹冠截留百分比分別占林外雨量的86%、6%與8%，發現臺灣冷杉樹冠在夏季較冬季乾燥，樹冠截留能力較冬季強。

在鴛鴦湖地區的一連串試驗，完整敘述了台灣扁柏天然林的降水量、雲霧沉降量與穿落水、幹流水的關係，並探討穿落水、幹流水的影響因子。陳耀德（2003）將降水區分為降雨及雲霧沉降，試驗期間之穿落水量占降雨量的比例變化極大，介於60%~90%之間，平均為84.2%，並有高達173%的紀錄。而幹流水占0.1%~7.5%，平均則為3.2%。穿落水與幹流水之和占降雨量的比例介60%~95%之間，平均為87.4%，於2002年10月與2003年1月，分別有高達180%及101%的紀錄，認為此為雲霧沉降所造成。陳子弘（2006）研究幹流量的影響因子與適當的幹流量測定法，結果認為台灣扁柏的胸高直徑、樹冠投影面積、通道障礙物與樹皮形態都是影響單株樣樹幹流水量的顯著因子，其中胸高直徑的顯著性最高，可解釋71%幹流水量的變異；幹流量與降雨量呈正相關，而雲霧沉降量對幹流水產量的多寡影響不大，可忽略雲霧沉降量的影響，幹流量為降雨量0.86%~



5.52%，總幹流量為總降雨量的 $4.7 \pm 0.8\%$ ，並求出降雨量與幹流量之關係式。林志偉（2007）分析兩個不同林齡的台灣扁柏林穿落水沉降情形及空間分佈特性，於鴛鴦湖地區台灣扁柏老齡林及更新林中沿穿越線固定間隔架設穿落水收集器，收集期間為2005年10月至2006年11月，共22個降雨樣本，結果顯示老齡林穿落水量占林外降雨量的92%，更新林穿落水量占林外降雨量的72%，兩林分穿落水量與林外降雨量及總降水量（含雲霧沉降量）均成線性正相關，因研究地區雲霧沉降量大，扁柏葉截留雲霧沉降後，影響穿落水量，造成較鬱閉的位置穿落水量增加。簡意婷（2008）總結2003~2006年的觀測資料。平均年雨量、霧水量、幹流水和穿落水量分別為 4005 ± 1036 mm、 241 ± 42 mm、 129 ± 32 mm和 3467 ± 868 mm。霧水量、幹流量、穿落水量和截留量分別為雨量的6.0%、3.2%、86.6%和 16.2%。雨水和霧水是森林樹冠的水分來源，分別提供樹冠 94.3%和 5.7%的水分。雨水和霧水進入樹冠後，3.0%分配至幹流水、81.7%分配至穿落水到達森林地表。因此，穿落水為森林內部最主要的水分來源。其餘15.3%的雨水和霧水則由樹冠截留，最後以蒸發的方式返回大氣。


闊葉林方面，簡文村（1986）在溪頭地區測量總降雨量、穿落水量及幹流量，穿落水量、幹流量與樹冠截留量各占總降雨量88.14%、2.29%、9.56%，結論認為在降雨持續時間相同的前提下，林分之樹冠截留量隨降雨量增加而增加，樹冠截留百分比則隨之減少，在降雨量20 mm以上時，其比值已趨定值。陸象豫、唐凱軍（1995）在蓮華池天然闊葉林的研究，觀測期間穿落水、幹流水與樹冠截留量各占林外雨量的84.47%、4.20%與11.32%，各月的樹冠截留百分比相差極大，1990年12月達100%，而以夏季颱風季節最低，1991年8月僅3.9%。林登秋等（1996）研究臺灣東北部福山地區天然闊葉林樹冠截留現象及季節性差異，並探討氣候和降雨型態對此兩者的影響，觀測期間樹冠截留百分比為11.3%，發現樹冠截留量夏季高於冬季，但樹冠截留百分比則冬季較高，歸納出夏季樹冠截留量



高的原因為溫度較高、相對濕度較低、蒸發散速率較高，造成葉面較乾燥使截留容量高；冬季則因每場降雨量小、降雨延時長及降雨強度小，提高樹冠截留百分比。

總結上述研究，針葉樹如臺灣扁柏（林志偉，2007；陳子弘，2006；陳耀德，2003；簡意婷，2008）、臺灣雲杉（賴彥任等，2007；賴鴻寬，2002）、臺灣鐵杉（魏聰輝等，2009）、臺灣冷杉（金佐蒔，2012）、杉木（潘家聲，1964）、臺灣杉（薛美莉，2009）、木麻黃（陳財輝等，1999）等，研究結果顯示，各樹種的樹冠截留量不同，而由於針葉樹的生育地多位於較高海拔地區，包括棲蘭山、塔塔加及合歡山等，其降水可能包含雨水、霧水與降雪等多種形態，如何描述高海拔地區不同降水條件下的樹冠截留過程，亦是值得探討的問題，林志偉（2007）、陳子弘（2006）、陳耀德（2003）、簡意婷（2008）等人的研究成果也說明了涵蓋降水（霧水、降雨等）、林內的穿落水與幹流水等的長期觀測，對樹冠截留作用、水文收支及養分收支研究而言相當有幫助；闊葉林則有林登秋等（1996）、夏禹九等（1982）、陸象豫、唐凱軍（1995）、潘家聲（1966）、簡文村（1986）等，試驗地遍及東北部福山、中部蓮華池與溪頭集水區，結果顯示各地區闊葉林的年樹冠截留百分比非常接近，介於9.56%~12.42%左右。

此外，臺灣因降雨季節分布不均，使部分地區有乾濕季的區別，在陸象豫、唐凱軍（1995）於中部天然闊葉林、林登秋等（1996）於東北部天然闊葉林、陳財輝等（1999）於四湖海岸木麻黃林的研究和金佐蒔（2012）於合歡山臺灣冷杉的研究可發現此種氣候型態對闊葉樹及針葉樹皆有影響，相對於夏季，冬季的降雨型態會增加幹流水百分比、減少樹冠截留量及增加樹冠截留百分比；而在中海拔多霧地區，霧的水平降水量可以達到總降水量的6%（簡意婷，2008），可能提高林下穿落水量，造成林內穿落水量高於林外雨量（陳耀德，2003）。



除了分析不同樹種外，潘家聲（1974b，1976）亦曾針對不同栽植密度、修枝程度進行試驗，在相同降雨條件下，16年生杉木林的幹流量、樹冠截留量與栽植密度成正相關，穿落水量則為負相關；14年生肖楠的樹冠截留量以修去樹高1/3處理為最高，此試驗結果與Komatsu et al. (2008)的結果相符。

其次，江永哲（1964）研究麻竹、荊竹、綠竹及桂竹林內降水分配，試驗期間為1963年1月至1964年5月，觀測降雨事件29次，以迴歸分析降雨量與穿落水量、林冠吸收量和釋流量的關係，發現林外降雨增加時，穿落水量：桂竹>綠竹>荊竹>麻竹，林冠吸收量：麻竹>荊竹>綠竹>桂竹，釋流量：桂竹>荊竹>綠竹>麻竹。陸象豫等（2005）以檳榔為對象，探討其水文特性及對環境的影響，由於樹型特殊，枝幹光滑，樹冠截留飽和度約為1.5 mm，遠較天然闊葉林低，穿落水、幹流水及樹冠截留百分比分別為34.70%、29.88%和35.42%。Lu et al. (2007)亦針對中部地區桂竹林進行研究，發現樹冠截留量及幹流量分別占年雨量的13.6及4.6%，樹冠截留百分比較天然闊葉林高。

由於森林的多層次性，除了樹冠之外，林下植被，包括灌木、草本植物及苔蘚類，以及林地地表的枯枝落葉等都能截留水分。劉美娟（2004）於鴛鴦湖地區研究苔蘚植物的養分循環，試驗期間2003年7月至2004年5月，總降雨量 2618 mm，穿落水量2337 mm，推估研究區地表苔蘚植物於試驗期間的截留總量約為719 mm，占穿落水的31%。陸象豫等（1988a）研究蓮華池地區天然闊葉林枯枝落葉層特性，結果顯示最大截留量為本身乾重之183.8%，相當於2.97 mm之水深，平均含水量0.48 mm，約經12日可達最低含水量。陸象豫等（1988b）調查蓮華池人工杉木林、天然闊葉林、桂竹林及畢祿溪工作站內二葉松純林、針闊葉混合林等五種林相之枯枝落葉層水文特性，得知針闊葉混合林枯枝落葉層厚度最高，其次為二葉松林、人工杉木林、闊葉林、桂竹林，枯枝落葉層厚度越深，則單位面積之乾重越重，截留的水分越多。

關於不同林型之穿落水、幹流水及樹冠截留的資料整理，薛美莉（2009）研究烏石坑地區18年生台灣杉人工林，與前人研究結果比較如表 2.6。黃正良等（2002）亦整理蓮華池地區不同林分密度及撫育之樹冠截留研究成果如表 2.7。

表 2.6 台灣地區不同林型之穿落水、幹流水及樹冠截留百分比比較

（薛美莉，2009）


年降雨量 (mm)	穿落水 (%)	幹流水 (%)	樹冠截留 (%)	林型	文獻
2050	86.39	1.15	12.46	台灣杉人工林	薛美莉（2009）
2821	88.13	1.8	11.69	台灣杉人工林	林琚三（1976）
2533	68.28	5.99	18.92	柳杉人工林	林琚三（1976）
1608	62-84	3.2-8.6	7.8-29.9	馬尾松	周恒、江永哲 （1964）
1608	60-83	3.6-12.7	14-38	杉木人工林	周恒、江永哲 （1964）
1165	91.64	0.8	7.56	杉木人工林	潘家聲（1964）
2822	77	14	9	杉木人工林	劉瓊霖、許博行 （1999）
2090	90.87	1.41	7.72	台灣檫人工林	潘家聲（1965）
2822	76	5	19	次生闊葉林	劉瓊霖、許博行 （1999）
2707	84.47	4.2	11.32	天然闊葉林	陸象豫、唐凱軍 （1995）
2346	88.9	<1	11.1	天然闊葉林	林登秋等（1996）
2822	74	3	23	天然闊葉林	劉瓊霖、許博行 （1999）

表 2.7 蓮華池地區不同林分密度及撫育之樹冠截留研究成果

(黃正良等, 2002)

密度 (株/ ha)	穿落水 (%)	幹流水 (%)	樹冠 截留 (%)	林況	文獻
2400	90.87	7.72	1.41	19 年生台灣檫	潘家聲 (1965)
2600	88.96	3.30	7.74	18 年生大葉桉	潘家聲 (1974a)
2033	91.64	0.80	7.56	13 年生杉木林	潘家聲 (1964)
2200	88.15	0.90	10.95		
1600	89.11	0.82	10.07	16 年生杉木林	潘家聲
1280	91.24	0.98	7.78		(1974b)
840	94.06	0.56	5.38		
4490	58.89	12.04	28.98	13 年生肖楠	潘家聲
3350	73.00	8.91	18.09	(不同密度)	(1974c)
2500	69.65	8.21	22.15		
3350					
不修枝	80.86	9.09	10.05		
1/2 修枝	82.36	7.34	10.29	14 年生肖楠	潘家聲 (1976)
1/3 修枝	72.47	9.12	18.41	(不同修枝程度)	
1/4 修枝	77.31	7.19	15.50		
	85.91	1.67	12.42	天然闊葉林	潘家聲 (1966)
	86.53	1.84	11.63	天然闊葉林	夏禹九等 (1982)
	84.47	4.20	11.30	天然闊葉林	陸象豫、唐凱軍 (1995)
2000	34.70	29.88	35.42	14 年生檳榔	陸象豫等 (1999)

溪頭柳杉人工林的樹冠截留研究始於邱永和 (1972) 以43年生柳杉為對象，於樣區中設置1個自記虹吸式雨量計及8個標準雨量計量測林內穿落水量，各林分挑選樣木20株並使用貯水桶測量幹流量，試驗期間為1970年1月至1971年3月，但由於幹流貯水桶在降雨量超過40 mm時就會超量，取得之幹流量資料不多，在估



算樹冠截留百分比時忽略幹流量，試驗期間柳杉樹冠年截留百分比20.40%，幹流量占總雨量3.85%，亦發現有霧日時的幹流百分比(6.71~12.21%)大於無霧日(0.41~4.16%)，結果認為樹冠截留量受降雨持續時間和降雨量同時影響。吳文統(1994)於第3林班173號造林地44年生柳杉林，使用32個自製、直徑20 cm、容量約3 L的雨量計及1個標準雨量計觀測穿落水，試驗期間為1994年3月至5月4日，從16場降雨事件中選出10場分析，柳杉樹冠截留百分比為15.90~88.22% (本文作者自行換算)，並分析影響樹冠截留的因子，得出就單一場降雨而言，影響林內降雨量及樹冠截留的主要因子為：林外總降雨量及開始第一小時林內外降雨量比值，可解釋為樹冠的濕潤狀態會影響樹冠截留量，樹冠濕潤時減少截留量，增加林內降雨量，但此試驗的觀測時間僅2個月，僅以10場降雨的資料建立的樹冠截留量與降雨量的迴歸分析，且因未測量幹流量，在計算樹冠截留百分比時仍忽略幹流。陳怡妙(2010)在溪頭第3林班60-4號造林地36年生柳杉林設置樣區，觀測塊狀皆伐前後柳杉林分之養分、水量及土壤水化學變化，穿落水裝置為3個15 cm漏斗連接25 L水桶，隨機佈設於12個20 m × 20 m樣區中，林外雨量裝置與穿落水相同，觀測方法為設定間隔6小時以上的降雨事件，以單次降雨事件為單位收集，試驗結果認為柳杉樹冠截留百分比為15%，由於此研究著重於養分循環，柳杉樹冠截留百分比定義為疏伐區與未疏伐區穿落水百分比的差，並非來自林內與林外雨量之比較(林外雨量裝置直到2008年12月底才架設完成，至2009年3月起才有林外雨量資料)，與樹冠截留之一般定義不同。

第三章 研究材料與方法




第一節 研究區域概況

臺大實驗林溪頭營林區位於臺灣中部，介於東經 $120^{\circ}46'50''$ 至 $120^{\circ}48'30''$ ，與北緯 $23^{\circ}40'37''$ 至 $23^{\circ}40'42''$ 之間。地處北勢溪（東埔蚋溪）上游，距離竹山鎮東南方約22 km，行政區域屬南投縣鹿谷鄉，營林區範圍南北長約10 km，東西寬度由北而南漸次開展約在2~4.6 km之間（陳紫蛾、張石角，1987）。區內管轄6個林班（1~6林班），面積共計2349 ha（臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處，2008；臺灣大學農學院實驗林管理處，1963）。



圖 3.1 溪頭地區的地形圖（經建三版 9520-II NW 溪頭）
（資料來源：<http://map.happyman.idv.tw/twmap/main.php>）



溪頭為一開口向北之畚箕型谷地，東、西、南三面環山，地形大致上由北向南漸次升高，海拔高600-2000 m，南側為本區最高峰—嶺頭山（海拔2025 m），東側與鳳凰山（海拔1696 m）等數座連峰組成鳳凰山脈，鳳凰山脈北段有三條小山脊向西北延伸，構成本區北界；嶺頭山向西延伸與內樹皮山（海拔1766 m）連成之山脈構成本區南界，山脈西段向西北方分出兩條小稜線形成一丘陵地，其下游為北勢溪，兩者合為本區之西界（陳紫蛾、張石角，1987）。

地質方面，由第三紀中新世上部之南莊層、桂竹林層、新第三紀卓蘭層及第四紀之台地崩積層組成，岩性包括砂岩、粉砂岩、泥岩、頁岩或泥頁岩互層等，崩積層則由粘土、粉砂、砂與礫土構成，厚度應當在20 m以上。有水坑斷層南北向貫穿本區（陳紫蛾、張石角，1987）。

溪頭營林區之土壤大部分為頁岩與砂岩等母岩風化而成的褐色土，位於林下故長年維持高含水率且腐質層深厚，深度30 cm以下多礫石，質地為砂質壤土、砂質粘土、砂質黏壤土或壤土（何鎮平，1977）。土壤pH值隨林相不同，介於4.3至5.9之間，為酸性土壤（王亞男等，2002）。

本區有氣象站一處，設立於1928年，位於北緯23°40'13"、東經120°47'54"，海拔高1150 m，為一級農業氣象站（臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處，2008），根據1941~2005年氣象資料，年均溫度16.5 °C，年均降雨量2661.5 mm，年蒸發量約523 mm，各月平均相對濕度88~91%，降雨主要集中於5到9月，占年雨量76.5%，10月至隔年4月占年雨量23.5%，平均年降雨日數167.7天，如圖 3.2及圖 3.3（鄭森松、陳信佑，2009）。因山谷地形之故，盛行季風對風的影響並不明顯，谷風吹拂時段在白天，主要風向為NNW、NW，夜間吹山風，主要風向為SE、SSE（魏聰輝等，1995）。

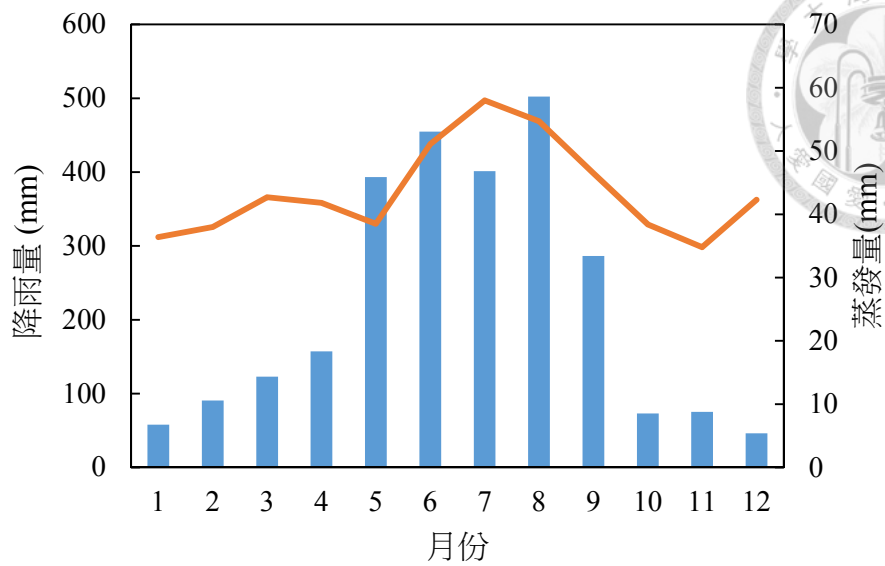


圖 3.2 溪頭氣象站 1941~2005 年月平均降雨量及 1963~2005 年月平均蒸發量
(鄭森松、陳信佑，2009)

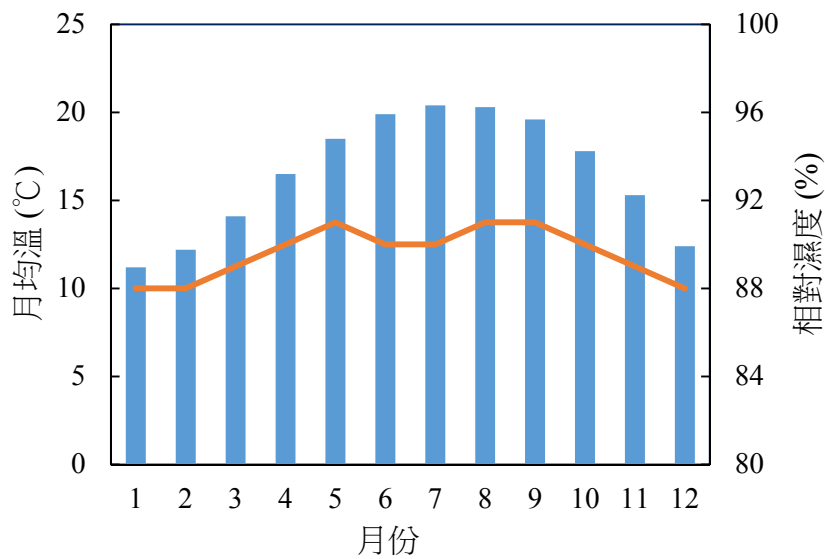
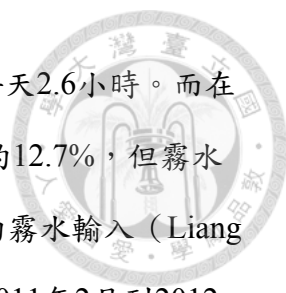


圖 3.3 溪頭氣象站 1941~2005 年月平均溫度及相對濕度
(鄭森松、陳信佑，2009)

溪頭屬多霧地區，以2005年3月至2006年4月觀測資料為例，能見度小於1000 m之霧日數達320天，共計2415小時，占總時數28%；發生頻率最高的是2005年4月到7月及2006年3月（153/153天），最低為2006年1月（12/31天）；霧日平均持



續時間以2005年4月最高，達每天18.4小時，最低為該年8月的每天2.6小時。而在霧水收集量上具有明顯的季節變化，乾季降雨量僅全年降雨量的12.7%，但霧水收集量占全年72%，因此在相對乾燥的時期，可能有較為豐富的霧水輸入（Liang et al., 2009；梁晏綾，2007）。魏聰輝等（2011）亦指出，自2011年2月到2012年1月11個月間，霧日為292天，成霧總時數2009.8小時，成霧平均為每日6.8小時，其中能見度小於500 m之濃霧，共計276天，總時數1405.3小時，推判溪頭地區霧之種類為升坡霧。

