

國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文

指導教授：張世杰 博士

鴛鴦湖地區台灣扁柏森林幹流水量之估算

Quantification of stemflow of
Chamaecyparis obtusa var. *formosana*
at the Yuanyang Lake site



研究生：陳子弘

中華民國九十五年七月

Abstract

Stemflow is a spatially localized point input of precipitation and solutes at the plant stem and is of hydrological and ecological significance in forested ecosystems. The stemflow volumes of 30 sample trees from yellow cypress were collected every two weeks from October 2005 to April 2006 in a *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana* forest at the Yuanyang Lake site, Taiwan. The purpose of this study is to: (1) find the intraspecific variation in stemflow production between the yellow cypresses; (2) Quantification of stemflow in study site.

The stemflow was highly influenced by crown project area, bark roughness, and flow path obstructions. Beside, there was a positive correlation between stemflow volume and tree diameters at breast height (DBH), which accounted for 71% variation of stemflow.

Different methods described in the literature, for scaling up the stemflow values from tree level to stand level were applied. The best for this type of forest is based on correlations between stemflow volume and tree diameters at breast height, the distribution of trees in the stand relative to their DBH. Stemflow for trees in a stand (mm) can thus be determined from total rainfall (mm). This represents $4.7(\pm 0.8)\%$ of precipitation deposition.

Keywords: stemflow, *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana*, stemflow determination.

摘要

在森林生態系中，幹流水是降雨時樹木所集中的大量雨水，沿著樹幹以點源方式輸入至林地表面，並攜帶著從樹木上被淋洗出來的化學物質，具有顯著的生態及水文意義。本研究於鴛鴦湖地區的台灣扁柏森林，進行幹流水量之研究。研究目的為 (1) 探討影響台灣扁柏單棵樣樹幹流水產量的因子。(2) 選取適合的方式來估算鴛鴦湖地區台灣扁柏森林的幹流水量。研究方法為選取 30 棵不同胸高徑的台灣扁柏樣樹，收集幹流水。

2005 年 10 月至 2006 年 4 月，每兩週採樣一次，共有 14 次的採樣記錄。台灣扁柏的胸高徑、樹冠投影面積、通道障礙物與樹皮形態都是影響台灣扁柏單棵樣樹幹流水量的顯著因子，而由於胸高徑最容易被量測，此外在統計上發現胸高徑與幹流水量的相關性最高，可解釋 71% 幹流水量的變異，所以非常適合用胸高徑來推測單棵樣樹的幹流水量，當台灣扁柏胸高徑越大時，樹冠投影面積也越大，可以收集到的幹流水量就越多。台灣扁柏單棵樣樹所收集到幹流水量的多寡與重力沈降量的大小呈現線性正相關，雲霧沈降量對幹流水產量的多寡影響不大，可忽略雲霧沈降量的影響。台灣扁柏的集中率隨著重力沈降量的增加呈現對數上升。

本研究區適合使用胸高徑分層法來估算台灣扁柏整個林分的幹流水量，依據重力沈降量由小至大，幹流水量為重力沈降量的 0.86%~5.52%。2005 年 10 月至 2006 年 04 月，總幹流水量為總重力沈降量的 4.7(±0.8)%。由重力沈降量來預測台灣扁柏森林幹流水量的模式為 $SF(mm) = 0.0553 * PD(mm) - 0.9594$ ， $R^2 = 0.9732$ 。

關鍵字：幹流水、台灣扁柏、估算幹流水量。

目錄

1. 前言.....	1
2. 文獻回顧.....	2
2.1 幹流水在水文與生態上的意義.....	2
2.2 幹流水收集器.....	5
2.3 幹流水的取樣方法.....	6
2.4 林分幹流水量之估算.....	6
2.4.1 代表樣區法.....	9
2.4.2 代表樣樹法.....	9
2.5 影響幹流水量的因子.....	11
2.5.1 樹木特性.....	12
2.5.2 降雨類型.....	13
2.6 幹流水集中率.....	13
2.7 鴛鴦湖地區幹流水之研究現況.....	15
3. 研究目的.....	16
4. 材料與方法.....	17
4.1 樣區概述.....	17
4.2 取樣設計.....	20
4.3 收集器架設.....	21
4.4 影響幹流水量因子之測量.....	22
4.4.1 台灣扁柏樹木形態之測量.....	22
4.4.2 降雨類型之測量.....	23
4.4.3 樹皮吸水、滴落能力之測試.....	24
5. 結果.....	25
5.1 台灣扁柏與大氣沈降之基本資料.....	25
5.1.1 台灣扁柏樣樹基本資料.....	25
5.1.2 大氣沈降基本資料.....	28
5.1.3 樹皮吸水、滴落能力.....	29

5.2	影響幹流水量之因子.....	30
5.2.1	樹木特性.....	30
5.2.2	大氣沈降量.....	36
5.3	林分幹流水量之估算.....	41
6.	討論.....	47
6.1	影響幹流水量之因子.....	47
6.1.1	樹木特性.....	47
6.1.2	降雨類型.....	51
6.2	林分幹流水量之估算.....	55
7.	結論.....	57
8.	建議未來研究方向.....	57
9.	引用文獻.....	58

圖目錄

圖 1	樹冠層水文收支。.....	3
圖 2	幹流水收集器。左：螺旋形；右：環形。.....	5
圖 3	集中率 (Funneling Ratio) (Herwitz, 1986)。.....	14
圖 4	幹流量(mm)與重力沈降量(mm)關係圖 (陳耀德, 2003)。.....	15
圖 5	5 棵樣樹總幹流量與胸高徑之關係(資料來源：陳耀德, 2003)。....	16
圖 6	樣區位置圖。.....	18
圖 7	1 ha 樣區中有 1820 棵台灣扁柏,以胸高徑為單位,每 1 cm 內的棵數 (陳耀德, 2003)。.....	19
圖 8	1 ha 樣區中, 25 棵台灣扁柏樣樹位置與編號。.....	20
圖 9	架設螺旋形幹流水收集器。.....	21
圖 10	2005/05~2006/04 重力沈降量與雲霧沈降量。.....	28
圖 11	樹冠投影面積與幹流量之關係。.....	32
圖 12	灑水實驗回收水量與胸高徑之關係。.....	32
圖 13	幹流量與樣樹胸高徑的線性迴歸分析圖。.....	34
圖 14	更新林、老齡林樣樹的幹流量與其胸高徑的線性迴歸分析圖。....	34
圖 15	大氣沈降量越大,集中率(FR)呈現對數上升。.....	37
圖 16	單棵樣樹幹流量與大氣沈降量之關係圖。.....	37
圖 17	2006/03/14~16, PD: 2.5 mm, FG: 1.7 mm, 25 棵代表樣樹胸高徑(cm)與幹流量 Stemflow(mL)的線性迴歸圖。.....	39
圖 18	2006/01/05~02/06, PD: 211.3 mm, FG: 25.5 mm, 25 棵代表樣樹胸高徑(cm)與幹流量 Stemflow(L)的線性迴歸圖。.....	40
圖 19	每兩週的幹流量與樣樹胸高徑之決定係數。.....	40
圖 20	估算林分幹流量：(a)胸高徑分層法、(b)胸高徑-幹流水相關法。 .	42
圖 21	以胸高徑分層法(DBH class)、胸高徑-幹流水相關法(DBH-SF),估算林分幹流量,都與大氣沈降量呈正相關。.....	44
圖 22	以胸高徑分層法(DBH class)、胸高徑-幹流水相關法(DBH-SF),估算林分幹流量,與大氣沈降量的比例,呈現對數形式。.....	44

圖 23	樹皮吸水、滴落能力實驗結果。樣樹 SF24、31、33、34。	50
圖 24	樹皮吸水、滴落能力實驗結果。樣樹 SF51、52、54、63、64。	50
圖 25	幹流水量與重力沈降量、雲霧沈降量的比例。	53
圖 26	10/13~27,10/27~11/10 兩段期間的降雨類型與幹流水量。	54

表目錄

表 1	各種植被形態的幹流水量(Levia Jr. & Frost, 2003)。	4
表 2	幹流水取樣方法、樣樹數量、估算方法與重力沈降量的比例(修改自 Lewis, 2003)。	7
表 3	30 棵台灣扁柏樣樹基本資料。	26
表 4	30 棵樣樹的幹流水收集器收集效率。	27
表 5	14 次的採樣的起、止日期，採樣期間的重力沈降量、雲霧沈降量。	29
表 6	11 棵台灣扁柏樣樹樹皮吸水、滴落能力測試結果。	30
表 7	25 棵樣樹總幹流水量(2006/01/05~04/27)與胸高徑、樹冠投影面積、胸高斷面積、樹幹表面積、樹高之相關係數。	31
表 8	30 棵樣樹的集中率(FR)、SF/(CPA*PD) %。	35
表 9	14 次採樣記錄的幹流水集中率平均值、最大值、最小值。	36
表 10	代表樣樹的幹流水量 SF(mL)與大氣沈降量 PD+FG(mm)的線性迴歸公式，每兩週採樣一次，採樣次數 (n=14)。	38
表 11	胸高徑分層法。	43
表 12	胸高徑-幹流水相關法。	43
表 13	2005/10/27~2006/04/27，PD: 1282.4 mm，FG: 153.7 mm，13 次的採樣記錄，25 棵代表樣樹，以胸高徑劃分成 5 個徑級，每個徑級收集到幹流水量(L)的比例。	45
表 14	2005/10/27~2006/04/27，PD: 1282.4 mm，FG: 153.7 mm，13 次的採樣記錄，25 棵代表樣樹，以胸高徑劃分成 5 個徑級，推估到 1 ha 中每個徑級收集到幹流水量(L)的比例。	46
表 15	選取平均胸高徑級 9 棵樣樹，以胸高斷面積平均法估算林分幹流水量。	55

1. 前言

Likens & Bormann (1995)認為生態系是一個開放的系統，水分與養分會不斷地在各生態系邊界(boundaries)間流動並在生態系統內的各種組成分子(components)間循環。大氣沈降是水分與養分輸入到森林生態系的重要途徑，其輸入的途徑相當多樣。依沈降型態分為濕沈降 (wet deposition) 與乾沈降 (dry deposition) (Likens & Bormann, 1995)。Matzner (1989)依沈降方式將大氣沈降分為重力沈降 (precipitation deposition, PD) 及攔截沈降 (interception deposition, ID) 兩種。

森林樹冠層是由樹葉、枝條、莖幹所組成的不均質層。從水文學的觀點來看，樹冠層扮演著過濾的角色，允許雨水通過其間的孔隙而進入地表。如果視每一棵樹的樹冠與樹幹如漏斗一般，那麼林分內植株的密度及樹冠的分佈則可比擬為漏斗的數量及大小 (Bellot & Escarre, 1998)。當降雨落至森林時，一部分的雨水並不直接落至地面，而是先落至葉子、枝條與莖幹上，經由樹冠層攔截繼而藉由蒸發作用再返回於大氣中，此一過程稱為攔截損失(interception loss, IL)；一部分的雨水直接穿過樹冠層落至地面，或由葉子、枝條攔截並聚集起來，再從樹上滴落至地面，統稱為穿落水(throughfall, TF)；另外有一部分雨水會附著於葉子、枝條上，形成一層很薄的水膜，然後集中至樹幹上並順著樹幹流至森林地表，稱為幹流水(stemflow, SF)。在研究森林水文循環時，必須準確地測量攔截損失量、穿落水量與幹流水量，才能更清楚地了解這三部分在森林水文收支平衡中所占的比例(Aboal *et al.*, 1999; Likens & Bormann, 1995)。

幹流水的水量受到降雨類型、氣候、季節、附生植物、植被種類、樹冠層結構與植物生長週期影響，所以不同的森林會有不同的幹流水量(Levia Jr. & Frost, 2003)。在一座森林中，植株的密度及樹冠的分佈都會將未經由攔截損失的雨水再重新分配，而影響幹流水水量。此外降雨的類型及樹冠的構造，造成了幹流水與穿落水在空間及時間上的高度變異，而植株在空間上的分佈以及樹冠之間的孔隙，也決定了雨水落至森林土壤中的空間分佈(Bellot & Escarre, 1998)。

為瞭解在一個林分中有多少的降雨是以幹流水形式進入森林地表，學界已發展出數種取樣的方式及估算幹流水量的方法。本研究想要深入瞭解如何估算台灣扁柏森林的幹流水量，收集幹流水的方式、取樣的方法、樣樹數量、並從單棵樣樹如何推估到整個林分的幹流水量等問題，此外也將探討影響台灣扁柏單棵樣樹所收集到的幹流水量多寡的因子。

2. 文獻回顧

本研究將對幹流水在生態與水文上的意義，幹流水的收集方式，取樣方法，估算方法，以及影響幹流水量的因子做一探討。

2.1 幹流水在水文與生態上的意義

大氣沈降依沈降型態分為濕沈降與乾沈降，濕沈降包含霧、露、雨、雪、冰雹；乾沈降為顆粒懸浮物、膠體粒子等。Matzner (1989)依沈降方式將大氣沈降分為重力沈降及攔截沈降兩種。雨、雪、固體顆粒等受重力作用而沈降者，即為重力沈降；大氣中的物質受大氣的擾動且被植被攔截而沈降者，稱為攔截沈降，包括顆粒懸浮物及雲霧沈降 (cloud or fog deposition)。攔截沈降量的多寡決定於植被型態與氣候因子。植被型態包含植被高度、樹冠層大小與結構、生物量、葉片與附生植物的物理性質與排列方式；氣候方面則包括空氣中的水分含量、水滴大小、風速、風向、溫度等，所以隨地理位置不同，攔截沈降的量也會有明顯的差異(Bruijnzeel & Proctor, 1994)。

藉此兩種方式所攜帶的水分沈降於森林內時，水分並不完全直接落至地面，而是先落至葉子、枝條與莖幹上，經由樹冠層攔截繼而藉由蒸發作用再返回於大氣中，此一過程稱為攔截損失；一部分的水分直接穿過樹冠層落至地面，或由葉子、枝條攔截並聚集起來，再從樹上滴落至地面，統稱為穿落水；另外有一部分的水分會附著於葉子、枝條上，形成一層很薄的水膜，然後集中至樹幹上並順著樹幹流至森林地表，稱為幹流水 (圖 1)。

藉由重力沈降與攔截沈降所攜帶的水分，經過樹冠層輸入到森林內部，但尚未到達土壤時，森林冠層的水文收支平衡可用一簡單式子表示：

$$PD + ID = TF + SF + IL \quad (1)$$

許多森林學家及水文學家在研究森林水文收支時，對樹冠層的攔截損失都非常感興趣，但要直接量測攔截損失並不容易，因此可以直接測量重力沈降(PD)、穿落水(TF)、幹流水(SF)。而攔截沈降(ID)部分，其量化的難度較高，大都需要以較精密之儀器分析或數學模式來求得其沈降量(Demoz *et al.*, 1996; Lovett, 1984)。再由森林水文收支平衡公式，計算出攔截損失量(IL)(Crockford & Richardson, 2000; Ford & Deans, 1978; Kittredge *et al.*, 1941; Price *et al.*, 1997; Wei *et al.*, 2005)。

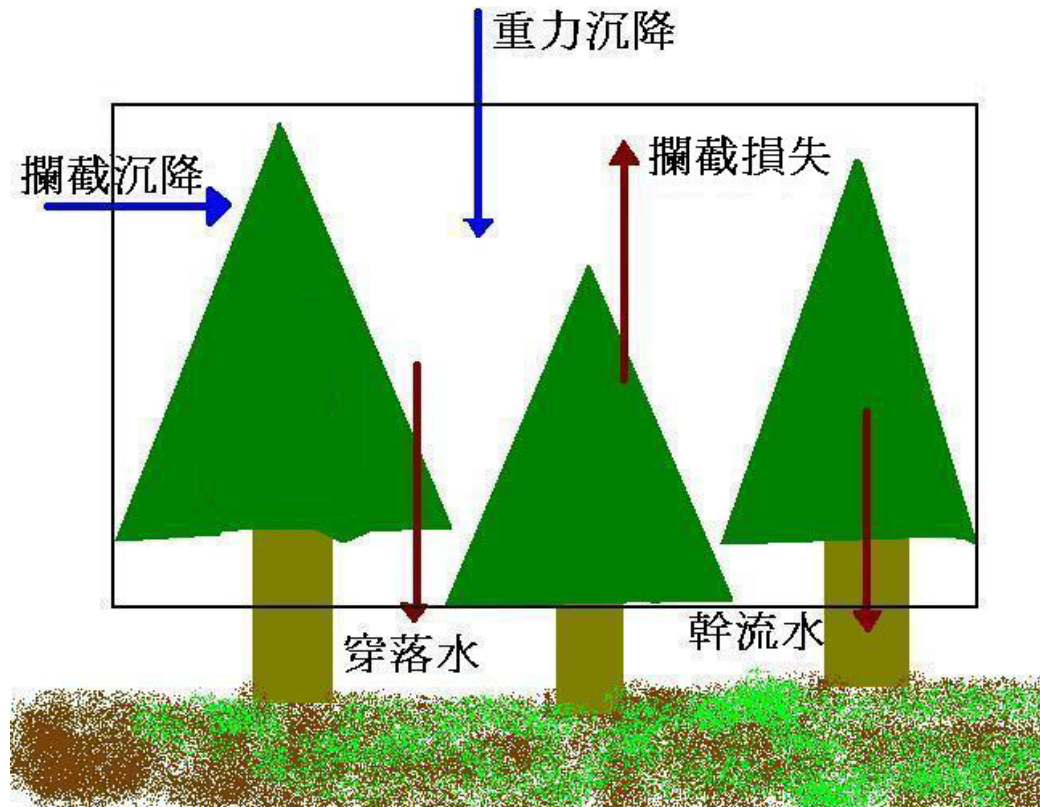


圖 1 樹冠層水文收支。經由重力沈降和攔截沈降的水分沈降於森林內時，接觸過樹冠層而降至地面的稱為穿落水；沿著樹木主幹流至地表者稱為幹流水；若只停留於樹冠層或其它體表，並再蒸發回大氣而未達地面者，稱為攔截損失。

Levia Jr. & Frost (2003)整理幹流水的文獻，發現在熱帶、溫帶、半乾燥及乾燥的生態系中，因植被形態的不同，注入到森林及農地土壤的幹流水量有很大的變異，在森林生態系的樹冠層水文收支中，幹流水量大約為總降雨量的 0.9%-13.6%(表 1)。有一些研究顯示幹流水量不如穿落水量一樣地顯著，如 Lloyd & de Marques (1988)在亞馬遜熱帶雨林調查發現幹流水量為總降雨量的 1.8%；Price *et al.* (1997)在北曼尼托巴的北寒林調查發現幹流水量小於總降雨量的 1%；Marin *et al.* (2000)在哥倫比亞西部的 4 座熱帶雨林調查發現幹流水量平均為總降雨量的 1.1%。因此在這些研究中，幹流水未具備在水文上的代表性。

在森林生態系中，當降雨接觸過植物體表面，會有一部分水分與離子被植物體直接吸收利用、存留 (retention)；而一部分的雨水會溶解、攜帶植物體表的乾沈降或把植物體表的物質淋洗 (leaching) 下來，故幹流水之水量、化學組成與重力沈降有相當大的差異(Fan & Hong, 2001; mm, 1998; Liu *et al.*, 2003)。雖然在林分尺度上，幹流水量占總

沈降量的比例不大。但以單棵樹木的尺度來看，在森林內的樹木冠層像漏斗一樣集中雨水，而以局部性點源的方式，大量地輸入至樹木根部周圍的小面積土壤內，對於補充樹木水分及養分具有重要的生態水文 (eco-hydrological) 及生物地質化學 (biogeochemical) 意義(Chang & Matzner, 2000; Herwitz, 1986; Návar, 1993; Voigt, 1960)。大量的幹流水除了補充局部性的土壤水及地下水，更造成樹木周圍的土壤沖蝕(Herwitz, 1986)。幹流水也影響了土壤水分及養分的空間分佈(Chang & Matzner, 2000; Falkengren-Grerup, 1989)。這局部性輸入的雨水會影響樹木的細根在早春發育時的空間分佈(Herwitz & Levia Jr., 1997)。在乾燥和半乾燥地區植物的樹冠可以攔截並集中雨水沿著樹幹流下，來適應缺水的環境，在墨西哥東北部三種半乾燥灌木叢樹冠下，所接受的幹流水量大約為降雨量的 5 倍，這順著枝條、樹幹流下的幹流水，是乾燥和半乾燥地區植物生長所需的重要水分來源(Mauchamp & Janeau, 1993; Návar, 1993)。

表 1 熱帶、溫帶、半乾燥及乾燥生態系，各種植被形態的幹流水量(Levia Jr. & Frost, 2003)。

Vegetation Type	Stemflow (% of incident precipitation)	Reference
Tropical ecoregions		
Tropical montane rainforest	13.6	Herwitz (1986)
Tropical rainforest	1.8	Lloyd & de Marques (1988)
Tropical mantane rainforest	< 1.0	Veneklaas & Van Ek (1990)
Tropical rainforest	0.9-1.5	Marin <i>et al.</i> (2000)
Temperate ecoregions		
<i>Pinus radiata</i> plantation	11.2	Crockford & Richardson (1990)
Dry sclerophyll forest	4.8	Crockford & Richardson (1990)
Pine-hemlock-beech plots	1.2-9.6	Voigt (1960)
Northern red oak plantation	4.0	Durocher (1990)
Japanese cypress forest	12	Kuraji <i>et al.</i> (2001)
Semi-arid and arid ecoregions		
Chihuahuan desert shrubs	4.0-45.0	Mauchamp & Janeau (1993)
Semi-arid shrubs	0.76-5.14	Návar (1993)
Creosotebushes	5.9-26.9	Whitford <i>et al.</i> (1997)
Laurel forest	1.2-13.6	Aboal <i>et al.</i> (1999)
Mediterranean holm oak forest	2.6-12.1	Bellot & Escarre (1998)

2.2 幹流水收集器

幹流水的收集方式，大部分的研究是在樹幹上距離地面 1.3 m 的位置處架設幹流水收集器(Cape *et al.*, 1991; Kuraji *et al.*, 2001)。若有特定的目的，亦可在不同的高度架設幹流水收集器。如 Kuraji *et al.* (2001)研究日本扁柏樹幹表皮留存雨水的的能力，因此分別在日本扁柏樹幹上距地面 19.1 m 處及 1.3 m 處架設收集器。

在架設幹流水收集器時，需要考慮到的因素包括：1. 材料費用，尤其是大量架設收集器時、2. 材質容易附著於樹幹上，經過長時期仍然能與樹幹緊密黏著、3. 材質不能與幹流水產生化學反應(Likens & Eaton, 1970)。Likens & Eaton (1970)在測試過各種材質後，發現聚氨酯 (polyurethane, PU) 發泡劑是幹流水收集器的最佳材質。

幹流水收集器主要有兩種形式：螺旋形 (spiral type) 收集器(Cape *et al.*, 1991)及環形 (collar type) 收集器(Durocher, 1990)(圖 2)。螺旋形收集器是將幹流水從樹幹處導引至螺旋形凹槽，並沿著螺旋形凹槽底端流出。螺旋形收集器可能會遇到的問題是掉落至凹槽的枯落物會隨著水流至底端的出口，造成出口被枯落物堵塞，或流入測量系統而影響資料的正確性。環形收集器是圍繞著樹幹成一個環狀的凹槽來收集幹流水，並在環形溝槽上開鑿一小洞連接水管，導引至收集桶。Durocher (1990)發現枯落物也會掉落至環形凹槽，但因為水流速慢，比較不會堵塞出口。不論是螺旋形或是環形收集器都已成功地被使用來收集幹流水(Levia Jr. & Frost, 2003)。

依據研究的目的，可以將收集到的幹流水導入收集桶或是傾斗式雨量計，來測量幹流水量。使用收集桶時，若樹木集中的幹流水量太多而超過收集桶的容量，可以再外接一個溢流桶。在冬天會結冰的地區，則是使用幹流水收集桶，而不使用傾斗式雨量計(Levia Jr. & Frost, 2003)。

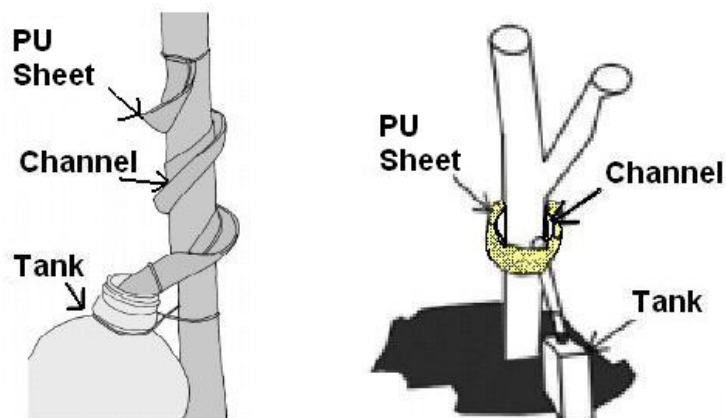


圖 2 幹流水收集器。左：螺旋形；右：環形。

2.3 幹流水的取樣方法

對於整個林分幹流水的取樣部分，可以歸納成兩類：代表樣區法及代表樣樹法 (Hanchi & Rapp, 1997)。

代表樣區法是選取可代表整個林分的小樣區，直接測量小樣區中的全部樹木所收集到的幹流水(Ford & Deans, 1978; Manfroi *et al.*, 2004; San Jose & Montes, 1992)。在擁有多種樹木的森林(e.g. 熱帶森林)，適合用代表樣區法來估算整個林分的幹流水量(Manfroi *et al.*, 2004)。小樣區的面積是依據研究目的而定，Manfroi *et al.* (2004)在馬來西亞沙勞越的熱帶森林中，使用代表樣區法，小樣區的面積為 10 m × 10 m。使用代表樣區法可以得到很確實的資料，但很難找到可代表整個林分的小樣區。

代表樣樹法是測量一個林分或研究樣區中的代表樣樹所收集到的幹流水，來推估整個林分的幹流水量；選擇代表樣樹的方式有兩種，一是選擇接近研究樣區中所有樹木平均胸高徑(diameter at breast height, DBH) 的單一徑級，在樹齡相似的人工林，適合以平均的胸高徑級來選取樣樹(Herwitz & Levina Jr., 1997)；一是選擇符合林分中，各種胸高徑樹木的集合，在樹齡廣泛分佈的純林或是混合林，適合用胸高徑分徑級來選取樣樹 (Aboal *et al.*, 1999; Bellot & Escarre, 1998; Cape *et al.*, 1991)。

2.4 林分幹流水量之估算

從研究樣區的樹木上所收集到的幹流水量，必須將體積單位轉換成降雨量的深度表示單位(mm)，才能由個別樣樹的幹流水量推估至整個林分的幹流水量，並計算出幹流水量在總降雨量中的百分比。當個別樣樹的幹流水量要從體積單位轉換成深度單位時，所需要的轉換面積有數種選擇，因此發展出代表樣區法與代表樣樹法來估算林分幹流水量(Aboal *et al.*, 1999; Hanchi & Rapp, 1997)。

表 2 是參考 Lewis (2003)所整理出來對於幹流水量的研究。各研究者在不同的森林中，使用的取樣方法、樣樹數量、估算方法及幹流水量在重力沈降量中的比例。在表 2 中對於林分幹流水量之估算，使用的方法包括了代表樣區法、胸高斷面積平均法、胸高斷面積分層法、胸高徑分層法、樹冠投影面積法等等，以下將對這些估算林分幹流水量的方法做一探討。

表 2 幹流水取樣方法、樣樹數量、估算方法與重力沉降量的比例(修改自 Lewis, 2003)。STRS: stratified random sampling, SRS: simple random sampling, n: number of sampled trees, n_h : number of trees per stratum, H: number of strata, BA: basal area, DBH: diameter at breast height, CPA: crown project area, SF: stemflow.

