

國立東華大學自然資源管理研究所論文

指導教授：張世杰 博士

鴛鴦湖地區台灣扁柏老齡林及
更新林穿落水量之研究

The study of throughfall in an old-growth and a
young yellow cypress stand in Yung-Yang Lake
forest ecosystem



研究生：林志偉

中華民國九十六年一月

謝誌

感謝張世杰老師兩年多來的收留及指導，讓我有機會踏進美麗的鴛鴦湖雲霧森林中並完成此研究，而在鴛鴦湖野外工作的期間，是我最充實、快樂的階段。感謝林登秋及林能暉兩位老師在百忙之中，不辭勞遠地到花蓮來，給予指導及建議，特別要感謝夏禹九老師的指導，甚至在口試後仍不斷給予建議及指導。也要感謝本所陳紫娥老師及吳海音老師，在專討報告時不吝給予意見。

感謝實驗室的伙伴們：桂香、昭豪、子弘、意婷、欣民、妍綾、家欣、銘哲、顥達、天翊及靜莉，幫忙在野外的的工作。感謝凱欣學姐，在畢業後仍抽空回來幫忙架設收集器；感謝美娟學姐在百忙中，幫忙修改論文及投影片，以及要感謝俞婷幫忙修改英文摘要。沒有大家的幫忙，這個實驗無法完成，真的謝謝大家。

感謝我的家人支持，讓我除了學業外能夠無後顧之憂，讓我能在此遙遠的東部，能專心無慮的研究。感謝啟偉及尤夕，給予心靈慰藉及鼓勵，讓我能堅持下去，完成研究。以及要感謝高中至今的死黨們的提醒及刺激，我要畢業啦，別催了。

最後感謝曾經幫助及關心我的每一個人，你知道我是在說你，別客氣收下我的感謝吧。

Abstract

Spatial variation of throughfall was investigated in two *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana* stands of different age (10-50 vs. 300-400 years old) in northeastern Taiwan. In each stand, 100 throughfall collectors were installed along a randomly selected 100-m transect with 1 m distance between consecutive collectors. The collectors were built up with funnels of 12 cm in diameter and 2-L collecting bottles, which limited the collection capacity to a maximum of 190 mm. The water volume of the collectors were recorded every two weeks from October 2005 to November 2006 and totally 22 useful samples were used for analysis.

The results showed that the stand age affected the amount of throughfall by far: throughfall accounted for 92% of bulk precipitation in the old-growth *Chamaecyparis* stand but only 72% for the young one. In both stands, throughfall correlated linearly with bulk precipitation. Within each stand, however, the amount of throughfall exhibited high spatial variation. On average, the smallest amount of throughfall occurred in the area 1.0-1.5 m away from stems for the old-growth stand and 0.5-1.0 m for the young stand. This pattern changed with the amount of bulk precipitation: when bulk precipitation was extremely little, the throughfall amount increased with increasing distance to stems; when bulk precipitation was large, the spatial variation decreased. The leaf area index (LAI) and openness above each collector were measured using hemispherical photography. The average LAI of the old-growth and the young stand was 6.2 and 5.2, respectively. The openness of the canopy may influence the amount of fog interception and further affect the amount of throughfall. By use of semivariogram, the distance of spatial correlation of throughfall was 14.0-42.0 m in the old-growth stand and 2.0-80.0 m in the young stand. On the other hand, the amount of throughfall showed a cyclic variation pattern using Fourier analysis with periods of 2.0-16.7 m and 2.0-20.0 m for old-growth and young stand, respectively. The necessary number of collector to reduce the sampling error to 10% was 8-61 for the old-growth stand and 12-33 for the young stand. These numbers reduced to 7 and 9 when total water volume of the 22 sampling events were analyzed.

Keyword: *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana* ; throughfall ; spatial variability

摘要

本研究於鴛鴦湖地區台灣扁柏老齡林及更新林中，沿穿越線間隔 1m，架設穿落水收集器，以瞭解兩不同林齡台灣扁柏林穿落水沈降情形及空間分佈的特性。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占重力沈降 92%，更新林穿落水占重力沈降 72%，兩林分穿落水量與林外降雨量及總沈降量均成線性正相關。兩林分穿落水與離樹幹距離並無明顯相關，老齡林最小水量發生於離樹幹 1.0-1.5m 處；更新林穿落水最小水量發生於離樹幹 0.5-1.0m 處。當降雨量極小時(e.g. 事件 9, BP=2.5mm; 事件 13, BP=3.0mm) 反而為緊鄰樹幹的位置穿落水量最低。而當降雨量大時，各區間穿落水量則差異不大。利用半球面影像分析求得各點開闊度及葉面積指數，老齡林葉面積指數平均值為 6.2，更新林葉面積指數平均值為 5.2。開闊度影響雲霧截留沈降，進而影響穿落水水量。半變異元分析，老齡林空間相關距離為 3.0-42.0m；更新林空間相關距離為 2.0-80.0 m。使用傅立葉轉換求得水量變化週期，老齡林穿落水量變化週期為 2.0- 16.7 m，更新林則為 2.0- 20.0 m。因應穿落水空間變異，在 10% 誤差下，所需的穿落水收集器老齡林為 8-61 個，更新林則需 12-33 個。若以實驗期間所收集的 22 次穿落水總沈降量估算，老齡林需 7 個，更新林需 9 個收集器。