本區植被，除鳳凰山麓尚保留面積約509 ha之闊葉樹天然林，供為樹木學、植物學及生態學上之教學、實習及研究外，其餘坡地都已開發，改造為人工林，以栽植柳杉(*Cryptomeria japonica*)、臺灣杉(*Taiwania cryptomerioides*)、紅檜(*Chamaecyparis formosensis*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)及巒大杉(*Cunninghamia lanceolata* var. *konishii*)等針葉樹種，及孟宗竹(*Phyllostachys heterocycla*)、桂竹(*Phyllostachys makinoi*)等竹類為主，另有泡桐(*Pulownia taiwaniana*)、臺灣赤楊(*Alnus formosana*)等數種闊葉樹造林地，惟面積較小，近年因經營目標轉變，造林多使用鄉土樹種，且以混合造林為主（臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處，2008；劉儒淵等，1990）。

溪頭的人工林經多年經營，林相良好，林下植被茂密，本研究試驗地第3林班173號造林地，為1950年造林之柳杉純林，造林時的密度約3805 株/ha（173號造林地造林台帳），目前密度約721 株/ha（臺大實驗林調查資料），面積16.17 ha，海拔1250 m左右，平均坡度15°。本研究自行調查林下植被組成，木本植物有小葉白筆(*Symplocos modesta*)、牛奶榕(*Ficus erecta* var. *beeheyana*)、長梗紫芋蕨(*Oreocnide pedunculata*)、大葉楠(*Machilus japonica* var. *kusanoi*)等，草本植物有曲莖馬藍(*Strobilanthes flexicaulis*)、巒大秋海棠(*Begonia randaiensis*)、山薑(*Alpinia japonica*)、奮起湖冷水麻(*Pilea funkikensis*)、冷清草(*Elatostema lineolatum*)、闊葉

樓梯草(*Elatostema platyphyllum*)、赤車使者(*Pellionia radicans*)、長梗盤花麻(*Lecanthus peduncularis*)、角桐草(*Hemiboea bicornuta*)、姑婆芋(*Alocasia macrorrhizos*)等，蕨類則有蕨類則以觀音座蓮(*Angiopteris lygodiifolia*)、廣葉鋸齒雙蓋蕨(*Diplazium dilatatum*)等，植物相豐富，多為適合潮溼環境生長的植物，優勢種以牛奶榕、闊葉樓梯草、冷清草、姑婆芋、觀音座蓮最為常見。

第二節 樣區設置

研究對象樣區之柳杉林分狀態及林內降水再分佈觀測示意圖如圖 3.4，採用水收支法量測穿落水、幹流水來估計柳杉樹冠截留量，另以浸水秤重法估計林下植物截留量。於第3林班173號造林地設置樣區兩處(圖 3.5)，海拔1264 m，樣區1設有穿落水裝置9組(T1~T9)，幹流水裝置11組(S1~S11)，穿落水裝置配置如圖 3.6，每個圓圈代表一個穿落水裝置，圓圈中的數字為裝置編號，各裝置間隔10 m，幹流水裝置配置將於下段描述；樣區2設穿落水雨量計5組(UTR1~UTR5)，如圖 3.7，後為比較水桶及雨量計兩種收集方法的差異，在每個雨量計旁增設穿落水裝置共5組(UT1~UT5)。

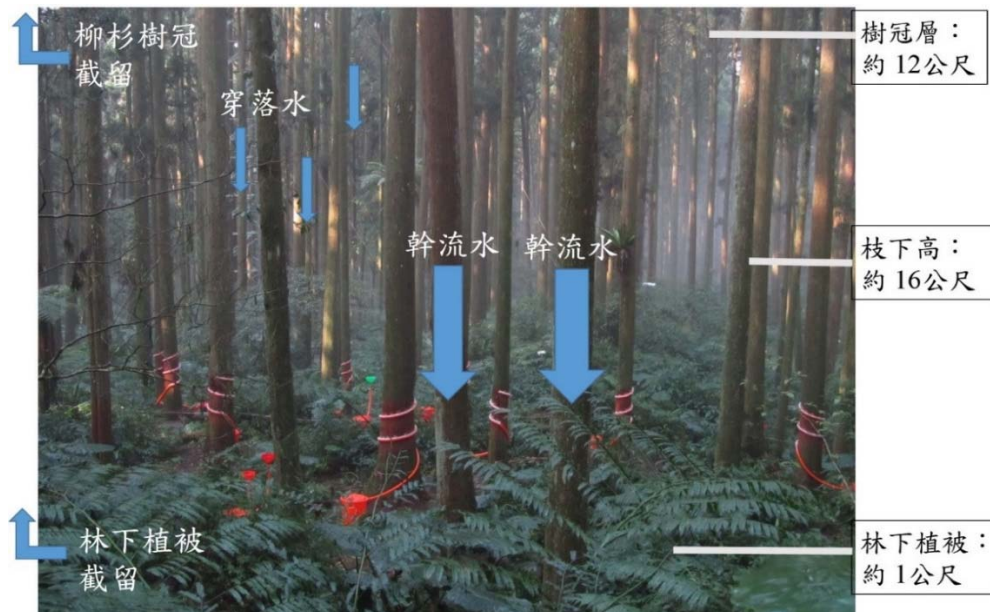


圖 3.4 樣區之柳杉林分狀態及林內降水再分佈觀測

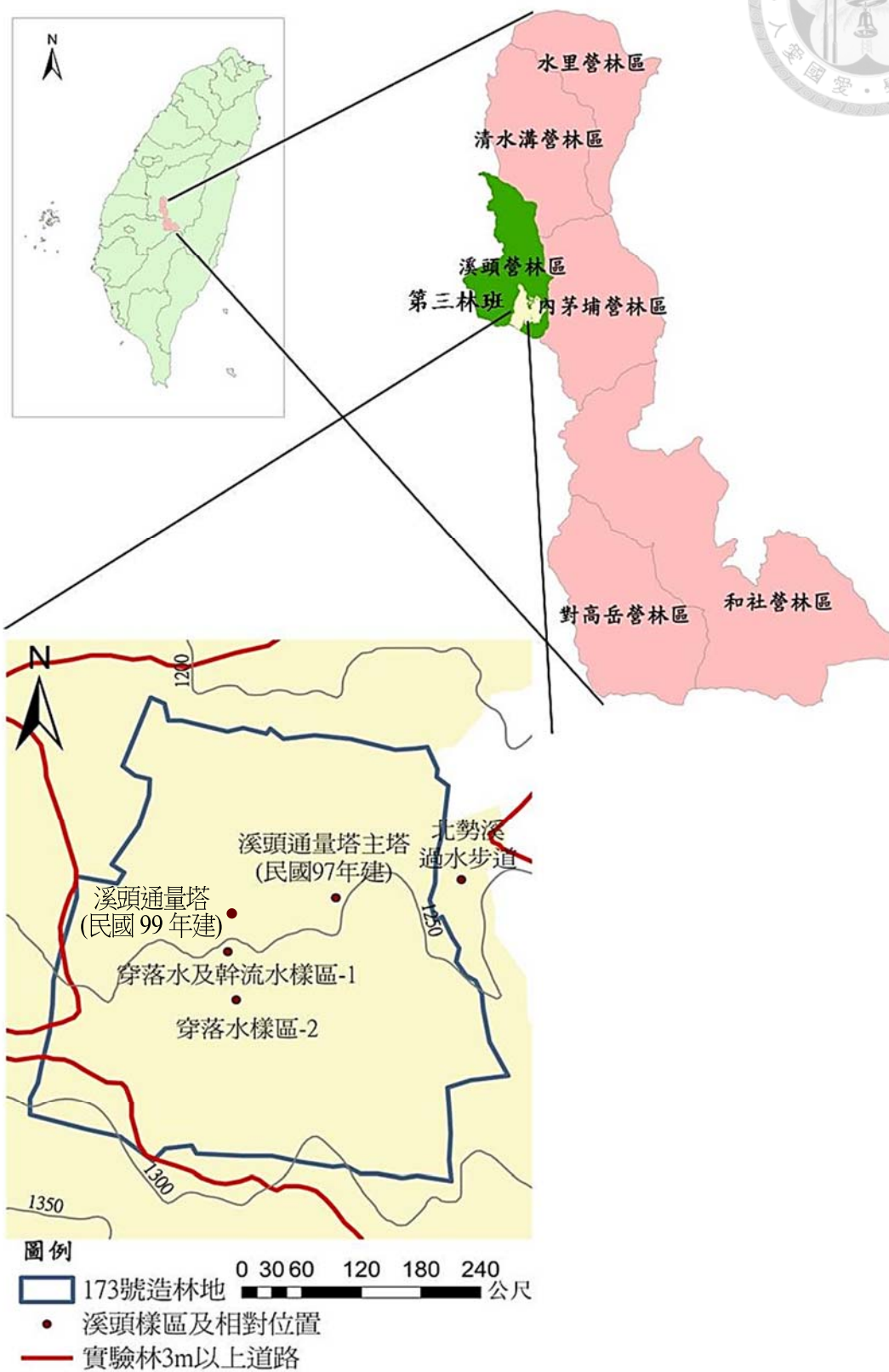


圖 3.5 樣區位置圖

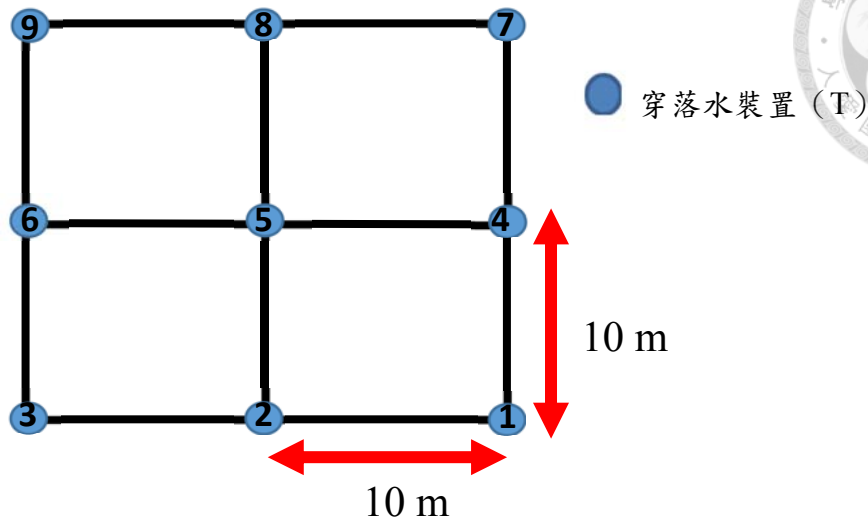


圖 3.6 樣區 1 穿落水裝置配置圖

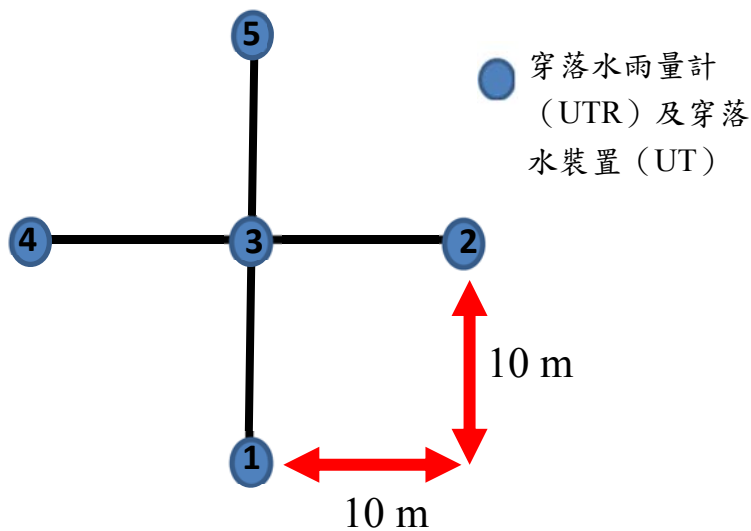


圖 3.7 樣區 2 穿落水裝置配置圖

本研究於173號造林地內選擇地點為2010年所建的通量塔南側，坡度較緩且凸起石塊較少處，便於裝置架設及測量作業，由於東西兩側皆為溪溝，寬度僅20~30 m左右，故採南北方向佈設樣區。穿落水的樣區設置，係以固定間隔距離(10 m)來觀測穿落水。樣區1的穿落水裝置於2012年1月13日完成T1~T7，2月23日全數裝設完畢，並於3月8日收到第一筆完整的穿落水資料；穿落水樣區2的雨量

計UTR1~UTR5裝設完成於2012年3月9日，樣區2的穿落水裝置UT1~UT5則於同年的10月4日裝設完成，10月24日收到第一筆完整資料。

樣區1中幹流水裝置之配置，首先自臺大實驗林取得173號造林地調查資料（圓形樣區取樣），按胸徑級大小分組之株數分佈，如圖 3.8，本研究依株數百分比的分佈挑選樣木，同時注意樣木生長情況，剷除樹幹凹陷或過於傾斜者，選取之樣本如表 3.1，按DBH由小到大的順序分別給予樣木編號S1~S11。

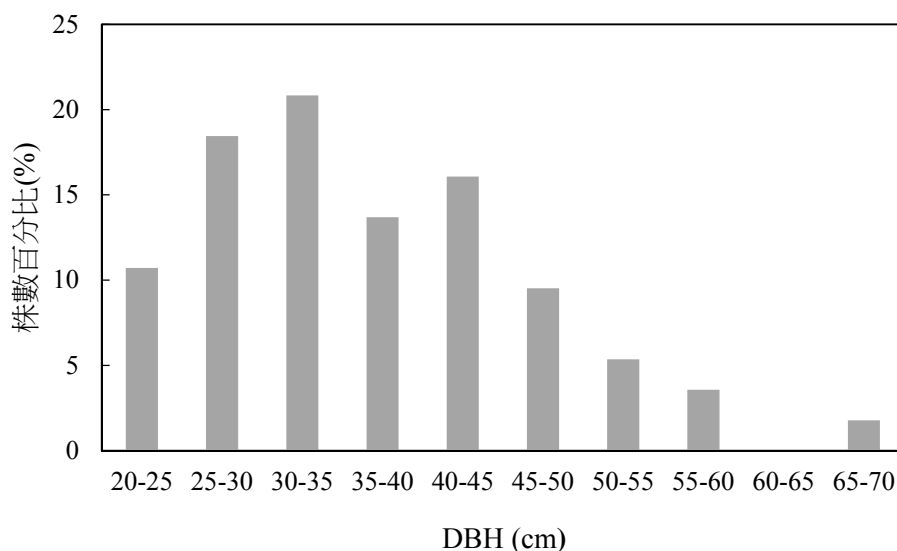


圖 3.8 173 號造林地取樣調查之 DBH 徑級分布圖

表 3.1 幹流水觀測之樣木及其 DBH

分組	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50 以上
挑選株數	1	2	2	2	2	1	1
DBH(cm)	21.6	28.4 26.8	34.2 32.8	35.2 36	42.6 41.2	47.8	50.2

樣區1所有幹流水裝置(S1~S11)於2012年3月8日全數裝設完畢，連接數個46 L或86 L水桶，但由於幹流量太大大次超量，於5月26日挑選其中5株樣木更換為雨量計觀測，詳細方法於下節資料收集與分析的二、水文收支項目之資料與收集之（三）幹流水中敘述。



第三節 資料收集與分析

一、試驗架構圖

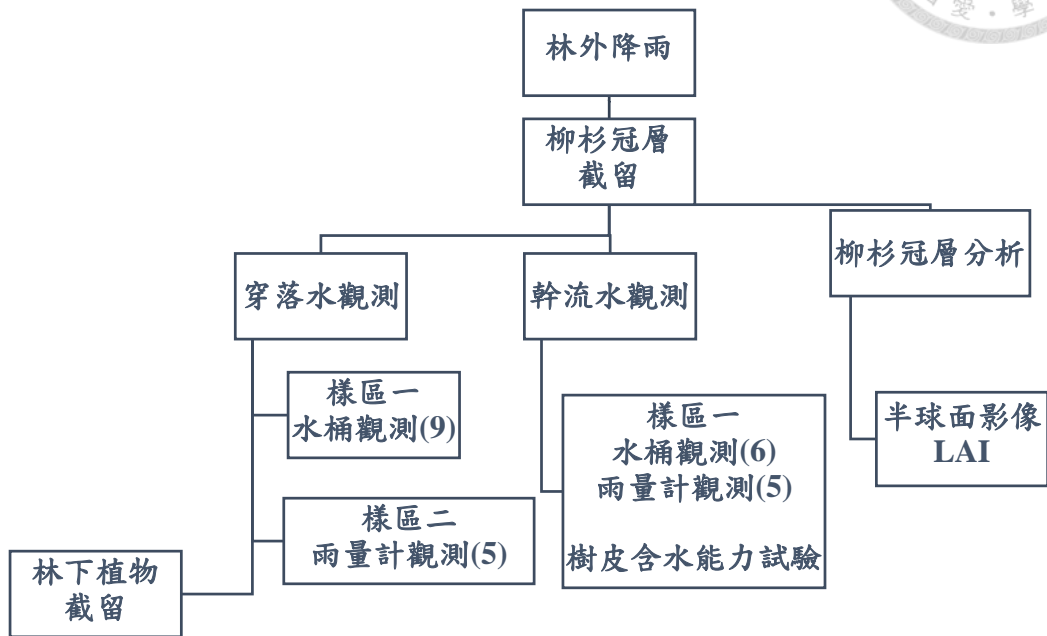


圖 3.9 試驗架構圖

二、柳杉樹冠結構分析

1. 樹冠孔隙率測定—半球面影像分析

柳杉降水再分佈過程中，穿落水的來源有二，一為經過樹冠孔隙直接滴落，二為經過樹冠的葉、樹枝、樹幹攔截後滴落，測定樹冠孔隙率可瞭解林分鬱閉程度，有助於界定柳杉樹冠對穿落水的影響，測定與分析方法如下。

- (1) 在清晨天尚未全亮，且林內無霧雨遮蔽之適當光線條件下，使用魚眼鏡頭進行影像拍攝，相機為NIKON COOLPIX E990數位相機，鏡頭為NIKON FC-E8 Fisheye Converter。
- (2) 以三腳架固定相機，使用水平尺確認各方向皆為水平，拍攝高度設定為120 cm（與穿落水裝置高度相同）。



(3) 拍攝前確認鏡頭之南北方位，以利後續影像資料分析。

(4) 拍攝完之影像資料以GLA(Gap Light Analyzer (Version 2.0))軟體分析樹冠孔隙率(Gap fraction)，該軟體亦可計算LAI值。

(5) 於2012年3月8日及2012年4月6日各拍攝一次。

2. 柳杉葉面積指數—LAI-2200植物冠層分析儀

LAI-2200植物冠層分析儀使用一組魚眼光學感應器分別測量樹冠上和樹冠下的5個不同天頂角（ 7° 、 23° 、 38° 、 53° 、 68° ）的輻射得到透光度，再經輻射模型運算葉面積指數。

依照LAI-2200的操作手冊(LI-COR, Inc., 2011)模型假設有四點：

1. 葉片是黑色且在樹冠下沒有任何光反射和散射。
2. 樹冠中的葉片隨機分佈。
3. 相對於魚眼探測頭每個同心環的檢測區域而言，葉片是很小的，即探測頭離最近葉片的距離應大於葉片寬的4倍以上。
4. 葉片的方位角是隨機的，也就是無論葉片方向為何，只要都不朝同一方向排列即可。

LAI-2200測定分析方法如下：

- (1) 將LAI-2200的兩隻測桿分別置於樹冠上及樹冠下方，同時開機令其讀取數據，需保持測桿水平，兩者皆使用 90° 遮蓋片以防止鏡頭受操作者影響。
- (2) 樹冠上方的點位於附近之通量塔（2010年建）上（每5秒鐘自動記錄一筆），約40 m高的位置，同時在樹冠下進行隨機取樣，共取36個點。
- (3) 將收集到的資料以FV2200軟體進行分析，軟體可配對樹冠上和樹冠下相近時間的光度資料，依模型計算出LAI。
- (4) 本研究於2012/3/22日測量一次。



三、水文收支項目之資料收集

(一) 林外雨量

使用溪頭苗圃、大學坑設置的氣象站及溪頭通量塔之雨量計觀測資料，苗圃、大學坑氣象站為每10分鐘記錄1筆，溪頭通量塔為30分鐘記錄1筆，資料之使用準則為，苗圃、大學坑的雨量資料用於切割降雨事件，配合林內之穿落水、幹流水雨量計的時序資料分析林外降雨與林內穿落水、幹流水的時間差，通量塔的雨量計位於173號造林地的通量塔主塔（2010年建）頂端，高於柳杉樹冠，是距離本研究樣區最近的雨量計資料，用於與15日收集1次的穿落水、幹流水水桶資料分析樹冠截留量，惟因儀器多次故障造成資料不全，故若某時段有完整資料則使用，否則仍以苗圃、大學坑的雨量資料為主。

降雨事件的定義為從有降雨記錄開始，間隔在 n 小時以內視為同一場降雨事件（因為林外降雨結束後林內降雨仍然持續），本研究將 n 值設為1、2、3、4、6、12、18、24、48、72小時。方法為將雨量資料輸入Excel軟體，首先篩選出有降雨發生的時間，記錄每次開始和結束時間，接著比較每次的時間差是否為 n 小時以內，若為時間差超過 n 小時則確認為不同場降雨事件，若在 n 小時以內，則合併前後場次資料直到找到超過 n 小時的時間間隔，完成後按時間順序從1開始給予降雨事件編號。

(二) 穿落水

穿落水量收集主要有下列兩種方式：一為設置受水面積較大之承雨槽，二為設置承雨漏斗，配合小型雨量計進行監測。前者考慮的是空間分佈的一致性，後者則可紀錄單位時間的林內穿落水資料（塚本，1992）。

陸象豫、唐凱軍（1995）在蓮華池天然闊葉林之試驗方法以及林登秋等（1996）在福山之試驗方法為在林內地表高度約90 cm處或枯枝落葉層上方設直

徑20或25 cm漏斗承接穿落水，下置塑膠計或將漏斗連接把水匯流至傾斗式自計雨量計以測量水量，本試驗參考前人的研究，設計穿落水裝置。

穿落水承接器設置方式：角鐵2支間隔110 cm，高度120 cm，高度設定以高於林下植物為基準，將直徑20 cm漏斗固定在角鐵上，以束帶調整漏斗水平，下接塑膠水管連接塑膠水桶(46 L)，以矽利康填補塑膠水桶內外縫隙。每隔15日左右蒐集穿落水量1次，使用量桶或量測水位高換算水量。