Study	Species	n	Sampling design	Estimation method	%
Aboal <i>et al.</i> (1999)	49 yr laurel forest, 6 species	30	STRS by DBH for each species, $n_h=1, H=5$	BA regression	6.85
Asdak <i>et al.</i> (1998)	Tropical rainforest unlogged and logged	16 20	Judgment within DBH strata	Not reported	1.4 0.3
Bellot & Escarre (1998)	Holm-oak forest Q. ilex A. unedo P. media	10 5 5	STRS by DBH for each species		12.1 6.6 3.9 1.6
Cape <i>et al.</i> (1991)	Scots pine and 5 other species	54	STRS by DBH for each of 9 plots, $n_h=3, H=2$	STRS for total; SRS for error	6~15
Cavelier <i>et al.</i> (1997)	Tropical rainforest	9	Judgment within DBH strata	Mean annual SF per tree	0.4
Crockford & Richardson (1990)	Eucalypt Pinus radiata	32 21	Judgment	Mean per unit BA times total BA	4.8 11.2
Ford & Deans (1978)	14 yr Sitka spruce	23	Measure all trees in plot	stemflow/area	27
Gash <i>et al.</i> (1995)	20m Maritime pine	6	Judgment	Not reported	1
Hanchi & Rapp (1997)	Pinus pinea	—	Judgment	Stormwise DBH regression	16.4
Herwitz (1986)	Tropical rainforest	8	Judgment	effective crown area	13.6
Herwitz & Levia Jr. (1997)	Populus grandiden	5	mean DBH	Mean and Standard deviation	5.4~9.9
Johnson (1990)	50 yr Sitka spruce	9	Judgment	Not reported	3
Kuraji <i>et al.</i> (2001)	70 yr Japanese cypress	4	Judgment	Not reported	12
Llorens <i>et al.</i> (1997)	Scots pine	7	Judgment	Not reported	1.3
Lloyd & de Marques (1988)	Amazonian tropical rainforest	19	Judgment	Mean and Standard error	1.8

Study	Species	n	Sampling design	Estimation method	%
Manfroi <i>et al.</i> (2004)	Sarawak tropical rainforest	78	Measure all trees in plot	stemflow/area	3.5
Marin <i>et al.</i> (2000)	4 forest ecosystems	—	Judgment	Not reported	1.1
Martinez-Meza & Whitford (1996)	Flourensia cernua	—	Judgment	Not reported	4~45
	semi-arid shrubs		Random	Not reported	
Návar (1993)	D. texana	15			5.14
	P. laevigata	8			0.76
	A. farnesiana	7			1.0
Price <i>et al.</i> (1997)	black spruce	21	Judgment	Not reported	0.95
Schroth <i>et al.</i> (1999)	Polyculture	30	Judgment	Not reported	3.4
	monoculture	6			24.7
	fallow	6			20.3

2.4.1 代表樣區法

以樹木的密度、平均胸高徑級、空間分佈，來選擇可以代表整個林分的一個小樣區(Hanchi & Rapp, 1997)。在一次降雨事件中或固定的時間週期內，收集在小樣區面積 $A(m^2)$ 內，所有樹木的總幹流水量 $V_t(L)$ ，將總幹流水量 V_t 除以小樣區的面積 A ，轉換成降雨的深度單位 $S_t(Lm^{-2})^1$

$$S_t = \frac{V_t}{A} \quad (2)$$

2.4.2 代表樣樹法

- 胸高斷面積平均法(Basal Area mean)：(Crockford & Richardson, 1990)

此方法將林分中代表樣樹 j 在一次降雨事件中或固定的時間週期內，所收到的幹流水量 $V_j(L)$ ，除此棵樣樹的胸高斷面積 $BA_j(m^2)$ ，再將所有代表樣樹所得之值 (Lm^{-2}) 平均，此平均值乘以每 1 ha 中此種樹木的胸高斷面積總和，得到林分中此種樹木全部的幹流水量 $S_t(L/ha)^2$ 。在樹齡相似的人工林，適合用胸高斷面積平均法來估算整個林分的幹流水量。

- 胸高斷面積分層法(Basal Area class)：(Jiménez *et al.*, 1996)

此方法將林分中所有樹木以胸高斷面積分出等級，在每一等級 BA_j 中選出代表樣樹，收集幹流水。在一次降雨事件中或固定的時間週期內，將每一胸高斷面積 BA_j 的平均幹流水量 $V_j(L)$ ，乘以每 1 ha 中此徑級的樹木數量 F_j ，得到此等級中所有樹木的幹流水量 $S_j(L/ha)$

$$S_j = V_j * F_j \quad (3)$$

將所有徑級的幹流水量加總，得到每 1 ha 中此種樹木全部的幹流水量 $S_t(L/ha)$

$$S_t = \sum_{j=1}^J S_j \quad (4)$$

¹ 單位換算：1 L / 1 m² = 1000 cm³ / 10000 cm² = 0.1 cm = 1 mm

² 單位換算：1 L / 1 ha = 1 L / 10000 m² = 10⁻⁴ mm

- 胸高徑分層法(DBH class)：(Hanchi & Rapp, 1997)

此方法將林分中所有樹木以胸高徑分出徑級，在每一徑級 DBH_j 中選出代表樣樹，收集幹流水。在一次降雨事件中或固定的時間週期內，將每一胸高徑級 DBH_j 的平均幹流水量 V_j (L)，乘以每 1 ha 中此徑級的樹木數量 F_j 得到此徑級中所有樹木的幹流水量 S_j (L/ha)

$$S_j = V_j * F_j \quad (5)$$

將所有徑級的幹流水量加總，得到每 1 ha 中所有樹木的幹流水量 S_t (L/ha)

$$S_t = \sum_{j=1}^J S_j \quad (6)$$

- 降雨-幹流水相關法：(Hanchi & Rapp, 1997)

此方法是建立各胸高徑級代表樣樹的幹流水量與林外降雨(mm)的迴歸公式。在一次降雨事件中或固定的時間週期內，以降雨量 R 代入迴歸公式中，求得胸高徑級 DBH_j 的幹流水量 V_j (L)

$$V_j = a_j (R)^{b_j} \quad (7)$$

代表樣樹胸高徑 DBH_j 的幹流水量乘以每 1 ha 中此徑級的樹木數量 F_j ，得到每 1 ha 中此徑級中所有樹木的幹流水量 S_j (L/ha)

$$S_j = V_j * F_j \quad (8)$$

將所有徑級的幹流水量加總，得到每 1 ha 中所有樹木的幹流水量 S_t (L/ha)

$$S_t = \sum_{j=1}^J S_j \quad (9)$$

- 樹冠投影面積法(CPA)：(Aboal *et al.*, 1999)

此方法將林分中所有樹木以胸高徑分出徑級，在每一徑級 DBH_j 中選出代表樣樹，收集幹流水。在一次降雨事件中或固定的時間週期內，將每一胸高徑級 DBH_j 代表

樣樹的幹流水量 V (L) 除以其樹冠投影面積 CPA (m^2)，乘以每 1 ha 中此徑級樹木的樹冠投影面積總和 CPA_j (m^2) 占全部樹木樹冠投影面積總和 CPA_t (m^2) 的比例，得到此徑級中所有樹木的幹流水量 S_j (Lm^{-2})

$$S_j = \frac{V}{CPA} * \frac{CPA_j}{CPA_t} \quad (10)$$

將所有徑級的幹流水量加總，得到每 1 ha 中所有樹木的幹流水量 S_t (Lm^{-2})

$$S_t = \sum_{j=1}^J S_j \quad (11)$$

Hanchi & Rapp (1997) 比較 3 種估算林分幹流水量的方法，分別是代表樣區法、降雨-幹流水相關法與胸高徑分層法。他們發現代表樣區法與胸高徑分層法所估算的林分幹流水量相近，但是不容易找到可以代表整個林分的小樣區。而以降雨-幹流水相關法所估算的林分幹流水量會高估了實際的林分幹流水量。因此他們確定使用胸高徑分層法來估算林分幹流水量是準確可靠的，而且非常容易。

Aboal *et al.* (1999) 在加納利群島中的特納利夫島月桂樹(laurel)森林內，使用樹冠投影面積法、胸高斷面積平均法、降雨-幹流水相關法以及胸高斷面積分層法來估算林分幹流水量。他們發現在月桂樹森林內，樹冠高度重疊，使用樹冠投影面積法會低估了林分幹流水量。而以降雨-幹流水相關法所估算的林分幹流水量會高估了實際的林分幹流水量。使用胸高斷面積平均法，在他們的研究中會因為所選取的樣樹無法代表林分中各徑級樹木的分佈，而高估了實際的幹流水量。使用胸高斷面積分層法，考慮到林分中各徑級樹木的數量分佈，因此使用這個方法可以求得合理可靠的林分幹流水量。

2.5 影響幹流水量的因子

在森林生態系中，當部分的降雨經由幹流水的形式到達地面時，受到樹木特性及降雨類型所影響，使幹流水量的多寡產生變異(Crockford & Richardson, 1990)。在樹木特性部分，以單棵樹木的尺度來看，包括了樹冠面積(Aboal *et al.*, 1999)、枝條角度(Herwitz, 1987)、樹皮質地(Aboal *et al.*, 1999; Kittredge *et al.*, 1941; Návar, 1993; Návar *et al.*, 1999)、有無附生植物(Veneklaas & Van Ek, 1990)，都會影響單棵樹木的幹流水產量。以林分的尺度來看，除了單棵樹木所造成的影響之外，還包括林分中的樹種組成、植株

的密度(Durocher, 1990; Návar *et al.*, 1999)、不同的樹種所造成樹冠結構在三維空間中的幾何分佈(Kittredge *et al.*, 1941; Martinez-Meza & Whitford, 1996)，使林分的幹流水量產生變化。在降雨類型部分，降雨事件中的降雨量、降雨頻率、降雨延時、降雨強度(Crockford & Richardson, 2000; Kuraji *et al.*, 2001)，都會對幹流水量的多寡產生影響。以下就單棵樹木特性及降雨類型這兩部分來探討：

2.5.1 樹木特性

- 樹冠投影面積 (crown project area)

樹冠投影面積是影響幹流水量多寡的顯著因子(Aboal *et al.*, 1999)。Aboal *et al.* (1999)在加納利群島中的特納利夫島月桂樹森林內，選取 6 個優勢樹種來研究幹流水量的變異，發現樹冠投影面積越大的樹種，能攔截到的雨水也越多，幹流水產量有越大的趨勢。Ford & Deans (1978)在蘇格蘭南方 14 年生的西達卡雲杉(*Picea sitchensis*)人工林中，發現西達卡雲杉的樹冠投影面積越大，收集到的幹流水量也越多。

- 枝條角度 (branch angle)

高於水平的枝條，匯集幹流水的潛能大於水平或比水平低的枝條(Herwitz, 1987)。Herwitz (1987)經由實驗室的實驗來探討枝條傾斜度與匯集幹流水量之間的關係。分別測試乾的枝條與濕的枝條，而枝條傾斜度是從高於水平 2.5° 提升至 60°。經過測試發現對於乾的枝條來說，匯集的幹流水量與枝條傾斜度呈線性正相關。Johnson (1990)在蘇格蘭一座 50 年生的西達卡雲杉森林中，發現隨著樹齡的增加，幹流水量反而減少。他認為當西達卡雲杉的樹齡越大，其枝條的傾斜度越不利於產生幹流水，這是因為針葉樹的枝條傾斜度，會隨著樹齡的增加，從高於水平漸漸變成低於水平。

- 通道障礙物 (flow path obstructions)

水流通道在枝條下側，如分離的樹皮或是枝條上的附生植物會導致幹流水滴落成穿落水，滴落位置在枝條末端的影響小，在近樹幹端影響大，主幹如果傾斜且有障礙物(分離的樹皮、附生植物)也導致幹流水滴落；幹流水收集器寬度、障礙物大小位置、樹幹傾斜度都會造成影響(Crockford & Richardson, 1990)。

- 樹皮形態 (bark type)

樹皮形態亦是影響幹流水量多寡的因子之一(Aboal *et al.*, 1999; Návar, 1993)。不

同的樹種其樹皮厚度及形態有很大的差異，實際影響幹流水產量。相對於平滑且容易濕潤的樹皮有最大的幹流水產量，而厚且吸水的樹皮幹流水產量較少，這是因為厚且吸水的樹皮需要飽和後才開始產生幹流水。此外，樹皮表面積也會影響幹流水產量，尤其是在降雨量小的事件中。當每單位樹幹面積中的樹皮表面積越大，則在開始產生幹流水之前，需要越多的水來濕潤樹皮(Crockford & Richardson, 1990)。

2.5.2 降雨類型

- 降雨強度 (precipitation intensity)

Ford & Deans (1978)在蘇格蘭的西達卡雲杉森林，研究降雨強度對幹流水、穿落水及攔截損失的影響，發現降雨強度中等的降雨事件提供產生幹流水的最佳條件。在低的降雨強度事件中，大部分在樹冠上的雨水尚未落至地面，就已蒸發。在高的降雨強度事件中，幹流水量超過枝條通道容量而滴落，造成幹流水產量低於同樣降雨量但降雨強度低的事件。

- 降雨事件間乾燥時期

若兩降雨事件間隔很短，就不需要額外的雨水來濕潤樹皮(Crockford & Richardson, 1990)。

- 降雨角度

對於冠層開闊的森林很重要，低角度的降雨使樹幹半邊的樹皮濕潤後，就可收集到幹流水(Crockford & Richardson, 1990)。

2.6 幹流水集中率

Herwitz (1986)提出集中率 (Funneling Ratio, FR) 的方法，由同種類不同樣樹或不同樹種間所收集到的幹流水量，來比較樹木收集雨水的效率。

$$FR = \frac{SF}{(BA * PD)} \quad (12)$$

公式 12 中的 SF 是樣樹所收集到的幹流水量(stemflow, L)；BA 是樣樹的胸高斷面積(basal area, m²)；PD 是重力沈降量(precipitation deposition, mm)；BA*PD 表示在樣樹胸高斷面積的大小下，所收集到的重力沈降量(L)；SF/PD = CA 定義為在此重力沈降

量(mm)下，需要多大的貢獻面積(contributing area, CA, m^2)，才能收集到的幹流水量(L)(圖 3)。Crockford & Richardson (1990)使用過同樣的指標，但他們命名為幹流水因子(Stemflow Factor)。集中率是用來決定樹冠枝條對幹流水的產生是否有貢獻，當集中率為 1 時，表示樣樹所收集的幹流水量等同於在樣樹胸高斷面積的大小，所收集到的重力沉降量。若集中率大於 1 時，表示枝條將雨水集中到樹幹所做的貢獻，增加了總幹流水量。

Steinbuck (2002)在美國北加州 100 年生的紅杉(redwood)次生林中，選取 3 個優勢樹種：海岸紅杉(Redwood)、道格拉斯冷杉(Douglas-fir)、韃皮櫟(Tanoak)，來研究樹木形態對幹流水量的影響，計算出它們的年度集中率，發現韃皮櫟的集中率最大，道格拉斯冷杉次之，海岸紅杉最小。因為韃皮櫟枝條高於水平的比例最大，且樹皮最光滑，道格拉斯冷杉次之，而海岸紅杉枝條高於水平的比例最小，且樹皮最粗糙。

Herwitz (1986)在澳洲東北部的熱帶雨林中，觀察同一樹種(*Balanops australiana*)的兩棵樹，其中一棵樹幹筆直，一棵樹幹明顯地傾斜。他發現兩棵樹集中率相差 16 倍，造成這差別的原因是傾斜的樹幹無法有效地集中雨水。

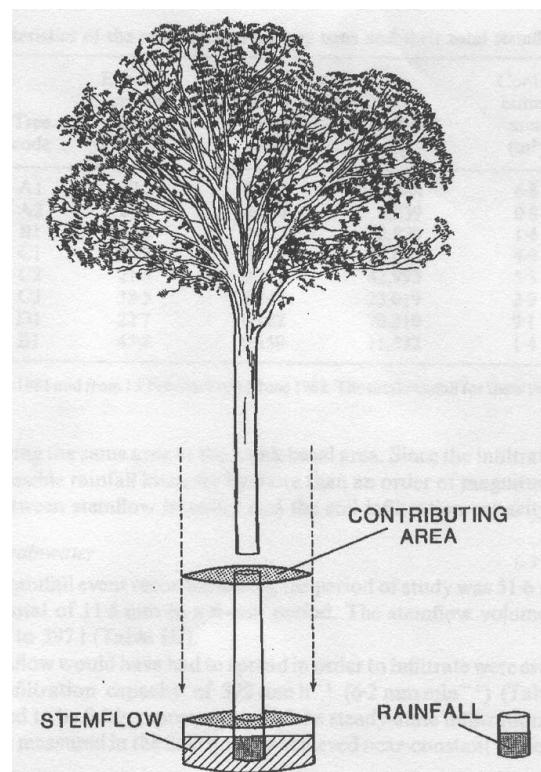


圖 3 集中率 (Funneling Ratio)。幹流水量超過與樣樹胸高斷面積一樣大小雨量桶所收集到的雨量，這是樹冠的貢獻面積所產生的集中作用(Herwitz, 1986)。

2.7 鴛鴦湖地區幹流水之研究現況

陳耀德 (2003) 在鴛鴦湖研究樣區探討大氣養分的輸入，包括重力沉降、穿落水、幹流水及雲霧沉降。其中幹流水的取樣方式與化學組成分析是利用代表樣樹法，選擇接近林分平均胸高徑的 5 棵台灣扁柏作為取樣個體，以螺旋形收集器收集幹流水。幹流水量的估算方式是以胸高斷面積平均法，先測量樣區內所有植物個體的總胸高斷面積，再利用比例式求出樣區內的幹流水總量。於 2002 年 9 月至 2003 年 3 月之間，幹流水量為重力沉降量的 0.3% ~ 7.4%，平均為 4.0%。幹流水量與重力沉降量呈線性正相關，決定係數 $R^2 = 0.79$ (圖 4)。從圖 4 中可以觀察到，當重力沉降量為 120 mm 與 200 mm 時所估算的幹流水量相似。當重力沉降量為 130 mm 與 350 mm 時所估算的幹流水量亦相似。此外，5 棵台灣扁柏樣樹所收集到的幹流水量與胸高徑呈負相關且 5 棵樣樹的幹流水量變異很大，樣樹胸高徑為 25 cm 時，所收集到的幹流水量最小(圖 5)。

幹流水之 pH 值為重力沉降、穿落水、及雲霧沉降這四者中的最低值，平均為 4.17。比較重力沉降、穿落水、幹流水三者各離子的平均濃度發現，幹流水的導電度、氫離子、氯離子、鈉離子、鉀離子的濃度最高，而硫酸根離子、鈣離子、鎂離子、銨根離子的濃度最低。

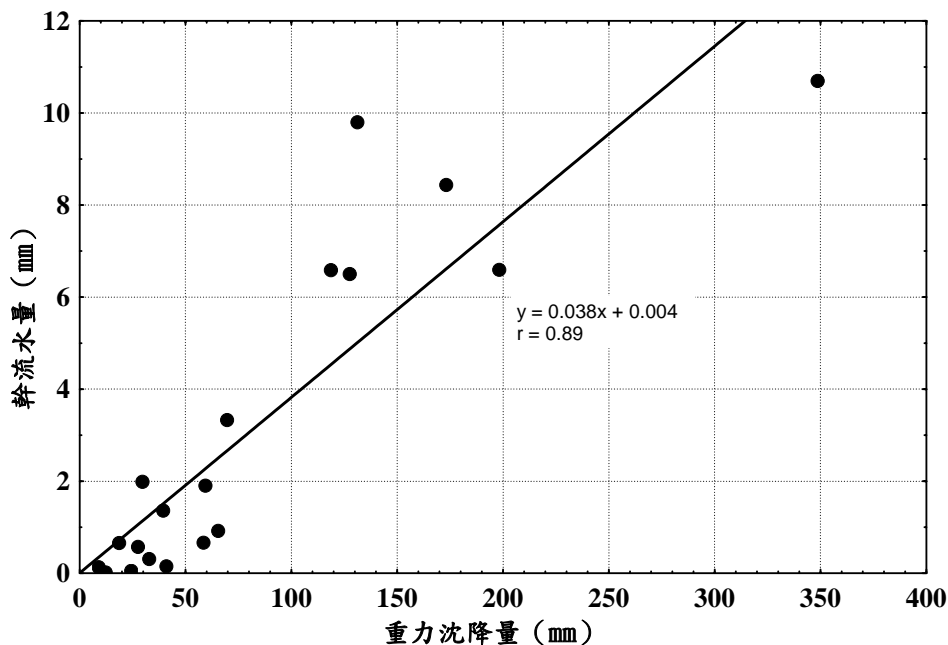


圖 4 幹流水量(mm)與重力沉降量(mm)關係圖，呈一正相關(陳耀德，2003)。

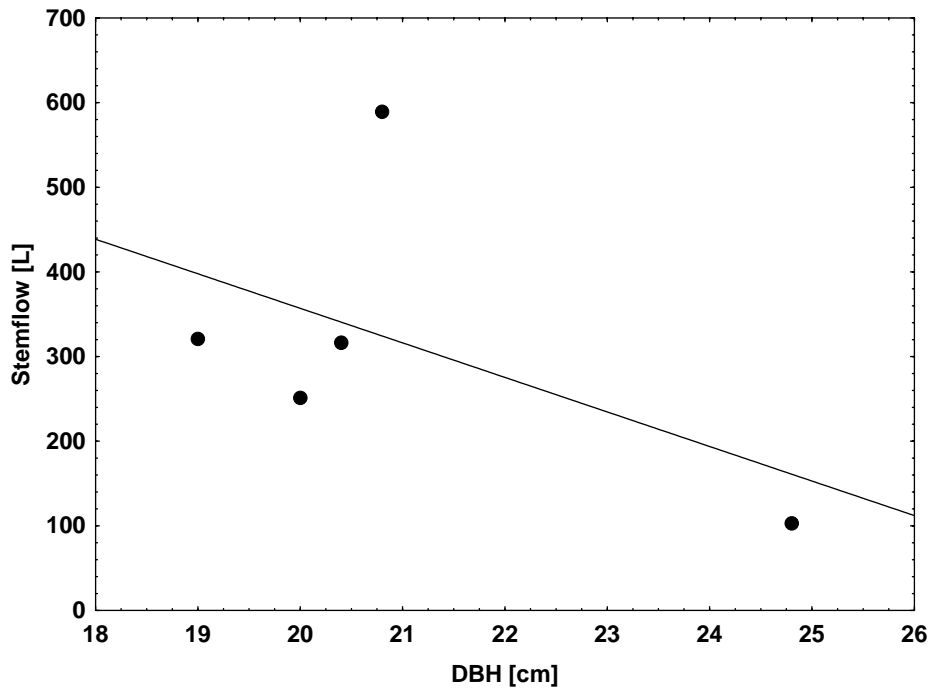


圖 5 5 棵樣樹總幹流量(2002/10/17 ~ 2003/05/28)與胸高徑之關係(資料來源：陳耀德，2003)。

3. 研究目的

從 Levia Jr. & Frost (2003)所整理的幹流水研究資料中顯示，對於收集幹流水的方法，取樣的方式，樣樹的數量，及從單棵樣樹推估到整個林分的幹流水量的方法沒有統一的協定，主要是依據研究者的研究目的及研究樣區的林相特性而定。在研究森林水文循環時，能準確可靠地估算幹流量，就更能清楚幹流水在森林水文收支平衡中所占的比例，而幹流量的多寡是受到樹木特性及降雨類型所影響。依據 Levia Jr. & Frost (2003)對於目前幹流水研究的整理，也建議對同種樹木間的幹流量變異做深入的研究。因此，本研究的研究目的為：