關鍵字：台灣扁柏、穿落水、空間變異

目錄

1. 前言.....	1
2. 文獻回顧.....	1
2.1 大氣沈降及穿落水.....	1
2.2 穿落水的空間變異.....	4
2.2.1 影響穿落水變異的因子.....	6
2.2.2 估算穿落水水量的方法.....	8
2.3 穿落水空間變異之研究.....	10
2.4 國內穿落水量相關研究.....	13
2.5 研究目的.....	14
3. 材料與方法.....	15
3.1 樣區概述.....	15
3.2 實驗設計.....	17
3.2.1 樣線選擇.....	17
3.2.2 沈降量的量測.....	17
3.2.3 兩林份調查.....	19
3.3 穿落水空間變異分析.....	21
4. 結果.....	23
4.1 穿落水與重力沈降、雲霧沈降的關係.....	26
4.2 所需收集器數目.....	29
4.3 樹冠層對穿落水的影響.....	30
4.3.1 林分資料.....	30
4.3.2 穿落水量與離樹幹距離.....	32
4.3.3 穿落水量與開闊度指數之關係.....	33
4.4 空間變異分析.....	34
4.4.1 半變異元分析.....	34
4.4.2 傅立葉分析.....	34
5. 討論.....	38
5.1 穿落水之比較.....	38

5.2	所需收集器數目	41
5.3	穿落水量與離樹幹距離之關係	43
5.4	穿落水量與開闊度之關係	44
5.5	半變異元分析結果	44
5.6	傅立葉轉換週期變化	45
5.7	冠層水文收支	46
6.	結論	49
7.	引用文獻	50

圖目錄

圖 1	森林冠層水分輸入、輸出示意圖	2
圖 2	半變異元與對應於三個不同間隔距離的距離散佈圖	12
圖 3	樣區位置圖	16
圖 4	(a)穿落水收集器；(b)穿落水收集器野外放置情形	18
圖 5	以連續函數圖形繪製的半變異圖	22
圖 6	老齡林穿落水量與重力沉降關係圖	27
圖 7	更新林穿落水量與重力沉降關係圖	27
圖 8	老齡林穿落水量與總沉降關係圖	28
圖 9	更新林穿落水量與總沉降關係圖	28
圖 10	老齡林台灣扁柏胸高徑與冠幅關係圖	31
圖 11	更新林台灣扁柏胸高徑與冠幅關係圖	31
圖 12	各降雨事件時離樹幹距離與穿落水水量之關係圖	32
圖 13	不同降雨強度時開闊度與穿落水水量之關係圖	33
圖 14	不同降雨強度穿落水水量半變異圖	36
圖 15	老齡林 22 次總和水量快速傅立葉轉換分析圖	37
圖 16	更新林 22 次總和水量快速傅立葉轉換分析圖	37
圖 17	兩不同口徑收集器穿落水量關係圖	39
圖 18	老齡林穿落水占總沉降量比例與總沉降量之關係圖	39
圖 19	更新林穿落水占總沉降量比例與總沉降量之關係圖	40
圖 20	更新林 20 cm 口徑收集器穿落水占重力量比例與重力沉降量之關係圖	40
圖 21	老齡林穿落水變異係數與林外降雨關係圖	42
圖 22	更新林穿落水變異係數與林外降雨關係圖	43
圖 23	老齡林截留率與總沉降量關係圖	48
圖 24	更新林林截留率與總沉降量關係圖	48

表目錄

表 1	各地穿落水與林外雨間的比例.....	4
表 2	單一樹冠尺度下，穿落水水量空間變異之研究.....	5
表 3	老齡林與更新林基本資料.....	17
表 4	林外雨及穿落水資料.....	24
表 5	各事件沈降量及穿落水所佔比例.....	25
表 6	不同強度降雨時，所需收集器數量.....	29
表 7	兩林分樣線台灣扁柏基本資料.....	30
表 8	兩林分各事件穿落水所得空間相關距離及傳立葉轉換週期.....	35
表 9	各地所需穿落水收集器數目.....	42
表 10	台灣扁柏冠層水文收支.....	47

1. 前言

大氣沈降(atmospheric deposition)是水分與養分輸入到森林生態系的重要途徑。大氣沈降經過樹冠層攔截後大部分藉由穿落水(throughfall)及幹流水(stemflow)之路徑落至森林地面，因此穿落水水量的研究對於瞭解生態系養分循環的狀況是不可忽視的重要部分(Parker, 1983)。森林冠層結構的異質性是造成穿落水水量空間變異的最大因素。而瞭解穿落水水量空間上系統性的變化，則有助於將取樣及分析的誤差降至最小 (Seiler, 1995)。