圖 3.10 穿落水裝置圖 (左：水桶，右：雨量計)

穿落水之水桶裝置設計為每個點設2個漏斗，漏斗直徑20.1 cm，共計截水面積為634.62 cm²，測量到的水量(mL)除以截水面積換算成深度(mm)。

穿落水雨量計設置方式：雨量計約24 cm高，置於100 cm高的鍍鋅鐵管上，高度合計約為124 cm，計內置三層濾網防止堵塞。雨量計為Davis Inc.製Model 7852傾斗式雨量計，該型雨量計可監測0.01 inch及0.2 mm兩種模式，使用前已調整成0.2 mm模式，並經過自行校正，校正方法為將雨量計與記錄器連接，掛設點滴裝置，末端置於雨量計內使水自行滴入，計算流入雨量計的水量和記錄器記錄到的水量，確認兩者相符，每個雨量計皆執行2次。雨量計連接之Campbell Scientific Inc.之 CR-1000型資料蒐集記錄器，可同時記錄降雨時間和降雨量。穿落水雨量計為傾斗式，截水面積214 cm²，資料收集為每隔5分鐘記錄一筆，每次

0.2 mm，如遇雨量計堵塞、斷線等異常狀況，於計算時排除該段時間之資料。

穿落水具有相當大的空間變異性，Holwerda et al. (2006)在波多黎各Luquillo山脈的Bisley 2集水區的試驗結果，面積6.4 ha的低山地熱帶雨林，若要達到95%的信賴水準，穿落水至少需要100個固定觀測點或30個移動觀測點。本試驗因經費及人力限制，試驗設計僅有樣區1與樣區2共14個觀測點，故在資料分析時將除去大於平均值加減2倍標準差的極端值。

由於收集期間穿落水之雨量計資料都比水桶資料低，平均低達30%，故在本試驗中雨量計資料主要用途，為配合林外降雨量的資料切割成的單場降雨事件，來檢視林外降雨與穿落水間的時序關係。

把各降雨事件時間內的14個穿落水桶資料平均後（T1-T9、UT1-UT5），可得平均穿落水深，乘以試區面積，即為該降雨事件內之穿落水量。

（三）幹流水

幹流水幹流收集裝置設置方法：於樣木之離地表高度約130至170 cm樹幹周圍，削去外層樹皮，以內徑2.5 cm塑膠軟管緊密纏繞樹幹3圈，管上間隔適當距離切「 \square 」字型鑿出若干小孔，將掀起之塑膠管用鋁釘固定在樹幹上，並以內徑約6.4 mm的細塑膠管纏繞於大塑膠管外側，先用束帶固定後，再用矽利康填補所有縫隙（圖 3.11），管子末端連接塑膠水桶（6組）或傾斗式雨量計（5組）測量水量。水管與水桶連接處內外皆填上矽利康，防止漏水；與雨量計連接時，以三角形鐵為基座固定雨量計（圖 3.12），校正水平氣泡，幹流水水管末端先連接直徑20 cm漏斗，再將漏斗覆蓋在雨量計上（圖 3.13），縫隙填補矽利康，防止穿落水進入。



圖 3.11 幹流水塑膠水管纏繞及裝置圖



圖 3.12 雨量計基座設置圖



圖 3.13 幹流水雨量計連接示意圖

水桶資料每15日左右蒐集幹流水量1次，使用量桶或量測水位高換算水量；雨量計包括Nippon Electric Inc.製0.5 mm傾斗式雨量計及大田計器製作所製0.5 mm傾斗式雨量計，皆連接Campbell Scientific Inc.之 CR-1000型資料蒐集記錄器，可同時記錄降雨時間和降雨量（圖 3.14）。



圖 3.14 幹流水承接裝置圖（左：水桶，右：雨量計）

原設計以水桶蒐集的方式，在幹流量過大有超量的情況，自2012/5/26 14:30起，於樣木編號S1、S2、S3、S8、S11的幹流水資料蒐集改為安裝雨量計，雨量計為傾斗式，每次0.5 mm，資料收集為每隔1分鐘記錄1筆，並在其他樣木增設水桶，達到每棵都能承受178 L的水量。

計算時分別統計該段蒐集時間水桶的資料（S4、S5、S6、S7、S9、S10）和雨量計的資料（S1、S2、S3、S8、S11），若安裝雨量計前則為全部S1~S11幹流水桶的資料，將11株樣木的水量平均，得到平均單株柳杉幹流量，乘以樣區1柳杉總株數（30株），為本樣區幹流量總和，再除以樣區面積(20 m × 20 m)可得樣區幹流量深度(mm)。

由於間隔15日左右之蒐集的幹流量頗為可觀。以下說明資料異常時的處理，若水桶超量在平均時則略過該株樣木不計；如遇雨量計堵塞、斷線等異常狀況，於計算時排除該段時間之資料。異常資料超過3筆，該段時間記為無資料。

幹流水時序資料方面，配合幹流水雨量計資料，與林外降雨量的資料切割成



的單場降雨事件，檢視林外降雨與幹流水間的時序關係。

(四) 水桶之水深—水量迴歸方程式建立

由於蒐集之水桶的水量多時，使用量杯量測耗時，因此依照使用的水桶類型，建立水深-水量迴歸方程式以利資料收集和分析。使用的水桶有兩種，一種為46 L橘色塑膠桶，另一種是86 L藍色塑膠桶，建立迴歸方式為：倒入固定水量（以10 L為單位），量測水桶內水深，以水深為自變數x，水量為依變數y。

建立46 L水桶水位-水量方程式：

$$y = 0.0047x^2 + 0.7949x + 0.7183 \quad (r^2 = 0.9999) \quad (3.1)$$

86 L水桶水位-水量方程式：

$$y = 0.0034x^2 + 1.2675x - 0.667 \quad (r^2 = 1) \quad (3.2)$$

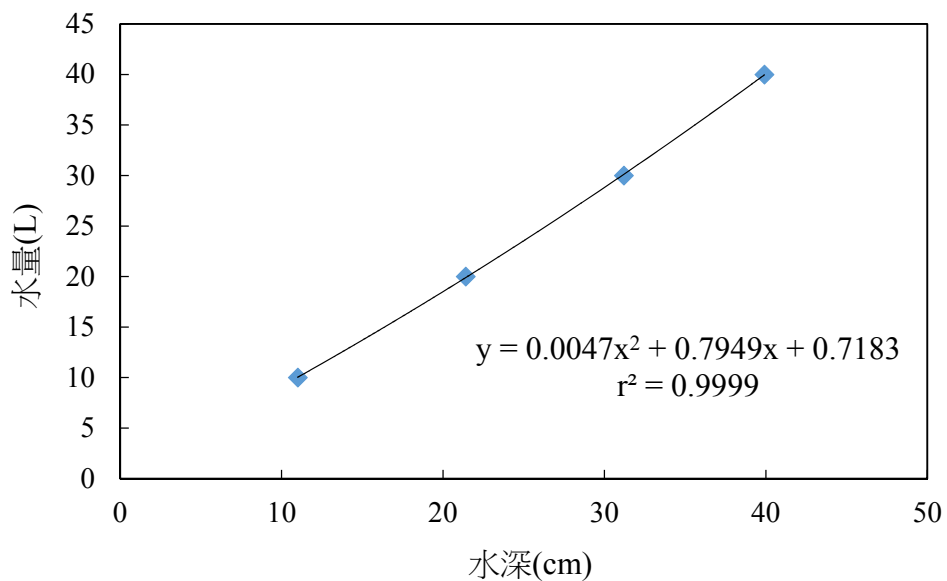


圖 3.15 46 L 水桶水量與水深的關係

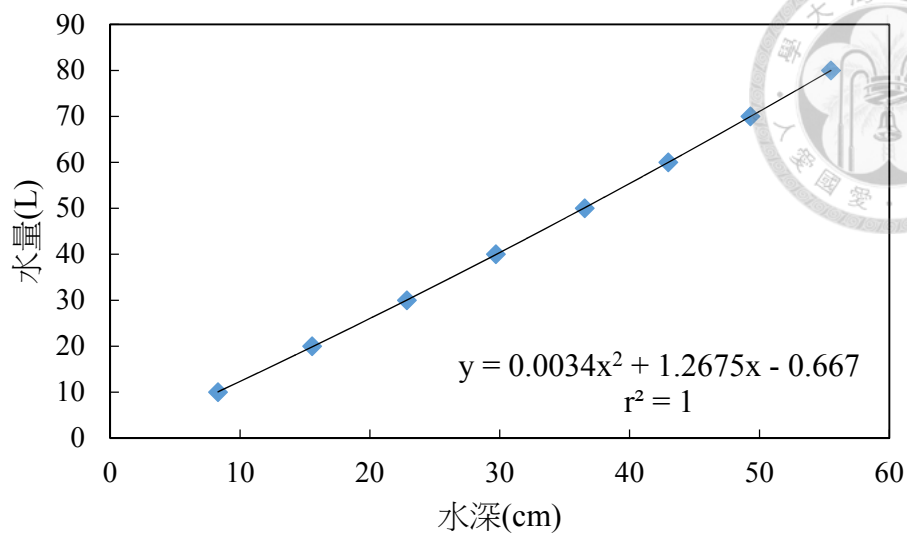


圖 3.16 86 L 水桶水量與水深的關係

(五) 柳杉樹皮含水能力試驗

為了解柳杉樹皮的含水能力，採用浸水秤重法，於樣區1隨機挑選柳杉6株，記錄DBH，在胸高直徑處刮除20 cm × 20 cm，厚度約1 cm的樹皮，裝袋編號攜回實驗室。

試驗時取出氣乾72小時，秤其乾重，浸水潤濕後再秤其濕重，記錄濕重，計算柳杉樹皮在天然狀態下的含水能力。

(六) 林下植物截留

採用浸水秤重法，於樣區1或2附近隨機圈出1 m × 1 m小樣區，將區內土壤表面以上所有林下植物全數收割，包括自側邊生長但橫過樣區上方者，收割之林下植物裝袋編號後攜回實驗室，保存於10°C冰箱中。

試驗時將採回的林下植物體取出，平鋪於網目1 mm大小的塑膠網上，配合小型電風扇氣乾1小時，視枝葉量調整時間，以葉面全乾且植物體不萎縮為原則，氣乾期間每隔15分鐘翻動一次以確保葉面完全乾燥。氣乾後先秤重，接著把全部植物體浸水，待完全濕潤後取出滴乾30秒，再置於塑膠網上（此時應無水從網子

中滴落) 秤重，植物體濕重減去乾重即為截留水量，除以小樣區面積可知林下植物的截留水深，全部試驗於室溫27°C條件下進行。



(七) 柳杉樹冠截留

樹冠截留的估計有多種方式，在實測上常用的方法為林外雨量與穿落水量及幹流量之差，或是以穿落水發生前所觀測到的林外降雨量視為樹冠截留量（陸象豫、唐凱軍，1995）。

本研究之樹冠截留定義為林外降雨量減去穿落水量和幹流量，另將穿落水量、幹流量、樹冠截留量除以林外降雨量以百分比表示。

第四章 結果與討論



第一節 降雨量與降雨事件

溪頭地區降水主要來自降雨，樹冠截留量與降雨型態息息相關，林登秋等（1996）在福山天然闊葉林進行的研究指出，夏季因溫度高、蒸發散速率較快、相對濕度較低，使葉面較乾燥提高樹冠截留貯留量；冬季則由於每場降雨量少、降雨延時長及降雨強度小，因而提高樹冠截留百分比。而要了解降雨型態，更好的方法是先以固定分割時間分割出降雨事件，再從降雨事件來看降雨與樹冠截留的關係，這也是目前研究較缺乏的部份。

因本研究同時取用溪頭苗圃及大學坑氣象站的雨量資料，故先檢驗二者之間的關係，圖 4.1 為 2012/01/01~6/30 苗圃與大學坑氣象站日雨量關係圖，苗圃的日雨量與大學坑的日雨量相當接近，二者關係式 $y = 1.05x - 0.30$ ，其中 y 為苗圃的日雨量， x 為大學坑的日雨量， r^2 為 0.99。

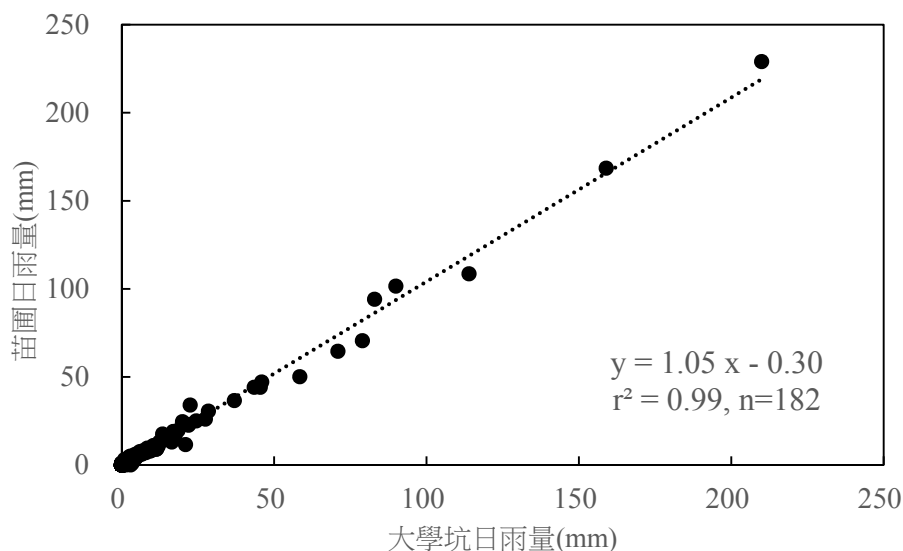


圖 4.1 溪頭苗圃及大學坑氣象站的雨量資料關係圖(2012/01/01~06/30)

觀測期間 2012 年 1 月至 2013 年 2 月的月降雨量，及 1941~2005 年月平均降雨量繪製如圖 4.2，2012 年 1 月至 2012 年 6 月資料來自苗圃氣象站，2012 年 7 月至 2013 年

2月，因苗圃氣象站故障，改用大學坑氣象站的資料。溪頭乾濕季明顯，依往年降雨資料，雨季為5到9月，乾季為10月至隔年4月，降雨主要集中於6至8月。觀測期間降雨主要集中於4到8月，又6月和8月最高，6月份降雨量729.0 mm，其中，梅雨鋒面(6/10~6/14)降雨量493.0 mm(67.6%)，泰利颱風(6/19~6/21) 降雨量131.5 mm(18.0%)；8月降雨量979.0 mm，其中蘇拉颱風(7/30~8/3)的降雨量810 mm(82.7%)，颱風或梅雨風鋒面期間的降雨量多且降雨強度大，柳杉樹冠截留作用將因此受到限制。此外，颱風期間降雨的空間變異性大，又受到風速的作用，使的林外降雨量及林內降雨量、幹流量等觀測的準確性大受影響，在後續的分析結果顯示，颱風期間的穿落水百分比呈現偏低的情形。

2012年7月因無颱風形成，月累積雨量低於歷年平均值，11月和12月原屬乾季，但本年度東北季風帶來的降雨較多，降雨量較歷年平均值高。

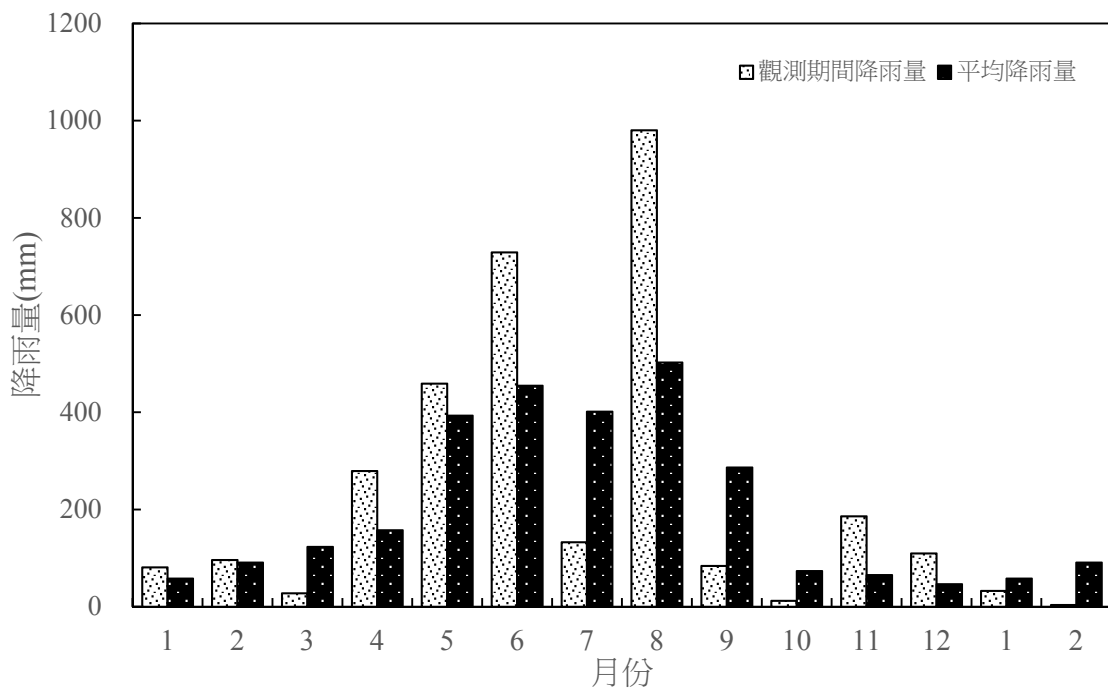


圖 4.2 溪頭氣象站 2012 年月降雨量及 1941~2005 年月平均降雨量分佈圖

降雨為森林水文收支的輸入項，雨水被樹冠截留後蒸發消失，或是從樹冠滴落，造成林內降雨會有時間延遲的情形，因此，在降雨事件的分割時間上，應考

慮前一場次的降雨事件不會影響到下一場次穿落水百分比、幹流水百分比和樹冠截留百分比的觀測及估算。首先使用不同的降雨事件分割時間來觀察分離出的降雨事件之降雨量分布，將降雨量分成0.5 mm、1-2.5 mm、3-10 mm、10-50 mm、50-100 mm、100-130 mm、130-200 mm、200-350 mm和>350 mm 九個等級，分析不同等級的降雨事件百分比，結果如圖 4.3。

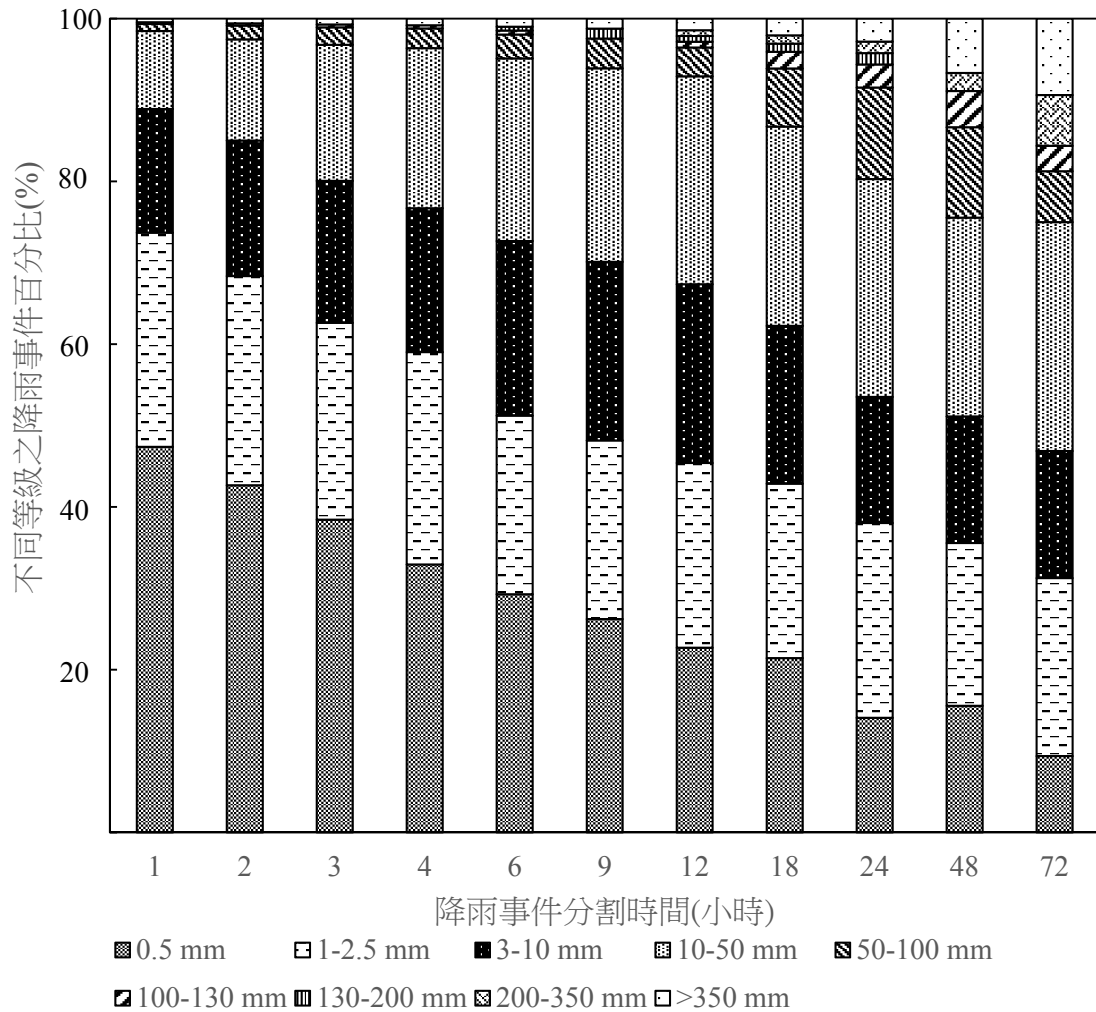


圖 4.3 不同分割時間之不同等級降雨事件百分比

由圖 4.3可以看出，隨著分割時間增長，累積雨量0.5 mm的降雨事件占的百分比逐漸減少，而且因小而連續的降雨事件被合併（這些小降雨事件發生在大累積雨量降雨事件前後），可區分出一些雨量較大(>130 mm)的降雨事件，各種大小降雨事件分布也較平均，但若分割時間過長則可能合併太多小降雨事件。分析