- 探討影響台灣扁柏單棵樣樹幹流水產量的因子。
- 選取適合的方式來估算鴛鴦湖地區台灣扁柏森林的幹流量。

4. 材料與方法

4.1 樣區概述

研究區位於雪山山脈北段的棲蘭山區，蘭陽溪支流的石頭溪集水區，海拔高度約 1,400 ~ 1,800 m，平均坡度約 14°，面積 350 ha，宜蘭縣大同鄉太平山事業區 100 號林道 14 ~ 15 km 處(24°35'N,121°25'E)(圖 6)，距鴛鴦湖自然保留區約 2 km。此區屬林務局羅東林區管理處，太平山事業區 32 林班地，該單位在 1961 年於此林班地中擇地試辦檜木天然下種造林，並於 1972、1975 兩年度繼續在 100 號林道兩側實施檜木天然下種更新造林作業 (彭令豐，1988)，至今形成以台灣扁柏 (*Chamaecyparis obtusa* var. *formosana*) 為優勢樹種之天然下種更新林。

台灣扁柏俗稱黃檜或厚殼仔，是日本扁柏的變種。為常綠大喬木，高度可達 40 公尺，胸高徑可達 3 公尺。樹皮棕褐色至灰紅色，縱向淺裂或長條剝落。大枝密生而平展，小枝扁平。葉對生，先端略鈍形，黃綠色，鱗片狀，向地一側之葉間白粉甚少，中葉橫斷面盤形，中肋表面突起，背面凹，側葉鈍三角形，表面中肋稍隆起(Li & Keng, 1994)。邱志明等人 (1995)調查樣區周邊同樣為台灣扁柏天然下種更新林的林分，發現台灣扁柏樹冠構造大致呈一圓錐狀，其最大枝徑或枝長出現在樹高之 1/3 ~ 1/4 處。樹幹分叉情況甚少，僅約 7%。在樣區中林分的樹冠已呈現交叉鬱閉狀態，林分的鬱閉度高達 96%(葉青峰，2004)。

依據鴛鴦湖自然保留區於 1993 至 2000 年的氣象資料顯示，鴛鴦湖地區的年均溫為 13°C。年雨量豐沛，受颱風的影響極大，範圍從 2000 mm 到 5000 mm 以上的紀錄都有，平均相對濕度 90%。夏季的雨水來源為地形雨及颱風，冬天則為東北季風，全年無明顯的乾濕季之分。雲霧籠罩時數將近為全年總時數的 40%，且具有季節及日變化，為一典型之雲霧森林(Chang *et al.*, 2002)。由於本研究樣區為一雲霧森林，林內有很高的濕度，樹木上累積相當豐富的附生植物生物量，其中以苔蘚植物為優勢種(鄧振華，2006)。

在 2002 年時，國立東華大學自然資源管理研究所於太平山事業區 100 號林道 14.5 km 南方約 100 m 處，劃設一 100m × 100m 的永久樣區，海拔高度約為 1600 ~ 1650 m。並於永久樣區旁搭建一座 23 m 之氣象鐵塔，觀測各氣象狀況。在林道 15 km 處的開闊地，搭建一座 3.5 m 之氣象鐵塔，收集林外降雨(陳耀德，2003)。研究團隊開始進行長期生態系調查研究，期能對於鴛鴦湖地區台灣扁柏森林生態系之水分與養分循環，有較為完整性之瞭解。

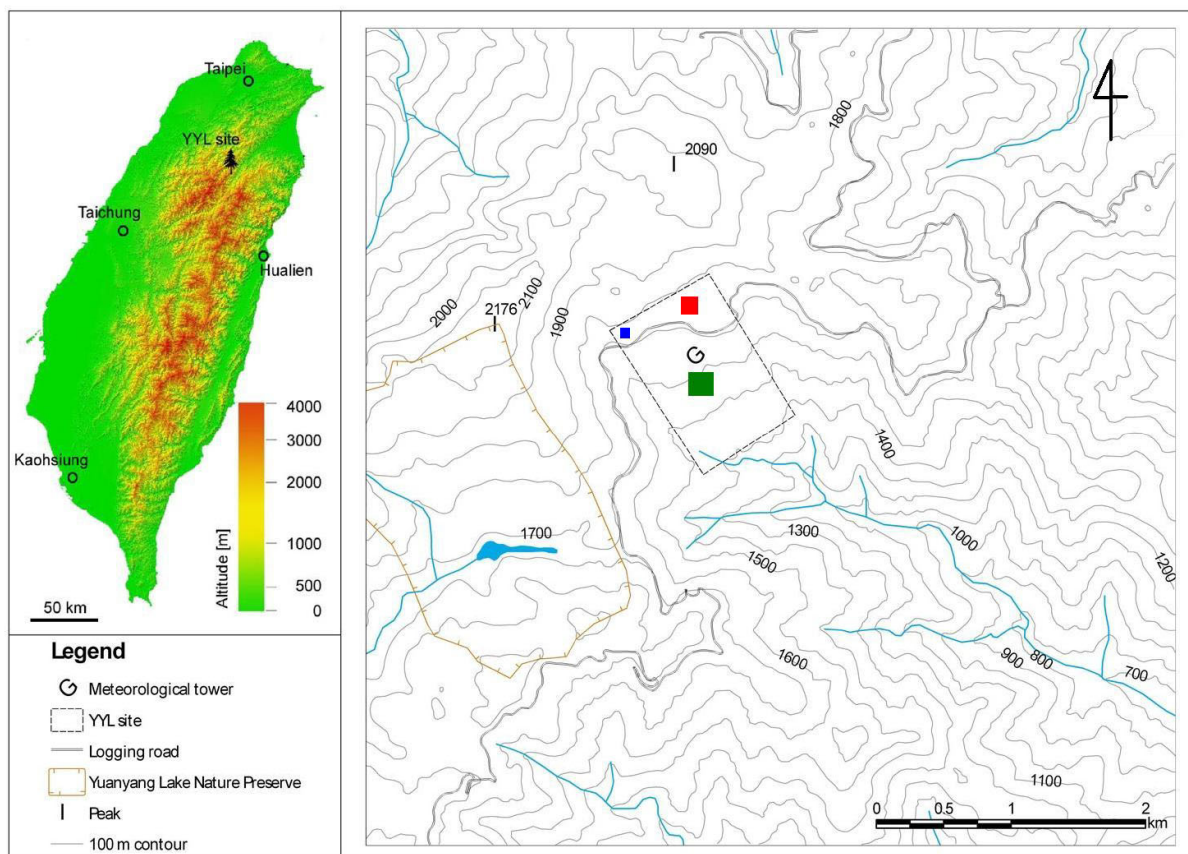


圖 6 樣區位置圖。綠色方塊為 1 ha 永久樣區，紅色方塊為老齡林，藍色方塊為林外雨收集處。

從 2002 年開始陸續進行的研究有：大氣養分輸入之探討(陳耀德，2003)，樣區內台灣扁柏生物量之估算(葉青峰，2004)、雲霧沈降量之估算(吳敏如，2004; 葉青峰，2004)，地表苔蘚植物對養分循環之影響(劉美娟，2004)，台灣扁柏蒸散作用之研究(羅勻謙，2004)，養分存量與枯落物養分流量之研究(朱慧君，2005)，台灣扁柏樹液流動之探討(陳俐如，2005)，台灣扁柏生物量與樹冠結構之探討(陳凱欣，2005)，附生性苔蘚植物組成、分佈與生物量之研究(鄧振華，2006)，土壤呼吸之研究(曾桂香，2006)。

陳耀德 (2003)在此 1 ha 樣區中，選擇 20 格 10m × 10m 的小樣區，其中西北端的 12 格是收集穿落水與幹流水的取樣位置；其餘 8 處分別位於樣區周圍與中央處。系統取樣調查這 0.2 ha 內所有胸高徑大於 1cm 以上的木本植物，測量其高度與胸高徑，並加以編號與鑑種。共計出現 33 種維管束植物，其中裸子植物只有台灣扁柏一種，林分密度為 1820 stems ha⁻¹。台灣扁柏樹齡分佈在 10 ~ 50 年間，平均樹高約為 10 ~ 11 m，總胸高斷面積為 41.5 m² ha⁻¹，占樣區所有植物總胸高斷面積的 81.8%。胸高徑的分佈

介於 1 ~ 36 cm 之間，胸高徑小於 10 cm 的數量最多，而後是介於 15 ~ 19 cm、20 ~ 24cm、10 ~ 14cm、大於 25cm 的數量最少，平均胸高徑為 16.7 cm(圖 7)。

利用陳凱欣 (2005)在鴛鴦湖台灣扁柏天然下種更新林研究樣區中，調查 8 棵台灣扁柏樹冠結構的資料，整理出 8 棵台灣扁柏的胸高徑與其枝條角度間之關係。8 棵台灣扁柏的胸高徑介於 6.2 ~ 23 cm，樣樹的枝條數介於 68 至 142 之間，枝條角度高於水平，平均角度介於 32 ~ 47°。由於在天然下種更新林中，各胸高徑級台灣扁柏的平均枝條角度高於水平，且差距不大，因此不考慮枝條角度對幹流水的影響。

台灣扁柏樹皮呈縱向淺溝裂縫，樹齡越大，裂縫越深；呈長片條狀剝落，偶而具有方形鱗片(Li & Keng, 1994)。像鱗片一樣的分離樹皮會導致幹流水滴落成穿落水。台灣扁柏樹幹上，具有豐富的附生性苔蘚植物，苔蘚植物的生物量、覆蓋度隨著台灣扁柏胸高徑的增加而提高，苔蘚占附生植物總生物量的比例隨著距離地面高度的增加而遞減，且主要的生物量集中於距離地面 5 m 內的範圍(鄧振華，2006)，是導致幹流水滴落形成穿落水的重要因素。

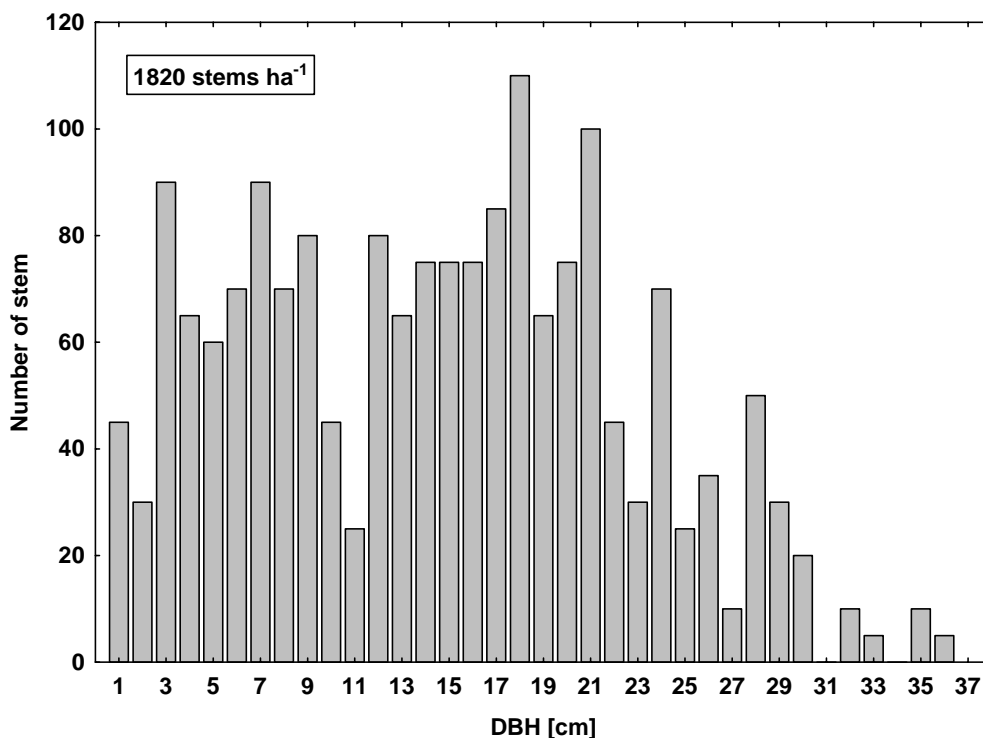


圖 7 在 1 ha 樣區中有 1820 棵台灣扁柏，以胸高徑為單位，每 1 cm 內的棵數 (陳耀德，2003)。

4.2 取樣設計

本研究使用代表樣樹法，選取符合林分中各種胸高徑級的台灣扁柏。依據研究樣區台灣扁柏胸高徑的分佈，將其分為 5 個徑級：分別是小於 10cm、10~14cm、15~19cm、20~24cm、大於 25cm。每一徑級選取 5 棵樣樹，選擇的原則是樹幹無分叉，樹與樹之間最好不會樹冠交錯，樹周圍地形較平坦。在永久樣區西北端的 12 格小樣區中，總共選取 25 棵樣樹(圖 8)，編號分別為 SF11、SF12、SF13、SF14、SF15、SF21、...、SF55。

100 號林道 14.5 km 北方約 100 m 處，海拔高度約為 1750~1800 m，為一台灣扁柏老齡林。台灣扁柏樹齡分佈在 150~250 年間，平均樹高約為 22~23 m，胸高徑的分佈介於 22~78 cm 之間，平均胸高徑為 50 cm (朱妍綾，私人通訊)。在老齡林中，依據台灣扁柏胸高徑的分佈，選取 5 棵台灣扁柏，胸高徑分別為 35、41、45、51、56 cm，編號為 SF61、SF62、...、SF65。

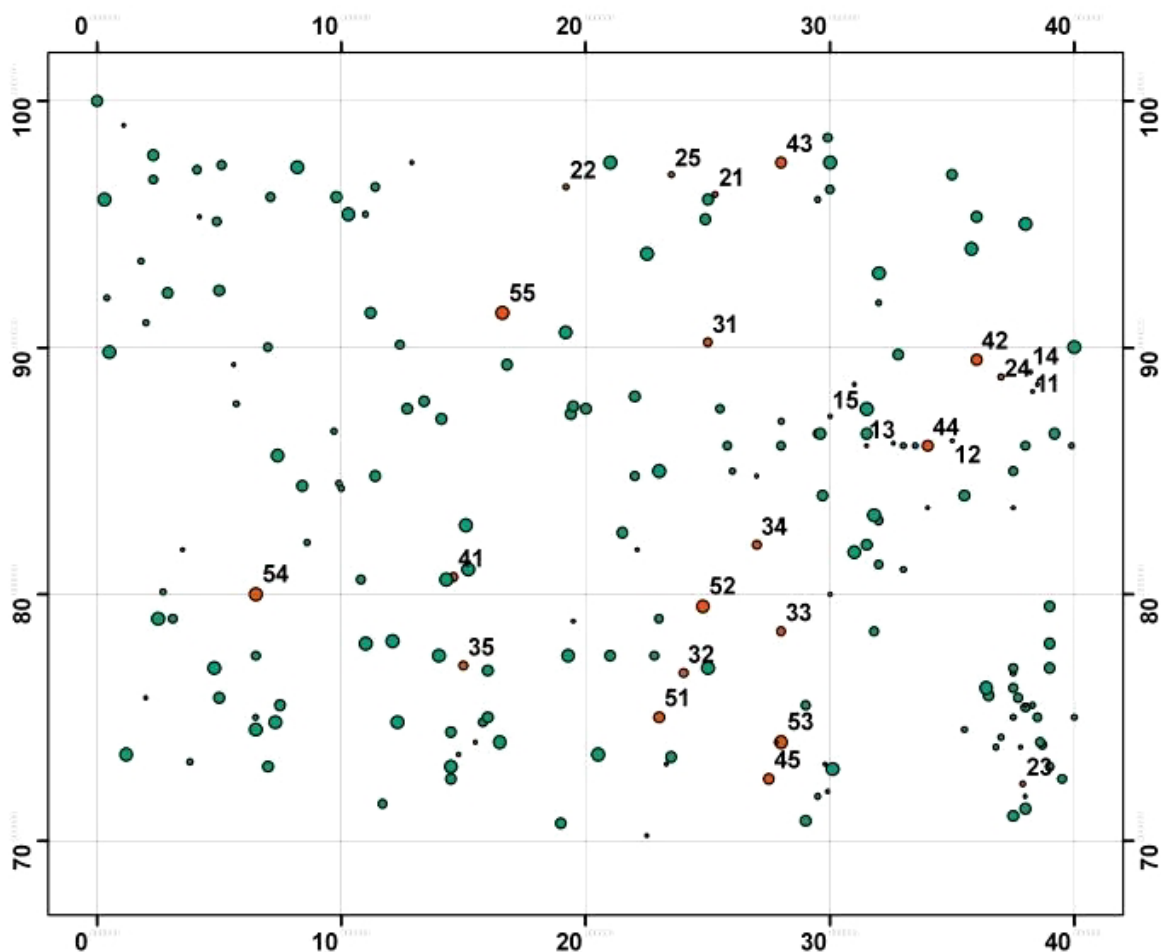


圖 8 1 ha 樣區中，25 棵台灣扁柏樣樹位置與編號。

4.3 收集器架設

本研究使用螺旋形收集器。螺旋形幹流水收集器的架設方式，首先在樣樹樹幹上距離地面 1.3 m 處，移除附生植物，並刮除分離的樹皮，以直徑為 2.5 cm 的水管與一般車用內胎或是保溫管，分別上下纏繞成雙螺旋狀，再於其中間的縫隙處噴上聚氨酯發泡劑。等聚氨酯發泡劑凝固後將內胎與水管取下，以矽膠修補其與樹幹的連接處，於底端出口處連接上水管，便可將幹流水引入水桶，依據樣樹胸高徑大小的分類，水桶的容量分別為 66 L、106 L、140 L、175 L。幹流水收集器凹槽的寬度為 2.5 cm (圖 9)。經由陳耀德 (2003) 所架設 5 個螺旋形收集器的使用狀況得知，雖然會有台灣扁柏的枯落物掉入收集器凹槽中，但因為凹槽出口處的寬度為 2.5 cm，且枯落物較為細小，不會堵塞凹槽出口。並於水管末端加裝過濾網，以防雜物進入收集桶。



圖 9 架設螺旋形幹流水收集器。

4.4 影響幹流水量因子之測量

由文獻回顧中得知幹流水量受到樹木特性及降雨類型所影響，因此在樹木特性部分，測量台灣扁柏數種樹木形態參數。在降雨類型部分，記錄每兩週及每 10 分鐘的降雨量，並利用能見度資料計算台灣扁柏樹冠層所攔截到的雲霧量。

4.4.1 台灣扁柏樹木形態之測量

測量 30 棵台灣扁柏樣樹的樹冠投影面積、胸高徑、樹高、樹幹表面積及幹流水收集效率。

- 樹冠投影面積 (Crown projection area, CPA, m²) :

對於樹冠投影面積的測定，量測方法為於樣樹四周訂出八個方位（分別為東、東南、南、西南、西、西北、北、東北），依序於上述之八個方位以樹身為起點向外拉出皮尺，將各方位上方樹冠最邊界垂直投影處之長度記下，如此可畫出一八邊形，將其視為八個三角形，利用 $\frac{1}{2}|\vec{a}||\vec{b}|\sin 45^\circ$ 求出每一三角形的面積，將八個三角形面積加總後即可得到樹冠投影面積。

- 胸高徑(Diameter at breast height, DBH, cm) :

使用皮尺於樹高 1.3 m 處進行量測。

- 樹高(Height of tree, TH, m) :

使用間格測定桿直接量測，由於許多樣木是直接生長於枯倒木上，或因地勢而傾斜生長，故量測時，若樹根部分有高低起伏者，一律以最低點算起。

- 樹幹表面積 (Stem surface area, SA, m²) :

假設樹幹為圓錐形，樹高(TH)減去 1.3m 為其高度，胸高徑(DBH)除以 2 為底圓半徑，代入圓錐形表面積公式：

$$SA = \pi * \frac{DBH}{2} * \sqrt{(TH - 1.3)^2 + \left(\frac{DBH}{2}\right)^2} \quad (13)$$

- 幹流水收集效率(Stemflow collect efficiency, CE) :

為了確認幹流水收集器是否能完全收集到從樹幹上流下來的幹流水，是否有部分

的幹流水會從收集器與樹幹的連接處間流出，而未被幹流水收集器收集，因此進行幹流水收集效率之測試。此實驗需要在晴朗的天氣操作，且與降雨事件至少間隔一天以上。在每棵樣樹的幹流水收集器與樹幹連接處上方 5 cm，使用 500 mL 水瓶均勻地灑水，在水管連接處放置 2000 mL 量桶收集水量，每隔 10 分鐘灑水一次，直到 2000 mL 量桶收集到的水量不再變化，以此次收集到的水量除以 500 mL，定義為此收集器的收集效率。因為是以量桶收集到的水量不再變化時，定義為每棵樣樹的收集水量，因此對於每棵樣樹的測試時間可能會長短不一。

4.4.2 降雨類型之測量

降雨資料是利用林外雨鐵塔上的雨量桶，每隔兩週記錄一次的降雨量，以及傾斗式雨量計 (tipping bucket rain gauge, 0.5 mm, TIC-1, 竹田計器工業株式會社, 日本)，每 10 分鐘記錄一筆數據。雲霧沈降量是利用 23 m 之氣象鐵塔已架設的能見度儀 (MIRA visibility sensor 3544, Aanderaa instrument, Norway)，每 10 分鐘記錄一筆數據。世界氣象組織定義，當水平能見度低於 1000 m 以下時，稱為「有霧」。霧的濃淡可由能見度表示，能見度儀記錄範圍在 20 至 3000 m 間，當能見度值越低時，表示雲霧的濃度越濃。

- 降雨強度：

利用傾斗式雨量計每 10 分鐘一筆的記錄，計算出每小時的降雨強度。

- 降雨事件間乾燥時期：

利用傾斗式雨量計每 10 分鐘一筆的記錄，計算出每小時的降雨量，若在降雨前後 8 小時內都沒降雨，稱為一次降雨事件(Asdak *et al.*, 1998)。以傾斗式雨量計的記錄，計算出降雨事件間的乾燥時期。

- 降雨角度：

本研究樣區位於林分內部，且林分鬱閉度達 96%，因此不考慮降雨角度的影響。

- 雲霧沈降量(fog deposition, FG)：

利用葉青峰 (2004)所求得能見度與台灣扁柏林分攔截雲霧沈降量的關係式

$$FG(t) = 2.6 * \exp\left(\frac{1618.1}{x + 374.7}\right) \text{ kg H}_2\text{O ha}^{-1} \text{ 5min}^{-1} \quad (14)$$