由於穿落水是水分及養分進入森林生態系的重要途徑，所以穿落水水量對於估算生態系養分流量的模式來說是非常重要的參數，若能先瞭解森林冠層的結構及其對穿落水水量的影響，能提高模式估算流量的可靠性(Raat et al., 2002)。

樣區位置的不同及樹種的差異等因素都會影響穿落水的水量，即使是相同樹種但林齡的不同，亦會造成冠層結構的差異進而影響穿落水的水量。本研究選擇鴛鴦湖地區位在同一坡面上具相異林齡的兩座台灣扁柏森林，進行穿落水水量之試驗，藉以探討林齡對穿落水水量之影響。

2. 文獻回顧

2.1 大氣沈降及穿落水

大氣沈降是水分與養分輸入到森林生態系的重要途徑(Eaton et al., 1973)。以沉降的方式區分，大氣沈降可分成重力沉降(precipitation deposition, PD)及截留沉降(interception deposition, ID)兩種。大氣中的物質受到重力作用而沉降則稱之為重力沉降；若大氣中的物質因大氣擾動而被植被攔截沉降進入森林則稱之為截留沉降(Matzner, 1989)。

根據 Parker (1983)對林內沈降的定義，通過冠層滴落至森林地表而沒有被冠層攔截的水滴稱之為穿落水(throughfall, TF)，順著枝條或樹幹流至樹木基部的沈降稱之為幹流水(stemflow, SF)，這個定義最常被使用及接受。穿落水又可細分成自由穿落(free throughfall, Th)及冠層滴落(canopy drip, D)。自由穿落，即沈降通過冠層時途經樹冠孔隙(gap)滴落至地表未與樹木表面接觸，冠層滴落則為經植被表面再滴至地表的沈降(Rutter et al., 1971)。本研究所定義的穿落水即為自由穿落與冠層滴落的總合($TF=D+Th$)。

森林冠層中水的收支平衡可用一簡單式子表示：

$$PD + ID = TF + SF + IL \quad (\text{公式 1})$$

式中：

PD：重力沉降

SF：幹流水

ID：截留沉降

IL：截留流失

TF：穿落水

森林冠層水分輸入部分是經由重力沉降與截留沉降。利用穿落水、幹流水及截留流失將水分輸出森林冠層(圖 1)。其中，重力沉降、穿落水與幹流水三者可用儀器或容器收集後，直接計算其沉降量。而量化截留沉降的難度較高，需要較精密的儀器分析或以模式分析才能求其沉降量(Krupa, 2002)。欲求得未知的截留流失量，可以用所收集及求得的重力沉降、截留沉降、幹流水及穿落水，再利用公式 1 計算求出截留流失量。然而穿落水占整個沈降的比例極大，若忽視穿落水的空間變異將使推估森林水分循環產生誤差。