觀測資料發現，對穿落水及幹流水的發生而言，累積雨量0.5 mm的小降雨事件，除非柳杉樹冠一直處於潮溼狀態，多無法產生林內降雨即被樹冠截留，故在降雨事件分割上期望減少0.5 mm小場次降雨事件的數目，能有較大累積量的降雨場次資料和較平均的降雨事件分布。

本研究採用6小時為分割時間，2012年1月至2013年2月共計可分割出205場降雨事件，相較於短時間間隔可分割出降雨量分布較平均的降雨事件；相較於長時間間隔則保有較詳細的大累積雨量降雨事件資料。

表 4.1 不同分割時間降雨事件場次數

分割	1	2	3	4	6	9	12	18	24	48	72
時間	小時	小時	小時	小時	小時	小時	小時	小時	小時	小時	小時
場次	460	354	281	249	205	164	141	98	71	45	32

第二節 柳杉樹冠結構分析

一、樹冠孔隙率

樹冠孔隙率在計算分析時，考慮地形影響及樣區1、樣區2皆為鬱閉柳杉林分，將半球面影像分析的天頂角 α 設為 $3^{\circ}\sim 51^{\circ}$ ，無法設 $0^{\circ}\sim 51^{\circ}$ 係為軟體分析限制，且因樣區位於斜坡面上，若取 0° 可能受地形遮蔽影響， $3^{\circ}\sim 51^{\circ}$ 應足夠表示樹冠孔隙率(gap fraction)的狀態。

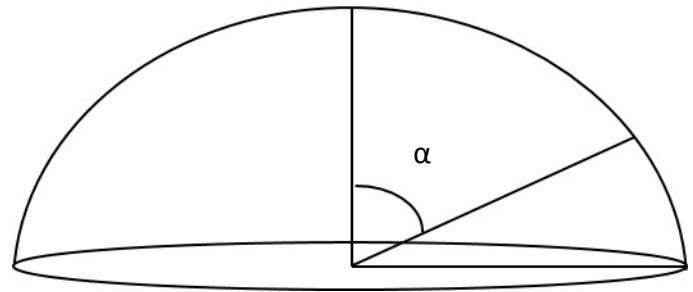


圖 4.4 天頂角夾角示意圖

表4.2為樣區1各穿落水觀測點的樹冠孔隙率，各點平均值介於20.08到26.10%



之間，兩次拍攝的分析結果平均值差異不大(3/8：24.43%、4/16：24.11%)，總平均為24.27%，T9的孔隙率在9個觀測點中是最低的。

表 4.2 樣區 1 九個穿落水觀測點樹冠孔隙率

gap fraction (%)										
拍攝日期	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	平均
2012/03/08	23.53	25.51	27.38	26.60	27.68	27.16	24.33	20.06	17.61	24.43
2012/04/16	26.33	25.66	23.38	24.84	24.53	23.06	22.64	24.03	22.54	24.11
平均	24.93	25.59	25.38	25.72	26.10	25.11	23.48	22.04	20.08	24.27

表 4.3為樣區2各穿落水觀測點的樹冠孔隙率，拍攝日期為2012年4月16日，UT1~UT5介於19.54%到22.93%之間，平均值為21.99%，比樣區1的樹冠孔隙率略小。

表 4.3 樣區 2 五個穿落水觀測點的樹冠孔隙率

gap fraction (%)						
拍攝日期	UT1	UT2	UT3	UT4	UT5	平均
2012/04/16	22.40	22.93	22.81	22.29	19.54	21.99

二、樹冠 LAI

表4.4 為樣區1九個穿落水觀測點之半球面影像分析柳杉樹冠的LAI，為了減少鬱閉林分對觀測點的影響，天頂角設定0°~40°，兩次拍攝分析結果的平均值差異不大(3/8：2.64、4/16：2.68)，就不同拍攝點來看，樹冠孔隙率最低的T8、T9並非LAI最低的觀測點，顯示在鬱閉的柳杉林分下，除了LAI之外還有其他影響孔隙率的因子，包括鄰近的樹枝、樹幹及附生植物等。

表 4.4 樣區 1 九個穿落水觀測點之樹冠的 LAI

拍攝日期	LAI									
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	平均
2012/03/08	2.69	2.64	2.91	2.77	2.43	2.42	2.49	2.82	2.57	2.64
2012/04/16	2.50	2.74	2.77	2.55	2.82	2.75	2.58	2.66	2.74	2.68
平均	2.60	2.69	2.84	2.66	2.63	2.59	2.54	2.74	2.66	2.66

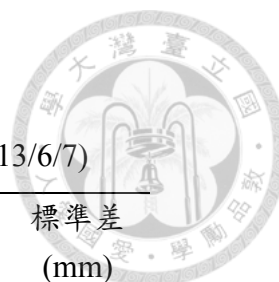
其次，在樣區1內隨機選36個測點，使用以LAI-2200植物冠層分析儀於2012/03/22總共測量1次，收集的資料經軟體分析得到柳杉樹冠的LAI為2.65，與半球面影像分析得到的LAI值相似。

第三節 穿落水

一、穿落水資料

表 4.5為2012/10/24到2013/6/7以15日左右為間隔收集的穿落水資料，採計本段時間之目的為檢定樣區1水桶、樣區2水桶與樣區2雨量計間的平均數是否相同。由於在觀測時發現樣區1水桶資料和樣區2雨量計資料之間平均數差達30%，為驗證觀測方法的準確性，自2012/10/4起於樣區2雨量計樣區裝設與樣區1相同的穿落水水桶蒐集裝置，位置都在各雨量計旁；此外，樣區1及樣區2水桶資料的標準差亦相當大，甚至高於平均值，在樣區2雨量計資料也可發現這個現象，由此可知穿落水各個觀測點不同時間之資料變異相當大。

表 4.5 的資料型態為 15 日左右收一次的樣區 1、樣區 2 水桶資料，及經過整理相同時間的樣區 2 雨量計資料，按樹冠孔隙率分析結果（表 4.2、表 4.3），樣區 1 T1~T9 的樹冠孔隙率平均值為 24.27%，樣區 2 UT1~UT5 的樹冠孔隙率平均值為 21.99%，樣區 1 的樹冠孔隙率高於樣區 2，就穿落水平均值來看，樣區 1 的穿落水平均值 85.59 mm 小於樣區 2 的 85.77 mm，顯示樹冠孔隙率低會提高穿落水量，穿落水除了直接穿過樹冠孔隙的雨水之外，樹冠孔隙率較低可能有較多的



樹冠滴落水，為造成差異的原因。

表 4.5 樣區 1 及樣區 2 穿落水資料(2012/10/24~2013/6/7)

	資料個數	最小值 (mm)	最大值 (mm)	平均 (mm)	標準差 (mm)
樣區 1 水桶	16	0.20	486.30	85.59	128.09
樣區 2 水桶	16	0.25	472.03	85.77	125.33
樣區 2 雨量計	16	0.00	325.00	60.06	85.60

表 4.6為假設變異數相等的T檢定結果，在顯著水準 $\alpha=0.05$ 條件下，樣區1水桶和樣區2水桶兩者的平均數無顯著差異。

表 4.6 穿落水樣區 1 及樣區 2 水桶資料 T 檢定

T 檢定 假設變異數相等	樣區 1 水桶	樣區 2 水桶
平均數	85.59	85.77
變異數	16407.98	15706.85
觀察值個數	16	16
自由度	30	
t 統計	-0.004	
P(T<=t) 單尾	0.498	
臨界值：單尾	1.697	
P(T<=t) 雙尾	0.997	
臨界值：雙尾	2.042	

儘管樣區 2 雨量計資料相較於水桶資料偏低，但若將樣區 2 水桶 (y 軸) 及雨量計資料 (x 軸) 作圖，將截距設為 0，也就是雨量計資料等於 0 mm 時水桶資料亦為 0 mm，如圖 4.5，仍發現二者間相關性非常高， r^2 值為 1.00，關係式為 $y = 1.45x$ ，亦即穿落水雨量計的觀測值乘以 1.45 倍，可當做實際的穿落水量。

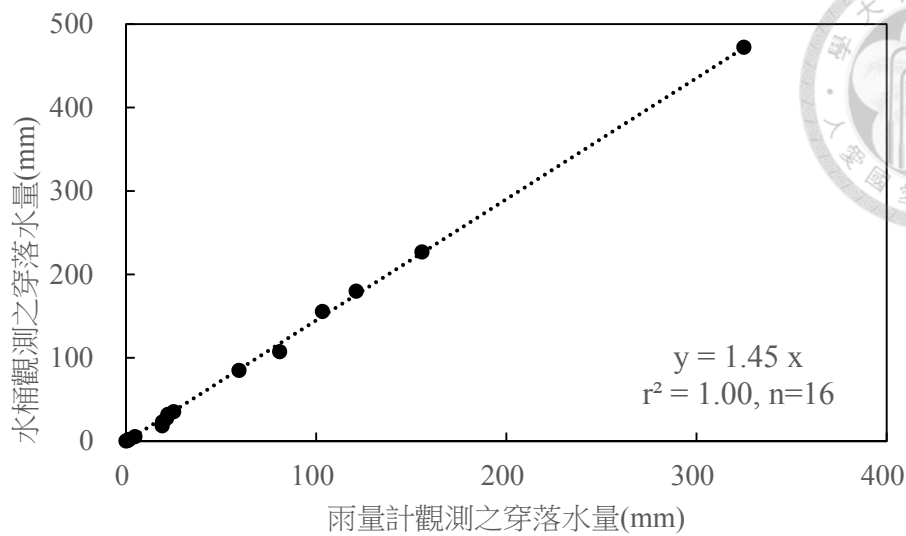


圖 4.5 樣區 2 穿落水桶與雨量計資料之關係

二、極端值分析

表 4.7 為觀測期間穿落水觀測的極端值資料，極端值定義為超過平均值正負兩倍標準差範圍者，根據統計結果，穿落水極端值皆為超過平均值正的兩倍標準差，都發生在樣區 1，其中觀測點 T1 有 2 次、T5 有 1 次、T8 有 4 次、T9 有 2 次，該期間降雨量接近 100 mm 的有 4 場，介於 0.5~3.5 mm 的有 2 場。由於極端值會造成平均值高估，穿落水分析時將去除這些資料。

表 4.7 穿落水極端值資料

資料日期	極端值數	位置	降雨量(mm)
20120709	1	T8	77.5
20120820	1	T1	102.0
20120903	1	T1	107.0
20121004	1	T8	3.5
20121123	1	T5	103.5
20130204	1	T9	0.5
20130314	1	T8	4.0
20130425	1	T8	94.5
20130607	1	T9	- ^a

^a：尚未取得降雨資料



與表 4.2 樹冠孔隙率結果對照，觀測點 T8 的孔隙率為樣區 1 中最低的，此觀測點為最常發生極端值的位置，推測觀測點 T8 之穿落水的蒐集受樹冠的影響最大。

三、穿落水與降雨量

整理樣區 1 和樣區 2 穿落水的觀測資料，皆為 15 日左右收集一次的觀測資料，去除極端值後，自 2012/1/13 至 2013/2/21，共有 27 場有效資料，將各場蒐集的樣區 1 及樣區 2 的穿落水觀測點 (T1~T9、UT1~UT5) 之資料平均，與同時期降雨量資料作圖 (圖 4.6)，得到穿落水量與降雨量的線性迴歸式為 $T = 0.87P + 4.95$ ， $r^2 = 0.99$ ，穿落水量隨著降雨量增加而增加，二者間呈高度相關性。

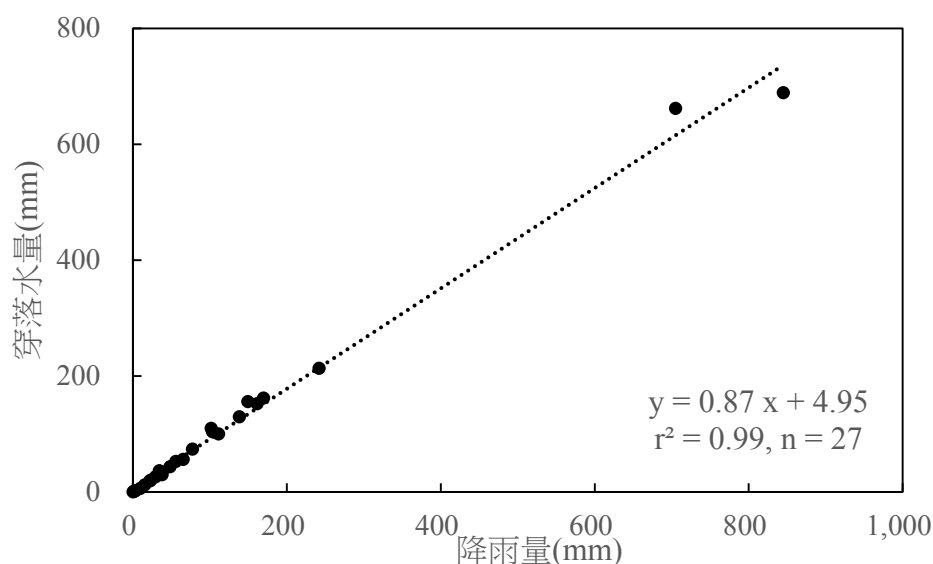


圖 4.6 穿落水量與降雨量的關係

圖 4.7 為穿落水百分比與降雨量關係圖，穿落水百分比隨著降雨量增加而增加，降雨量約 400 mm 時穿落水百分比趨近 100%，在極端降雨量 (>600 mm) 時有較低的穿落水百分比，此 2 個資料點的降雨為梅雨鋒面及颱風造成，由於降雨量高且降雨強度大，降雨量的空間變異可能增大，再者，雨水直接穿過孔隙或經過樹冠使降雨再分佈，可能因空間變異性增大使穿落水分佈不均，造成觀測結果之穿落水百分比偏低，或者是颱風期間穿落水、林外雨量的觀測誤差造成；相反

地，當降雨量低於20 mm，穿落水百分比也會低於80%，低雨量時樹冠截留的影響增大，造成穿落水百分比降低。

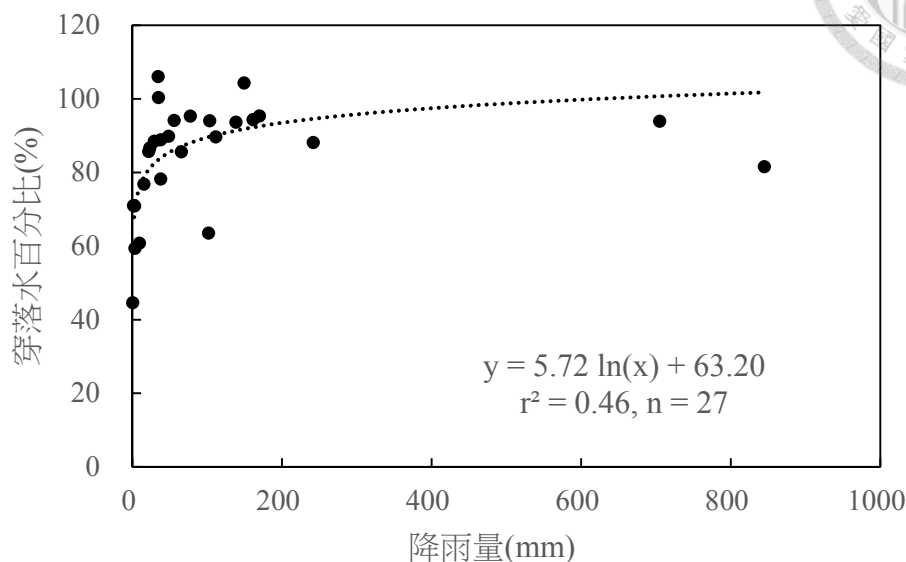


圖 4.7 穿落水百分比與降雨量的關係

將圖 4.7 的穿落水百分比資料按月降雨量大於100 mm及月降雨量小於100 mm區分，如圖 4.8，可發現月降雨量小於100 mm的時候資料點接近趨勢線，當月降雨量大於100 mm時資料點較分散。推測在月降雨量小於100 mm時，因降雨強度大的降雨事件少，穿落水百分比依降雨量增加而上升，降雨量大於100 mm的月份，降雨強度大的降雨事件發生頻率增加，當累積降雨量低於200 mm時使樹冠截留量降低因而增加穿落水百分比；其次，累積降雨量高於200 mm時，可能因降雨強度大，觀測上容易出現誤差，造成計算出的穿落水百分比偏低。

此外，觀測期間共記錄到3筆穿落水百分比超過100%的資料，皆為月降雨量大於100 mm的月份，發生於2012年7月和11-12月，蒐集期間內的降雨量和穿落水百分比分別為35.0 mm(100.32%)、149.5 mm(104.32%)、34.5 mm(106.05%)，其可能原因將於本章第五節與樹冠截留百分比一併討論。

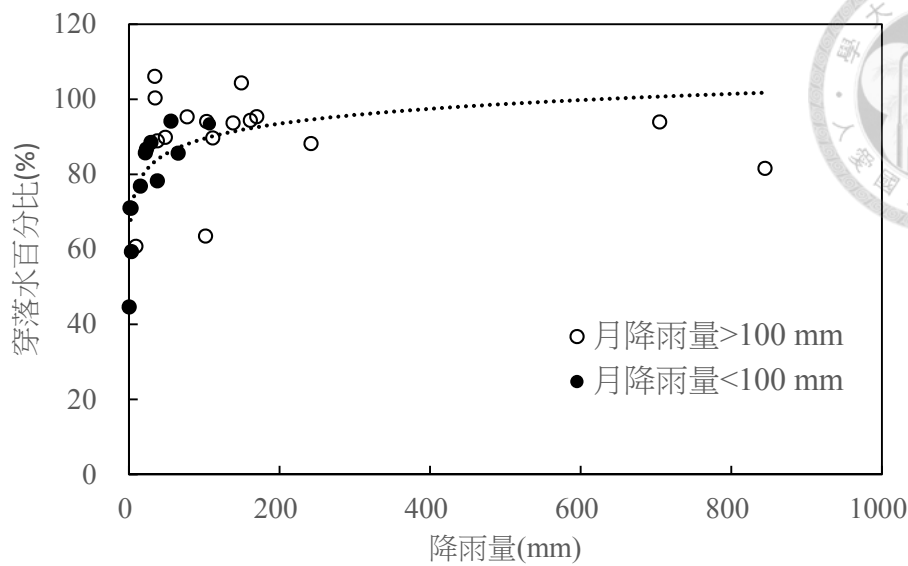


圖 4.8 穿落水百分比與降雨量大小的關係

穿落水的產生與林外降雨會產生時間差，賴鴻寬（2002）認為林內降雨較林外降雨延遲，需考慮前期的降雨量會影響後期的樹冠飽和貯留量，因此以事件為單位分析穿落水與林外降雨的關係有其重要性。

樣區2穿落水雨量計安裝於2012年3月9日，在2012年1月至2013年2月共205場降雨事件中，可與穿落水雨量計資料對比者共計177場，除掉降雨延時過短（小於10分鐘）及降雨量過低（小於0.5 mm）者，計有117場有效降雨事件，總計林外降雨延時787小時，林內降雨延時1524.67小時，林內降雨在時間上較林外延長1.94倍，平均延遲0.32小時。其中有35.04%在降雨後1小時內發生，比例最高，29.91%是降雨後立刻發生（時間差=0小時）；另有19.66%的林內降雨則提前發生，而提前發生在1小時以內者占82.61%，原因可能有二，首先是降雨空間上的變異性，林內降雨與林外降雨之雨量計位置不同造成差異，還有樹冠孔隙的不均質性讓降雨直接穿過孔隙，影響記錄到的降雨開始時間，第二是不同的觀測儀器，穿落水雨量計之傾斗容量為0.2 mm，每5分鐘記錄一筆資料，苗圃及大學坑氣象站為傾斗式0.5 mm雨量計，每10分鐘記錄一筆，在分析時先將穿落水雨量計資料整理為每10分鐘一筆資料，可能0.2 mm的雨量傾斗先動作，使得二者間記錄

的開始時間有差異，另一個可能為林外雨量站與林內雨量站的儀器時間軸誤差，但可能性較低。



表 4.8 林外降雨與林內降雨發生時間差

時間差(hr)	場次數	百分比(%)
$0 > x$	23	19.66
$x = 0$	35	29.91
$1 \geq x > 0$	41	35.04
$2 \geq x > 1$	11	9.40
$x > 2$	7	5.98
合計	117	

林外降雨事件場次編號方式為按照切割出的場次時間順序，自 2012 年 1 月至 2013 年 2 月，205 場降雨事件編號為 1~205。由於樣區 1 及樣區 2 穿落水的水桶資料與樣區 2 雨量計的資料存在平均數差異（表 4.5），樣區 2 穿落水雨量計將只用來分析林內降雨的時間序列，而不考慮量的部份。以下就樣區 2 雨量計資料討論林內與林外降雨時間差。

編號187林外降雨發生於2012/12/4 23:00~2012/12/6 8:00，延時9小時，降雨量52.5 mm，與前一場間隔51小時，降雨強度5.83 mm/hr，林內降雨起始的時間為2012/12/4 19:30（圖 4.9），圖中的UTRSum為樣區2雨量計資料的總和（黑色實線），Rain為林外降雨量（灰色虛線），可看出林內降雨先於林外降雨出現（黑色箭頭處）。