在氣象塔上 22.3 m 處所架設的能見度儀，每 10 分鐘記錄一筆能見度資料，因為

公式 14 是每 5 分鐘的能見度與雲霧沈降量的關係式，但能見度儀每 10 分鐘記錄一筆資料，所以假設每 10 分鐘內的能見度相同，將能見度資料輸入到公式 14 中，求得每 10 分鐘的雲霧沈降量，再乘以 6 計算出每小時的雲霧沈降量，若能見度大於 1000 m 時，假設沒有雲霧沈降量。

4.4.3 樹皮吸水、滴落能力之測試

樹皮形態及通道障礙物的性質已於 4.1 樣區概述中討論過，但無法得知當雨水沿著樹幹流下來時，有多少水量會被樹皮吸收，或從分離的樹皮、附生植物上滴落下來。因此選擇 11 棵樣樹進行樹皮吸水、滴落能力的操作實驗，此操作實驗是參考 Steinbuck (2002) 和 Voigt (1960) 所使用的田間實驗方法，並加以修改。此實驗需要在晴朗的天氣狀態下操作，且與降雨事件間隔至少一天以上。在樣樹的幹流水收集器上方 3 m 處，使用 500 mL 水瓶均勻地在樹幹四周灑水，在水管連接處放置 2000 mL 量桶收集水量。每隔 10 分鐘灑水一次 500mL，並記錄所收集到的水量，每棵樣樹總共灑水 10 次，水量 5000 mL。

5. 結果

2005 年 9 月底，陸續完成幹流水收集器的架設，從 2005/10 起，開始收集幹流水，至 2006/04 的 6 個月期間，共計完成 14 次的採樣。因為從 2006/01 開始，收集到 30 棵樣樹完整的幹流水量資料，因此 2006/01/05 ~ 04/27 這段期間，稱為實驗期間。在結果的部分，將呈現台灣扁柏與大氣沉降的基本資料，影響幹流水量的因子，以及林分幹流水量的估算。

5.1 台灣扁柏與大氣沉降之基本資料

在文獻回顧中得知影響幹流水量之因子包括樹木特性及降雨類型，而對於林分幹流水量的估算亦需要利用樣區中樹木的胸高徑、胸高斷面積、樹冠投影面積，以及大氣沉降量等資料。因此測量台灣扁柏樣樹得到樹木特性的基本資料，並整理林外雨鐵塔上所收集到的降雨資料，以及利用氣象塔上的能見度資料，求得雲霧沉降量，做為本研究的大氣沉降基本資料。

5.1.1 台灣扁柏樣樹基本資料

測量 30 棵台灣扁柏樣樹的樹冠投影面積、胸高徑、樹高、樹幹表面積。所測得的資料列於表 3 中。

- 樹冠投影面積：

台灣扁柏樹冠投影面積與胸高徑呈線性正相關，相關係數為 0.88 ($p < 0.01$)。

- 幹流水收集效率(表 4)：

樣樹的胸高徑越大，樹皮表面積越大，而樹皮表面積的大小以及不同乾燥程度的樹皮會有不同的吸水量。因此選擇在幹流水收集器與樹幹連接處上方 5 cm 的範圍內灑水，以降低樹皮吸水的影響程度，並確定為收集器的幹流水收集效率。觀察 30 棵樣樹的幹流水收集效率(表 4)，可以發現 30 棵樣樹第一次回收的水量，與不再變化時所回收水量之間的差距介於 0~40 mL，代表被樹皮吸收的水量很少，主要是經由收集器的收集效率所影響，所以不論降雨量的大小，所收集到的幹流水都應該經過收集效率來修正。

在本研究中，30 棵樣樹每兩週個別收集到的幹流水量，稱為修正前的幹流水量，經由收集效率調整過後(收集到的幹流水量除以收集效率)，稱為修正後的幹流水量(corrected stemflow, CSF)。在結果中的分析與呈現，皆使用修正後的幹流水量。

表 3 30 棵台灣扁柏樣樹基本資料，以及實驗期間(2006/01/05~04/27) 30 棵樣樹的幹流水量(L)。DBH: diameter at breast height、TH: height of tree、BA: basal area、CPA: crown project area、SA: stem surface area。

Tree ID	DBH (cm)	TH (m)	BA (cm ²)	CPA (m ²)	SA (m ²)	Stemflow (L)
SF11	3.2	6.0	8.0	0.68	0.24	15.8
SF12	4.8	7.0	18.1	1.25	0.43	40.5
SF13	6.5	8.0	33.2	1.52	0.68	11.6
SF14	7.0	9.0	38.5	1.88	0.85	41.4
SF15	9.2	11.0	66.5	1.62	1.40	67.8
SF21	10.6	12.0	88.2	0.55	1.78	46.0
SF22	12.5	9.5	122.7	2.26	1.61	37.5
SF23	13.5	10.0	143.1	1.51	1.84	75.4
SF24	14.5	10.0	165.1	2.52	1.98	165.1
SF25	15.2	13.0	181.5	2.89	2.79	132.8
SF31	16.0	12.0	201.1	6.40	2.69	495.3
SF32	16.7	10.0	219.0	3.00	2.28	188.1
SF33	17.5	10.0	240.5	5.57	2.39	219.3
SF34	19.0	11.0	283.5	4.23	2.90	258.3
SF35	20.0	10.0	314.2	3.64	2.73	148.0
SF41	21.0	13.0	346.4	5.42	3.86	180.2
SF42	22.0	12.0	380.1	5.19	3.70	334.3
SF43	23.5	14.0	433.7	5.27	4.69	248.8
SF44	24.5	12.0	471.4	7.73	4.12	242.8
SF45	25.1	11.0	494.8	6.06	3.82	307.2
SF51	26.3	10.0	543.3	3.80	3.59	241.3
SF52	29.0	10.0	660.5	9.34	3.96	454.1
SF53	30.5	10.0	730.6	8.48	4.17	423.0
SF54	32.5	13.2	829.6	13.97	6.08	267.7
SF55	34.0	12.5	907.9	13.41	5.98	413.5
SF61	35.0	20.1	962.1	10.65	10.34	102.1
SF62	41.0	22.0	1320.3	17.85	13.33	143.5
SF63	45.0	23.8	1661.9	19.19	16.26	71.6
SF64	51.0	25.6	2042.8	24.54	19.47	182.0
SF65	56.0	25.6	2463.0	34.09	21.38	172.4

表 4 30 棵樣樹的幹流水收集器收集效率。DBH: diameter at breast height、CE: stemflow collect efficiency。

Tree ID	DBH (cm)	Water applied and received (mL), 10 minutes				CE
		500	500	500	500	
SF11	3.2	490	490			0.98
SF12	4.8	480	480			0.96
SF13	6.5	420	430	430		0.86
SF14	7.0	440	460	460		0.92
SF15	9.2	480	490	490		0.98
SF21	10.6	480	490	490		0.98
SF22	12.5	470	470			0.94
SF23	13.5	470	480	480		0.96
SF24	14.5	480	480			0.96
SF25	15.2	480	480			0.96
SF31	16.0	480	490	490		0.98
SF32	16.7	460	480	480		0.96
SF33	17.5	440	460	460		0.92
SF34	19.0	460	480	480		0.96
SF35	20.0	460	460			0.92
SF41	21.0	430	440	440		0.88
SF42	22.0	480	480			0.96
SF43	23.5	480	480			0.96
SF44	24.5	430	440	440		0.88
SF45	25.1	440	440			0.88
SF51	27.0	450	470	470		0.92
SF52	29.0	420	440	440		0.88
SF53	30.5	440	440			0.88
SF54	32.5	360	380	400	400	0.80
SF55	34.0	400	420	420		0.84
SF61	35.0	450	460	460		0.92
SF62	41.0	440	440			0.88
SF63	45.0	400	420	420		0.84
SF64	51.0	400	420	420		0.84
SF65	56.0	400	420	420		0.84

5.1.2 大氣沈降基本資料

在文獻回顧中，依據沈降方式將大氣沈降分為重力沈降與攔截沈降兩種，並針對這兩種方式所攜帶的水分沈降至森林內，產生幹流水。因此在本研究中，重力沈降量專指降雨量，而攔截沈降量專指雲霧沈降量。在降雨類型部分，記錄每兩週及每 10 分鐘的降雨量，計算出每小時的降雨強度。並由能見度資料計算出每小時的雲霧沈降量。本研究樣區在 2005/05~2006/04 間，每月的重力沈降量及雲霧沈降量如圖 10 所示，在此期間，重力沈降的累積量共計 5258 mm，雲霧沈降的累積量共計 240.3 mm，其中 2005/07 的重力沈降量為 821 mm，最大的降雨強度為 52 mm hr^{-1} ，2005/08 的重力沈降量為 1446.5 mm，最大的降雨強度為 57 mm hr^{-1} ，2005/10 的重力沈降量為 802.5 mm，最大的降雨強度為 52 mm hr^{-1} ，皆由颱風影響所致。2005/11~2006/02，每月的重力沈降量皆小於 320 mm，最大的降雨強度也小於 6 mm hr^{-1} 。在 2005/10~2006/03 間，雲霧沈降量較多，2006/02 的雲霧沈降量可達 38.9 mm。而在 2005/06~08 間，每月的雲霧沈降量不超過 8.9 mm。

從 2005/10 起，開始收集幹流水，至 2006/04 的 6 個月期間，共計完成 14 次的採樣。14 次的採樣的起、止日期，以及採樣期間的重力沈降量、雲霧沈降量列於表 5。

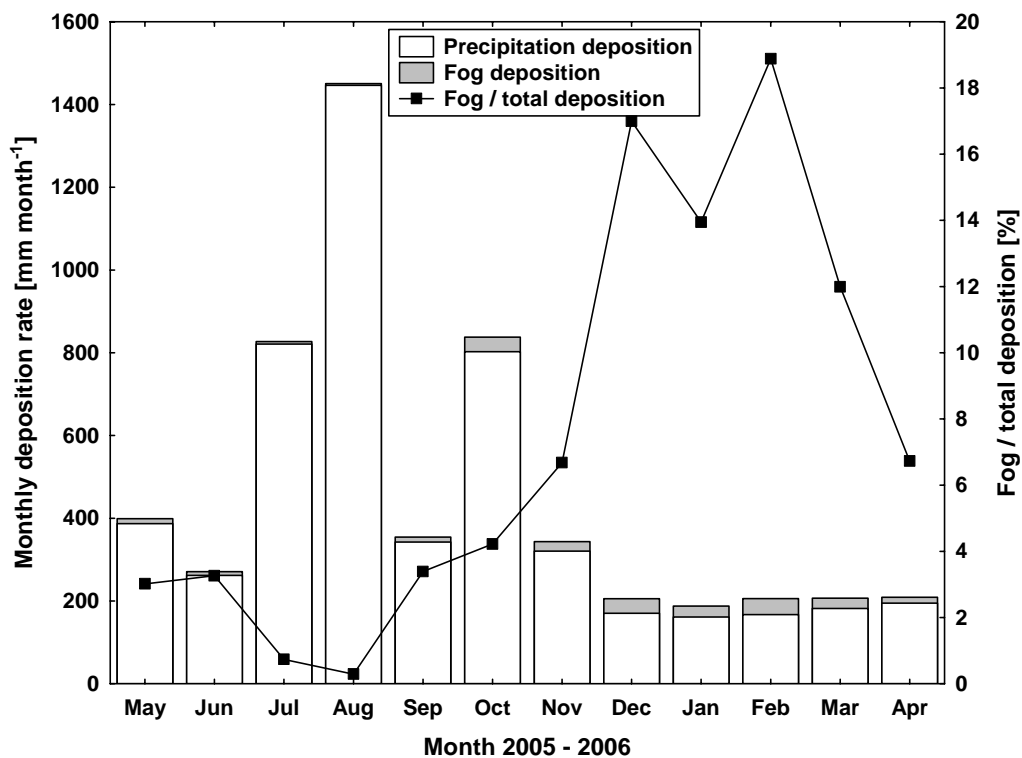


圖 10 2005/05~2006/04 重力沈降量與雲霧沈降量。

表 5 14 次的採樣的起、止日期，以及採樣期間的重力沈降量、雲霧沈降量。

Sampling No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Begin date	51013	51027	51110	51124	51208	51222	60105	60206	60215	60302	60314	60316	60330	60413
End date	51027	51110	51124	51208	51222	60105	60206	60215	60302	60314	60316	60330	60413	60427
PD (mm)	68.3	73.0	313.2	32.9	89.8	57.9	211.3	20.0	129.8	25.5	2.5	135.0	61.1	130.5
FG (mm)	17.5	8.7	17.8	14.2	18.8	11.0	25.5	10.8	12.1	10.1	1.7	9.9	3.9	9.2

5.1.3 樹皮吸水、滴落能力

經由操作樹皮吸水、滴落能力實驗，所得的結果列於表 6。以 500 mL 乘以開始收集到水量的次數減去開始收集到的水量，為此樣樹初始的樹皮吸水、滴落能力。以 500 mL 減去第 10 次收集到的水量，為此樣樹飽和時的樹皮吸水、滴落能力。

從表 6 中可以很明顯的觀察到，當台灣扁柏胸高徑越大，回收的水量越少，所以樹皮吸水、滴落能力越強。以此實驗操作為基準，在初始狀態下，樣樹 SF14 (DBH: 7.0cm) 樹皮吸水、滴落水量 270 mL，而樣樹 SF54 (DBH: 32.5cm) 樹皮吸水、滴落水量 980 mL。在樹皮吸水狀態飽和時，樣樹 SF14 (DBH: 7.0cm) 樹皮吸水、滴落水量 70 mL，而樣樹 SF54 (DBH: 32.5cm) 樹皮吸水、滴落水量 330 mL。除了因為台灣扁柏的胸高徑越大，其樹皮表面積越大，需要更多的水來濕潤樹皮。樹皮下端也會與樹幹分離，形成滴落點。此外台灣扁柏的胸高徑越大，附生植物也越多，當水沿著樹幹流下時，會順著附生植物滴落下來，若滴落點與樹幹的距離超過收集器的寬度 2.5cm，則變成穿落水，無法被收集器收集到。

以樣樹 SF31 (DBH: 16cm)、SF33 (DBH: 17.5cm)、SF34 (DBH: 19cm)來說，這 3 棵樣樹胸高徑被分在同一徑級中，樹幹表面積也相近。在樹皮吸水狀態飽和時，樹皮吸水、滴落水量分別為：100 mL、240 mL、160 mL，樹皮吸水量變化大且不隨著胸高徑變大而變大，這是因為 SF31 的樹幹上有附生植物，且滴落點在收集器範圍內，可以增加吸水能力，飽和時可以增加幹流水的收集量。SF33 的樹幹上有附生植物，增加了滴落能力，但滴落點在收集器範圍外，飽和時就會減少幹流水的收集量。

表 6 11 棵台灣扁柏樣樹樹皮吸水、滴落能力測試結果。DBH: diameter at breast height。

Tree ID	SF14	SF24	SF31	SF33	SF34	SF44	SF51	SF52	SF54	SF63	SF64
DBH (cm)	7.0	14.5	16.0	17.5	19.0	24.5	26.3	29.0	32.5	45.0	51.0
Water applied(mL)	Water recovered (mL), per 10 minutes										
500	230	70	10	10	10	5	5	5	0	0	0
500	400	240	170	180	190	90	25	25	20	0	0
500	420	315	240	250	310	180	75	75	100	7	25
500	410	360	320	230	340	210	125	125	120	8	18
500	420	330	380	240	340	230	145	170	170	14	50
500	440	360	380	260	340	250	165	210	160	42	75
500	420	355	380	230	330	230	200	250	170	55	95
500	420	370	390	240	340	240	230	280	170	83	96
500	420	380	400	280	330	250	240	300	160	85	100
500	430	380	400	260	340	250	240	300	170	95	110
Initial water (mL)	270	430	490	490	490	495	495	495	980	1493	1475
Saturated water (mL)	70	120	100	240	160	250	260	200	330	405	390

5.2 影響幹流水量之因子

影響幹流水量的因子很多，包括樹木特性及降雨型態這兩部分，在樹木特性部分，本研究測量 30 棵樣樹的因子包括：樹冠投影面積、胸高徑、樹高、樹幹表面積，以上參數列於樣樹基本資料中(表 3)，此外並測量 11 棵樣樹的樹皮吸水能力(表 6)。

5.2.1 樹木特性

實驗期間，將永久樣區中 25 棵樣樹所收集到的總幹流水量與胸高徑、胸高斷面積、樹冠投影面積、樹幹表面積、樹高，分別做相關分析及顯著水準測試(表 7)。胸高徑與幹流水量的相關係數為 0.8413 ($p < 0.001$)，顯示樣樹的胸高徑會影響幹流水量；樹冠投影面積與幹流水量的相關係數為 0.8266 ($p < 0.001$)，顯示樣樹的樹冠投影面積會影響幹流水量；胸高斷面積與幹流水量的相關係數為 0.8175 ($p < 0.001$)；樹幹表面積與幹流水量的相關係數為 0.7862 ($p < 0.001$)；樹高與幹流水量的相關係數為 0.47 ($p = 0.018$)，因為樣區中台灣扁柏的樹高差距不大，且與幹流水量沒有顯著的關係，所以在天然下種更新林

中台灣扁柏的樹高不是影響幹流水量的重要因子。比較相關係數，胸高徑大於樹冠投影面積大於胸高斷面積大於樹幹表面積，且經由收集效率修正後的幹流量之相關係數又大於修正前的相關係數。

在樹冠投影面積部分，將 25 棵樣樹個別在 4 個月期間所收集到的幹流量加總，並與其樹冠投影面積做迴歸分析。可以觀察到幹流量與樹冠投影面積呈線性正相關，相關係數為 0.8266 ($p < 0.01$) (圖 11)，所以樹冠投影面積是影響幹流水量的顯著因子，台灣扁柏的樹冠投影面積越大，所收集到的幹流量越多。

在通道障礙物與樹皮形態部分，以 11 棵樣樹在樹皮吸水、滴落能力操作實驗中，灑水 10 次(5000 mL)所回收的水量與樣樹胸高徑做迴歸分析。可以觀察到回收的水量與胸高徑呈負相關，相關係數為 -0.95 ($p < 0.01$) (圖 12)，所以通道障礙物與樹皮形態是影響幹流水量的顯著因子。當施加同樣的水量，台灣扁柏的胸高徑越大，樹皮越粗糙，附生植物越多，可以回收的水量越少。

表 7 25 棵樣樹總幹流量(2006/01/05~04/27)與胸高徑、樹冠投影面積、胸高斷面積、樹幹表面積、樹高之相關係數。

	SF (L)	
	r	P value
DBH (cm)	0.8413	<0.001
CPA (m ²)	0.8264	<0.001
BA (cm ²)	0.8175	<0.001
SA (m ²)	0.7862	<0.001
TH (m)	0.4697	0.018

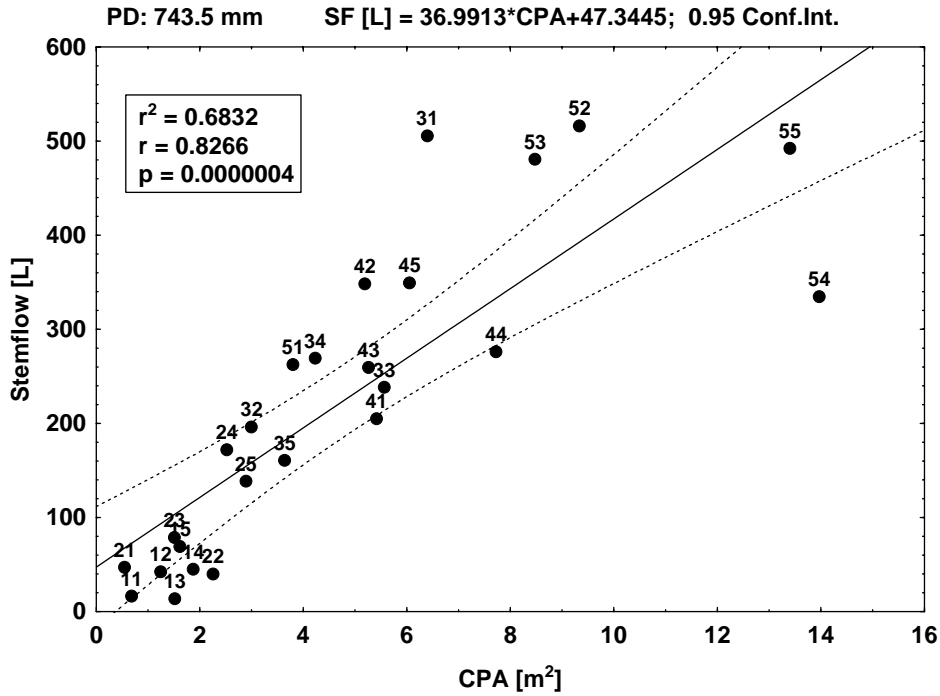


圖 11 樹冠投影面積與幹流水量之關係。2006/01/05~04/27，PD: 743.5 mm，FG: 83.2 mm，幹流水量(L)與樹冠投影面積(m²)做迴歸分析，相關係數為 0.8266 (p<0.001)。

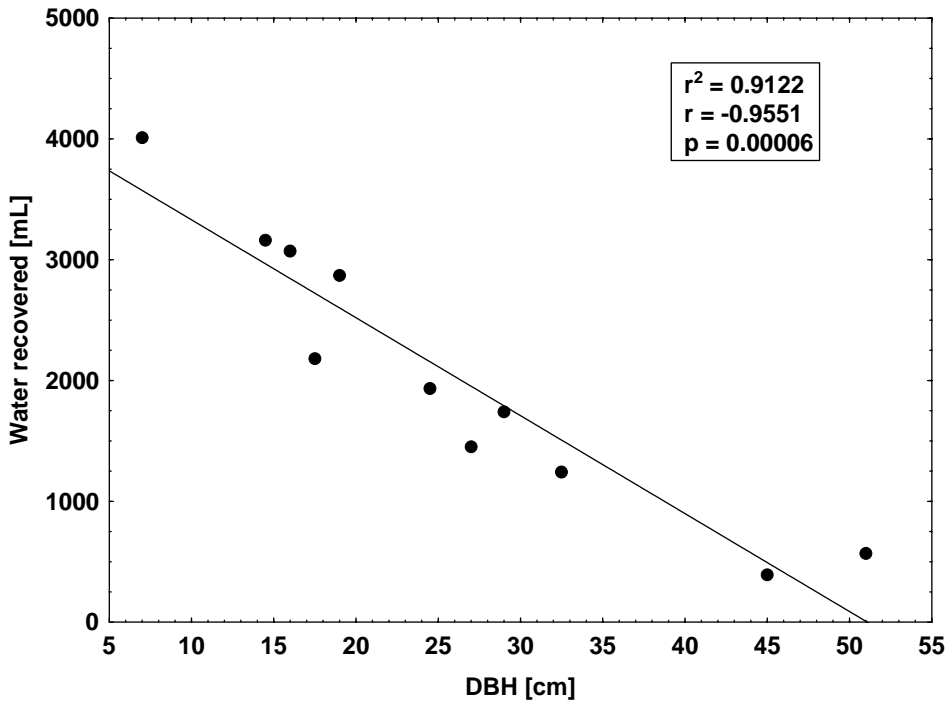


圖 12 灑水實驗回收水量與胸高徑之關係。11 棵樣樹樹皮吸水、滴落實驗，灑水 10 次 5000mL 所回收的水量與胸高徑做相關分析，相關係數為 -0.95 (p<0.001)。

樹冠投影面積、通道障礙物與樹皮形態都是影響台灣扁柏幹流水量的顯著因子，而由統計上發現本樣區中台灣扁柏的胸高徑與幹流水量的相關性最高，相關係數為 0.8413 ($p < 0.001$)，以胸高徑與幹流水量做迴歸分析，所建立的線性迴歸模式為(圖 13)：

$$SF(L) = 15.67 * DBH(cm) - 62.7388 \quad (15)$$

模式的 $R^2 = 0.7077$ ，表示胸高徑這個自變數之變異可以解釋約 71% 幹流水量的變異。當台灣扁柏胸高徑越大時，可以收集到的幹流水量就越多。

為了確認台灣扁柏的胸高徑越大，所產生的幹流水量越多，在老齡林也選取 5 棵台灣扁柏收集幹流水，樣樹基本資料列於表 3。實驗期間，將幹流水資料分為天然下種更新林及老齡林這兩群，以代表樣樹的胸高徑與幹流水量做線性迴歸分析，天然下種更新林的 $R^2 = 0.7077$ ，老齡林的 $R^2 = 0.4925$ (圖 14)。單獨以天然下種更新林與老齡林來分析，樣樹的胸高徑與其幹流水量都呈現正相關，幹流水量在經由收集效率修正後比修正前的相關性高，天然下種更新林又比老齡林的相關性高。綜合天然下種更新林與老齡林來比較，老齡林樣樹 SF61 (DBH: 35 cm) 所產生的幹流水量明顯小於天然下種更新林 SF55 (DBH: 34 cm)，老齡林 5 棵樣樹並沒有因為胸高徑較大而產生比天然下種更新林樣樹更多的幹流水，在老齡林與天然下種更新林這兩個林分中，幹流水量產生了明顯地落差。