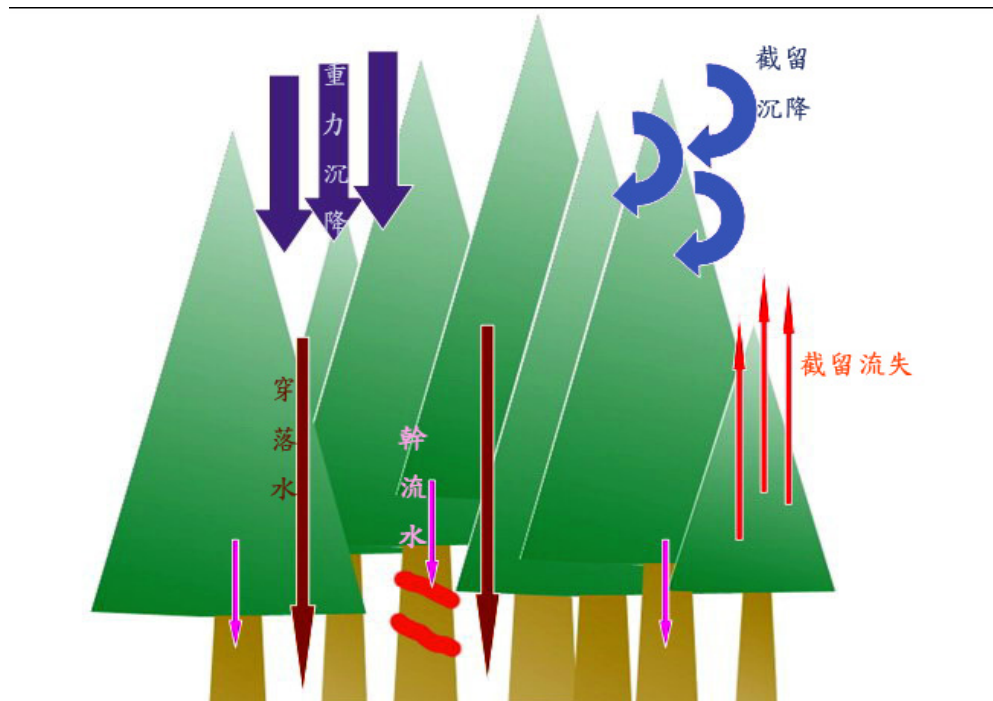


圖 1 森林冠層水分輸入、輸出示意圖。森林冠層水分輸入部分是經由重力沉降與截留沉降。利用穿落水、幹流水及截留流失將水分輸出森林冠層。

早期的森林水文循環研究即有對穿落水定量，如 Voigt (1960)於美國康乃迪克鐵杉林(*Tsuga canadensis*)的觀測，穿落水為林外降雨的 60.9%，而該地 35 年生紅松(*Pinus resinosa*)穿落水為林外降雨的 80.1%，山毛櫸(*Fagus grandifolia*)穿落水為林外降雨的 65.7%，不同樹種穿落水佔的比例不同；Rothacher (1963)於美國西北部進行花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)穿落水觀測，林分密度甚高的花旗松老齡林，穿落水約為雨量的 75 - 92%間，雨量愈大時穿落水佔雨量的比率愈大，當雨量超過 200 mm 以上時，穿落水甚至可達雨量的 96%。Helvey and Patric (1965)於美國東部進行的穿落水觀測，天然闊葉林的穿落水約為雨量的 90%。Rogerson and Byrnes (1968)觀測天然闊葉林與紅松人工林穿落水量的差異，發現兩者的穿落水約為降雨量的 90%，差異不顯著。表 1 整理各地穿落水與林外雨之間的比例，顯示各地穿落水占總沈降量的比例相當高，但各地之間的差異頗大。

穿落水除了攜帶原本大氣中的營養物質外，通過森林冠層時也淋洗(leaching)樹冠表面的營養物質一併滴落至森林地表，是森林中水分及養分重要的來源之一(Lin, 2000)。儘管穿落水所提供的養分較枯落物(litterfall)少，但是所含的水分是植物所必須，溶於其中的礦物質也較容易被植物所吸收(Parker, 1983)。與幹流水相比，穿落水所提供的水分及養分較多(Chuyong, 2004; Tobón, 2004)。Tobón et al. (2004)在哥倫比亞的研究，大氣沈降中高達 98%(其中 38%為乾沈降及雨水與冠層交換，62%來自雨水)的營養鹽是靠穿落水輸入地表。鴛鴦湖地區台灣扁柏(*Chamaecyparis obtusa* var. *formosana*)更新林中，離子輸入的主要途徑均為穿落水(氫離子藉由幹流水輸入所佔的比例較高外(33%)，其餘離子>95%由穿落水輸入地表)(陳耀德，2003)。

表 1 各地穿落水(TF)與林外雨(BP)間的比例。各地穿落水比例從 43%-100%，為森林冠層水分重要的途徑。

樹種	樹齡(yr)	TF/BP(%)	引用文獻
<i>Picea sitchensis</i>	14	43	Ford and Deans (1978)
<i>Bactris gasipaes</i>	-	46.4-97.4	Schroth et al. (1999)
<i>Picea mariana</i>	60-120	56-69	Carleton and Kavanage (1990)
<i>Tsuga canadensis</i>	-	60.9	Voigt (1960)
<i>Fagus grandifolia</i>	[all ages]	65.7	Voigt (1960)
<i>Picea sitchensis</i>	50	69	Johnson (1990)
<i>Quercus ilex</i>	-	75	Bellot and Escarre (1998)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	old-growth	75-96	Rothacher (1963)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	25	78	Pypker et al.(2005)
<i>Pinus resinosa</i>	35	80.1	Voigt (1960)
Tropical rain-forest	[all ages]	87.2	Asdak et al. (1998)
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	10-50	87.4	陳耀德 (2003)
<i>Acer saccharum</i>	dbh=16-15	89	Eaton et al. (1973)
Broad-leaved tree	-	90	Helvey and Patric (1965)
Broad-leaved tree	-	90	Rogerson and Byrnes (1968)
<i>Pinus pinaster</i>	18	82-100	Loustau et al. (1992)

2.2 穿落水的空間變異

穿落水水量的空間變異會影響土壤濕度(Bouten et al., 1992; Schume et al., 2003; Raat et al., 2002)、土壤水(Seiler and Matzner, 1995; Manderscheid and Matzner, 2000)、地下水(Bottcher et al., 1997)及地表逕流的化學組成(Beier, 1998)，進而影響植物對水分、養分的吸收，造成養分循環的空間異質性，因此研究穿落水水量的空間變異是重要的。

對於穿落水空間變異的研究，早期多是在單一樹冠尺度下，測量距樹幹不同距離的穿落水水量。在 19 世紀末，Hoppe (1896)於德國的研究發現，樹冠結構為系統性的變化，因而造成穿落水量呈梯度變化的。有些研究結果顯示離樹愈遠，穿落水水量愈少(e.g. Voigt, 1960; Ford and Deans, 1978; Herwitz, 1987)；有些則發現離樹幹愈遠穿落水水量愈大