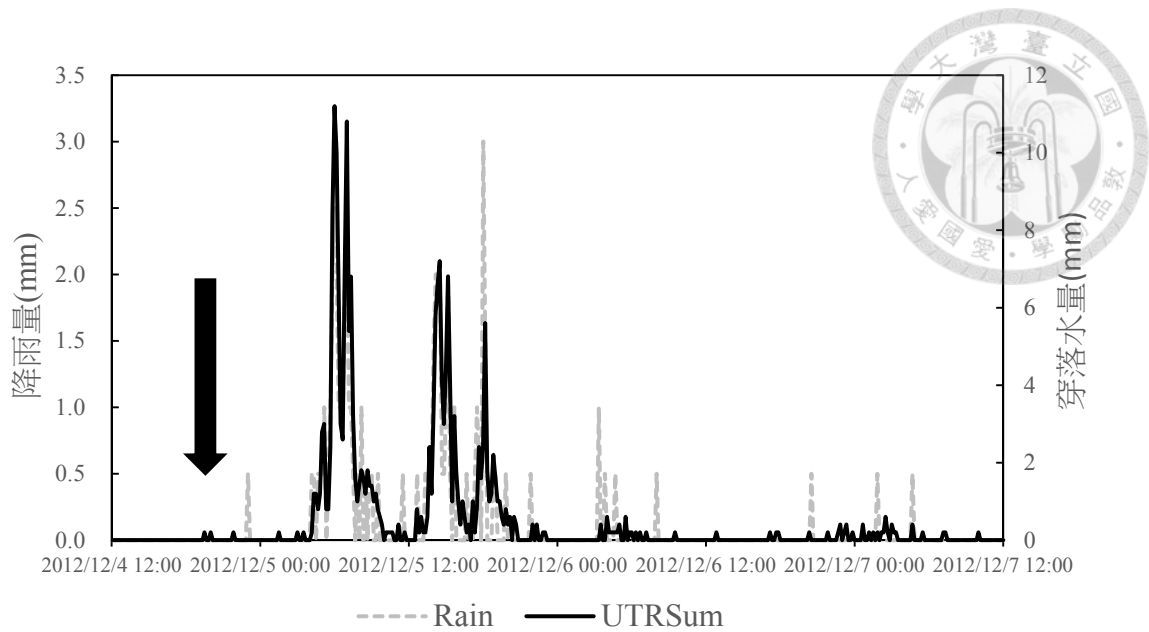


圖 4.9 編號 187 林外降雨事件對應之林內降雨情況

乾燥時期的樹冠，需要經過濕潤後才能產生穿落水，如2012/10/29 17:00的編號168及2012/10/30 15:00~2012/10/30 16:20的編號169場林外降雨事件（圖4.10），編號168場距離前一場降雨事件438.17小時，降雨量0.5 mm，降雨延時小於1小時，編號169距離編號168場22小時，降雨量1.5 mm，降雨延時1小時，編號168場林外降雨事件雖有雨滴直接穿過樹冠孔隙的可能，但並未記錄到林內降雨，應為林外降雨量僅0.5 mm所致，編號169場因距離前場次時間較短，樹冠受前場次降雨濕潤，除了直接穿過孔隙外，雨水經樹冠枝葉後滴落的可能性增加，僅1.5 mm的降雨量也可產生林內降雨。

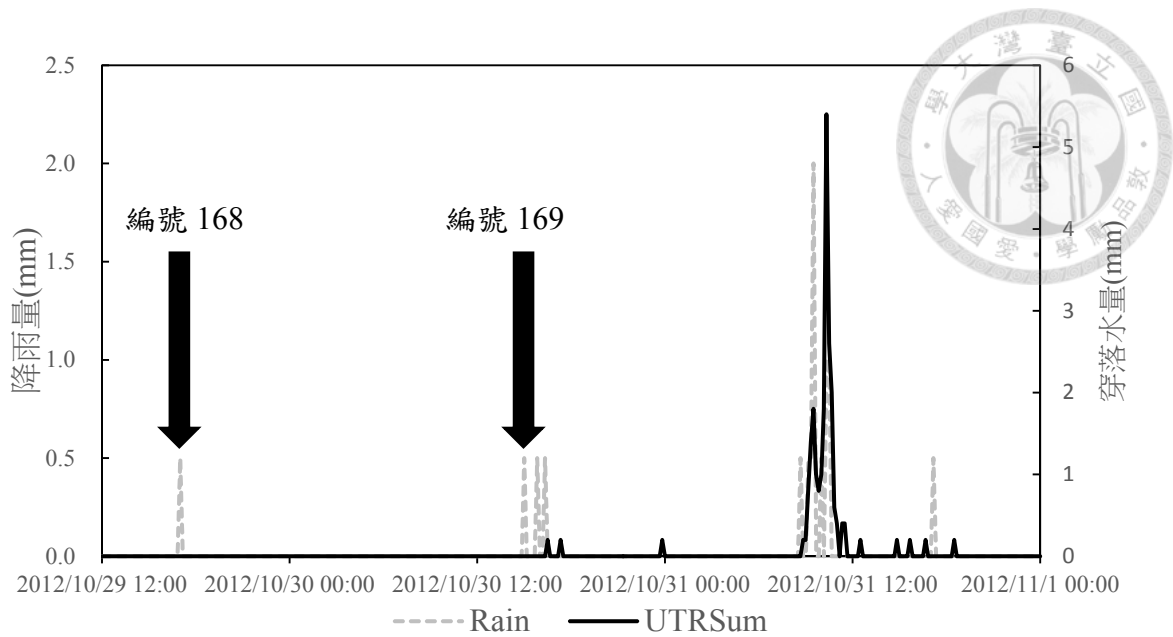


圖 4.10 編號 168、169 林外降雨事件對應之林內降雨情況

在乾季被降雨濕潤的樹冠，可能有助於霧水的攔截與滴落，以2012年12月編號184~187及193兩場次的降雨事件來說明。圖 4.11為編號184~186林外降雨事件對應的林內降雨情況，3場林外降雨事件時間2012/12/3 3:40~2012/12/4 5:00，184場降雨量2 mm、降雨延時1小時，185場降雨量0.5 mm、降雨延時10分鐘，186場降雨量0.5 mm、降雨延時10分鐘。184場與前一場間隔22.5小時，這些降雨事件為溪頭冬季典型的短延時、低降雨強度的降雨事件，林內降雨時間為2012/12/3 4:30~2012/12/3 9:50及12/3 14:10~12/4 7:00，可發現在經過一段時間的乾燥後，低降雨強度降雨需要先潤濕樹冠後，林內降雨才會發生，相較於林外降雨，林內降雨強度顯得更平緩且時間更長，且林內降雨持續時間達12小時左右，因此時間樹冠呈濕潤狀態，若有適當成霧條件配合，就可能造成霧水滴落。

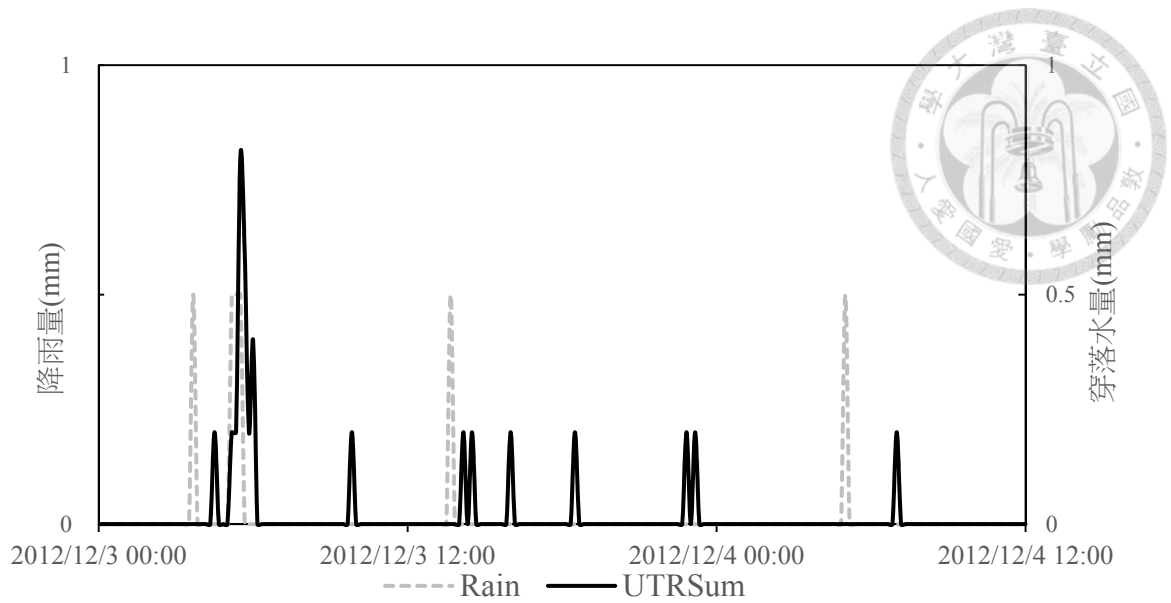


圖 4.11 編號 184~186 林外降雨事件對應之林內降雨情況

另外為編號193場林外降雨事件，時間2012/12/30 0:20~2012/12/30 11:00，延時10小時，降雨量15.5 mm，與前一場間隔60.67小時，平均降雨強度1.55 mm/hr，因起始降雨強度較大，使樹冠雖然經過60.67小時未濕潤，卻立刻產生林內降雨，而林外降雨結束後林內降雨則持續了24小時以上，推測可能有霧水輸入，否則林內降雨無法持續如此長的時間。

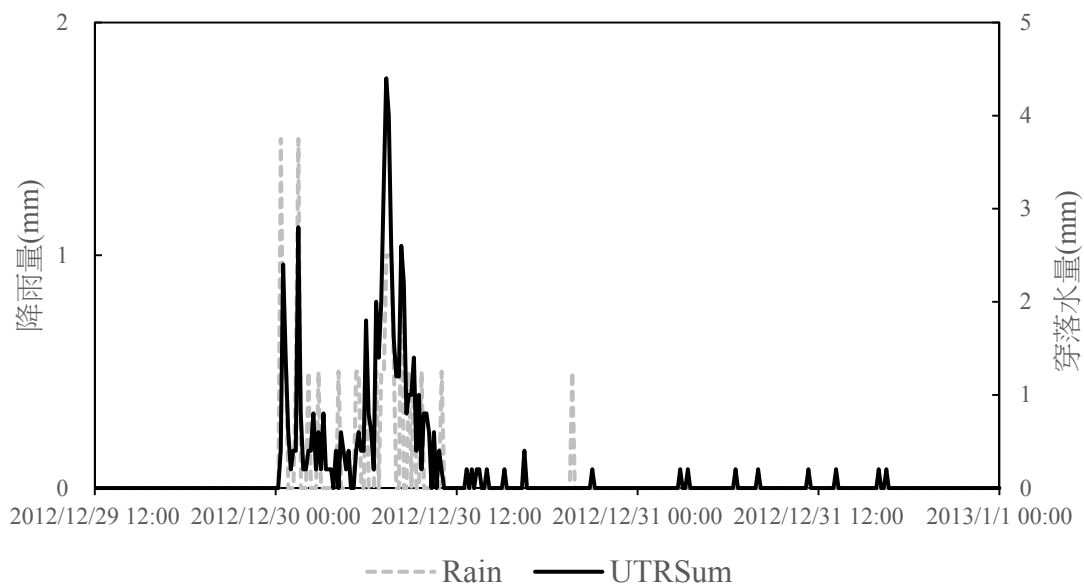



圖 4.12 編號 193 林外降雨事件對應之林內降雨情況



樣區2雨量計於觀測期間(2012/3/9 15:30~2013/2/28 00:00)有記錄到林外未降雨降超過6小時，但林內有降雨的資料，推測為霧水、或空氣中水氣飽和凝結的水滴造成，在此通稱水平降水，共計14.6 mm，僅占觀測期間總降雨量(3026.0 mm)的0.48%，但樣區2使用之Davis Inc.製0.2 mm雨量計資料較樣區1及樣區2水桶觀測資料低(表 4.5)，由圖 4.5可知樣區2水桶與雨量計觀測穿落水時，兩者的相關性相當高，因此，將實際觀測之水平降水量，乘以1.45倍估算之水平降水量21.17 mm，約占觀測期間總降雨量的0.70%，參照臺灣其他地區的相關研究，水平降水占降雨量的百分比多介於4%~11%左右，葉青峯(2004)在棲蘭山的觀測指出，2003年3月至2004年2月間的水平降水量為328 mm，累積降雨量2940 mm，水平降水占總降水量11%，同一地區和時間內，吳敏如(2004)使用微氣候模式估計亦得到類似的結果，推估水平降水量313 mm，占總降水量的10%，此外，黃昭豪(2007)於相同地區估計2004年5月至2006年4月水平降水量約占總總降水量的4%，簡意婷(2008)統計2003~2006年棲蘭山鴛鴦湖地區水平降水量約占降水量6.0%；梁晏綾(2007)參考葉青峯(2004)和吳敏如(2004)計算出的台灣扁柏天然林水平降水沉降速率，以觀測到的霧持續時間推估溪頭地區的水平降水量約占總降水量的6.2%~11.9%。本試驗估算結果僅0.70%，遠低於其他地區的觀測值，應為觀測方法不同所致，葉青峯(2004)在氣象塔上以鐵架固定塑膠布，中間懸吊台灣扁柏葉或苔蘚，測量扁柏及苔蘚的雲霧攔截效率，以估計水平降水量；陳耀德(2003)、黃昭豪(2007)則在氣象塔上架設主動式霧水蒐集器，無論是以雲霧攔截效率推估，或使用主動式霧水蒐集器，皆是不考慮雲霧與樹冠間的交互作用，以間接方法來估計水平降水量，本研究所觀測到的水平降水係為雲霧或空氣中的水氣、氣候狀態及柳杉樹冠交互作用後的結果，儘管觀測值偏低，但相較於其他觀測方法而言更接近天然狀態，亦可發現水平降水觀測與實際狀況的差別。

以發生頻率來看，各雨量計發生次數占總發生次數的百分比為15.07%到26.03%，如表 4.9，以UTR3最高，其次為UTR2，UTR1及UTR5次之，UTR4最低，與表 4.3樣區2樹冠孔隙率資料對照發現，UT1~UT4的樹冠孔隙率相當接近，但水平降水發生頻率卻有差異，UTR2和UTR3較高而UTR1和UTR4較低，另外，UT4的孔隙率(22.29%)大於UT5(19.54%)，但UTR4水平降水發生次數最低，顯示水平降水發生除了樹冠孔隙率外尚有其他影響因子，如苔蘚、附生植物攔截，Chang(2002)估計鴛鴦湖台灣扁柏單株立木上的優勢附生植物有0.17 mm/h的水平降水攔截一滴落能力，像附生植物這種三度空間的重疊架構，無法從樹冠孔隙率中顯示出來，若要瞭解水平降水與柳杉樹冠結構的交互關係，需要更進一步的研究。

表 4.9 樣區 2 的五個雨量計水平降水發生頻率

樣區 2 雨量計編號	次數	百分比(%)
UTR1	13	17.81
UTR2	17	23.29
UTR3	19	26.03
UTR4	11	15.07
UTR5	13	17.81
總和	73	100.00

以發生時間來看，各雨量計發生次數占總發生次數的百分比為13.70%~46.58%，如表 4.10，UTR1~UTR5共計73次記錄中發生時間皆無重疊，以6~12時最常見，參考魏聰輝（2011）的研究，溪頭各月份的成霧時段，以12時過後頻率最多，在16-17時達到高峰，但該時段為本研究統計水平降水發生頻率最低的時段，因此，推斷成霧頻率最高的時段並非水平降水發生最頻繁的時段；又12~18時發生最少，推測應為霧及空氣中的水氣經過凝結形成水滴，且氣溫較白天低不易蒸發，於清晨到中午之間滴落。



表 4.10 利用樣區 2 的雨量計統計水平降水發生時間及百分比 (依發生時間)

時間 (24 小時制)	次數	百分比(%)
6-12	34	46.58
12-18	10	13.70
18-24	13	17.81
24-6	16	21.92

以發生月份來看，如表 4.11，發生頻率最高的月份為 2012 年 6~8 月。根據魏聰輝 (2011) 的觀測結果，溪頭 2011 年 3 月的霧時、霧日、成霧頻率最高，又以 2011 年 11 月最低；Liang et al. (2009) 的研究則認為成霧頻率最高者為 2005 年 4 月~7 月及 2006 年 3 月，本研究水平降水發生頻率較高的 5~8 月並非都是成霧頻率較高的月份，相反地，魏聰輝 (2011) 及 Liang et al. (2009) 皆認為成霧頻率高的 3 月，在本研究中水平降水發生百分比僅 6.85%，和其他時段相似，推論應該是 6~8 月較頻繁的降雨事件及較高的降雨量，使樹冠經常維持濕潤狀態，增加水平降水的發生頻率，從此結果亦可發現，傳統的水平降水觀測方式得到的資料可能無法代表真實的森林水文過程，若要研究林內的水平降水，需考慮樹冠的濕潤狀態。

表 4.11 利用樣區 2 的雨量計統計水平降水發生時間及百分比 (依發生月份)

時間 (月份)	次數	百分比 (%)	期間降雨事件數 (6hr)	期間降雨量 (mm)
2012 年 3 月*	5	6.85	8	20.0
4 月	5	6.85	25	279.0
5 月	4	5.48	21	459.0
6 月	16	21.92	20	729.0
7 月	16	21.92	23	132.5
8 月	10	13.70	22	979.0
9 月	2	2.74	14	84.0
10 月	3	4.11	9	12.0
11 月	2	2.74	12	189.0
12 月	3	4.11	12	106.5
2013 年 1 月	2	2.74	6	32.5
2 月	5	6.85	5	3.5

*自 2012/03/09 15:30 開始觀測。



第四節 幹流水

一、幹流水與降雨量

整理樣區1幹流水水桶和雨量計觀測資料（自2012/1/13至2013/2/21），平均後與同時期降雨量資料作圖 4.13，因2012年2月至6月幹流水多次超量，無法取得正確的觀測資料，故僅有20筆資料，幹流水量與降雨量的線性迴歸式為 $S = 0.03P + 0.16$ ， $r^2 = 0.93$ 。

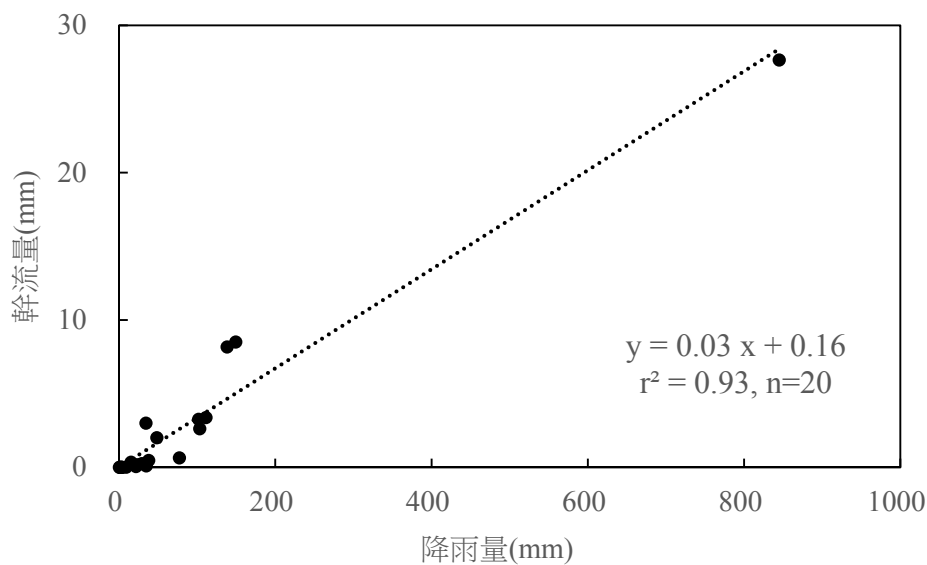


圖 4.13 幹流水量與降雨量的關係

圖 4.14為幹流百分比與降雨量的關係圖， $n=19$ 係為去掉圖 4.13中降雨量845 mm的資料點，其原因為缺乏降雨量200~800 mm之間的幹流量資料，該資料點在迴歸分析時可能是具有影響力的觀測值(influential observation)，而且該資料點屬於颱風將與，觀測結果可能出現較大的誤差，故去除之。整體而言隨降雨量增加，幹流百分比增加，但變動相當大，可以看出資料點分佈非常分散，趨勢線約在4%趨於平緩，顯示幹流百分比應達最大值，但由於幹流水在收集時多次超量，且觀測期間降雨量介於200~800 mm的場次相當稀少，以致缺乏高降雨量(>200 mm)的幹流水百分比資料， r^2 僅0.33，不足以解釋全部的幹流水狀況。