依據 Herwitz (1986)對集中率的定義，計算 30 棵樣樹的集中率(funneling ratio, FR)、貢獻面積(contributing area, CA = SF/PD)，並依據 Aboal *et al.* (1999)以樣樹的樹冠投影面積做為比較的標準，計算 SF/(CPA*PD)%，所得的結果列於表 8。

對於 30 棵樣樹來說，可以觀察到隨著樣樹胸高徑的增加，集中率雖然會有波動，但整體的趨勢是由大變小，以樣樹的胸高斷面積為基準，所集中的幹流水量為大氣沉降量的 24.3 倍下降至 0.6 倍。這表示台灣扁柏的胸高徑越小，集中雨水的的能力越佳。當以樣樹的樹冠投影面積為基準，SF/(CPA*PD)%所代表的意義，是單棵樣樹將大氣沉降量轉換成幹流水量的效率。從表 8 中得知，胸高徑介於 10 ~ 30 cm 的台灣扁柏轉換效率較佳，最高可達 10.3%；而當台灣扁柏的胸高徑小於 10 cm 或大於 30 cm 時，將大氣沉降量轉換成幹流水量的效率低落，最低只有 0.5%，轉換效率之間的差距可達 20 倍。

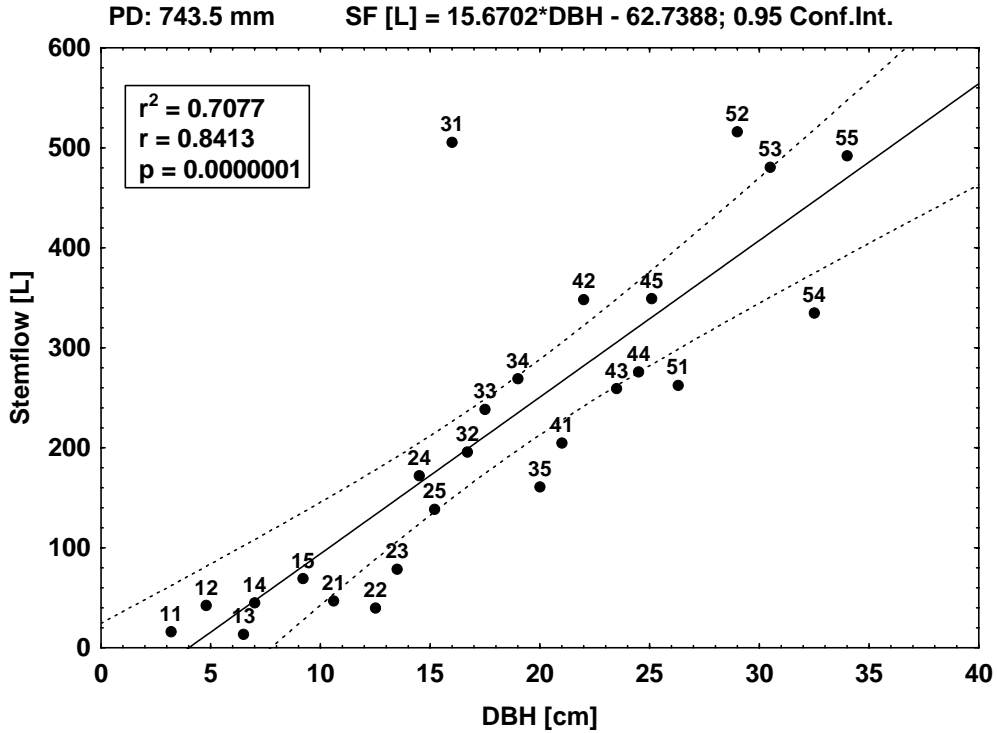


圖 13 幹流量與樣樹胸高徑的線性迴歸分析圖。實驗期間(2006/01/05~04/27)幹流量與研究樣區樣樹的胸高徑做線性迴歸分析，95%信賴區間，相關係數為 0.84 ($p < 0.001$)。

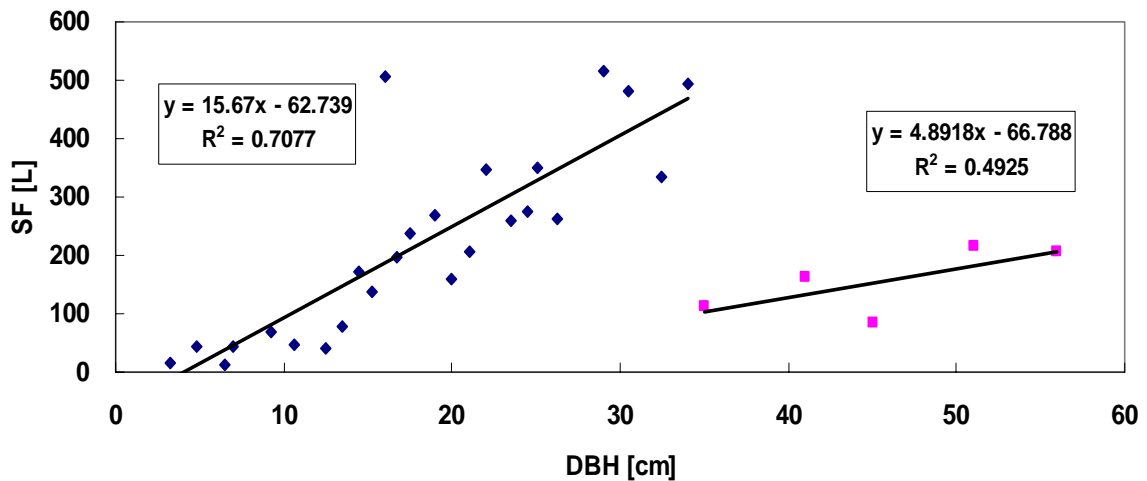


圖 14 天然下種更新林、老齡林樣樹的幹流量與其胸高徑的線性迴歸分析圖。實驗期間(2006/01/05~04/27)天然下種更新林、老齡林樣樹的幹流量與其胸高徑分別做線性迴歸分析，天然下種更新林比老齡林的相關性高。

表 8 30 棵樣樹的集中率(FR)、SF/(CPA*PD) %。實驗期間(2006/01/05~04/27)的大氣沈降量 PD = 826.7 mm。DBH: diameter at breast height、BA: basal area、CPA: crown project area、CA: contributing area、FR: funneling ration、PD: precipitation deposition。

Tree ID	DBH (cm)	BA (m ²)	CPA (m ²)	Stemflow (L)	CA (m ²)	FR(CA/BA)	SF/(CPA*PD)%
SF11	3.2	0.0008	0.68	16.2	0.02	24.3	2.9
SF12	4.8	0.0018	1.25	42.2	0.06	28.2	4.1
SF13	6.5	0.0033	1.52	13.5	0.02	4.9	1.1
SF14	7.0	0.0038	1.88	45.0	0.06	14.1	2.9
SF15	9.2	0.0066	1.62	69.2	0.09	12.6	5.2
SF21	10.6	0.0088	0.55	46.9	0.06	6.4	10.3
SF22	12.5	0.0123	2.26	40.0	0.05	3.9	2.1
SF23	13.5	0.0143	1.51	78.6	0.11	6.6	6.3
SF24	14.5	0.0165	2.52	172.0	0.23	12.6	8.2
SF25	15.2	0.0181	2.89	138.4	0.19	9.2	5.8
SF31	16.0	0.0201	6.40	505.5	0.68	30.4	9.6
SF32	16.7	0.0219	3.00	195.9	0.26	10.8	7.9
SF33	17.5	0.0241	5.57	238.4	0.32	12.0	5.2
SF34	19.0	0.0284	4.23	269.1	0.36	11.5	7.7
SF35	20.0	0.0314	3.64	160.9	0.22	6.2	5.3
SF41	21.0	0.0346	5.42	204.8	0.28	7.2	4.6
SF42	22.0	0.0380	5.19	348.3	0.47	11.1	8.1
SF43	23.5	0.0434	5.27	259.2	0.35	7.2	6.0
SF44	24.5	0.0471	7.73	275.9	0.37	7.1	4.3
SF45	25.1	0.0495	6.06	349.2	0.47	8.5	7.0
SF51	26.3	0.0543	3.80	262.3	0.35	5.8	8.3
SF52	29.0	0.0661	9.34	516.0	0.69	9.4	6.7
SF53	30.5	0.0731	8.48	480.7	0.65	8.0	6.9
SF54	32.5	0.0830	13.97	334.7	0.45	4.9	2.9
SF55	34.0	0.0908	13.41	492.3	0.66	6.6	4.4
SF61	35.0	0.0962	10.65	111.0	0.15	1.4	1.3
SF62	41.0	0.1320	17.85	163.1	0.22	1.5	1.1
SF63	46.0	0.1662	19.19	85.3	0.11	0.6	0.5
SF64	51.0	0.2043	24.54	216.7	0.29	1.3	1.1
SF65	56.0	0.2463	34.09	205.3	0.28	1.0	0.7

5.2.2 大氣沈降量

從 2005/10/13 至 2006/04/27，共有 14 次的採樣記錄。在不同的大氣沈降量下，計算每一棵樣樹的集中率，求得平均值、最大值與最小值(表 9)。對於 30 棵樣樹來說，當樣樹胸高徑大於 19 cm 時，集中率的最小值幾乎都小於 1，在不同的大氣沈降量下，集中率最大值與最小值的差距從 4 倍至 19 倍，胸高徑越大，其差距的倍數也越大，這是因為當大氣沈降量未超過樹冠截留容量 (interception storage capacity) 時，胸高徑越大，樹冠面積也越大，越多的雨水被樹木枝條所攔截而留存在樹冠間。分析 14 次採樣記錄的大氣沈降量與每一棵樣樹的集中率，可觀察到當大氣沈降量越大，其集中率就隨著大氣沈降量呈現對數增加，以樣樹 SF34 為例(圖 15)。

經由收集代表樣樹的幹流水量，可以觀察到大氣沈降量越大，單棵樣樹所收集到幹流水量就越多。30 棵代表樣樹個別的幹流水量 SF(mL)，與大氣沈降量 PD+FG(mm) 都呈線性正相關，以樣樹 SF45 為例(圖 16)。經由線性迴歸分析，30 棵代表樣樹的幹流水量 SF(mL)，與大氣沈降量 PD+FG(mm)，其 R^2 的範圍介於 0.813 ~ 0.968，平均值為 0.922 (表 10)。

表 9 14 次採樣記錄的幹流水集中率平均值、最大值、最小值。FR: funneling ratio。

Tree ID	SF11	SF12	SF13	SF14	SF15	SF21	SF22	SF23	SF24	SF25
Mean FR	25.0	27.1	5.0	11.2	13.8	7.1	5.2	7.2	12.5	9.4
Max. FR	44.4	41.6	8.7	22.4	27.0	15.9	10.0	13.0	24.5	15.3
Min. FR	8.4	8.0	2.4	4.8	5.1	1.9	2.4	2.0	1.0	1.4
Tree ID	SF31	SF32	SF33	SF34	SF35	SF41	SF42	SF43	SF44	SF45
Mean FR	31.5	10.7	12.8	10.9	5.5	7.8	12.0	7.9	7.3	8.5
Max. FR	44.8	19.8	20.8	16.4	9.2	14.7	25.6	17.8	11.7	15.0
Min. FR	18.8	1.1	3.3	0.3	1.2	0.4	1.5	0.4	1.6	1.5
Tree ID	SF51	SF52	SF53	SF54	SF55	SF61	SF62	SF63	SF64	SF65
Mean FR	5.7	8.8	7.6	4.5	6.6	1.1	1.2	0.5	1.2	0.9
Max. FR	11.2	13.9	13.1	7.7	11.7	2.2	1.8	0.6	1.9	1.3
Min. FR	0.8	0.9	1.1	0.4	0.9	0.3	0.5	0.2	0.2	0.4

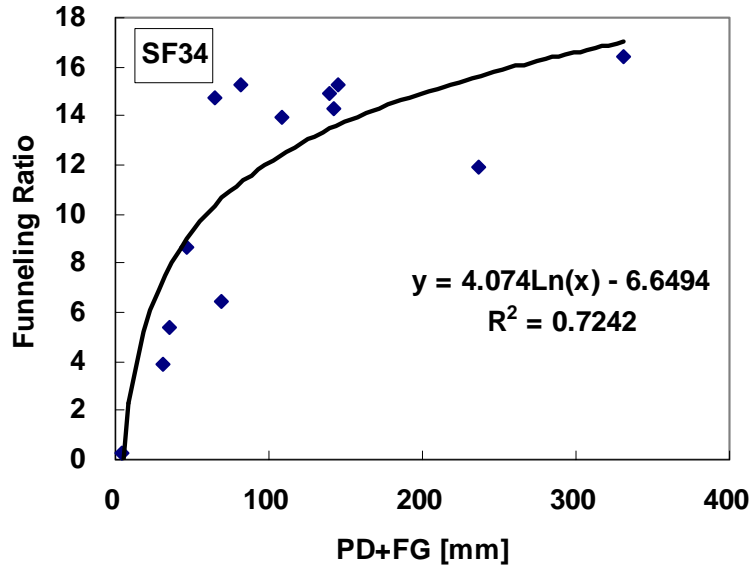


圖 15 2005/10/13~2006/04/27，以樣樹 SF34 為例，大氣沈降量越大，集中率(FR)呈現對數上升，30 棵樣樹都有此趨勢。

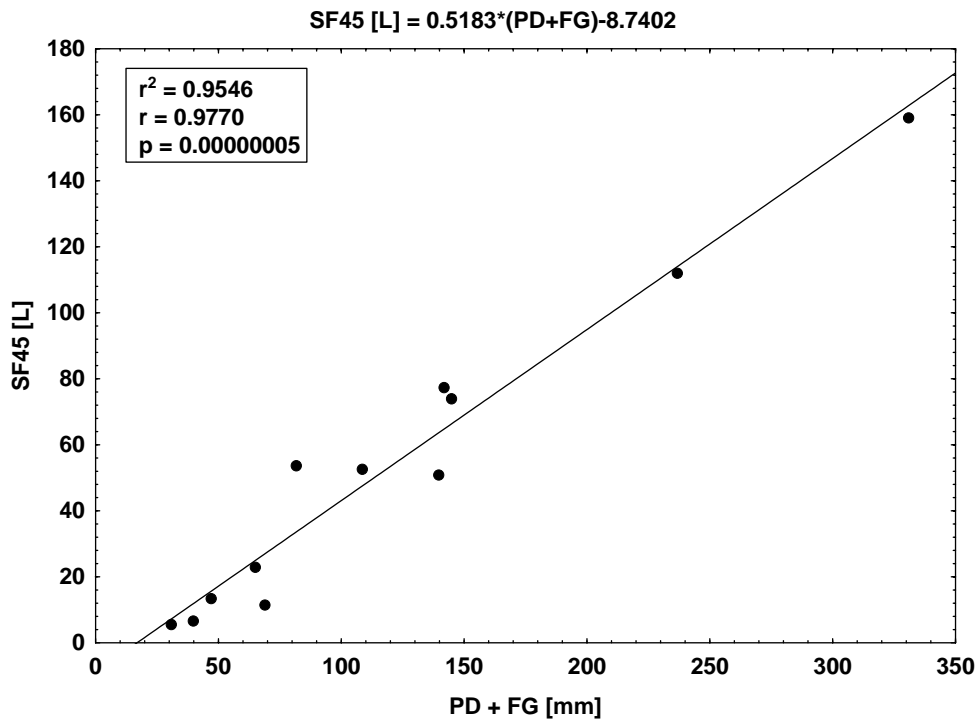


圖 16 單棵樣樹幹流水量與大氣沈降量之關係圖。樣樹 SF45 的幹流水量(L)與大氣沈降量(mm)呈線性正相關，相關係數為 0.977 ($p < 0.001$)。

表 10 代表樣樹的幹流水量 SF(mL)與大氣沈降量 PD+FG(mm)的線性迴歸公式，每兩週採樣一次，採樣次數 (n=14)。Initial PD+FG 為利用代表樣樹的幹流水量與大氣沈降量的線性迴歸公式，計算出開始產生幹流水量時，所需要的初始大氣沈降量。

Tree ID	DBH(cm)	Linear equation	R ²	Initial PD+FG (mm)
SF11	3.2	SF = 32.846 * (PD + FG) - 1315.7	0.911	40.1
SF12	4.8	SF = 72.825 * (PD + FG) - 2514.1	0.968	34.5
SF13	6.5	SF = 26.278 * (PD + FG) - 1043.3	0.927	39.7
SF14	7.0	SF = 76.55 * (PD + FG) - 3081.5	0.930	40.3
SF15	9.2	SF = 163.96 * (PD + FG) - 7120	0.912	43.4
SF21	10.6	SF = 126.33 * (PD + FG) - 6173.9	0.883	48.9
SF22	12.5	SF = 109.49 * (PD + FG) - 4924	0.874	45.0
SF23	13.5	SF = 168.61 * (PD + FG) - 6260.3	0.908	37.1
SF24	14.5	SF = 329.19 * (PD + FG) - 10902	0.930	33.1
SF25	15.2	SF = 267.45 * (PD + FG) - 9192.4	0.960	34.4
SF31	16.0	SF = 661.07 * (PD + FG) - 3353.9	0.876	5.1
SF32	16.7	SF = 403.84 * (PD + FG) - 15434	0.938	38.2
SF33	17.5	SF = 465.9 * (PD + FG) - 14924	0.957	32.0
SF34	19.0	SF = 442.5 * (PD + FG) - 11265	0.953	25.5
SF35	20.0	SF = 209.24 * (PD + FG) - 3018.6	0.813	14.4
SF41	21.0	SF = 465.4 * (PD + FG) - 17697	0.918	38.0
SF42	22.0	SF = 650.56 * (PD + FG) - 17651	0.940	27.1
SF43	23.5	SF = 455.94 * (PD + FG) - 10325	0.921	22.6
SF44	24.5	SF = 449 * (PD + FG) - 10130	0.953	22.6
SF45	25.1	SF = 518.33 * (PD + FG) - 8740.2	0.955	16.9
SF51	26.3	SF = 433.15 * (PD + FG) - 11745	0.934	27.1
SF52	29.0	SF = 653.33 * (PD + FG) - 4626.6	0.929	7.1
SF53	30.5	SF = 662.91 * (PD + FG) - 8739.9	0.921	13.2
SF54	32.5	SF = 589.33 * (PD + FG) - 19071	0.907	32.4
SF55	34.0	SF = 704.91 * (PD + FG) - 9452.8	0.946	13.4
SF61	35.0	SF = 188.41 * (PD + FG) - 4965.4	0.819	26.4
SF62	41.0	SF = 276.93 * (PD + FG) - 8302.3	0.973	30.0
SF63	45.0	SF = 156.38 * (PD + FG) - 5654.8	0.905	36.2
SF64	51.0	SF = 324.88 * (PD + FG) - 3265.8	0.910	10.1
SF65	56.0	SF = 309.62 * (PD + FG) - 6013.6	0.989	19.4

2006/03/14 ~ 16，收到單次降雨事件，大氣沈降量為 4.2 mm，25 棵代表樣樹的胸高徑與幹流水量的相關係數為 0.1445 ($p=0.48$)(圖 17)，幾乎是無相關亦不顯著。2006/01/05 ~ 02/06，大氣沈降量為 236.8 mm，25 棵代表樣樹的胸高徑與幹流水量的相關係數為 0.8449 ($p<0.001$)(圖 18)。當大氣沈降量越大，相關係數越大，所產生的幹流水量就越多。

以每兩週的幹流水量分別與台灣扁柏樣樹的胸高徑、樹冠投影面積、胸高斷面積做相關分析，可以觀察到當大氣沈降量越大，幹流水量與樣樹的胸高徑、樹冠投影面積、胸高斷面積的相關性就越高，其中又以幹流水量與樣樹胸高徑的相關性最佳， R^2 值介於 0.02 ~ 0.8，隨著大氣沈降量增加而呈現對數增加(圖 19)。

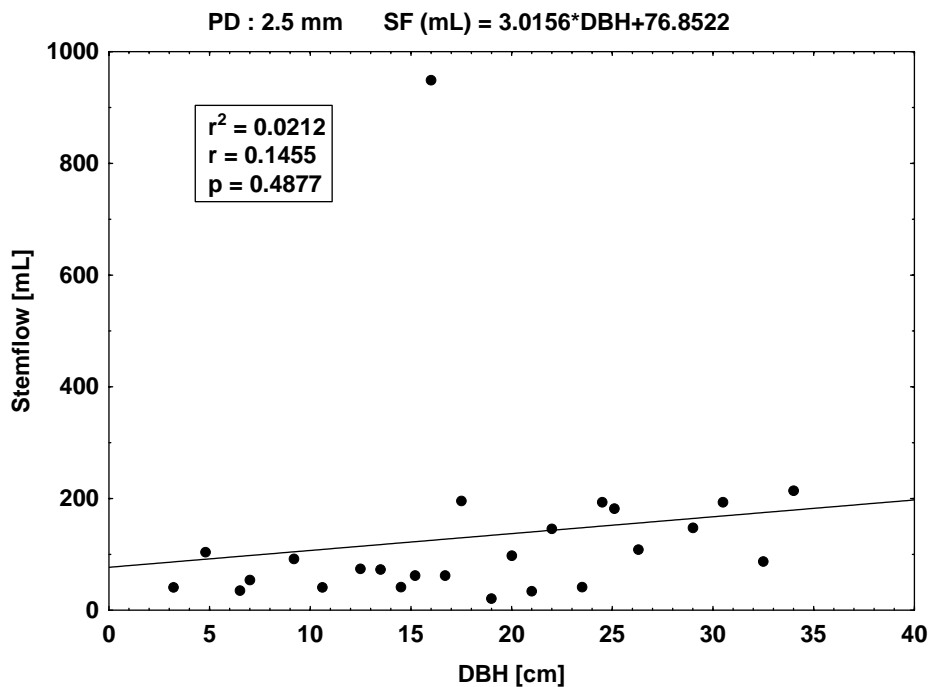


圖 17 2006/03/14~16，PD: 2.5 mm，FG: 1.7 mm，25 棵代表樣樹胸高徑(cm)與幹流水量 Stemflow(mL)的線性迴歸圖。

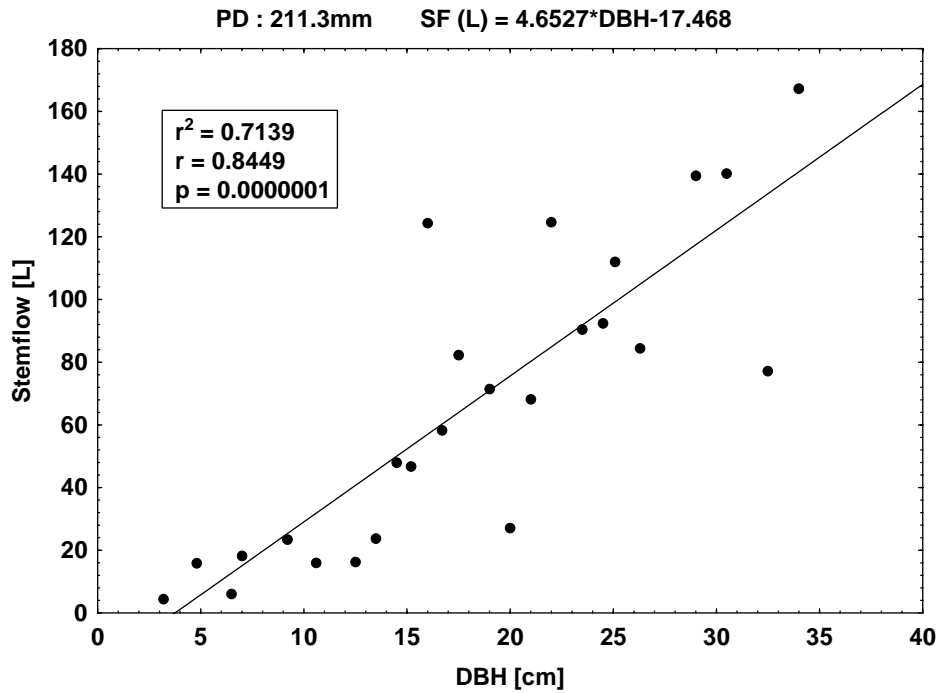


圖 18 2006/01/05~02/06，PD: 211.3 mm，FG: 25.5 mm，25 棵代表樣樹胸高徑(cm)與幹流水量 Stemflow(L)的線性迴歸圖。