(e.g. Aussenac, 1970; Beier et al., 1993; Johnson, 1990)；另外也有研究結果顯示穿落水水量與離樹幹遠近無關 (Loustau et al., 1992; Seiler and Matzner, 1995; Stout and McMahon, 1961)(表 2)。

表 2 單一樹冠尺度下，穿落水水量空間變異之研究。

穿落水水量的變異	樹種	樹齡(yr)	引用文獻
離樹愈近穿落水水量愈大	<i>Tsuga canadensis</i>	35	Voigt (1960)
	<i>Picea sitchensis</i>	14	Ford and Deans (1978)
	Tropical rain-forest	DBH>35cm	Herwitz (1987)
離樹愈近水量穿落水愈小	<i>Picea abies</i>	24	
	<i>Pinus sylvestris</i>	29	Aussenac (1970)
	<i>Abies grandis</i>	33	
	<i>Picea sitchensis</i>	50	Johnson (1990)
	<i>Picea sitchensis</i>	30	Pedersen(1992)
	<i>Picea abies</i>	40	Beier et al.(1993)
風雨大，離樹近水量大；風雨小，離樹遠水量大	<i>Picea abies</i>	60	Kittredge et al. (1941)
穿落水水量與離樹幹距離無關	<i>Picea abies</i>	140	Seiler and Matzner(1995)
	<i>Pinus pinaster</i>	18	Loustau et al.(1992)
	<i>Quercus falcate</i>		
	<i>Carya ovata</i>		
	<i>Quercus alba</i>	N/A	Stout and McMahon(1961)
	<i>Juniperus virginiana</i>		

2.2.1 影響穿落水變異的因子

穿落水的水量與樣站氣候、樹齡或林齡、物候狀況及風向有關，且穿落水的水量有高度空間變異。以下便針對各點說明：

■ 氣候

氣候因子包含降雨強度、降雨頻率、風向、溫濕度及林內微氣候，是影響穿落水水量差異的最主要因素。

降雨強度及頻率會影響樹冠對水分的截留，進而影響穿落水水量的變異。林登秋等(1996)在福山天然闊葉林中研究林內降雨，冬季林內穿落水占林外雨量 87.0%，比夏季 91.4%少。推論為冬季每場的降雨強度較夏季小，使冠層截留容量占林外降雨比例高，而降雨強度小雨滴動量也小，使樹冠能有效截留水分。Keim et al.(2004)比較不同間隔長度的降雨發現，間隔時間若為降雨時間的 2 倍，約有 15-20%的降雨會形成截留流失，而當兩場降雨間隔時間為降雨時間的 90 倍時，則有高達 30%的水分会遭截留而蒸發。研究亦發現若同樣的降雨量相比，降雨時間長則截留流失較少，主要的原因是因為降雨時濕度較高，且會降低環境溫度，使得蒸發的水分減少，增加穿落水的水量。Keim and Skaugset (2004)觀測 48 場降雨，發現降雨會先留在樹冠中 8-30min(平均 12min)，待樹冠水分累積至克服重力才行滴落形成穿落水。根據日本森林測候所的觀測，杉木林的樹冠截留量平均約為 13.2%，雨量愈小時截留占沈降量的比例愈大，當降雨為 10mm 以下時大於 50% 被樹冠截留，然而當降雨達 150mm 以上時只剩 10%以下的沈降被截留(陳信雄，1990)。

Stout and McMahon(1961)認為風向是影響穿落水水量的原因，於迎風面的位置所受的雨量較大，穿落水的水量會比背風面多，而與離樹幹無關。

■ 樹冠結構

樹冠層結構與組成是穿落水水量空間分配的重要控制因素(Herwitz and Slye, 1992; Whelan and Anderson, 1996)。

在單一林分內，各個位置因上方樹冠層葉生物量及葉面積指數(leaf area index, LAI)並不均質，沈降通過不均質的冠層後，穿落水水量在各點並不一致。Hansen(1995)在挪威雲杉樹冠內 6 個不同高度(分別離地面 7, 9.5, 11, 13, 15, 16m)及離樹幹不同距離(0.1, 0.5, 0.9, 1.3m)的各點測量穿落水的水量的變異，果顯示離樹幹愈遠水量愈大，而離地愈高所收集到的水量愈多，顯示葉生物量愈多，截留量愈大而造成穿落水愈少。Abrahamson et

al.(1998)於美國北卡羅萊納州 7-10 年生的松樹林(*Pinus taeda*)中的研究顯示，穿落水約為林外降雨的 89%，且葉面積指數愈高的位置穿落水的水量愈少($TF=1.56+0.89*BP-1.2*LAI$, $R^2=0.95$; $n=6163$)。Lovett and Reiners(1986)研究卻發現，葉面積指數愈大，穿落水的水量愈大。