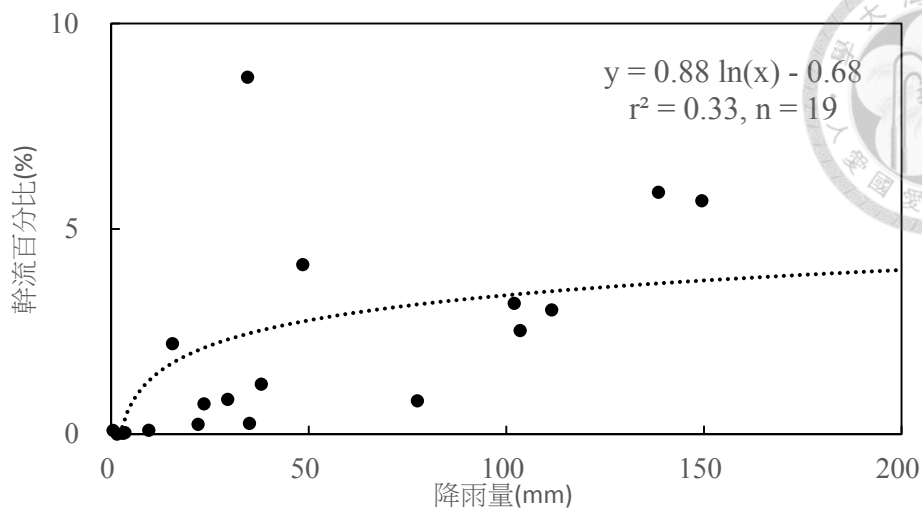


圖 4.14 幹流水百分比與降雨量的關係

表 4.12 為各場次幹流水百分比與降雨量、6 小時降雨事件數，可看出經過一段時間的降雨濕潤後，幹流水百分比會逐漸提高，如從 2012/04/12 到 2012/06/08 期間的降雨量達 712.0 mm，間隔 6 小時以上的降雨事件數達 53 次，因此 2012/06/08 測得的幹流百分比為 5.89%，但若缺乏足夠的降雨量支持，幹流水百分比會逐漸減少，如 2012/09/03~2012/11/08 期間的降雨量僅 30.0 mm，間隔 6 小時以上的降雨事件僅 20 次，因此 2012/11/08 測得的幹流百分比小於 1%；同理 2012/12/20~2013/01/21 期間的降雨量僅 86.0 mm，間隔 6 小時以上的降雨事件僅 13 次，因此 2013/01/21 測得的幹流百分比小於 1%，降雨在成為幹流水之前就先被樹冠截留或由樹皮及附生植物等吸收。

表 4.12 各場次降雨量及降雨事件數與幹流水百分比

觀測日期	降雨量 (mm)	幹流水百分比 (%)	期間 降雨事件數(6hr)
2012/02/07	65.5	- ^a	10
02/23	38.0	- ^a	4
03/08	56.0	- ^a	6
03/22	23.5	0.74	6
04/12	38.0	1.22	10
04/26	170.0	- ^a	12
05/10	242.0	- ^a	13



05/24	161.5	- ^a	10
06/08	138.5	5.89	8
06/26	705.0	- ^a	12
07/09	77.5	0.82	10
07/23	35.0	0.26	10
07/30	48.5	4.13	6
08/06	845.0	3.27	3
08/20	102.0	3.19	11
09/03	107.0	3.15	13
09/18	15.5	2.21	6
10/04	3.5	0.04	4
10/24	1.5	>0.01	6
11/08	9.5	0.10	4
11/23	103.5	2.52	4
12/06	149.5	5.69	12
12/20	34.5	8.69	3
2013/01/03	22.0	0.24	5
01/21	29.5	0.85	5
02/04	0.5	0.09	1
02/21	3.0	0.02	4

^a 幹流量超量，無資料

以幹流水雨量計資料配合分割出的6小時降雨事件資料來分析幹流發生的降雨量門檻值。亦發現降雨發生時，柳杉之樹冠、樹皮的濕潤狀態會決定幹流的發生時間，若處於濕潤狀態，幹流水於降雨後會立即發生。

分析時首先區分出間隔前一場達40小時以上的降雨事件，得出樹冠、樹皮完全乾燥的場次，如表 4.13，幹流水開始時間定義為裝有雨量計的5株樣木（S1、S2、S3、S8、S11）其中有1株開始記錄到幹流水，結束時間則為5樣木都沒有記錄幹流水為止，空白的幹流開始時間與結束時間表示該段時間幹流連續發生，如場次79到82，對幹流水而言算同一場次事件。

在共計20場降雨事件資料中，幹流發生的降雨量門檻值介於0.5到3.5 mm之間，平均林外降雨需累計達1.68 mm，幹流水才會發生。

表 4.13 各場次降雨事件之幹流產生的降雨量門檻值

場次 編號	林外降雨 開始時間	林外降雨 結束時間	降雨 量 (mm)	延時 (hr)	與前一 場間隔 時間 (hr)	幹流開始 時間	幹流結束 時間	幹流發生 的降雨量 門檻值 (mm)
79	2012/5/26 17:30	2012/5/27 3:40	23	10	145.67	2012/5/26 18:13	~	1.5
80	2012/5/27 13:30	2012/5/28 19:30	68.5	6	9.83	~	~	
81	2012/5/29 11:30	2012/5/29 23:40	22.5	12	16.00	~	~	
82	2012/5/30 15:10	2012/5/30 20:20	16.5	5	15.50	~	2012/6/1 00:05	
101	2012/6/29 16:10	2012/6/29 23:40	11	7	60.00	2012/6/29 17:01	~	2.5
102	2012/6/30 12:20	2012/6/30 23:10	3	10	12.67	~	2012/7/1 06:22	
109	2012/7/11 15:30	2012/7/11 16:30	6.0	1	104.67	2012/7/11 15:45	2012/7/11 19:16	1.5
115	2012/7/21 16:30	2012/7/21 17:20	6.0	0	46.67	2012/7/21 16:57	2012/7/21 18:36	3
124	2012/7/30 20:40	2012/7/31 8:20	5.0	11	62.00	2012/7/30 23:01	~	1.5
125	2012/7/31 16:20	2012/8/1 0:30	5.0	8	8.00	~	~	
126	2012/8/1 13:10	2012/8/3 2:30	810.0	13	12.67	~	2012/8/3 19:13	
127	2012/8/5 11:20	2012/8/5 16:50	15.0	5	56.83	2012/8/5 15:10	2012/8/5 22:29	3
128	2012/8/7 2:00	2012/8/7 4:00	4.0	2	33.17	2012/8/7 02:14	2012/8/7 14:45	1.5
145	2012/8/27 23:00	2012/8/28 15:10	12.0	16	44.67	2012/8/27 23:57	2012/8/28 16:44	1
146	2012/8/30 13:00	2012/8/30 14:30	12.0	1	45.83	2012/8/30 13:34	2012/8/30 20:11	3.5

152	2012/9/7 14:50	2012/9/7 17:50	2.0	3	94.00	2012/9/7 16:33	2012/9/7 17:51	1.5
173	2012/11/17 0:50	2012/11/18 23:40	85	22	98.50	2012/11/17 01:01	2012/11/1 9 21:34	2
174	2012/11/21 8:40	2012/11/21 15:10	2.5	6	57.00	2012/11/21 09:42	2012/11/2 1 13:08	1
178	2012/11/26 21:10	2012/11/27 15:10	11.5	18	54.83	2012/11/26 21:33	~	1.5
179	2012/11/27 22:00	2012/11/28 8:30	3	10	6.83	~	~	
180	2012/11/28 15:00	2012/11/28 15:30	1.5	0	6.50	~	~	
181	2012/11/29 0:40	2012/11/29 10:20	15	9	9.17	~	~	
182	2012/11/30 8:50	2012/12/1 3:40	7	18	22.50	~	~	
183	2012/12/2 7:00	2012/12/2 7:00	0.5	0	27.33	~	~	
184	2012/12/3 3:40	2012/12/3 5:30	2	1	20.67	~	~	
185	2012/12/3 13:40	2012/12/3 13:40	0.5	0	8.17	~	2012/12/3 16:50	
187	2012/12/4 23:00	2012/12/6 8:00	52.5	9	18.00	2012/12/5 04:18	~	1.5
188	2012/12/6 20:30	2012/12/7 4:40	1.5	8	12.50	~	2012/12/7 18:50	
189	2012/12/8 9:40	2012/12/9 14:50	29.5	5	29.00	2012/12/8 11:50	~	1.5
190	2012/12/10 8:00	2012/12/10 8:00	0.5	0	17.17	~	2012/12/1 1 14:03	
191	2012/12/23 11:30	2012/12/23 14:40	1	3	315.50	2012/12/23 13:14	2012/12/2 3 14:20	0.5
192	2012/12/27 21:20	2012/12/27 22:20	2	1	102.67	2012/12/27 21:26	2012/12/2 8 00:56	0.5
193	2012/12/30 0:20	2012/12/30 11:00	15.5	10	50.00	2012/12/30 00:24	2012/12/3 15:00	1.5

195	2013/1/2 23:40	2013/1/3 13:00	3	13	76.00	2013/1/3 06:47	2013/1/3 13:59	2
196	2013/1/8 11:40	2013/1/8 17:10	2	5	118.67	2013/1/8 14:15	~	1
197	2013/1/8 23:40	2013/1/10 05:50	17.5	6	6.50	~	2013/1/10 20:15	

二、柳杉樹皮含水能力

觀測期間發現，若柳杉樹皮呈乾燥狀態，幹流水需先潤濕樹皮後才會發生，為了解樹皮含水能力，採集樹皮進行試驗，結果如

表 4.14，每 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 的柳杉樹皮，可含水 67.34 至 137.82 g，單位面積含水量為 0.17 至 0.34 g/cm^2 ，平均值為 0.27 g/cm^2 。

將樹幹視為圓柱體，樹冠視為圓錐體，樹幹長度 16 m，樹冠層 12 m，以樹高胸高直徑 40.2 cm 的柳杉估計（40.2 cm 為取樣所得的平均胸高直徑），樹幹部分以圓柱體表面積、樹冠層以圓錐體表面積帶入：

$$\text{圓柱體表面積(不含底)} = 2\pi r \times h \quad (4.1)$$

$$\text{圓錐體表面積(不含底)} = \pi r \times \sqrt{r^2 + h^2} \quad (4.2)$$

上兩式中， r 為底圓半徑， h 為高，將 $r = 20.1 \text{ cm}$ ，樹幹長度 16 m、樹冠層 12 m 分別帶入 (4.1)、(4.2) 式，再乘以平均每平方公分含水量，可得樹幹及樹冠含水能力，各為 53.79 L 與 20.18 L，總計單株柳杉含水能力為 73.96 L，單株柳杉在 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 樣區中相當於 0.18 mm 的降雨。

依照此結果，參考前述以 5 株樣木得到的平均幹流發生之降雨量為 1.68 mm，在幹流產生過程中應有 0.18 mm 是潤濕樹皮，其餘 1.5 mm 為樹皮裂隙中以毛細管作用貯存水分，附生植物吸收水分，以及枝葉吸收水分等因子造成。



表 4.14 樹皮含水能力試驗結果

DBH(cm)	氣乾重 (g)	濕重(g)	含水量 (g)	每平方公分含水量 (g/cm ²)
43.0	65.25	193.26	128.01	0.32
32.5	36.15	103.49	67.34	0.17
51.6	69.59	196.58	126.99	0.32
27.1	33.99	124.36	90.37	0.23
42.7	81.01	169.35	88.34	0.22
44.2	52.62	190.44	137.82	0.34
平均				
40.2	56.44	162.91	106.48	0.27

三、幹流量與 DBH 的關係

往昔研究指出幹流量與DBH有相關性（金佐蒔，2012; 陳子弘，2006），但在本研究未發現顯著相關性。

選出2012/04/12、2012/07/09、2012/07/23、2012/07/30、2012/08/20、2012/09/03、2012/09/18、2012/11/23、2012/12/06、2012/12/20、2013/01/03共11場次的資料，為較具代表性的幹流量資料，其餘多資料不完整、幹流量過低（單株<10 mL）或數值與前述11場接近，以幹流量(mL)為y軸，DBH(cm)為x軸，幹流量與DBH關係圖如圖 4.15，將各場次降雨分別做線性迴歸分析， r^2 值介於<0.01到0.37之間，顯示幹流量與DBH的相關性不高，2012/04/12和2012/07/09的 r^2 值甚至小於0.01，僅2012/09/18、2012/11/23、2012/12/06、2012/12/20大於0.25，最高者為2012/12/06， r^2 值0.37。

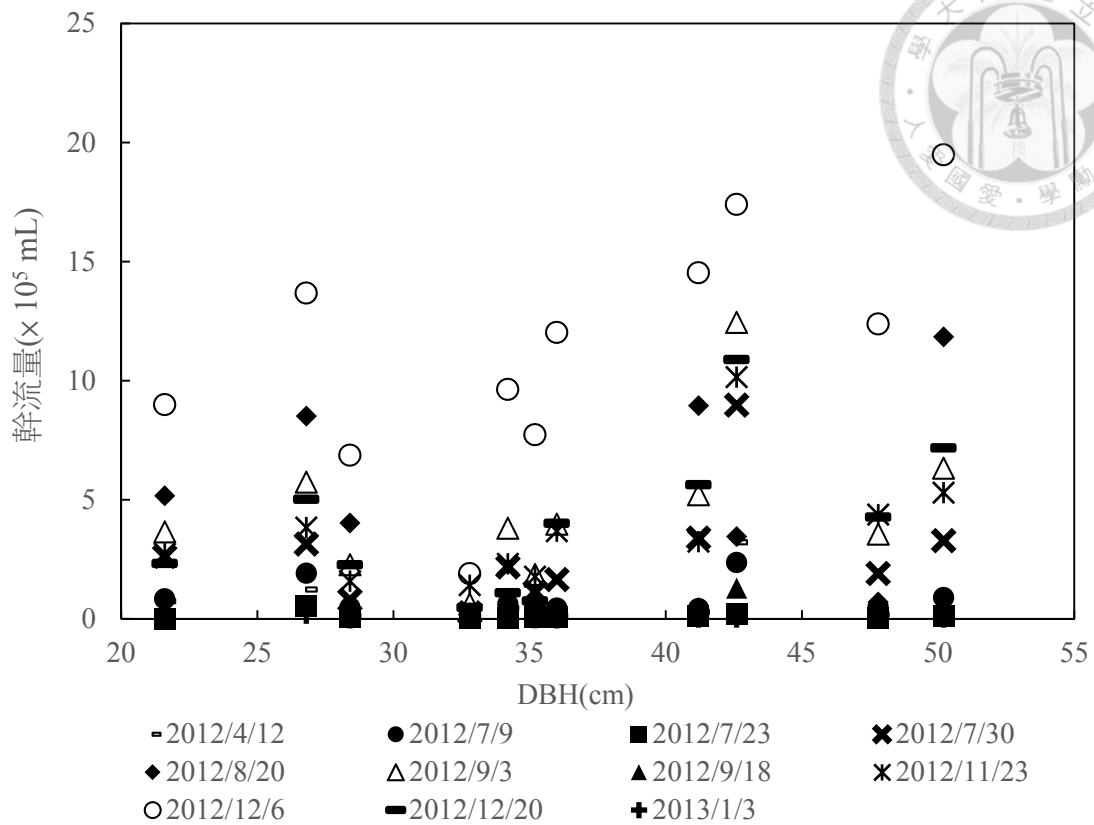


圖 4.15 幹流量與樣木的 DBH 的關係

表 4.15 幹流量(mL)與樣木 DBH(cm)之線性迴歸分析結果

日期	r ²	線性迴歸	降雨量(mm)
2012/04/12	<0.01	y = 41.44 x + 4683.47	38.0
2012/07/09	<0.01	y = 2.30 x + 8356.48	77.5
2012/07/23	0.03	y = -11.71 x + 1133.65	35.0
2012/07/30	0.10	y = 844.27 x - 3742.53	48.5
2012/08/20	0.02	y = 739.60 x + 13593.98	173.0
2012/09/03	0.14	y = 1347.37 x - 3594.87	111.5
2012/09/18	0.29	y = 199.02 x - 2620.92	15.5
2012/11/23	0.26	y = 844.27 x - 3742.53	110.5
2012/12/06	0.37	y = 3443.45 x - 10893.28	149.5
2012/12/20	0.29	y = 1925.01 x - 29457.01	34.5
2013/01/03	0.03	y = -11.71 x + 1133.65	22.0

為了確定樣木DBH、降雨量與幹流量間的關係，將11場共121筆資料進行線性複迴歸分析，以樣木DBH、降雨量為自變數，幹流量為依變數，結果顯示判定係數 $r^2 = 0.349$ ，變異數分析檢定結果棄卻(reject)依變數與自變數間無迴歸關係存在之虛無假設($p\text{-value}=0.000$)。常數項之t統計量檢定結果，棄卻常數項等於0的虛無假設($p\text{-value}=0.012$)，迴歸方程式常數不為0；自變數樣木DBH的迴歸係數t統計量檢定結果棄卻其為0的虛無假設($p\text{-value}=0.012$)，迴歸方程式之樣木DBH係數不為0；自變數降雨量的迴歸係數t統計量檢定結果棄卻其為0的虛無假設($p\text{-value}=0.000$)，迴歸方程式之降雨量係數不為0。所得到的迴歸方程式如式(4.3)。

$$Y = 903.466X_1 + 432.662X_2 - 35287.907$$

$$Y: \text{幹流量(mL)}, X_1: \text{DBH(cm)}, X_2: \text{降雨量(mm)} \quad (4.3)$$

上述分析結果可解釋為，以15日左右蒐集一次資料之場次為單位的幹流量與DBH之相關性中等，又樣木DBH、降雨量與幹流量間複迴歸分析結果判定係數 r^2 僅0.349，故儘管存在相關性，DBH與降雨量可解釋幹流量的能力仍不高，可能因林木本身生長或健康狀況等影響其幹流水收集效率，使較高的DBH不一定收到較多的幹流量，陳子弘（2006）的研究結果認為台灣扁柏之天然更新林和老齡林的DBH與幹流量之關係有差異，天然更新林（10~50年生）之DBH與幹流量間的 r^2 值可達0.708，而老齡林（150~250年生）僅0.493，此外，從Komatsu et al.(2008)；小松（2007）整理的日本地區柳杉樹冠截留試驗結果（表 2.3），亦可發現30年生的柳杉幹流水百分比(10.2%)高於70年生(5.6%)和71年生(4.0%)，顯示年輕林分與老熟林分之幹流量的主要影響因子應該不同，年輕林分主要受DBH影響，老熟林分則可能受生長及健康影響較大，造成老熟林分的幹流水收集效率降低。

除了林木本身的生長及健康狀況和降雨量外，幹流量可能還受到其他因子影響，如生長季節、林內溫濕度、風向、風速、降雨型態如被風趨動的雨(wind-driven rain)等，柳杉為常綠樹種，生長季節的差異在落葉樹種中較明顯(Liang et

al., 2009)，但本研究並未針對氣候因子與幹流量之關係進行分析，風速和風向會影響降雨型態，Van Stan li et al.(2012)針對兩種闊葉樹的研究發現不同樹冠型態對受風驅動而傾斜的降雨(inclined rainfall)及未傾斜的降雨(un-inclined rainfall)有著不同的捕獲能力，亦因此影響幹流水發生及幹流量，而被風驅動的降雨因集中於在樹幹的某個方向，會形成優勢流，可在樹幹未完全被潤濕的狀況下產生幹流水，柳杉是否有此現象，有待相關研究驗證。

第五節 柳杉樹冠截留

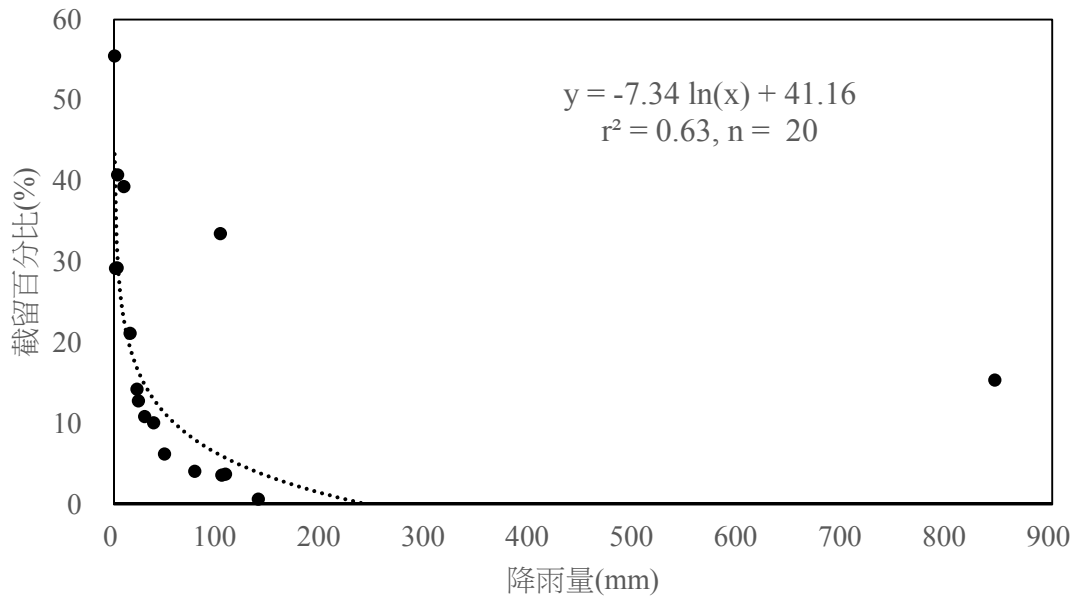
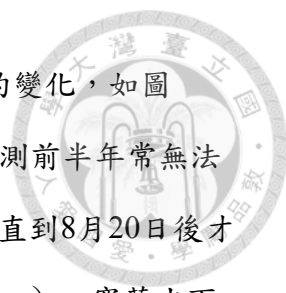


圖 4.16 樹冠截留百分比與降雨量的關係

圖 4.16為降雨量與樹冠截留百分比的關係圖，是樣區1及樣區2每15日左右收一次的資料結果（自2012/1/13至2013/2/21），幹流水無資料時則僅以穿落水資料估計，但刪去2012年7月和8月因梅雨鋒面和颱風造成的大量降雨(> 700 mm)及12月2次低於-10%的樹冠截留百分比，剩20筆。隨著降雨量增加，柳杉樹冠截留百分比會減少，降雨量在272 mm時樹冠截留百分比接近0，樹冠截留率低於0主要是高於100%的穿落水百分比造成，其原因將在本節稍後討論。