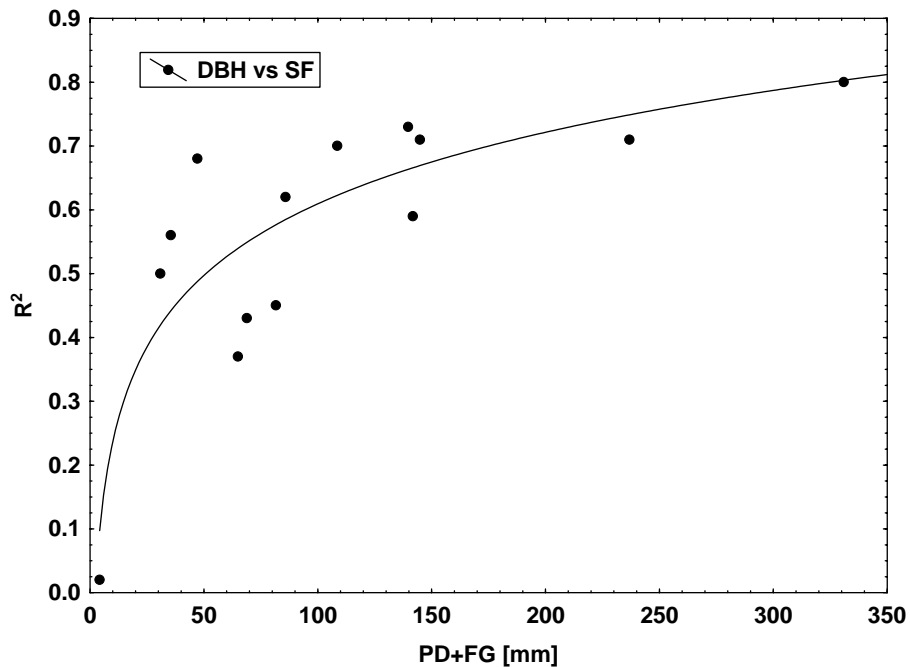


圖 19 每兩週的幹流水量與樣樹胸高徑之決定係數。每兩週的大氣沈降量越大，幹流水量與胸高徑的決定係數也越大。

5.3 林分幹流水量之估算

本研究採用代表樣樹法來估算整個林分的幹流水量。由影響因子的分析中得知，樣樹的幹流水量與胸高徑的相關係數最高，所以使用胸高徑分層法以及胸高徑-幹流水相關法這 2 種方法，來推估研究樣區的林分幹流水量。從 2005/10/13 至 2006/04/27 的 6 個月期間，重力沈降量為 1350.7 mm，雲霧沈降量為 171.2 mm，重力沈降量加上雲霧沈降量為大氣沈降量 1521.9 mm。

■ 胸高徑分層法 (表 11)：

在本研究中，胸高徑分層法是將林分中的台灣扁柏以胸高徑分出 5 個徑級，每 2 週收集 5 個徑級中 5 棵代表樣樹的幹流水，並求出平均值與標準誤差(圖 20.a1)，將 5 個徑級的平均幹流水量，乘以每 1 ha 中此徑級的樹木數量(圖 20.a2)，再乘上 10^{-4} ，得到林分中此徑級幹流水量(Lm^{-2})(圖 20.a3)，將所有徑級的幹流水量加總，得到林分幹流水量(mm)。

2005/11/10~24 的重力沈降量最大：313.2 mm，雲霧沈降量為 17.8 mm，幹流水量為 17.30 (± 2.22) mm，為大氣沈降量的 5.23%；2006/02/06~15 的重力沈降量最小：20 mm，雲霧沈降量為 10.8 mm，幹流水量為 0.5 (± 0.14) mm，為大氣沈降量的 1.64%；此外 2006/03/14~16 收到一次降雨事件，重力沈降量：2.5 mm，雲霧沈降量為 1.7 mm，幹流水量為 0.02(± 0.01) mm，為大氣沈降量的 0.51%。在此 6 個月期間，總幹流水量為 63 (± 11) mm，為大氣沈降量的 4.2(± 0.7)%。

■ 胸高徑-幹流水相關法 (表 12)

在本研究中，胸高徑-幹流水相關法是利用林分中的 25 棵台灣扁柏樣樹在每 2 週的時間內所收集到的幹流水量，建立樣樹胸高徑與其幹流水量的迴歸公式(圖 20.b1)，將 1 ha 中所有台灣扁柏的胸高徑輸入至迴歸公式中(圖 20.b2)，求得其幹流水量並加總(L/ha)(圖 20.b3)，再乘上 10^{-4} ，得到林分幹流水量(Lm^{-2})。

2005/11/10~24 的重力沈降量最大：313.2 mm，雲霧沈降量為 17.8 mm，幹流水量為 15.28 mm，為大氣沈降量的 4.62%；2006/02/06~15 的重力沈降量最小：20 mm，雲霧沈降量為 10.8 mm，幹流水量為 0.49 mm，為大氣沈降量的 1.6%；此外 2006/03/14~16 收到一次降雨事件，其重力沈降量：2.5 mm，雲霧沈降量為 1.7 mm，幹流水量為 0.02 mm，為大氣沈降量的 0.36%。在此 6 個月期間，總幹流水量為 61 mm，為大氣沈降量的 4%。

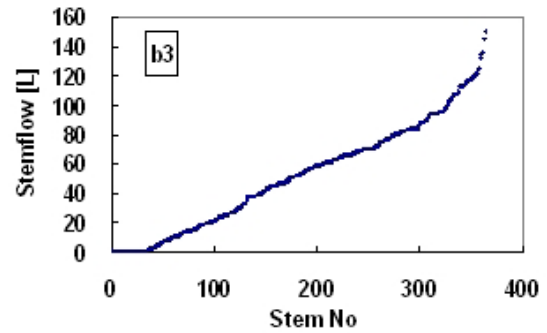
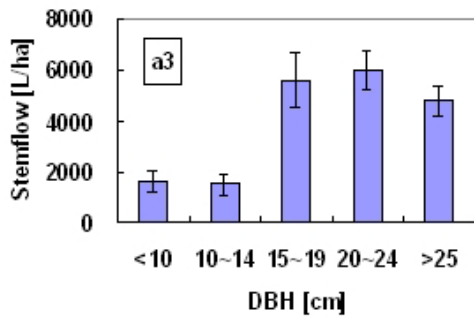
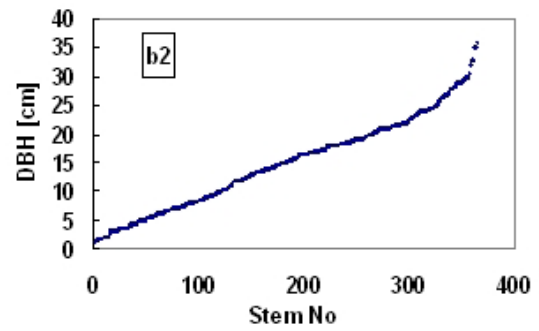
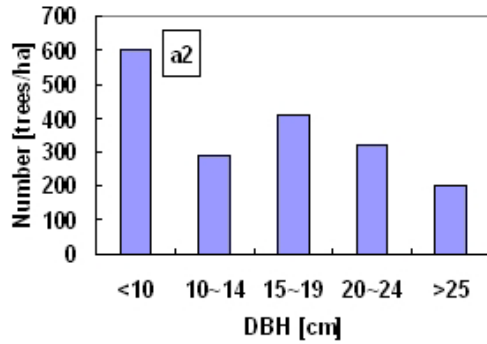
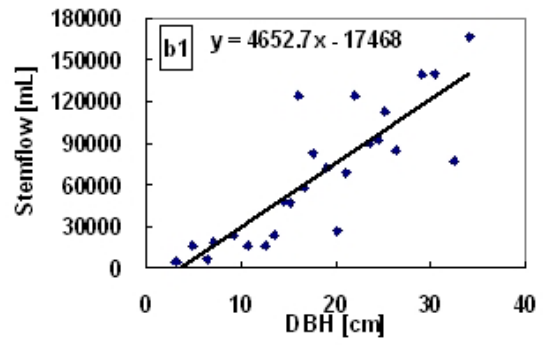
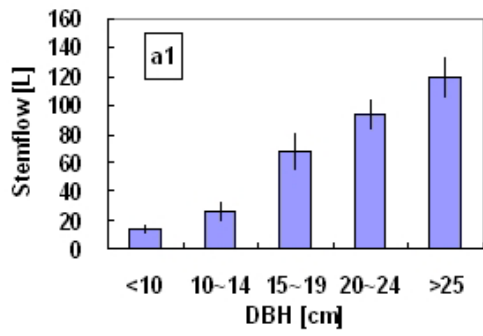


圖 20 估算林分幹流水量：(a)胸高徑分層法、(b)胸高徑-幹流水相關法。

表 11 胸高徑分層法。

Sampling No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PD (mm)	68.3	73.0	313.2	32.9	89.8	57.9	211.3	20.0	129.8	25.5	2.5	135.0	61.1	130.5
FG (mm)	17.5	8.7	17.8	14.2	18.8	11.0	25.5	10.8	12.1	10.1	1.7	9.9	3.9	9.4
SF (mm)	2.57	4.20	17.30	1.17	4.84	1.44	9.78	0.50	6.79	0.49	0.02	6.80	1.98	5.44
SE	0.60	1.01	2.22	0.21	0.81	0.37	1.66	0.14	1.14	0.10	0.01	1.32	0.40	1.12
SF/PD	3.76	5.75	5.52	3.56	5.39	2.49	4.63	2.52	5.23	1.93	0.86	5.04	3.24	4.17
SF/(PD+FG)	2.99	5.14	5.23	2.49	4.46	2.09	4.13	1.64	4.79	1.38	0.51	4.69	3.04	3.90

表 12 胸高徑-幹流水相關法。

Sampling No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PD (mm)	68.3	73.0	313.2	32.9	89.8	57.9	211.3	20.0	129.8	25.5	2.5	135.0	61.1	130.5
FG (mm)	17.5	8.7	17.8	14.2	18.8	11.0	25.5	10.8	12.1	10.1	1.7	9.9	3.9	9.2
SF (mm)	2.62	4.39	15.28	1.15	4.72	1.40	9.54	0.49	6.75	0.49	0.02	6.75	2.02	5.43
SF/PD	3.84	6.02	4.88	3.49	5.26	2.41	4.51	2.46	5.20	1.91	0.61	5.00	3.30	4.16
SF/(PD+FG)	3.06	5.38	4.62	2.44	4.35	2.03	4.03	1.60	4.76	1.37	0.36	4.66	3.11	3.89

這 2 種估算幹流水量的方法，所估算的林分幹流水量占大氣沈降量的比例，在經由收集效率修正後都比修正前多了 0.3%。此外，若不考慮雲霧沈降量，則總幹流水量在重力沈降量中所占的比例比在大氣沈降量中所占的比例多了 0.5%。

以胸高徑分層法以及胸高徑-幹流水相關法所估算的林分幹流水量，都可以觀察到當大氣沈降量越大時，林分幹流水量也越大，彼此呈線性正相關(圖 21)。林分幹流水量與大氣沈降量的關係式，胸高徑分層法： $SF(mm) = 0.0527*(PD+FG)(mm) - 1.2038$ ， $R^2 = 0.9712$ ；胸高徑-幹流水相關法： $SF(mm) = 0.0478*(PD+FG)(mm) - 0.8328$ ， $R^2 = 0.9728$ 。

2 種估算幹流水量的方法所估算的林分幹流水量，與大氣沈降量的比值，呈現曲線關係，經由幾種迴歸模式測試，選取最大的 R^2 值，發現對數公式最適合(圖 22)。

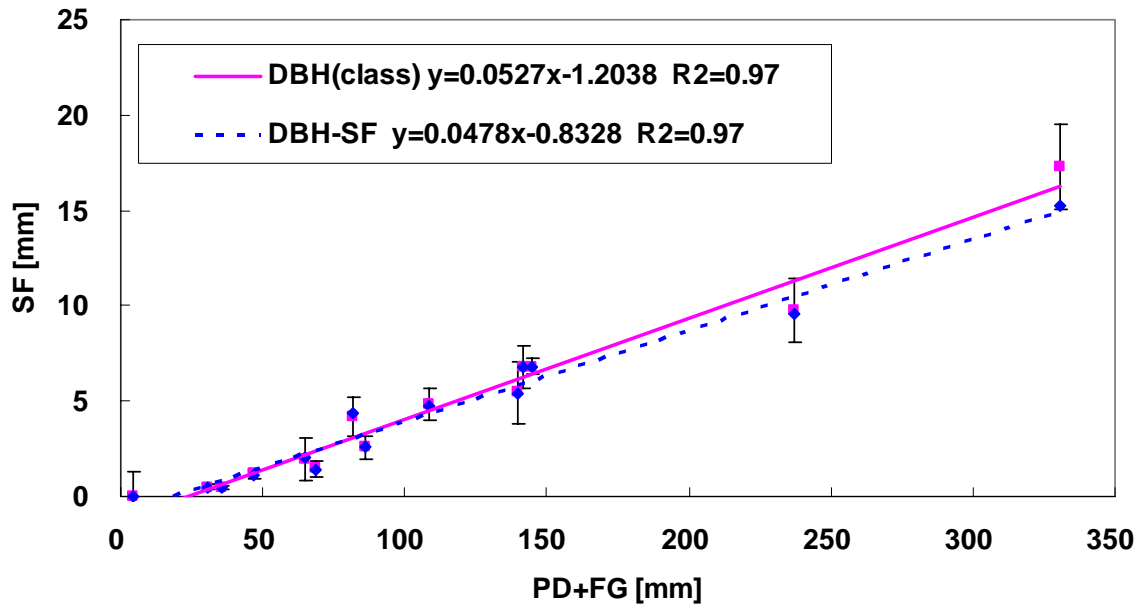


圖 21 以胸高徑分層法(DBH class)、胸高徑-幹流水相關法(DBH-SF)，估算林分幹流水量，都與大氣沉降量呈正相關。

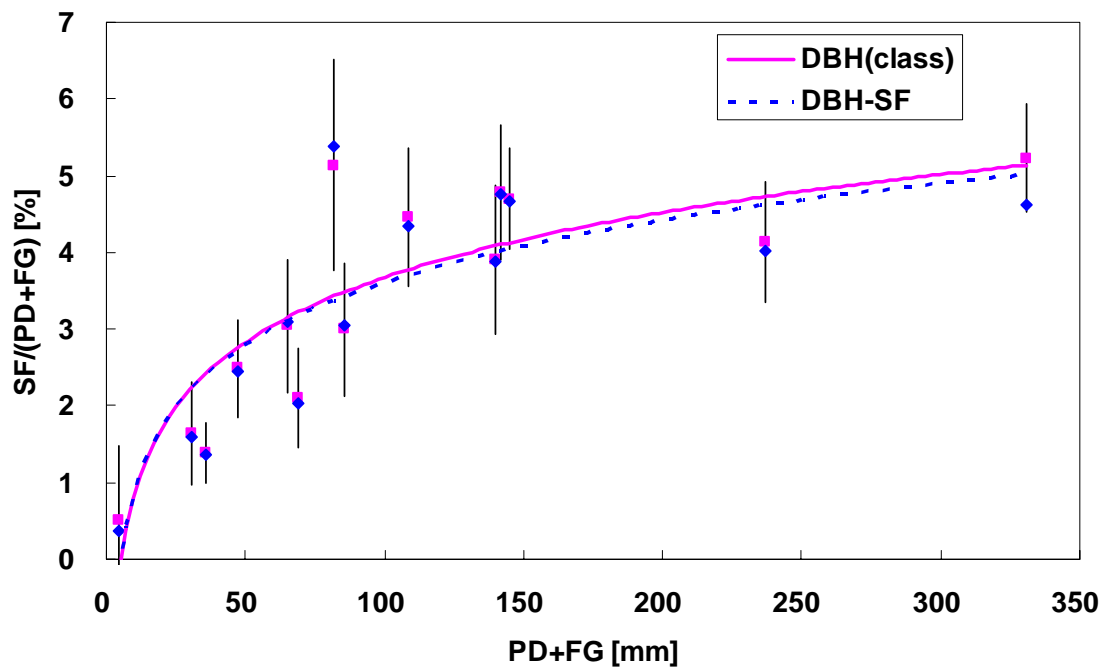


圖 22 以胸高徑分層法(DBH class)、胸高徑-幹流水相關法(DBH-SF)，估算林分幹流水量，與大氣沉降量的比例，呈現對數形式。

本研究使用胸高徑分層法、胸高徑-幹流水相關法這 2 種方法，來估算整個林分的幹流水量。發現所估算的林分幹流水量相似，因為這兩種方法是胸高徑概念的應用。在本研究中，選擇胸高徑分層法來估算整個林分的幹流水量。本研究區從 2005/10/13 至 2006/04/27 的 6 個月期間，總幹流水量為 63.4 (± 10) mm 為重力沉降量的 4.7(± 0.8)% ，為大氣沉降量的 4.2 (± 0.7)% 。由大氣沉降量來預測林分幹流水量的模式為 $SF (mm) = 0.0527*(PD+FG)(mm) - 1.2038$ ， $R^2 = 0.9712$ 。

以胸高徑分層法，來比較 5 種徑級所收集到的幹流水量，從 2005/10/27 至 2006/04/27，共有 13 次的採樣記錄。先比較 25 棵代表樣樹的 5 種徑級所收集到的幹流水量(L)，在 4 類大氣沉降量中及總大氣沉降量中，都可以觀察到胸高徑徑級越大，所收集到的幹流水量也越多(表 13)。再以胸高徑分層法，來推估在 1 ha 中 5 種徑級所收集到的幹流水量(表 14)，發現胸高徑的徑級介於 15~19cm，產生最多的幹流水，為總幹流水量的 32%，胸高徑徑級介於 20~24cm，產生次多的幹流水，為總幹流水量的 28.8%。

表 13 2005/10/27~2006/04/27，PD: 1282.4 mm，FG: 153.7 mm，13 次的採樣記錄，25 棵代表樣樹，以胸高徑劃分成 5 個徑級，每個徑級收集到幹流水量(L)的比例。

DBH (cm)	Trees	PD+FG classes ,mm (every 2 weeks)				All (13)
		40 (3)	40~90 (4)	90~180 (4)	>180 (2)	
<10	5	7.1 (4.0%)	31.5 (2.1%)	123.8 (3.0%)	185.7 (4.1%)	348.1 (3.3%)
10~14	5	14.1 (8.1%)	142.5 (9.4%)	349.4 (8.3%)	488.8 (10.7%)	994.9 (9.5%)
15~19	5	46.3 (26.4%)	387.2 (25.4%)	1044.9 (25.0%)	1009.9 (22.0%)	2488.2 (23.8%)
20~24	5	46.1 (26.3%)	448.4 (29.4%)	1081.3 (25.8%)	1298.5 (28.3%)	2874.3 (27.5%)
>25	5	61.4 (35.1%)	514.0 (33.7%)	1587.1 (37.9%)	1601.2 (34.9%)	3763.7 (36.0%)
Total	25	175.0 (1.7%)	1523.4 (14.6%)	4186.6 (40.0%)	4584.2 (43.8%)	10469.3 (100.0%)

表 14 2005/10/27~2006/04/27，PD: 1282.4 mm，FG: 153.7 mm，13 次的採樣記錄，25 棵代表樣樹，以胸高徑劃分成 5 個徑級，推估到 1 ha 中每個徑級收集到幹流量(L)的比例。

DBH (cm)	Trees	PD+FG classes ,mm (every 2 weeks)				All (13)
		<40 (3)	40~90 (4)	90~180 (4)	>180 (2)	
<10	600	847 (7.8%)	3775 (4.1%)	14860 (5.9%)	22289 (7.9%)	41773 (6.5%)
		240 (2.2%)	1263 (1.4%)	4557 (1.8%)	7323 (2.6%)	13384 (2.1%)
10~14	290	820 (7.5%)	8262 (8.9%)	20267 (8.0%)	28352 (10.1%)	57702 (9.0%)
		196 (1.8%)	2651 (2.8%)	6929 (2.7%)	6948 (2.5%)	16725 (2.6%)
15~19	410	3794 (34.9%)	31748 (34.1%)	85682 (33.8%)	82811 (29.5%)	204036 (32.0%)
		1091 (10.0%)	7778 (8.4%)	17947 (7.1%)	11447 (4.1%)	38264 (6.0%)
20~24	320	2949 (27.1%)	28694 (30.8%)	69206 (27.3%)	83106 (29.6%)	183956 (28.8%)
		596 (5.5%)	4117 (4.4%)	7783 (3.1%)	8754 (3.1%)	21252 (3.3%)
>25	200	2457 (22.6%)	20558 (22.1%)	63482 (25.0%)	64049 (22.8%)	150548 (23.6%)
		337 (3.1%)	4210 (4.5%)	6752 (2.7%)	4271 (1.5%)	15571 (2.4%)
Total	1820	10869 (1.7%)	93040 (14.6%)	253499 (39.7%)	280608 (44.0%)	638017 (100.0%)
		2462 (0.4%)	20021 (3.1%)	43969 (6.9%)	38745 (6.1%)	105198 (16.5%)

6. 討論

6.1 影響幹流量之因子

6.1.1 樹木特性

由表 4 所顯示的幹流水收集效率，可以觀察到收集效率介於 0.8~0.98 之間，樣樹胸高徑較小的收集效率較高，而樣樹胸高徑較大的收集效率較低，這是因為台灣扁柏樹幹的樹皮有垂直狀的裂縫，且胸高徑越大時裂縫越深，雖然在架設幹流水收集器時，會先刮除樹幹上的附生植物及剝離的樹皮，但無法完全刮除樹皮使樹幹平滑，且台灣扁柏胸高徑越大時裂縫越深、越難被刮平，所以幹流水沿著樹幹流至收集器時，就會有部分的幹流水順著裂縫流出收集器，當樣樹胸高徑越大時，流失的幹流量也就越多，所以在經由收集效率修正後的幹流量，與樣樹胸高徑的相關性就越高。

在本研究中，胸高徑、樹冠投影面積、通道障礙物與樹皮形態是影響台灣扁柏幹流水量的顯著因子，與其他研究幹流水的文獻有一致的結果。在樹冠投影面積部分，Ford & Deans (1978)在蘇格蘭南方 14 年生的西達卡雲杉人工林中，發現單棵樣樹的幹流量與其樹冠投影面積呈現顯著正相關。Aboal *et al.* (1999)在加納利群島中的特納利夫島月桂樹森林內，選取 6 個優勢樹種來研究幹流水量的變異，以複迴歸模式分析，發現樹冠投影面積是影響幹流水量的重要因子，樹冠投影面積大的樹種，能攔截到的雨水也越多。Steinbuck (2002)在美國北加州 100 年生的紅杉次生林中，選取 3 個優勢樹種來研究樹木形態對幹流水量的影響，以複迴歸模式分析，發現樹冠投影面積亦是影響幹流水量的重要因子。

在通道障礙物與樹皮形態部分，Návar (1993)在墨西哥東北方的薊叢 (Tamaulipan thornscrub) 中，選取 8 種灌木叢來研究樹皮粗糙度與幹流量之關係，發現樹皮光滑的樹種其幹流量最多，而樹皮粗糙的樹種其幹流量相對的就少很多，這是因為樹皮粗糙的樹種在樹幹上具有較多的孔隙來留住雨水，而減少能流至地面的幹流量。Aboal *et al.* (1999)在加納利群島中的特納利夫島月桂樹森林內，選取 6 個優勢樹種並測量其樹皮的粗糙度指標，以複迴歸模式分析，模式顯示具有最大的樹冠投影面積、樹皮最光滑的樹種，能收集到最大量的幹流水。Steinbuck (2002)在美國北加州 100 年生的紅杉次生林中，選取 3 個優勢樹種來研究樹木形態對幹流水量的影響，進行樹幹灑水操作實驗，以回收的水量來分析，發現樹皮最光滑的樹種所回收的水量也最多。

綜合上述的討論，在樹冠投影面積部分，不論是在同樹種不同樣樹間，或是不同

的樹種間，樹冠投影面積都是決定幹流水量多寡的顯著因子，樹冠投影面積越大，能攔截到的雨水越多，所收集到的幹流水量也越多。在通道障礙物與樹皮形態部分，都是在探討不同樹種間的樹皮粗糙程度，對幹流水量的影響，樹種的樹皮越光滑能收集到的幹流水量就越多，而未探討在同樹種不同樣樹間的樹皮粗糙程度，對幹流水的影響。