在同一地區，但因林分冠層狀況不同，雖然受到相同氣候影響，但穿落水量也不一致。Asdak et al.(1998) 於馬來西亞的 Central Kalimantan 的熱帶低地雨林區研究，結果顯示，在相同林外降雨的情況下樹冠最濃密的鬱閉區與其他區相較下，鬱閉區穿落水的比例及量都為最少。而樹冠覆蓋很低的孔隙區，99%的降雨通過樹冠落至森林底層。冀志軍和朱國全(1990)在湖南油桐林樹冠截留雨量的觀測研究，結果顯示不同鬱閉度有不同截留率。密林(鬱閉度 0.67)截留率為 22.89%，稀林(鬱閉度 0.3- 0.6)截留率為 12.65%，疏林(鬱閉度 0.3 以下)截留率只有 3%。此研究還發現當降雨在 20mm 以下，樹冠截留率達 16.27%，而在 40- 80mm 降雨量時，樹冠截留率只有 8.48%。降雨量小，截留量就大，降雨量大，截留量反而小。當森林樹冠出現空隙，會使樹冠不連續且改變樹冠對降雨截留的能力，造成穿落水量增加。Rogerson (1968)探討不同疏伐強度對穿落水量之影響，也發現疏伐導致截留量變小而增加穿落水量。Aboal et al. (2000)於多霧的松樹林中進行疏伐後對穿落水影響的試驗，結果疏伐減少松樹葉面積指數，反而導致穿落水減少，這是因為當地雲霧為森林重要的水分輸入來源，當樹木遭受疏伐後可截留雲霧的葉片減少，因而降低森林水分的輸入，造成穿落水的水量減少。而不同的樹種總成的冠層結構不同，也使穿落水量有變異。

除了葉片對穿落水的影響，枝條也會影響穿落水量，枝條傾斜角度會影響雨水落至枝條時是順著枝條流下形成幹流水、停留於枝條表面形成截留流失、或滴落形成穿落水(Herwitz, 1987; 江永哲, 1972)。Herwitz(1987) 於實驗室中將枝條由 2.5° 升至 60° ，發現枝條傾斜角度太大或太小都會增加穿落水量，當枝條角度為 60° 時，約 80% 的雨滴會滴落形成穿落水。江永哲(1972)的研究發現相思樹及馬尾松枝條傾斜角度分別為 66.6° 、 32.6° ，兩者的穿落水量占林外雨量分別為 82.8% 及 75.8%，顯示枝條傾斜角度對穿落水量有影響。

樹木的物候條件也是影響穿落水的水量的因素之一。不同的季節植物生長狀況也不相同，冠層的狀況也有所變化，而受冠層影響的穿落水也隨冠層的變化而不同，溫帶闊葉林有著明顯的生長季節變化，因此穿落水隨植物物候條件的變化在溫帶闊葉林中則顯的比針葉林明顯(Peterson and Rolfe, 1979)。

- 樹齡或林齡

樹齡也會影響穿落水水量，Johnson(1990)觀察北美松樹林，發現林齡愈大的森林穿落水占林外降雨比例會愈大。樹冠截留量在生長最旺盛時期比幼林或老齡林為多，因此會造成老齡林穿落水量比生長最旺盛時期多(陳信雄，1990)。然而 Carleton and Kavanagh (1990)觀察不同林齡的黑松林，不管位於森林邊緣或森林中央，穿落水水量卻是隨樹齡而減少。但由於較大的樹木樹幹體積較大，樹幹表面會吸收大量水分，所以測得的幹流水水量比例反而隨齡分而降低，相對在齡分較大的森林穿落水為水分到達地面主要的路徑。

- 其他因子

其他會影響穿落水水量的因素包含苔蘚、次冠層、幹流水的影響。附生於枝幹上的苔蘚雖占地面上所有植物生物量極小比例，但苔蘚本身會吸附水分，因而減少穿落水的沈降量(Price et al., 1997)。另一方面，苔蘚可增加截留雲霧的面積，增加截留的沈降量(Chang et al., 2002)，有可能會使得穿落水量增加。

次冠層也是影響穿落水量空間變異的因子(Carlyle-Moses et al., 2004; Loescher et al., 2002)。Carlyle-Moses et al.(2004)在墨西哥的橡木林的研究指出，次冠層覆蓋度會影響穿落水的水量。Loescher et al.(2002)於哥斯大黎加熱帶雨林發現，靠近次冠層樹幹的位置穿落水水量也較大。然而，有關次冠層植物截留的資料目前很少，這是由於次冠層的植物體積小且無明確樹冠形狀，因此可信賴的測定相當困難(陳信雄，1990)。

2.2.2 估算穿落水水量的方法

傳統的穿落水收集法，是在林下設置一定數量的漏斗式收集器，再將收集到的體積換算成林份單位的穿落水量。由於空間變異極大，因此過去有許多的研究旨在克服因空間變異造成的誤差，包含確認所需的收集器數量、變更收集器的位置、改變收集器面積或使用溝渠式的收集器等。

- 確認樣本數目

為降低因樣本數過少，造成的取樣誤差，許多研究者使用 Kimmins (1973)發展的精確度分析公式(公式 2)確認樣本數量：

$$n' = \frac{t_{\alpha, n-1}^2 \times CV^2}{E^2} \quad (\text{公式 2})$$

式中：

n' ：所需收集器數目 $t_{\alpha, n-1}$ ：Student's value at the α level
 CV ：變異係數 n ：樣本數
 E ：可接受的誤差