以時序資料來看穿落水、幹流水及樹冠截留百分比隨時間的變化，如圖 4.17~圖 4.19，2012年初，因為幹流量水桶觀測多次超量，使觀測前半年常無法得到幹流水資料，8月初颱風又造成儀器損壞及水桶資料超量，直到8月20日後才穩定。9-10月為觀測期間降雨偏低的月份（各僅有84 mm和12 mm），穿落水百分比和幹流水百分比自9月之後開始減少，這段時間的低降雨量使樹冠乾燥時間增長，加上9月1日至11月23日，累積雨量0.5 - 3 mm的降雨事件占71%，氣候和降雨型態使樹冠截留百分比增加，直到 11月23日的降雨後，樹冠再度處於濕潤狀態，樹冠截留百分比因而下降。

幹流水百分比在降雨量較低的月份中占的比例較高，顯示當降雨量減少時，幹流為柳杉降雨收支的重要輸入項。2012年11-12月，由於穿落水百分比超過100%(12/6：104.32%、12/20：106.05%)，以及該時段時間較高的幹流水百分比(12/6：5.69%、12/20：8.69%)，使樹冠截留百分比呈現負值(12/6：-10.00%、12/20：-14.74%)，另一次則發生於7月(7/23：-0.59%)。穿落水量高於林外雨量的狀況在台灣其他地區的試驗中也有出現（金佐蒔，2012；陳耀德，2003；賴鴻寬，2002），賴鴻寬（2002）認為受樹冠結構與觀測儀器擺設位置影響，樹冠互相接觸穿落水量會增加，陳耀德（2003）認為雲霧沉降會增加林內降水量，金佐蒔（2012）則認為是受降雨型態（長降雨延時、低降雨強度）和雲霧的綜合影響；Kobayashi et al. (2001) 在日本神戶六甲山針對日本柳杉的研究亦指出，用主動式雲霧蒐集器觀測到的水平降水量相當於降雨量的90-180%（平均值為122%），山脊的水平降水量高於山腹。溪頭為一谷地地形，又屬多霧地區，2012年7月和12月的降雨量分別為132.5和109.5 mm，就往年資料來看並非霧日最多及延時最長的月份，但並非最少的，根據魏聰輝等（2011）在溪頭的研究，2011年7月和12月能見度<1000 m的薄霧和能見度<500 m的濃霧的成霧時間皆接近全年平均，推論在溪頭地區若有（1）降雨100 mm左右的月份及（2）接近全年平均的成

霧時間這兩項條件存在，柳杉人工林會有相較於其他月份高的穿落水與幹流水百分比。另外，根據賴鴻寬（2002）年的研究，亦有可能為樹冠結構的影響，如樹冠交接互層處會產生匯集作用而增加穿落水量，此部分有待進行樣區內的樹冠分布及冠幅調查等相關資料收集來驗證。



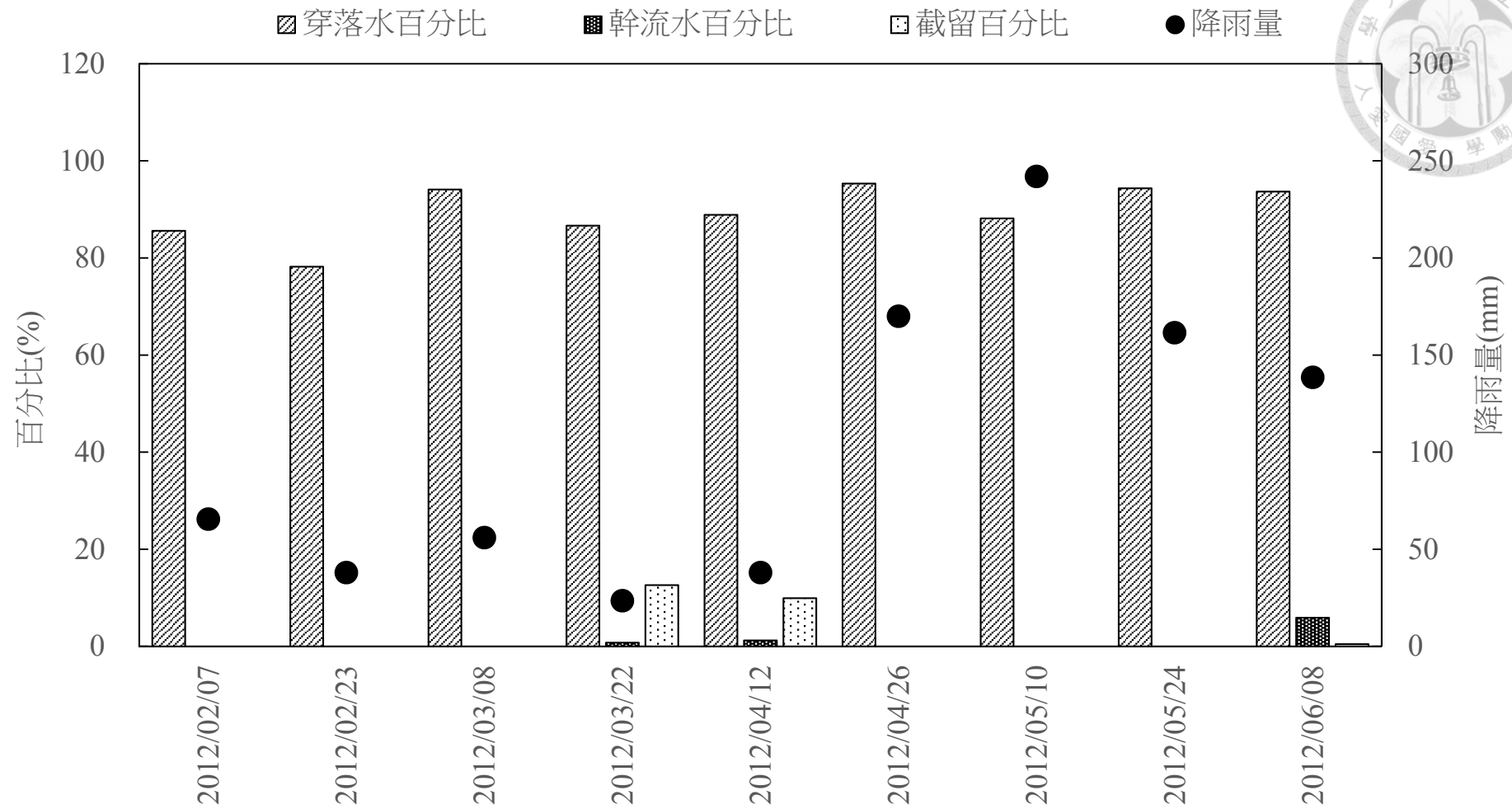


圖 4.17 穿落水、幹流水及樹冠截留百分比時序圖(2012/02/07~2012/06/08)

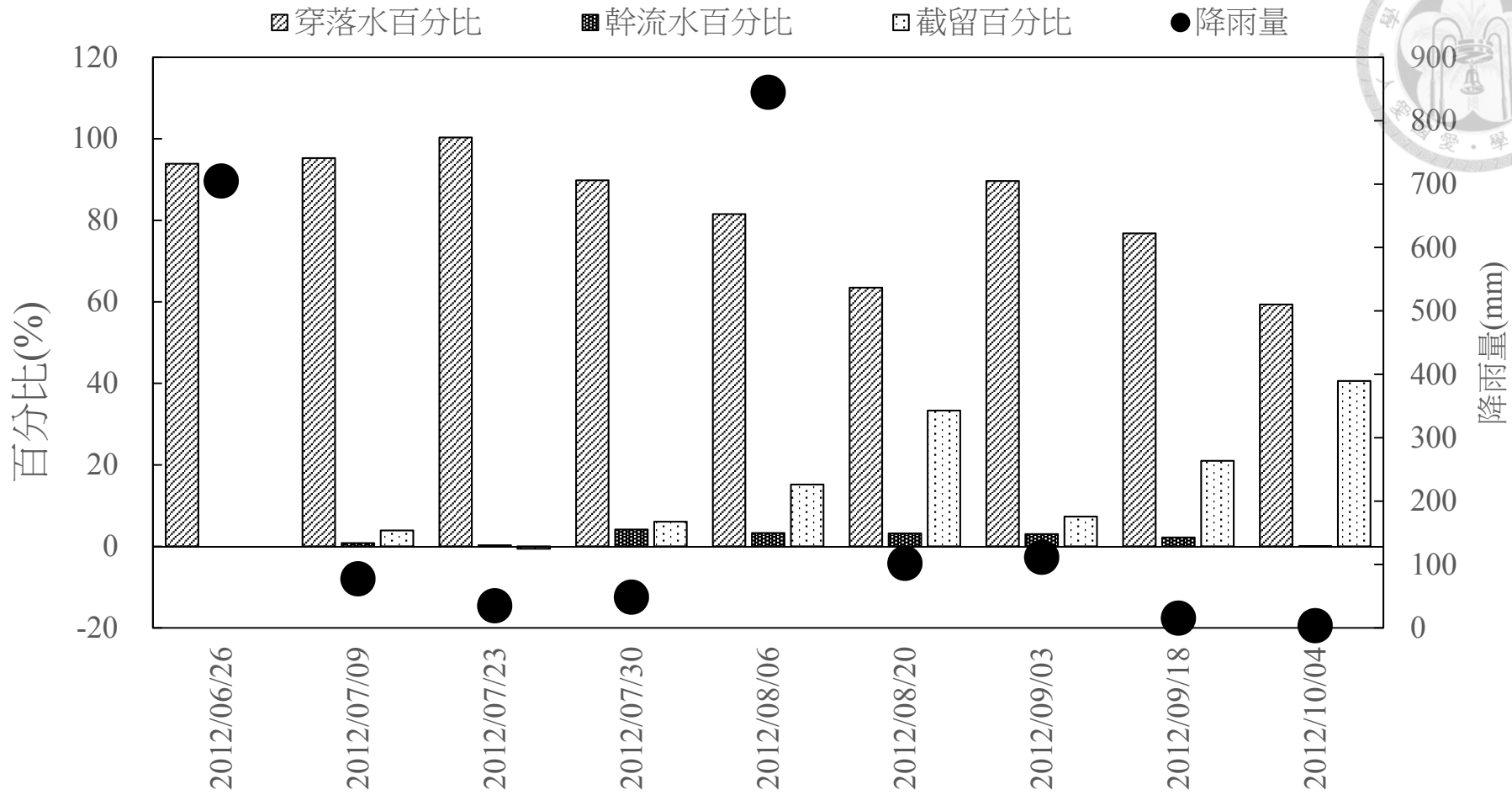
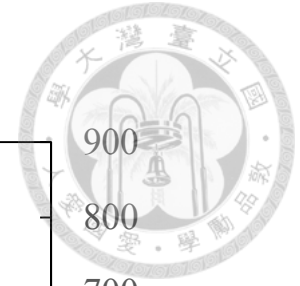


圖 4.18 穿落水、幹流水及樹冠截留百分比時序圖(2012/06/26~2012/10/04)

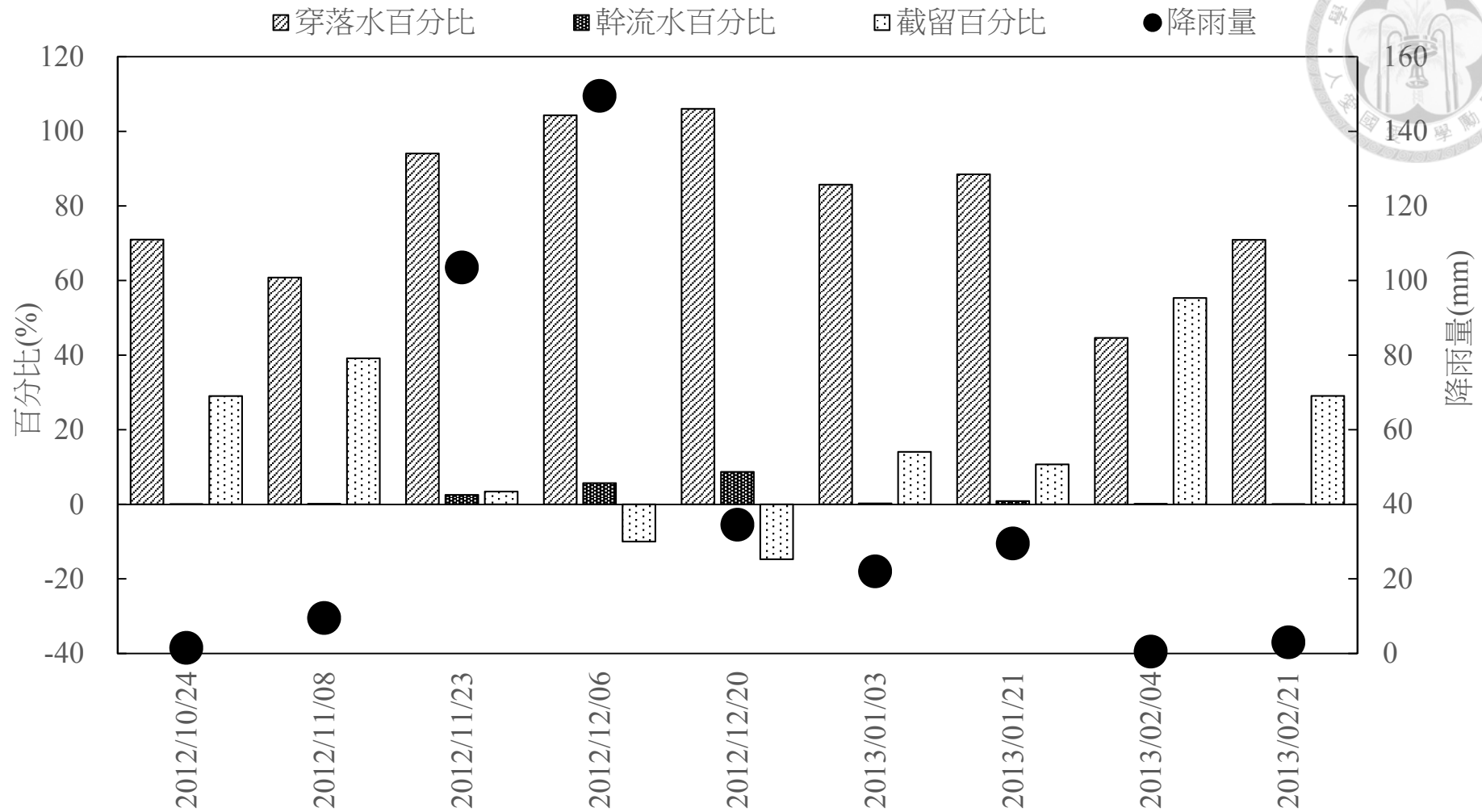


圖 4.19 穿落水、幹流水及樹冠截留百分比時序圖(2012/10/24~2013/02/21)

表 4.16 為觀測期間總降雨量、總穿落水量、幹流水量及樹冠截留量，2012 年 2 月至 2013 年 2 月的總降雨量 3308.0 mm，穿落水、幹流水及樹冠截留百分比各為 84.48%、2.15%及 13.37%，幹流水、樹冠截留百分比低於邱永和（1972）測得的 3.85%、20.40%，但邱永和所測得的結果來自 43 年生柳杉，本研究試驗地柳杉自 1950 年造林至今林齡為 63 年，根據 Komatsu et al. (2008)；小松（2007）；Pypker et al. (2005)等人的研究結果指出，年輕林分較老熟林分有較高的截留能力，本試驗地之柳杉已為老熟林分，枝葉生長較年輕柳杉弱，截留能力因此下降。以觀測期間(2012/02~2013/02)累積雨量大於 0.5 mm 且降雨延時大於 10 分鐘的 117 場有效林內降雨事件估算，每場降雨事件柳杉樹冠的截留能力為 3.78 mm，可視為柳杉樹冠截留飽和點。

表 4.16 觀測期間(2012/02~2013/02)柳杉穿落水、幹流水及樹冠截留百分比

降雨量 (mm)	穿落水 (mm)	幹流水 (mm)	樹冠截留 (mm)
3308.0	2794.5 (84.48%)*	71.1 (2.15%)*	442.3 (13.37%)*

*括弧內的數值是以降雨量為基準計算的百分比

幹流的部份，佐藤等（2002、2003a）在日本研究30年生柳杉幹流百分比為 10.2%，生原、相場（1982）研究71年生、田中等（2005）研究70年生柳杉幹流百分比各為4.0和5.6%，均高於本研究的2.15%，除了臺灣中部乾濕季分明的氣候條件和降雨型態差異，還有可能是遺失多次高流量的幹流水資料，使降雨較多的季節記錄到的資料數不夠，而降雨少的季節幹流量低，造成最後的平均值偏低的結果。

此外，若不計幹流百分比，僅以穿落水百分比算出的樹冠截留平均百分比為 15.52%，前述陳怡妙（2010）的樹冠截留估計值(15%)即為忽略幹流量的結果，雖然本研究結果幹流量僅2.15%，但因幹流多集中於小面積（樹幹周圍）上，對



土壤水的空間變異而言相當重要。

從本研究觀測期間之月降雨量較少（月降雨量 <100 mm的2012年2、3、9、10月及2013年1、2月），和月降雨量較多（月降雨量 >100 mm的2012年4、5、6、7、8、11、12月）來看，降雨量多的月份的穿落水及幹流水百分比較高，幹流水百分比尤其明顯，降雨量多之月份的平均3.25%、降雨量少者之月份的平均0.80%（表 4.17），然而，降雨量少的月份樹冠截留百分比平均21.62%，而降雨量多的月份則為6.76%，故以間隔15日或月為單位量測的資料分析柳杉樹冠截留百分比時，在降雨量多的月份忽略幹流水會高估樹冠截留百分比。

表 4.17 月降雨量大於及小於 100 mm 條件下穿落水、幹流水及樹冠截留百分比

月降雨量 (mm)	穿落水 (%)	幹流水 (%)	樹冠截留 (%)
<100	77.58	0.80	21.62
>100	89.99	3.25	6.76

第六節 林下植物截留

表 4.18為林下植物截留試驗結果，採樣日期為2013/05/28隨機圈出 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的樣區4個及2013/06/09隨機圈出 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的樣區6個，將樣區內的林下植物全數收割，攜回實驗室測量其截留水量結果為介於 $0.20\text{-}0.33\text{ mm/m}^2$ ，平均值為 0.25 mm/m^2 ，此測定值可視為林下植物對每場降雨事件的最大截留量，植物體氣乾重越重，可截留水份越多，如圖 4.20，儘管截留量相當低，但由於林下植被幾乎覆蓋整個柳杉林分，葉面積指數高，在每場降雨事件間蒸發速率快，以2012年共計194場降雨事件來估算，假設每場降雨事件的截留水都能充分蒸發，可截留 $194 \times 0.25 = 48.5\text{ mm}$ 的降雨量，相當於2012年全年降雨量 3174.5 mm 的1.53%，大約是樹冠截留量的10%左右。

表 4.18 林下植物截留試驗結果

採樣日期	編號	氣乾重 (g)	濕重 (g)	水重 (g)	單位面積 截留水量 (mm/m ²)
2013/05/28					
	1	1238.38	1452.87	214.49	0.21
	2	1143.75	1347.22	203.47	0.20
	3	1170.55	1443.83	273.28	0.27
	4	1227.84	1456.94	229.10	0.23
2013/06/09					
	1	1481.76	1690.24	208.48	0.21
	2	1450.71	1688.52	237.81	0.24
	3	1273.63	1563.08	289.45	0.29
	4	1579.36	1828.55	249.19	0.25
	5	2055.51	2383.01	327.50	0.33
	6	1028.60	1288.15	259.55	0.26
平均		1365.01	1614.24	249.23	0.25

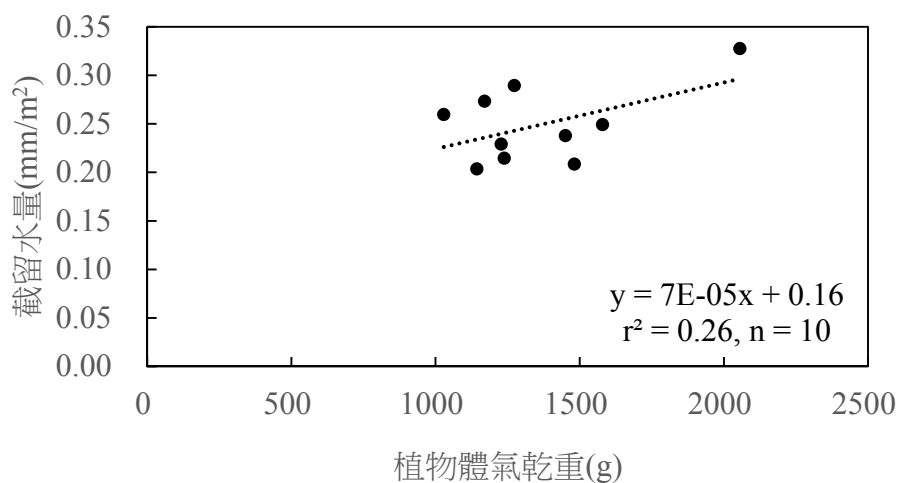


圖 4.20 截留水量與植物體氣乾重的關係


第五章 結論



本研究於溪頭營林區第3林班173號造林地柳杉人工林，設置兩個樣區，根據樹冠結構分析結果，樣區1穿落水觀測點樹冠孔隙率介於20.08~26.10%，平均為24.27%，樣區2介於19.54%~22.93%，平均為21.99%，樣區1的樹冠孔隙率稍高於樣區2，樹冠的LAI約為2.66。