在本研究中，台灣扁柏樹幹上的樹皮有垂直狀的裂縫，且胸高徑越大時裂縫越深，分離的樹皮越多，此外樹幹上的附生性苔蘚也越多(鄧振華，2006)，這些特性都造成幹流水從樹幹上滴落而減少幹流水量。以樣樹樹冠投影面積與幹流水量做迴歸分析(圖 11)，可觀察到幹流水量大致上隨著樣樹的樹冠投影面積增加而增加，但還是有極端值的存在，樹冠投影面積小但幹流水量多或是樹冠投影面積大但幹流水量少。在檢查離群值時，顯示樣樹 SF31、SF54 為離群值。若移除 SF31、SF54 這兩個離群值，再重新以樹冠投影面積與幹流水量做迴歸分析，可發現線性迴歸模式的 $R^2 = 0.84$ ，表示樹冠投影面積這個自變數之變異，可以解釋的幹流水量變異比原先具有極端值的資料 16%，達到可以解釋約 84% 幹流水量的變異，顯示這個模式的解釋能力良好，由此可知台灣扁柏的樹冠投影面積是一個有力的預測變數。

是什麼原因造成離群值 SF31、SF54。SF31 的樹冠投影面積(CPA: 6.40m^2)，所收集到的幹流水量相似於 SF52(CPA: 9.34m^2)，SF54 的樹冠投影面積(CPA: 13.94m^2)是 25 棵樣樹中最大，收集到的幹流水量相似於 SF42(CPA: 5.19m^2)。筆者以樣樹基本資料(表 3)及樹皮吸水、滴落能力(表 6)的操作實驗，來解釋可能的原因。

- SF31：

DBH:16cm，CPA: 6.40m^2 ，收集效率:0.98，飽和時樹皮的吸水、滴落能力:100mL/500mL，樹冠投影面積約為同徑級的 2 倍，樹冠沒有與周圍樹木的樹冠交錯，樹幹輕微傾斜 5° ，樹幹上有附生植物，灑水實驗時，水從附生植物上滴落下來落在收集器的收集範圍內，飽和時灑 500mL 的水可收回 400mL(圖 23)，所以幹流水量為同徑級的 2 倍以上。

- SF54：

DBH:32.5cm，CPA: 13.94m^2 ，收集效率:0.8，飽和時樹皮的吸水、滴落能力:330mL/500mL，樹冠投影面積比 SF55 稍微大一點，樹冠沒有與周圍樹木的樹冠交錯，樹幹上有密集的附生植物，灑水實驗時，水從附生植物上滴落下來落在收集器的收集範圍外，飽和時灑 500mL 的水只能收回 170mL(圖 24)，是研究樣區中，回收水量最少的樣樹，所以幹流水量為同徑級的一半。

在比較台灣扁柏胸高徑與幹流水量的關係時，發現老齡林 5 棵樣樹並沒有因為胸高徑較大而產生比天然下種更新林樣樹更多的幹流量(圖 14)。比較老齡林樣樹的集中率，也小於天然下種更新林樣樹的集中率。可能的原因包括了樹高、枝條角度、樹冠攔截損失與樹皮的吸水、滴落能力。

老齡林的台灣扁柏樹高介於 20 ~ 25m，是天然下種更新林台灣扁柏樹高的 2 倍，樹皮更為粗糙，且下端與樹幹分離，樹幹上有密集的附生植物，更容易形成滴落點。灑水實驗時，水從附生植物上滴下來落在收集器的收集範圍外，飽和時灑 500 mL 的水可收回 95 ~ 110 mL，比天然下種更新林樣樹中，回收水量最少的樣樹 SF54 還少(圖 24)。

在樹冠投影面積部分，雖然老齡林比天然下種更新林樣樹的樹冠投影面積來的大，但不能確定集中雨水的效率是否一樣。Johnson (1990)在蘇格蘭一座 50 年生的西達卡雲杉森林中，發現隨著樹齡的增加，幹流量反而減少。他認為當西達卡雲杉的樹齡越大，其枝條的傾斜度越不利於產生幹流水，這是因為針葉樹的枝條傾斜度，會隨著樹齡的增加，從高於水平漸漸變成低於水平。由目測觀察老齡林樣樹的枝條角度，發現比較接近水平，但沒有直接測量的資料，因此需要直接測量老齡林台灣扁柏的枝條角度，才能確認枝條角度是否影響了老齡林的幹流量。

在樹冠攔截損失部分，Kittredge (1948)指出經由攔截損失的水分與不同的樹冠層結構有關，而樹的年齡影響了樹冠層結構，在美國聖阿帕拉契山的白松 (Eastern white pine)，樹齡為 10 年、35 年、60 年的攔截損失率分別為 15%、19%、26%。推測同一種植物的不同樹齡具有不同的樹冠截留容量，且樹齡越大的樹木其樹冠截留容量越大，因而造成同種樹木其樹齡越大的攔截損失率也越大。

在樹幹截留容量部分，Kuraji *et al.* (2001)研究日本扁柏樹幹表皮留存雨水的功能，所觀察的日本扁柏其胸高徑為 31.7 cm、樹高為 28.8 m，發現在樹冠下距地面 19.1 m 處及胸高徑處收集器所收集到的幹流水，大於只在胸高徑處收集器所收集到的幹流水，當降雨量為 100 mm 時，幹流水量的差距為 50 L，很清楚的顯示這些雨水被樹幹表皮所攔截。若是能在老齡林台灣扁柏的枝下高處架設幹流水收集器，就更能分別出老齡林台灣扁柏在 1.3 m 處所收集到幹流量較少的原因，是因為老齡林樹冠收集雨水的效率比更新林差，或是因為更多的雨水從樹幹上滴落到收集器外。

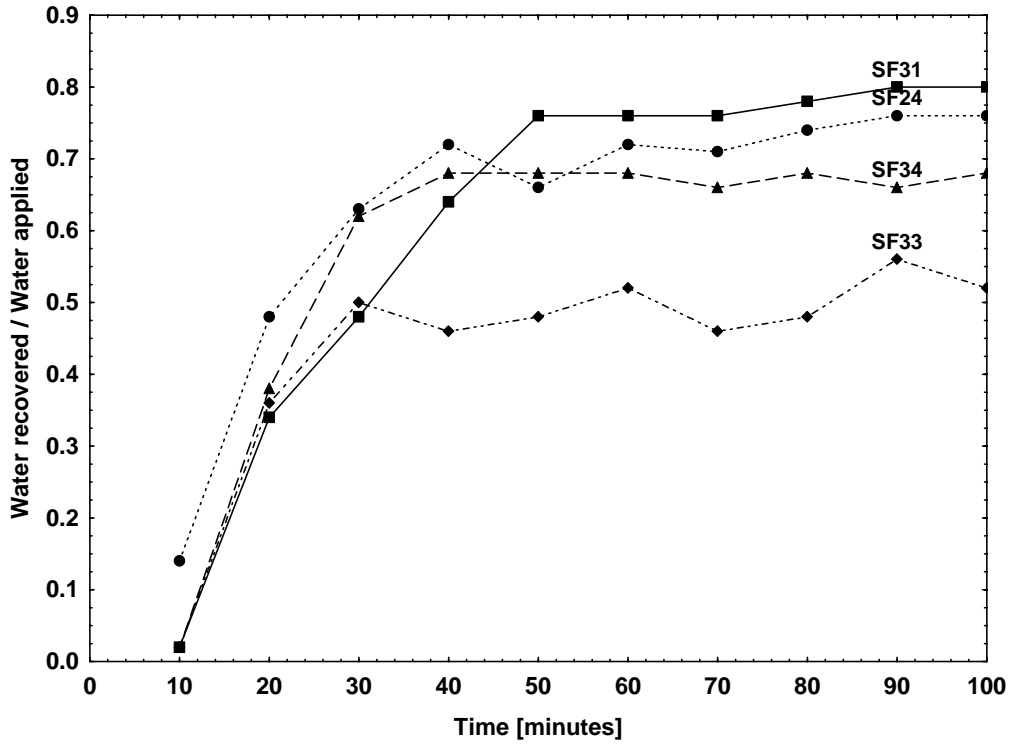


圖 23 樹皮吸水、滴落能力實驗結果。樣樹 SF24、SF31、SF33、SF34。

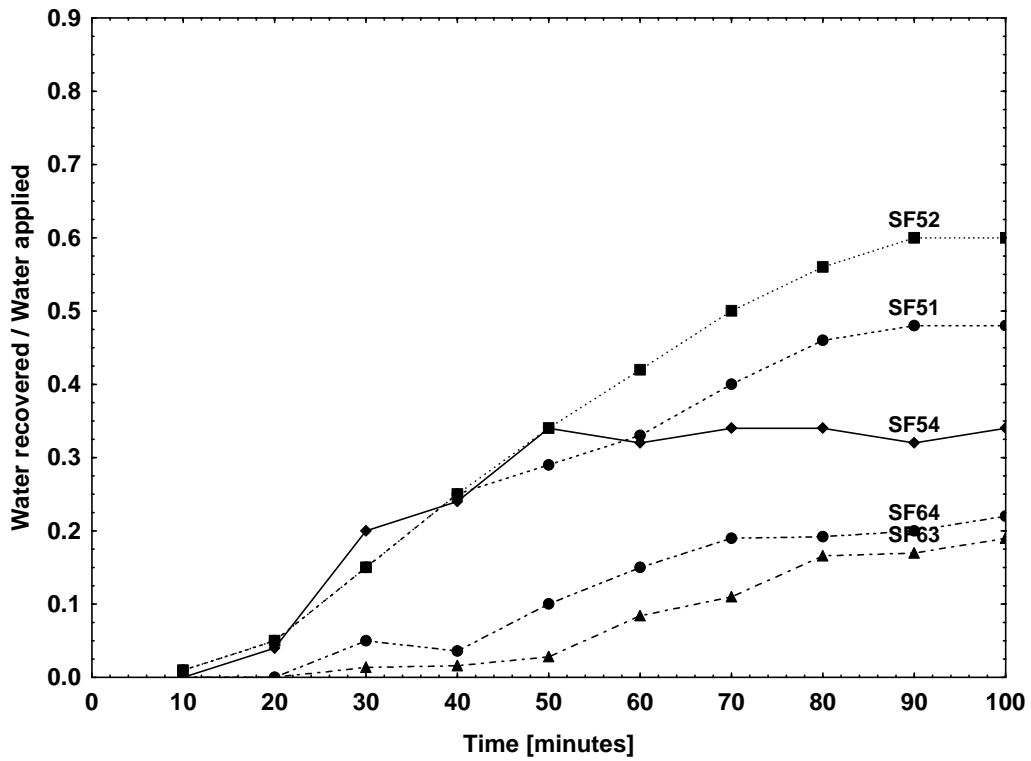


圖 24 樹皮吸水、滴落能力實驗結果。樣樹 SF51、SF52、SF54、SF63、SF64。

6.1.2 降雨類型

本研究樣區位於霧林帶，雲霧沈降是否會對幹流水產生影響。從 2006/03/14~16 的單次降雨事件中得知，重力沈降量為 2.5 mm，雲霧沈降量為 1.7 mm。對於 25 棵樣樹來說，雨水被樹冠所攔截，幾乎沒有產生幹流水，而雲霧沈降量每小時介於 0.01~0.18 mm，可以確定光考慮雲霧沈降量是無法產生幹流水，若下雨時又起霧，樹冠所攔截的雲霧可伴隨著重力沈降量一起沿著樹冠流下，而增加幹流水量。

經由代表樣樹的幹流水量與大氣沈降量的線性迴歸公式，來計算當開始產生幹流水時，所需要的初始大氣沈降量(表 10)，顯示當代表樣樹的胸高徑小於 15 cm 時，所需要的初始大氣沈降量大於 34 mm，當代表樣樹的胸高徑大於 15 cm，所需要的初始大氣沈降量介於 5~38 mm，表示當代表樣樹的胸高徑越小時，所需要的初始大氣沈降量越多，而代表樣樹的胸高徑越大時，所需要的初始大氣沈降量卻越少。這與灑水操作實驗回收水量的結果，以及在文獻回顧中 Crockford & Richardson (1990)所觀察到的現象不同，代表樣樹的胸高徑越大，樹幹表面積越大，在幹流水流下之前，需要越多的水來濕潤樹皮。

經由線性迴歸公式計算會呈現這樣的結果，可能是因為所收集的幹流水是每兩週採樣一次，而不是每一次的降雨事件所收集的幹流水，所以無法正確計算出初始大氣沈降量。因此在本研究中，以代表樣樹的幹流水量與大氣沈降量的線性迴歸公式，無法計算出當開始產生幹流水時，所需要的初始大氣沈降量。要求得開始產生幹流水時，所需要的初始大氣沈降量的最佳方法，是使用傾斗式雨量計(Kuraji *et al.*, 2001)。

幹流水依照定義應該是沿著樹幹流下來的水，但因為幹流水收集器的溝槽有一定的寬度，在本研究中幹流水收集器溝槽的寬度為 2.5 cm，所以不管是沿著樹幹流下來的水，或者是從樹幹上滴落下來的水，只要在幹流水收集器溝槽的寬度範圍內所收集到的水，都稱為幹流水。

2006/03/14 ~ 16 的降雨事件中，大氣沈降量為 4.2 mm，且此次降雨事件與前一次的降雨事件間隔 28 小時，樹皮較為乾燥。因為雨水會從樹幹上滴落下來，所以還是可以收到一些幹流水。若只以開始收集到幹流水時，當作所需要的初始大氣沈降量，那麼在研究樣區的台灣扁柏，所需要的初始大氣沈降量最大值為 4.2 mm。

在單次降雨事件中，以 25 棵代表樣樹的胸高徑與其幹流水量做線性迴歸的 R^2 值為 0.0844($p = 0.1589$)。從圖 17 中可以很明顯地觀察到代表樣樹的幹流水量與胸高徑幾乎不相關，而表 9 的集中率也顯示樣樹的胸高徑越大，其平均集中率越小且小於 1。

Bellot & Escarre (1998)在西班牙東北部的地中海冬青櫟森林中，觀察到幹流水量受到樹木大小及降雨量多寡的影響，而樹冠截留容量受到樹冠層結構及降雨類型的影響。在降雨量最小的降雨事件中，攔截損失量在降雨量中所占的比例最大，而幹流水量在降雨量中所占的比例最小，隨著降雨量的增加，攔截損失量在降雨量中所占的比例變得最小，而幹流水量在降雨量中所占的比例逐漸增加至固定比例。在本研究中得知當大氣沈降量未超過樹冠截留容量時，台灣扁柏胸高徑越大，樹冠投影面積越大，樹幹表面積越大，被樹冠攔截而損失的雨水越多，或是被留存在樹幹表皮中的雨水就越多。

在圖 19 中可以很明顯地觀察到當大氣沈降量越大，代表樣樹的幹流水量與其胸高徑的相關性就越高，這表示當大氣沈降量超過樹冠截留容量越多，越多的雨水就會從樹冠上的枝葉間滴落形成穿落水，或是沿著樹幹流下形成幹流水。

在圖 15 中，台灣扁柏單棵樣樹的集中率與大氣沈降量之間的關係，在未超過了初始大氣沈降量時，沒有幹流水產生；當超過了初始大氣沈降量開始產生幹流水時，台灣扁柏單棵樣樹的集中率，隨著大氣沈降量的增加而增加；當超過了樹木將雨水轉換成幹流水的能力時，隨著大氣沈降量的增加，集中率增加的幅度變小，或不再增加，所以整體來看，單棵樣樹集中率隨著大氣沈降量的增加呈現對數上升。當推估到整個林分的幹流水量時，幹流水量與大氣沈降量的比例，也是隨著大氣沈降量的增加呈現對數上升(圖 22)。

在圖 25 中，可以觀察到 2005/10/13~27 這兩週內，重力沈降量為 68.3 mm、雲霧沈降量為 17.5 mm，10/27~11/10 這兩週內，重力沈降量 73 mm、雲霧沈降量 8.7 mm，在這兩段期間內，雖然大氣沈降量相似，分別為 85.8 mm、81.7 mm，但以胸高徑分層法估算的幹流水量分別為 2.3 mm、3.9 mm，相差了 1.6 mm。在這兩段期間內的降雨強度相似，介於 0.5~4.0 mmhr⁻¹，10/13~27 有 9 次降雨事件，其中有 5 次降雨事件的降雨量小於 2.5 mm；10/27~11/10 有 4 次降雨事件，其中有 3 次降雨事件的降雨量小於 2.5 mm (圖 26)。推測是因為 10/27~11/10 的降雨類型為持續降雨，而 10/13~27 有數次的降雨事件間的乾燥時期，所以幹流水量小於 10/27~11/10 這兩週。由此可知，雖然在 10/13~27 的雲霧沈降量為 10/27~11/10 雲霧沈降量的 2 倍，但在 10/13~27 的重力沈降量小於 10/27~11/10 的重力沈降量，所以幹流水的產量，主要是由重力沈降量的多寡及降雨事件所影響，雲霧沈降量的多寡對幹流水產量的影響不大。

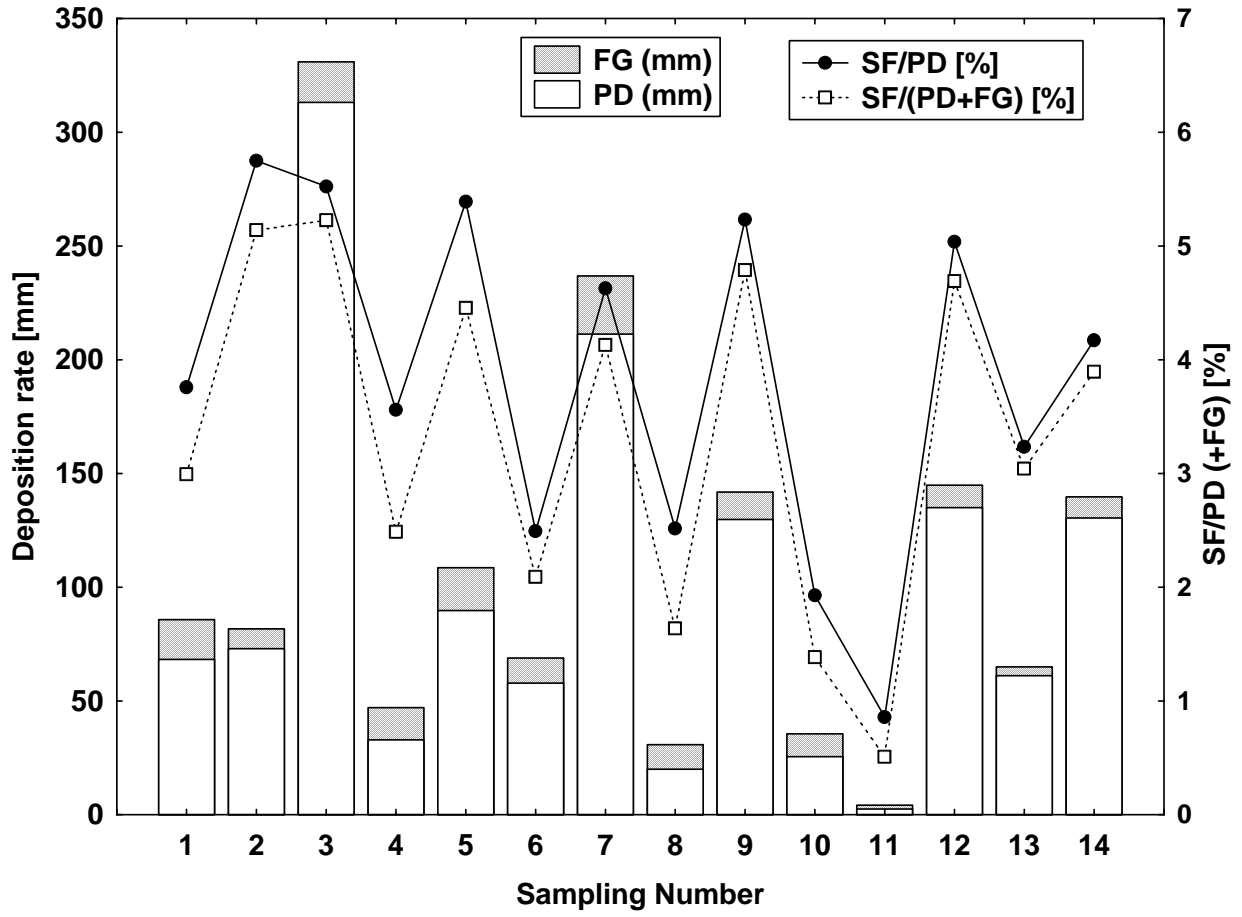


圖 25 幹流水量與重力沈降量、雲霧沈降量的比例。2005/10~2006/04，每兩周以胸高徑分層法估算的幹流水量與重力沈降量、雲霧沈降量的比例。

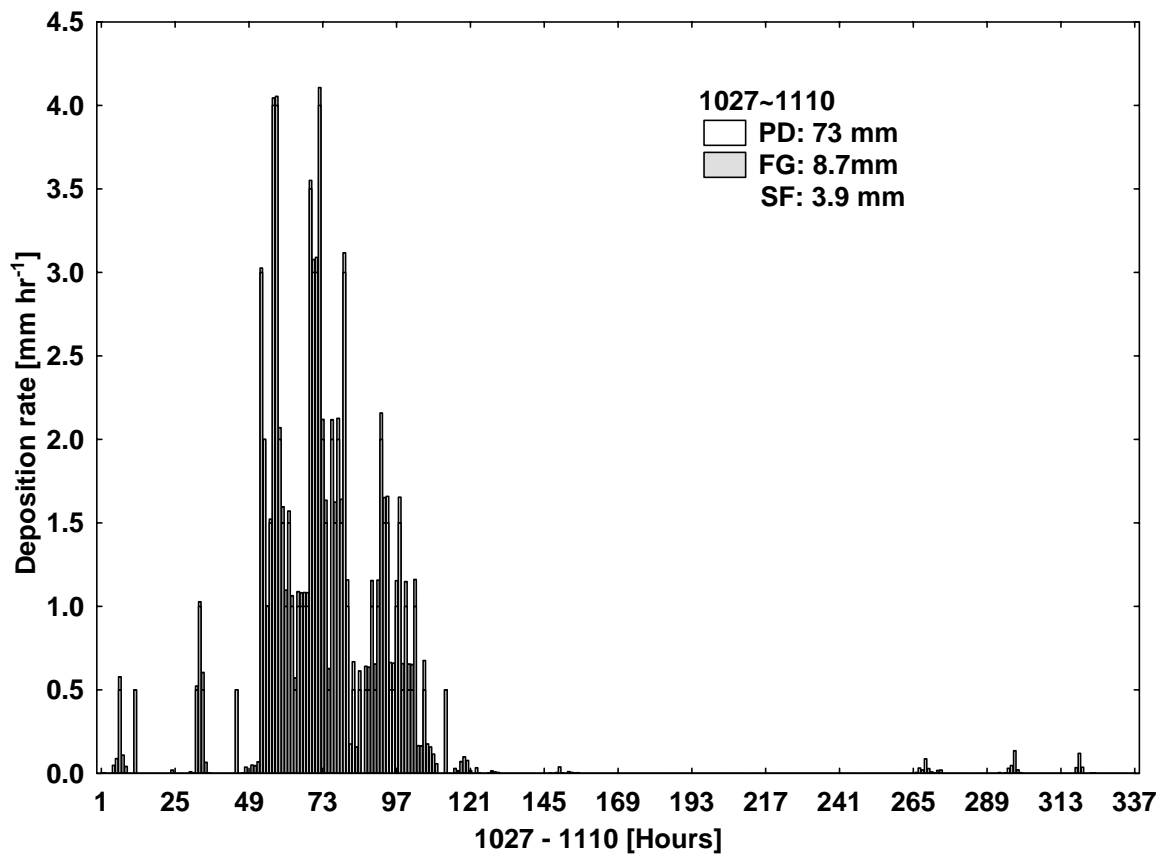
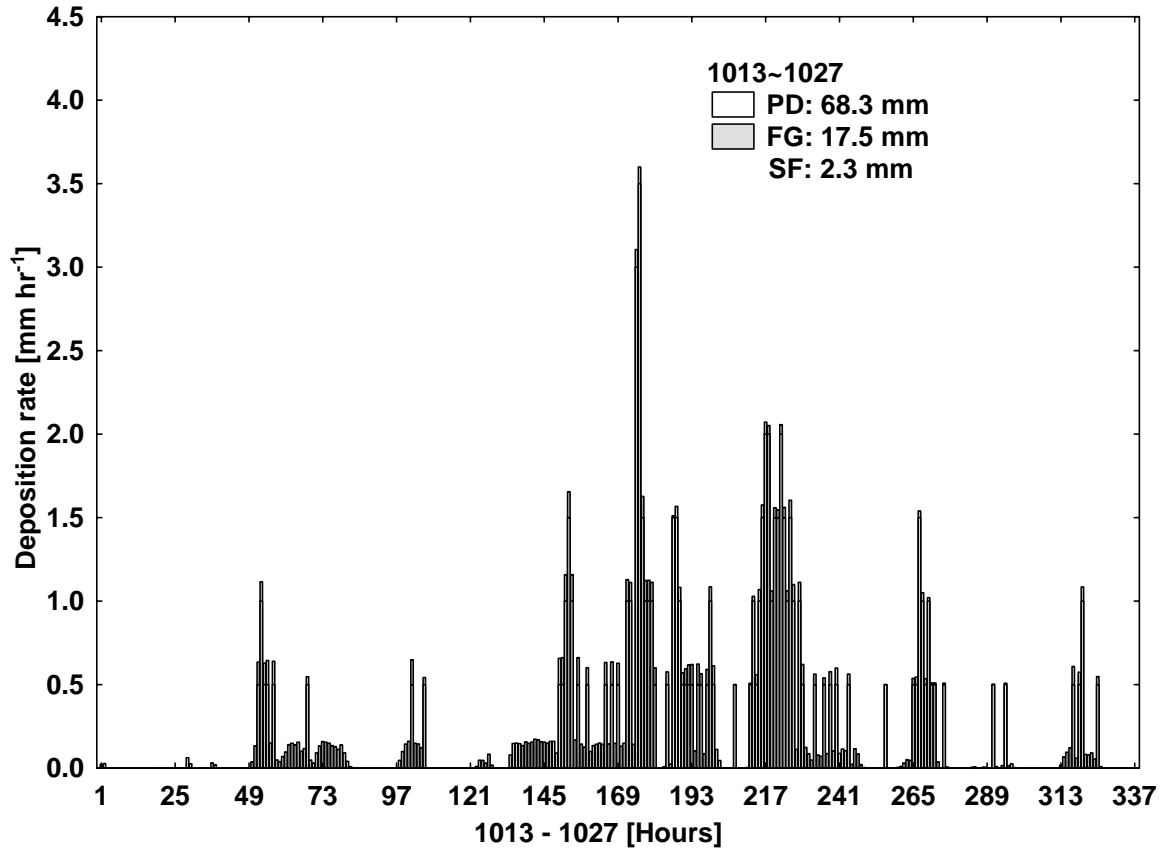