Lin et al. (1997)於台灣東北部福山亞熱帶雨林進行穿落水空間變異試驗，結果穿落水空間變異甚大，欲將每場降雨事件穿落水量測誤差 10%時，約需 16 個取樣值。Rodrigo and Ávila (2001)量測橡木林穿落水，發現穿落水量測誤差小於 10%時，約需 9-11 個取樣值，誤差小於 5%時，約需 22- 23 個取樣值。Gómez et al. (2002) 研究顯示降雨量大時橄欖樹的穿落水空間分佈型式較為一致，降雨量小時其穿落水空間分佈零亂不一，若要測量降雨量小的穿落水量則必須設置較多收集器。

▪ 收集器位置的更換

藉由更換收集器的位置收集到的水量，不會因特定點的特殊狀況(如位於滴落點下方)而錯估整個樣區的穿落水水量。Kimmins (1973)於每次收集後就隨機更換收集器位置，Lloyd and Marques-Filho (1988)則是將取樣瓶每週移動 1m。更換位置雖然可收集許多位置的水量資料，能避免因特殊狀況造成高估或低估整林分穿落水量，但不適合短期觀測或降雨事件間的觀測，且複雜的放置方式使得此法使用不如固定放置法適合各種森林，且無法了解影響每個位置穿落水水量差異的原因。

▪ 改變收集器類型

穿落水收集器可分成漏斗型與溝槽型兩種。漏斗型被廣泛使用於空曠之野外地區及森林中以量測沈降量。而一般認為溝槽型能收集到之水量較具有代表性的體積，且可收集到較大區域的穿落水，所以有些地區選擇架設溝槽式的收集器。

雖然溝槽型與漏斗型收集到的水量並不見得一致(Reynolds and Leyton, 1963; Kostelnik et al., 1989; Crockford and Richardson, 1990; Reynolds and Neal, 1991)，但溝槽型

收集面積較廣，能收集到不同樹冠特性下的穿落水，因此仍被接受使用。然而架設較方便的漏斗型收集器可安置於不同類型的地表，且可用來比較穿落水在不同位置造成水量及組成的差異，且收集總面積夠大也可代表樣區穿落水量，因此漏斗型使用較廣泛。

2.3 穿落水空間變異之研究

量化空間變異可利用地理統計中克利金法(kriging metho)半變異元(semivariogram)分析，或利用傅立葉分析求得變化的週期。克利金法原為探勘礦物所發展出來的無偏差內差法，旨在降低探勘點的數量，估算的變數中有一指標為變異元(variogram)，可用以分析各樣點間的關連程度(Gringarten and Deutsch, 2001)，因此過去有些研究穿落水空間變異的研究便搭配半變異元分析穿落水的空間變異特性(Bellot and Escarre, 1998; Gómez et al., 2002; Konishi et al., 2006; Loescher et al., 2002; Loustau et al., 1992;)。傅立葉分析(Fourier analysis)則是將使用正弦及餘弦函數，將數列轉換為頻率-振幅，當函數有週期性時，可使用傅利葉級數表示該函數，再利用傅立葉級數求的變化週期。

各地使用半變異元分析水量變化，結果並不一致。Loustau et al.(1992)及 Bellot and Escarre(1998)所測得穿落水彼此的空間相關距離為不明確。Gómez et al.(2002)於西班牙三棵橄欖樹(*Elaeocarpus serrate*)下放置收集器收集 12 次降雨，穿落水彼此的空間相關距離為 1-3m。Loescher et al. (2002)在哥斯大黎加熱帶雨林的研究發現穿落水彼此的空間相關距離高達 43m，結果並顯示空間相關距離會因冠層孔隙(gap)而縮短。Keim et al. (2005)於太平洋西北三座森林的研究發現，穿落水彼此的空間相關距離為 3-10 m，闊葉林於落葉時穿落水彼此的空間相關距離不明確。Konishi et al. (2006)在馬來西亞熱帶雨林中沿穿越線放置穿落水收集器，空間相關距離約 10m，該研究使用傅立葉分析所求得的水量週期變化為 10-15m，與開闊度指數(openness index)變化週期相當。

以下簡單介紹克利金法中的變異元：

- 變異元

克利金法對於空間的預測前必須先計算變異元，利用不同間距的變異元可用以分析各樣點間的關連程度。

變異元被定義為：

$$2\gamma(h) = \text{Var}[Y(u) - Y(u + h)]^2 \quad (\text{公式 3})$$

意即兩個資料點分開一距離 h ，其數值差異平方後的值，即為變異元。半變異元 ($\gamma(h)$) 為變異元 $2\gamma(h)$ 的二分之一，半變異元為變異度 (variability) 的測量，半變異元愈大表示樣本愈不相似。半變異元可視為一種統計上的量測，用來量測關連度 (correlation)，即相似性 (similarity) 的度量。