觀測期間(2012/10/24~2013/06/07)每間隔15日左右蒐集一次穿落水資料，總共收集15次，樣區1的穿落水平均值為85.59 mm，樣區2為85.77 mm，兩者差異不大。統計2012/02~2013/02觀測期間林外總降雨量3308.0 mm，柳杉人工林穿落水、幹流水及樹冠截留百分比各為84.48%、2.15%和13.37%，以觀測期間之117場有效林內降雨事件估算，平均每場降雨可截留3.78 mm。乾、濕季之幹流水的差異相當大，幹流水百分比在降雨量大且降雨事件多的濕季，明顯高於降雨量小且降雨事件少的乾季，在乾季若有降雨事件濕潤樹冠，有助於霧水的凝結與滴落，對乾季而言，霧等水平降水是一重要的水收入來源。從觀測期間降雨量較少（月降雨量<100 mm）的2012年2、3、9、10月及2013年1、2月，和降雨量較多（月降雨量>100 mm）的2012年4、5、6、7、8、11、12月來看，降雨量多的月份的穿落水及幹流水百分比平均分別為89.99%及3.25%，降雨量少者之月份則分別為77.58%及0.80%，而降雨量少的月份樹冠截留百分比平均21.62%，降雨量多的月份則為6.76%，故以間隔15日或月為單位量測的資料分析柳杉樹冠截留百分比時，在降雨量多的月份忽略幹流水會高估樹冠截留百分比。

樣區2記錄穿落水之雨量計於觀測期間(2012/3/9 15:30~2013/2/28 00:00)有記錄到林外無降雨時間超過6小時，但林內有降雨的資料，推測為霧水或空氣中水氣飽和凝結的水滴造成，通稱水平降水，估算量21.17 mm，占觀測期間降雨量3026.0 mm的0.70%，儘管估算值偏低，但本研究所觀測到的水平降水係為雲霧或



空氣中的水氣、氣候狀態及柳杉樹冠交互作用後的結果，相較於其他觀測方法而言更接近天然狀態。以發生時間來看，6~12時最常見，12~18時最少發生，推測應為霧及空氣中的水氣經飽和凝結形成水滴，且氣溫較白天低不易蒸發，於清晨到中午之間滴落；以發生月份來看，6~8月最常發生，應為本段時間較高的降雨量及較頻繁的降雨事件，使樹冠一直保持濕潤而增加水平降水發生機率。

間隔15日左右的幹流水觀測，觀測水桶需有178 L以上的容量，或使用雨量計觀測，幹流量與柳杉之DBH無顯著相關，產生幹流量的降雨量門檻值為1.68 mm，因柳杉的樹皮具有0.18 mm的含水能力，其餘1.50 mm為枝葉吸收等其他因子造成。


以浸水秤重法測得的林下植物對每一場降雨的最大截留量平均為0.25 mm/m²，以2012年共計194場降雨事件估算，林下植物截留量占全年降雨量的1.53%，大約是樹冠截留量的11%左右。


往後研究方向之建議：（1）穿落水、幹流水需要長時間的觀測才能累積足夠的資料，本研究在觀測期間內缺乏200~800 mm降雨條件下的資料，應持續觀測；此外，需增加對單場降雨事件之穿落水、幹流水、樹冠截留的分析，在單場降雨事件分析上，使用雨量計是相當合適的，可取得詳細的時序與流量資料，並能按欲探討的降雨間隔時間進行資料整理和分析。（2）林內的降雨在分佈現象，可能受到氣候因子的影響，可配合溪頭通量塔的林內微氣候資料以瞭解風、溫濕度等氣候因子對穿落水、幹流水的影響。（3）降水再分佈具有空間變異性，可增加穿落水觀測點（使用較簡單的穿落水裝置，以降雨事件為單位收集），以空間統計討論穿落水的空間變異性，如熱點分析、空間自相關等，若配合樣區內每木分佈與冠幅調查，則可更深入討論樹冠分佈與穿落水分佈的關係。


參考文獻

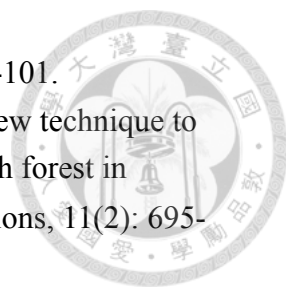


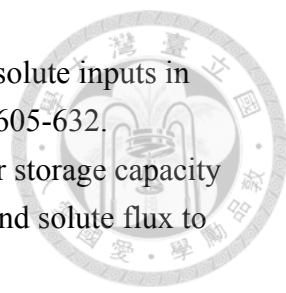
- 王亞男、江凱楹、陳子浩、劉興旺（2002）溪頭地區七種林相之地被物與土壤物理化學性質調查。臺大實驗林研究報告，16（1）：37-44。
- 台灣省農林廳林務局（1995）第三次台灣森林資源及土地利用調查。台灣省農林廳林務局，台北市，258 頁。
- 江永哲（1964）降雨時不同竹林降水分配之測定。臺灣省立中興大學農林學報，13 期，203-218。
- 江永哲（1972）不同樹種樹冠截留量之測定。中華水土保持學報，3（1）：22-27。
- 何鎮平（1977）臺大實驗林溪頭人工林森林土壤性質之分析。國立臺灣大學森林學研究所碩士論文，145 頁。
- 吳文統（1994）溪頭柳杉人工林降雨截留之研究。國立臺灣大學森林學研究所碩士論文，42 頁。
- 吳敏如（2004）以微氣候模式估算雲霧森林中臺灣扁柏的雲霧沉降量。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，78 頁。
- 周恒、江永哲（1964）降雨時不同樹種林分下幹流之測定(第二次報告)。臺灣省立中興大學及中國農村復興聯合委員會合作試驗報告。
- 林志偉（2007）鴛鴦湖地區台灣扁柏老齡林及更新林穿落水量之研究。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，87 頁。
- 林琚三（1976）台灣天然植生及人工造林之水分收支。中國農村復興聯合委員會補助計畫。
- 林登秋、夏禹九、金恆鑣（1996）臺灣東北部天然闊葉林林內降雨及林冠截留之研究。臺灣林業科學，11（4）：393-400。
- 邱永和（1972）柳杉及臺灣杉林分之降雨截留及其應用。國立臺灣大學森林學研究所碩士論文，64 頁。
- 金佐蒔（2012）合歡山臺灣冷杉林截留作用之研究。臺灣大學森林環境暨資源學研究所碩士論文，53 頁。
- 金恆鑣、劉瓊霖、夏禹九、黃正良（2003）福山天然闊葉林生態系對降水水化學的交互作用。臺灣林業科學，18（4）：363-373。
- 夏禹九、楊炳炎、金恆鑣、漆陞忠（1982）皆伐作業對蓮華池試驗集水區溪流流量的影響。臺灣省林業試驗所研究報告第 381 號，17 頁。
- 孫正春（1995）蓮華池地區不同樹種截留特性之研究。國立臺灣大學森林學研究所碩士論文，79 頁。
- 黃昭豪（2007）台灣扁柏森林冠層間之雲霧化學及其沉降量估算。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，50 頁。

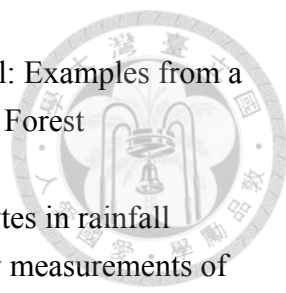
- 
- 葉青峯 (2004) 台灣扁柏森林的生物量及雲霧沈降量估算。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，84 頁。
- 臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處 (2008) 國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林經營計畫：民國九十七年七月至民國一〇七年六月。行政院農業委員會林業特刊，南投縣竹山鎮，206 頁。
- 臺灣大學農學院實驗林管理處 (Ed.) (1963) 國立臺灣大學農學院實驗林概況。推廣叢刊，第 1 號，48 頁。
- 梁晏綾 (2007) 台灣中部溪頭地區混沉降與霧化學特性之研究。國立彰化師範大學地理學研究所碩士論文，55 頁。
- 陳子弘 (2006) 鴛鴦湖地區台灣扁柏森林幹流量之估算。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，65 頁。
- 陳怡妙 (2010) 溪頭地區柳杉林分塊狀皆伐對土壤養分動態的影響。國立中興大學森林學系所碩士論文，78 頁。
- 陳財輝、許博行、張峻德 (1999) 四湖海岸木麻黃林分降水、幹流水及穿落水之養分含量與輸入，臺灣林業科學，14 (4)：419-435。
- 陳紫娥、張石角 (1987) 溪頭森林遊樂區之地質、地形及其發展史。台大實驗林研究報告，1 (1)：63-76。
- 陳耀德 (2003) 鴛鴦湖森林生態系大氣養分輸入之探討。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，114 頁。
- 陸象豫、唐凱軍 (1995) 台灣中部地區天然闊葉林降雨截留量之探討。林業試驗所研究報告季刊，10 (4)：445-457。
- 陸象豫、黃良鑫、傅鶴翹 (1999) 檳榔園水文特性之研究。臺灣林業科學，14 (2)：211-221。
- 陸象豫、黃良鑫、劉瓊霖 (2005) 檳榔園水文特性及其對環境的影響。中華水土保持學報，36 (1)：19-27。
- 陸象豫、漆陞忠，(1988a) 蓮華池地區天然闊葉林枯枝落葉層特性之研究。中華水土保持學報，19 (1)，71-79。
- 陸象豫、漆陞忠、盧惠生 (1988b) 不同林相枯枝落葉層物理及水文特性之研究。林業試驗所研究報告季刊，3 (1)：363-377。
- 黃正良、廖學誠、陳明杰、金恆鑣、陸象豫 (2002) 蓮華池試驗林森林水文研究之回顧分析。臺大實驗林研究報告，16，95-114。
- 劉美娟 (2004) 鴛鴦湖森林生態系地表苔蘚植物對養分循環之影響。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，120 頁。
- 劉崇瑞、蘇鴻傑 (1983) 森林植物生態學，臺灣商務，462 頁。
- 劉儒淵、鍾年鈞、陳子英 (1990) 溪頭森林遊樂區之植物資源。In：劉儒淵、黃英塗 (Ed.)，森林遊樂研討會，林業叢刊第 67 號，國立臺灣大學農學院實驗林管理處，溪頭森林遊樂區，269—304 頁。

- 
- 劉瓊霏、許博行 (1999) 幹流水和穿落水的水量及水質在三種林分的變化。林業研究季刊, 21 (2): 51-59。
- 潘家聲 (1964) 杉木林分對於降雨截留量之關係試驗。台灣省林業試驗所報告, 第 94 號, 15 頁。
- 潘家聲 (1965) 臺灣檫木林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗。台灣省林業試驗所報告, 第 114 號, 18 頁。
- 潘家聲 (1966) 天然闊葉林林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗。台灣省林業試驗所報告, 第 131 號, 20 頁。
- 潘家聲 (1974a) 大葉桉林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗。台灣省林業試驗所試驗報告, 第 253 號, 8 頁。
- 潘家聲 (1974b) 杉木不同疏伐度林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗。台灣省林業試驗所試驗報告, 第 255 期, 12 頁。
- 潘家聲 (1974c) 肖楠不同株行距林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗。台灣省林業試驗所試驗報告, 第 256 號, 11 頁。
- 潘家聲 (1976) 肖楠不同修枝度林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗。台灣省林業試驗所試驗報告, 第 274 號, 11 頁。
- 鄭森松、陳信佑 (Eds.) (2009) 國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處六十五年之氣象 (1941—2005)。林業特刊, 第 26 號, 臺大實驗林管理處, 南投縣竹山鎮, 91 頁。
- 賴彥任、魏聰輝、陳信雄、賴鴻寬 (2007) 塔塔加地區台灣雲杉天然林冠層截留與林內降雨之研究。中華水土保持學報, 38 (2): 135-146。
- 賴鴻寬 (2002) 塔塔加雲杉天然林林內降水之研究。國立臺灣大學森林學研究所碩士論文, 76 頁。
- 薛美莉 (2009) 烏石坑地區 18 年生台灣杉人工林雨水之質量組成。特有生物研究, 11 (1): 1-19。
- 簡文村 (1986) 台大實驗林溪頭區天然闊葉林分樹冠之降水截留量研究。國立臺灣大學農學院實驗林研究報告 173 號, 14 頁。
- 簡意婷 (2008) 棲蘭山樣區大氣沉降之 5 年研究。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文, 74 頁。
- 魏聰輝、姚榮鼎、周瑞龍 (1995) 溪頭地區山谷風特性之研究。臺大實驗林研究報告, 9 (4): 71-95。
- 魏聰輝、陳信雄、劉維 (2009) 塔塔加地區臺灣鐵杉天然林冠層截留量之研究。中華水土保持學報, 38 (2): 135-146。
- 魏聰輝、賴彥任、張振生、沈介文、洪致遠、王亞男、陳明杰 (2011) 溪頭地區霧分布特性初探。臺大實驗林研究報告, 25 (2): 149-160。
- 小松, 光 (2007) 日本の針葉樹人工林における立木密度と遮断率の關係。日本森林学会誌, 89 (3): 217-220。

- 
- 生原喜久雄、相場芳憲 (1982) スギ・ヒノキ壮齡林小流域における養分の循環とその収支。日本林學會誌, 64 (1): 8-14。
- 田中延亮、蔵治光一郎、白木克繁、鈴木祐紀、鈴木雅一、太田猛彦、鈴木誠 (2005) 袋山沢試験流域のスギ・ヒノキ壮齡林における樹冠通過雨量、樹幹流下量、樹冠遮断量。東京大学農学部演習林報告, 113, 197-239。
- 佐藤嘉展、久米篤、大槻恭一、小川滋 (2003a) 樹冠構造の違いが樹冠通過雨の分布特性に及ぼす影響: スギ林とマテバシイ林における樹冠通過雨特性の比較。水文・水資源学会誌, 16 (6): 605-617。
- 佐藤嘉展、大槻恭一、小川滋 (2003b) 常緑樹林地におけるリター遮断損失量の推定。水文・水資源学会誌, 16 (6): 640-651。
- 佐藤嘉展、大槻恭一、小川滋 (2002) マテバシイ林における年間樹冠遮断量の推定。九州大学農学部演習林報告, 83, 15-29。
- 服部重昭、近嵐弘栄、竹内信治 (1982) ヒノキ林における樹冠遮断量測定とその微気象学的解析。林業試験場研究報告, No. 318, 79-102。
- 塚本良則編 (1992) 森林水文学。現代の林学, 文永堂出版株式会社, 日本東京都, 319 頁。
- Asdak, C., Jarvis, P.G., van Gardingen, P., Fraser, A., 1998. Rainfall interception loss in unlogged and logged forest areas of Central Kalimantan, Indonesia. *Journal of Hydrology*, 206(3-4): 237-244.
- Chang, S.-C., Lai, I.L., Wu, J.-T., 2002. Estimation of fog deposition on epiphytic bryophytes in a subtropical montane forest ecosystem in northeastern Taiwan. *AtmRe*, 64(1-4): 159-167.
- Chang, S.-C., Yeh, C.-F., Wu, M.-J., Hsia, Y.-J., Wu, J.-T., 2006. Quantifying fog water deposition by in situ exposure experiments in a mountainous coniferous forest in Taiwan. *Forest Ecology and Management*, 224(1-2): 11-18.
- Crockford, R.H., Richardson, D.P., 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 14(16-17): 2903-2920.
- Deguchi, A., Hattori, S., Park, H., 2006. The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model. *Journal of Hydrology*, 318(1-4): 80-102.
- Gash, J.H.C., 1979. An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105(443): 43-55.
- Germer, S., Zimmermann, A., Neill, C., Krusche, A.V., Elsenbeer, H., 2012. Disproportionate single-species contribution to canopy-soil nutrient flux in an Amazonian rainforest. *Forest Ecology and Management*, 267(0): 40-49.
- Gerrits, A.M.J., Savenije, H.H.G., 2011. 2.04 - Interception. In: Editor-in-Chief: Peter,

- 
- W. (Ed.), *Treatise on Water Science*. Elsevier, Oxford, pp. 89-101.
- Gerrits, A.M.J., Savenije, H.H.G., Hoffmann, L., Pfister, L., 2007. New technique to measure forest floor interception — an application in a beech forest in Luxembourg. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(2): 695-701.
- Gomez-Peralta, D., Oberbauer, S.F., McClain, M.E., Philippi, T.E., 2008. Rainfall and cloud-water interception in tropical montane forests in the eastern Andes of Central Peru. *Forest Ecology and Management*, 255(3-4): 1315-1325.
- Hall, R., 2003. Interception loss as a function of rainfall and forest types: stochastic modelling for tropical canopies revisited. *Journal of Hydrology*, 280(1-4): 1-12.
- Helvey, J.D., Patric, J.H., 1965. Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of eastern United States. *Water Resour. Res.*, 1(2): 193-206.
- Herwitz, S.R., 1985. Interception storage capacities of tropical rainforest canopy trees. *Journal of Hydrology*, 77(1-4): 237-252.
- Herwitz, S.R., 1987. Raindrop impact and water flow on the vegetative surfaces of trees and the effects on stemflow and throughfall generation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12(4): 425-432.
- Holder, C.D., 2004. Rainfall interception and fog precipitation in a tropical montane cloud forest of Guatemala. *Forest Ecology and Management*, 190(2-3): 373-384.
- Holwerda, F., Scatena, F.N., Bruijnzeel, L.A., 2006. Throughfall in a Puerto Rican lower montane rain forest: A comparison of sampling strategies. *Journal of Hydrology*, 327(3-4): 592-602.
- Horton, R.E., 1919. RAINFALL INTERCEPTION. *MWRv*, 47(9): 603-623.
- Johnson, M.S., Lehmann, J., 2006. Double-funneling of trees: Stemflow and root-induced preferential flow. *Ecoscience*, 13(3): 324-333.
- Kobayashi, T., Nakagawa, Y., Tamaki, M., Hiraki, T., Aikawa, M., 2001. Cloud Water Deposition to Forest Canopies of *Cryptomeria Japonica* at Mt.Rokko, Kobe, Japan. *Water, Air, Soil Pollut.*, 130(1-4): 601-606.
- Koichiro, K., Yuri, T., Nobuaki, T., Isamu, K., 2001. Generation of stemflow volume and chemistry in a mature Japanese cypress forest. *Hydrological Processes*, 15(10): 1967-1978.
- Komatsu, H., Shinohara, Y., Kume, T., Otsuki, K., 2008. Relationship between annual rainfall and interception ratio for forests across Japan. *Forest Ecology and Management*, 256(5): 1189-1197.
- Levia, D.F., Frost, E.E., 2003. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. *Journal of Hydrology*, 274(1-4): 1-29.

- 
- Levia, D.F., Frost, E.E., 2006. Variability of throughfall volume and solute inputs in wooded ecosystems. *Progress in Physical Geography*, 30(5): 605-632.
- Levia, D.F., Herwitz, S.R., 2005. Interspecific variation of bark water storage capacity of three deciduous tree species in relation to stemflow yield and solute flux to forest soils. *Catena*, 64(1): 117-137.
- Levia, D.F., Keim, R.F., Carlyle-Moses, D.E., Frost, E.E., 2011. Throughfall and Stemflow in Wooded Ecosystems, *Forest Hydrology and Biogeochemistry*. In: Levia, D.F., Carlyle-Moses, D., Tanaka, T. (Eds.). *Ecological Studies*. Springer Netherlands, pp. 425-443.
- Liang, W.-L., Kosugi, K.i., Mizuyama, T., 2009. Characteristics of stemflow for tall stewartia (*Stewartia monadelphica*) growing on a hillslope. *Journal of Hydrology*, 378(1-2): 168-178.
- Liang, Y.-L., Lin, T.-C., Hwong, J.-L., Lin, N.-H., Wang, C.-P., 2009. Fog and Precipitation Chemistry at a Mid-land Forest in Central Taiwan. *J. Environ. Qual.*, 38(2): 627-636.
- LI-COR, Inc., 2011, LAI-2200 Plant Canopy Analyzer Instruction Manual, U. S., 215 pp.
- Link, T., 2004. The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(3-4): 171-191.
- Llorens, P., Domingo, F., 2007. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*, 335(1-2): 37-54.
- Lloyd, C.R., Marques ò, A.D.O., 1988. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 42(1): 63-73.
- Lu, S-Y, Liu, C-P, Hwang, L-S, Wang, C-H, 2007. Hydrological Characteristics of a Makino Bamboo Woodland in Central Taiwan. *Taiwan Journal of Forest Science*, 22(1): 81-93.
- Marin, C.T., Bouten, W., Sevink, J., 2000. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology*, 237(1-2): 40-57.
- McJannet, D., Wallace, J., Reddell, P., 2007. Precipitation interception in Australian tropical rainforests: II. Altitudinal gradients of cloud interception, stemflow, throughfall and interception. *Hydrological Processes*, 21(13): 1703-1718.
- Muzylo, A. et al., 2009. A review of rainfall interception modelling. *Journal of Hydrology*, 370(1-4): 191-206.
- Pypker, T., Bond, B., Link, T., Marks, D., Unsworth, M., 2005. The importance of

- 
- canopy structure in controlling the interception loss of rainfall: Examples from a young and an old-growth Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130(1-2): 113-129.
- Pypker, T.G., Unsworth, M.H., Bond, B.J., 2006a. The role of epiphytes in rainfall interception by forests in the Pacific Northwest. I. Laboratory measurements of water storage. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(4): 809-818.
- Pypker, T.G., Unsworth, M.H., Bond, B.J., 2006b. The role of epiphytes in rainfall interception by forests in the Pacific Northwest. II. Field measurements at the branch and canopy scale. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(4): 819-832.
- Rutter, A.J., Kershaw, K.A., Robins, P.C., Morton, A.J., 1971. A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology*, 9(0): 367-384.
- Staelens, J., De Schrijver, A., Verheyen, K., Verhoest, N.E.C., 2008. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. *Hydrological Processes*, 22(1): 33-45.
- Van Stan Ii, J.T., Siegert, C.M., Levia Jr, D.F., Scheick, C.E., 2011. Effects of wind-driven rainfall on stemflow generation between codominant tree species with differing crown characteristics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(9): 1277-1286.
- Veneklaas, E.J. et al., 1990. Hydrological properties of the epiphyte mass of a montane tropical rain forest, Colombia. *Vegetatio*, 89(2): 183-192.