圖 26 10/13~27,10/27~11/10 兩段期間的降雨類型與幹流水量。

6.2 林分幹流水量之估算

陳耀德 (2003) 選取 5 棵平均胸高徑級的台灣扁柏代表樣樹，以胸高斷面積平均法估算林分幹流水量。因為取樣數量少，當選擇的代表樣樹所收集到的幹流水量為所有樹木的極端值時，將會過於低估或是高估整個林分的幹流水量，且較適用於樹齡相近的人工造林。在陳耀德 (2003) 的研究中，選取 5 棵平均胸高徑級的台灣扁柏代表樣樹，其中 1 棵樣樹的幹流水量是低於平均的極端值，以胸高斷面積平均法所估算的林分幹流水量比胸高徑分層法少了 1 倍以上。對於具有優勢樹種且樹齡分佈廣的林分，較佳的做法是先將樹木以胸高徑做合理的分層，每個徑級先選擇 1 棵樣樹，確認其所貢獻的幹流水量比例，並調查每一胸高徑級中樹木的數量，來推算每個胸高徑級所貢獻的幹流水量比例，若平均徑級所貢獻的幹流水量比例最大，則可以用胸高斷面積平均法，選擇平均徑級的樣樹來估算整個林分的幹流水量。

在本研究樣區中，是否可以使用胸高斷面積平均法，選擇平均胸高徑級的樣樹來估算整個林分的幹流水量。因為台灣扁柏胸高徑介於 15~19cm、20~24cm 的樣樹，在整個林分中所貢獻的幹流水量比例最大，分別為 32%、28.8%(表 14)，所以選擇 SF32~SF45 這 9 棵樣樹，使用胸高斷面積平均法，來估算整個林分的幹流水量。得到總幹流水量為 67.4(±7.3) mm，為大氣沈降量的 4.4(±0.5)%(表 15)。與胸高徑分層法所估算的結果，相差 0.2%，在標準誤的範圍內，所以在本研究區可以使用胸高斷面積平均法，選擇平均胸高徑級的樣樹來估算整個林分的幹流水量。

表 15 選取平均胸高徑級 9 棵樣樹，以胸高斷面積平均法估算林分幹流水量。

Sampling No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PD (mm)	68.3	73.0	313.2	32.9	89.8	57.9	211.3	20.0	129.8	25.5	2.5	135.0	61.1	130.5
FG (mm)	17.5	8.7	17.8	14.2	18.8	11.1	25.5	10.8	12.1	10.1	1.7	9.9	3.9	9.2
SF (mm)	2.18	4.88	19.40	1.17	5.18	1.54	10.30	0.49	6.98	0.50	0.01	7.06	2.04	5.62
SE	0.63	0.65	2.16	0.10	0.49	0.23	1.09	0.07	0.43	0.05	0.00	0.57	0.30	0.53
SF/PD %	3.19	6.69	6.19	3.55	5.77	2.66	4.88	2.42	5.38	1.95	0.55	5.23	3.34	4.31
SF/(PD+FG) %	2.54	5.97	5.86	2.48	4.77	2.23	4.35	1.58	4.92	1.40	0.33	4.87	3.14	4.02

在台灣扁柏老齡林中，因為只選取 5 棵台灣扁柏樣樹，採樣的次數也不多，所以無法準確地估算老齡林的林分幹流水量。使用樹冠投影面積法，初步估算老齡林的林分幹流水量為大氣沈降量的 $0.9(\pm 0.1)\%$ ，但在老齡林中有豐富的底層小樹，尚未得知其對林分幹流水量的貢獻。Manfroi *et al.* (2004) 在馬來西亞沙勞越的熱帶森林中，發現熱帶森林中的底層小樹對林分幹流水量的貢獻度高達 77%。因此初步的估算可能會低估了台灣扁柏老齡林的幹流水量。

表 2 是參考 Lewis (2003) 所整理出來對於幹流水的研究，各研究者使用的取樣方法、樣樹數量、估算方法及幹流水量在重力沈降量中的比例。從文獻中可以觀察到當研究者的目的是估算幹流水量，就會詳細列出取樣方法、估算方法，樣樹數量也大於 20 棵，估算出幹流水量在重力沈降量中的比例，這樣的數據，才有比較的意義。

若研究者的目的不是在估算幹流水量，只是在森林冠層水文平衡中，順帶提到幹流水，通常就不會列出取樣方法、估算方法，樣樹數量也小於 20 棵，在這樣的情況下，幹流水量在重力沈降量中的比例，這樣的數據，只能當作參考用，因為從本研究中可以得知，不同的取樣方法、估算方法，樣樹數量，在估算幹流水量上可能相差到 1 至 2 倍。

本研究在估算台灣扁柏林分幹流水量時，使用代表樣樹法，樣樹數量為 25 棵，經由統計分析確認可以代表整個台灣扁柏林分。並發現胸高徑分層法最適合用來估算台灣扁柏林分幹流水量，與 Hanchi & Rapp (1997) 所建議估算林分幹流水量的方法一致。

7. 結論

台灣扁柏的胸高徑、樹冠投影面積、通道障礙物與樹皮形態都是影響台灣扁柏單棵樣樹幹流水量的顯著因子，由於胸高徑最容易被量測，此外在統計上發現胸高徑與幹流水量的相關性最高，可解釋 71% 幹流水量的變異，所以非常適合用胸高徑來推測單棵樣樹的幹流水量，當台灣扁柏胸高徑越大時，樹冠投影面積也越大，可以收集到的幹流水量就越多。

台灣扁柏單棵樣樹所收集到幹流水量的多寡與重力沉降量的大小呈現線性正相關，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。當重力沉降量未超過樹冠攔截容量，雨水被樹冠所攔截，25 棵台灣扁柏樣樹的幹流水量未隨著胸高徑的變大而增加；當重力沉降量超過樹冠攔截容量，25 棵台灣扁柏樣樹的幹流水量隨著胸高徑的變大而呈線性增加。

台灣扁柏單棵樣樹的集中率，當超過了初始重力沉降量開始產生幹流水時，隨著重力沉降量的增加而增加；當超過了樹木將雨水轉換成幹流水的能力時，隨著重力沉降量的增加，集中率增加的幅度變小，或不再增加，所以整體來看，集中率隨著重力沉降量的增加呈現對數上升。30 棵台灣扁柏樣樹的集中率隨著胸高徑的變大而下降。

本研究區適合使用胸高徑分層法來估算台灣扁柏整個林分的幹流水量，依據每兩週重力沉降量由小至大，幹流水量為重力沉降量的 0.86%~5.52%。2005/10 至 2006/04，總幹流水量為重力沉降量的 4.7(±0.8)%，若考慮雲霧沉降量，則為大氣沉降量的 4.2 (±0.7)%，總幹流水量在大氣沉降量中所占的比例比在重力沉降量中所占的比例大約少了 0.5%。由重力沉降量來預測台灣扁柏森林幹流水量的模式為 $SF(mm) = 0.0553 * PD(mm) - 0.9594$ ， $R^2 = 0.9732$ 。

8. 建議未來研究方向

本研究只針對樹木特性對幹流水量的影響做探討，無法深入了解降雨類型對幹流水量的影響，若使用傾斗式雨量計，就可以測量在單次降雨事件中，開始產生幹流水的初始重力沉降量，以及降雨類型(強度)對幹流水量的影響。

鴛鴦湖雲霧森林中的台灣扁柏樹幹上有豐富的附生性苔蘚，是影響幹流水量的因子之一，移除附生性苔蘚，能分別出台灣扁柏樹皮及附生性苔蘚對幹流水量的個別影響。

9. 引用文獻

- 朱慧君 (2005)。台灣扁柏森林生態系養分存量與枯落物養分流量之研究。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 吳敏如 (2004)。以微氣候模式估算雲霧森林中台灣扁柏的雲霧沈降量。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 邱志明、羅卓振南、鍾旭和 (1995)。棲蘭山檜木天然更新地--台灣扁柏幹形與樹冠構造之研究。林業試驗所研究報告季刊，10(1)，121-130。
- 陳俐如 (2005)。鴛鴦湖地區台灣扁柏樹液流動之探討。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 陳凱欣 (2005)。鴛鴦湖台灣扁柏森林生物量與冠層結構。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 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，花蓮縣。
- 彭令豐 (1988)。棲蘭山檜木天然下種更新造林之實施及現況。現代育林，3(2)，20-23。
- 曾桂香 (2006)。鴛鴦湖地區台灣扁柏森林土壤呼吸之研究。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 葉青峰 (2004)。台灣扁柏森林的生物量以及雲霧沈降量估算。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 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，花蓮縣。
- 鄧振華 (2006)。鴛鴦湖台灣扁柏天然下種更新林附生性苔蘚植物組成、分佈與生物量之研究。國立東華大學自然資源所碩士論文，花蓮縣。
- 羅勻謙 (2004)。鴛鴦湖地區台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，花蓮縣。
- Aboal, J. R., Morales, D., Hernández, M., & Jiménez, M. S. (1999). The measurement and modeling of the variation of stemflow in a laurel forest in Tenerife, Canary Islands. *Journal of Hydrology*, 221, 161-175.

- 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*, 237-244.
- Bellot, J., & Escarre, A. (1998). Stemflow and throughfall determination in a resprouted Mediterranean holm-oak forest. *Annales des Sciences Forestieres*, *55*, 847-865.
- Bruijnzeel, L. A., & Proctor, J. (1994). *Hydrology and biochemistry of tropical montane cloud forest: What do we really know?* New York: Springer-Verlag.
- Cape, J. N., Brown, A. H. F., Robertson, S. M. C., Howson, G., & Paterson, I. S. (1991). Interspecies comparisons of throughfall and stemflow at three sites in northern Britain. *Forest Ecology and Management*, *46*, 165-177.
- Cavelier, J., Jaramillo, M., Solis, D., & León, D. d. (1997). Water balance and nutrient inputs in bulk precipitation in tropical montane cloud forest in Panama. *Journal of Hydrology*, *193*, 83-96.
- 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. *Atmospheric Research*, *64*, 159-167.
- Chang, S.-C., & Matzner, E. (2000). The effect of beech stemflow on spatial patterns of soil solution chemistry and seepage fluxes in a mixed beech/oak stand. *Hydrological Processes*, *14*, 135-144.
- Crockford, R. H., & Richardson, D. P. (1990). Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in southeastern Australia: II stemflow and factors affecting stemflow in a dry sclerophyll eucalypt forest and a *Pinus radiata* plantation. *Hydrological Processes*, *4*, 145-155.
- 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*, 2903-2920.
- Demoz, B. B., Collett Jr, J. L., & Daube Jr, B. C. (1996). On the caltech active strand cloudwater collectors. *Atmospheric Research*, *41*, 47-62.

- Durocher, M. G. (1990). Monitoring spatial variability of forest interception. *Hydrological Processes*, 4, 215-229.
- Falkengren-Grerup, U. (1989). Effect of stemflow on beech forest soils and vegetation in southern Sweden. *Journal of Applied Ecology*, 26(1), 341-352.
- Fan, H. B., & Hong, W. (2001). Estimation of dry deposition and canopy exchange in Chinese fir plantations. *Forest Ecology and Management*, 147, 99-107.
- Ferrall, E. P., Beuken, R. V. D., Boyle, G. M., Cummins, T., & Aherne, J. (1998). Interception of seasalt by coniferous and broadleaved woodland in a maritime environment in western Ireland. *Chemosphere*, 36, 985-987.
- Ford, E. D., & Deans, J. D. (1978). The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young Sitka spruce plantation. *Journal of Applied Ecology*, 15(3), 905-917.
- Gash, J. H. C., Lloyd, C. R., & Lachaud, G. (1995). Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, 170, 79-86.
- Hanchi, A., & Rapp, M. (1997). Stemflow determination in forest stands. *Forest Ecology and Management*, 97, 231-235.
- Herwitz, S. R. (1986). Infiltration-excess caused by stemflow in a cyclone-prone tropical rainforest. *Earth surface processes and landforms*, 11, 401-412.
- Herwitz, S. R. (1987). Raindrop impact and water flow on the vegetative surfaces of trees and the effect on stemflow and throughfall generation. *Earth surface processes and landforms*, 12, 425-432.
- Herwitz, S. R., & Levia Jr., D. F. (1997). Mid-winter stemflow drainage from bigtooth aspen (*Populus grandidentata* michx.) in central Massachusetts. *Hydrological Processes*, 11(2), 169-175.
- Jiménez, M. S., Cermák, J., Kucera, J., & Morales, D. (1996). Laurel forests in Tenerife, Canary Islands: The annual course of sap flow in laurus trees and stand. *Journal of Hydrology*, 183, 307-321.

- Johnson, R. C. (1990). The interception, throughfall and stemflow in a forest highland Scotland and the comparison with other upland forests in the U.K. *Journal of Hydrology*, *118*, 281-287.
- Kittredge, J. (1948). *Forest influences. The effects of woody vegetation on climate, water and soil.*: McGraw-Hill, New York.
- Kittredge, J., Loughhead, H. J., & Mazurak, A. (1941). Interception and stemflow in a pine plantation. *Journal of Forestry*, *39*, 505-522.
- Kuraji, K., Tanaka, Y., Tanaka, N., & Karakama, I. (2001). Generation of stemflow volume and chemistry in a mature Japanese cypress forest. *Hydrological Processes*, *15*, 1967-1978.
- Levia Jr., 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*, 1-29.
- Lewis, J. (2003). Stemflow estimation in a redwood forest using model-based stratified random sampling. *Environmetrics*, *14*, 559-571.
- Li, H.-L., & Keng, H. (Eds.). (1994). *Flora of Taiwan* (2nd ed. Vol. 1). Taipei.
- Likens, G. E., & Bormann, F. H. (1995). *Biogeochemistry of a forested ecosystem* (2nd ed.). New York: Springer-Verlag.
- Likens, G. E., & Eaton, J. E. (1970). A polyurethane stemflow collector for trees and shrubs. *Ecology*, *51*, 938-939.
- Liu, W., Fox, J. E. D., & Xu, Z. (2003). Nutrient budget of a montane evergreen broad-leaved forest at Ailao mountain national nature reserve, Yunnan, southwest China. *Hydrological Processes*, *17*, 1119-1134.
- Llorens, P., Poch, R., Latron, J., & Gallart, F. (1997). Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area I. Monitoring design and results down to the event scale. *Journal of Hydrology*, *199*, 331-345.
- Lloyd, C. R., & de Marques, A. O. F. (1988). Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, *42*, 63-73.

- Lovett, G. M. (1984). Rates and mechanisms of cloud water deposition to a subalpine balsam fir forest. *Atmospheric Environment*, 18(2), 361-371.
- Manfroi, O. J., Koichiro, K., Nobuaki, T., Masakazu, S., Nakagawa, M., Nakashizuka, T., Lucy, C. (2004). The stemflow of trees in a Bornean lowland tropical forest. *Hydrological Processes*, 18, 2455-2474.
- Marin, C. T. n., 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, 40-57.
- Martinez-Meza, E., & Whitford, W. G. (1996). Stemflow, throughfall and channelization of stemflow by roots in three Chihuahuan desert shrubs. *Journal of Arid Environments*, 32, 271-287.
- Matzner, E. (1989). *Acidic precipitation: Case study solling*. In: *Acidic precipitation*. New York: Springer-Verlag.
- Mauchamp, A., & Janeau, J. L. (1993). Water funneling by the crown of *Flourensia cernua*, a Chihuahuan desert shrub. *Journal of Arid Environments*, 25, 299-306.
- Návar, J. (1993). The causes of stemflow variation in three semi-arid growing species of northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*, 145, 175-190.
- Návar, J., Charles, F., & Jurado, E. (1999). Spatial variations of interception loss components by Tamaulipan thornscrub in northeastern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 124, 231-239.
- Price, A. G., Dunham, K., Carleton, T., & L.Band. (1997). Variability of water fluxes through the black spruce (*Picea mariana*) canopy and feather moss (*Pleurozium schreberi*) carpet in the boreal forest of northern Manitoba. *Journal of Hydrology*, 196, 310-323.
- San Jose, J. J., & Montes, R. (1992). Rainfall partitioning by a semi-deciduous forest grove in the savannas of the Orinoco Llanos. *Journal of Hydrology*, 132, 249-262.
- Schroth, G., Silva, L. F. d., Wolf, M.-A., Teixeira, W. G., & Zech, W. (1999). Distribution of throughfall and stemflow in multi-strata agroforestry, perennial monoculture, fallow and primary forest in central Amazonia, Brazil. *Hydrological Processes*, 13, 1423-1436.

- Steinbuck, E. (2002). *The influence of tree morphology on stemflow in a redwood region second-growth forest*. California State University, California.
- Veneklaas, E. J., & Van Ek, R. (1990). Rainfall interception in two tropical montane rain forests, Colombia. *Hydrological Processes*, 4, 311-326.
- Voigt, G. K. (1960). Distribution of rainfall under forest stands. *Forest Science*, 6, 2-10.
- Wei, X., Liu, S., Zhou, G., & Wang, C. (2005). Hydrological processes in major types of Chinese forest. *Hydrological Processes*, 19, 63-75.
- Whitford, W. G., Anderson, J., & Rice, P. M. (1997). Stemflow contribution to the 'fertile island' effect in creosotebush, *Larrea tridentata*. *Journal of Arid Environments*, 35, 451-457.

附錄 1 實驗期間重力沉降量、雲霧沉降量與幹流水量。

Date	20051027	20051110	20051124	20051208	20051222	20060105	20060206	20060215
PD (mm)	68.3	73.0	313.2	32.9	89.8	57.9	211.3	20.0
FG (mm)	17.5	8.7	17.8	14.2	18.8	11.0	25.5	10.8
SF11 (mL)		483	10950	600	2000	860	4300	300
SF12 (mL)		550	20622	1800	6300	1650	15264	430
SF13 (mL)		491	6726	620	1650	600	5250	140
SF14 (mL)		1322	19464	700	3000	1220	16762	350
SF15 (mL)			54974	3880	10586	3638	22938	1260
SF21 (mL)	2568	5954	43148	2280	6229	1573	15708	640
SF22 (mL)		5182	36080	2440	7892	3100	15292	1000
SF23 (mL)		7498	56036	4080	14877	2404	22776	800
SF24 (mL)	14754	26026	106000	3638	22360	5065	46058	2200
SF25 (mL)	10739	17534	83475	5180	20364	3402	44811	2640
SF31 (mL)		63521	140000	17438	69612	33882	121896	10580
SF32 (mL)	8861	20889	130515	6386	26574	6476	55908	2050
SF33 (mL)	19417	33577	140000	7547	35709	14596	75702	3960
SF34 (mL)		30025	140000	7740	34085	10130	68597	2100
SF35 (mL)		7186	64029	3096	14799	6000	24949	2140
SF41 (mL)		30025	140000	6192	35100	9724	59969	1230
SF42 (mL)	42611	68089	200066	13158	58446	19468	119642	5940
SF43 (mL)	35912	53371	140000	11030	47281	9115	86868	5990
SF44 (mL)	23529	35100	121887	10449	39160	11348	81285	4470
SF45 (mL)	26929	47281	140000	11804	46266	10130	98541	4860
SF51 (mL)	6194		175000	9152	42054	7232	77640	3060
SF52 (mL)	29409	58576	175000	18226	56035	14858	122757	4280
SF53 (mL)	30108	61118	175000	12896	61119	12316	123393	7440
SF54 (mL)	20894	20449	157071	9568	30617	8503	61754	3600
SF55 (mL)	35700	64931	175000	13936	66202	21467	140550	7800
SF61 (mL)								570
SF62 (mL)							53769	3550
SF63 (mL)							31032	980
SF64 (mL)							35948	2010
SF65 (mL)							56227	3830

附錄 1 (續)

Date	20060302	20060314	20060316	20060330	20060413	20060427	20060511	20060525
PD (mm)	129.8	25.5	2.5	135.0	61.1	130.5	167.4	159.2
FG (mm)	12.1	10.1	1.7	9.9	3.9	9.2		
SF11 (mL)	3800	400	40	3160	1100	2760	3620	3360
SF12 (mL)	7600	1120	100	7120	2380	6500	8370	9621
SF13 (mL)	2500	340	30	1200	720	1420	2440	1820
SF14 (mL)	8600	1210	50	8300	2330	3810	8600	6730
SF15 (mL)	10972	850	90	16050	4660	10972	10200	14446
SF21 (mL)	9472	680	40	8225	3020	8225	10303	11135
SF22 (mL)	7400	820	70	5730	2400	4850	10719	12382
SF23 (mL)	15292	800	70	14669	8240	12798	19034	17371
SF24 (mL)	33793	1900	40	36911	11920	32338	48968	46474
SF25 (mL)	28181	1800	60	25686	9400	20281	27765	27141
SF31 (mL)	112238	9420	930	103103	36113	101073	122800	142166
SF32 (mL)	39412	2820	60	36621	14620	36621	45248	42203
SF33 (mL)	48039	3700	180	46263	10460	31038	38143	35098
SF34 (mL)	50577	3750	20	55906	24560	52861	69608	59966
SF35 (mL)	33829	2500	90	35606	14050	34844	45248	36621
SF41 (mL)	36621	3020	30	36113	12200	31038	51338	42457
SF42 (mL)	58697	4000	140	80266	11000	54637	41188	79758
SF43 (mL)	58697	1800	40	46771	11040	37636	52353	63518
SF44 (mL)	57936	4500	170	54383	8520	31546		51338
SF45 (mL)	68086	5700	160	65041	20140	44741	69101	70623
SF51 (mL)	53497	2750	100	55081	12240	36971	56669	56034
SF52 (mL)	84001	4920	130	104328	40783.2	92890	132288	108141
SF53 (mL)	100206	6450	170	99880	21810	63659	86536	80499
SF54 (mL)	65889	5200	70	66201	14110	50950	65566	78592
SF55 (mL)	94805	6600	180	78275	19100	66201	89077	83994
SF61 (mL)	12290	1200	80	26116	8560	21200	29803	33183
SF62 (mL)	26731	2400	140	27960	7800	21200	32261	39021
SF63 (mL)	11368	1650	60	10139	5399	11061	16284	16591
SF64 (mL)	38099	3300	100	43937	15300	43322	65444	68824
SF65 (mL)	35641	4100	230	32261	11550	28574	35948	31647