當資料是有相關連時，半變異元會趨於一最大值，此最大值稱之為門檻值 (sill)，門檻值對應的距離的 90% 又稱之為空間相關距離。當變異元數值小於門檻值時， $Y(u)$ 與 $Y(u + h)$ 的關連性為正值。而當變異元數值大於基值時， $Y(u)$ 與 $Y(u + h)$ 的關連性為負值 (圖 2)。

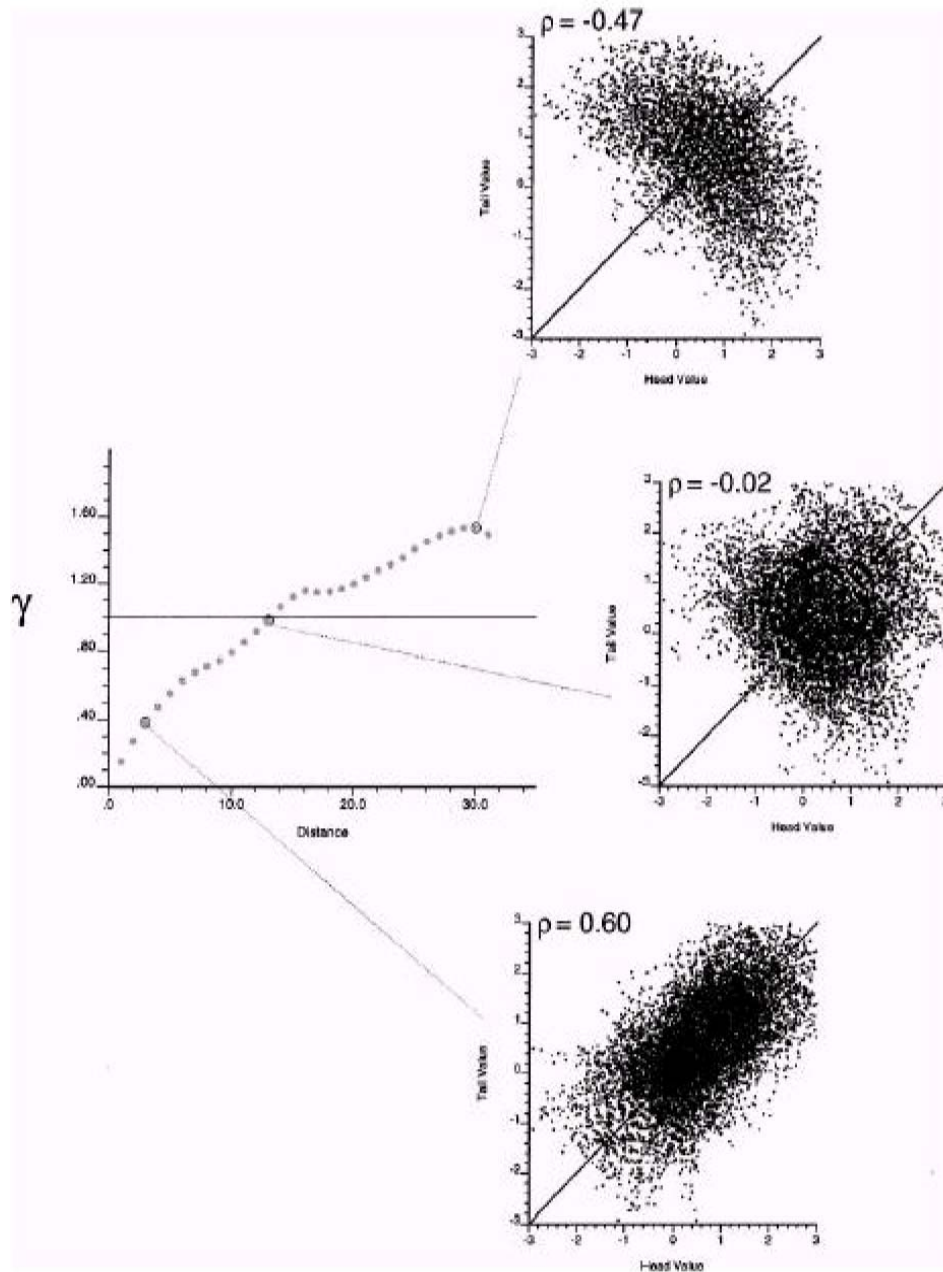


圖 2 半變異元與對應於三個不同間隔距離的距離散佈圖。當半變異元數值小於門檻值時，距離散佈圖的關連值為正，當大於或等於門檻值大小時，距離散佈圖的關連值為負(Gringarten and Deutsch, 2001)。

2.4 國內穿落水量相關研究

以下對國內穿落水量變異及影響因子的研究加以簡介：

潘家聲(1964; 1965; 1966)分別針對杉木、台灣檫木(*Zeikova serrata*)、闊葉林進行截留流失量的試驗，結果指出降雨強度為影響截留流失量之重要因子，穿落水量隨著林外雨增加而遞增，截留率（截留流失量占總沈降量的比例）卻隨林外雨增加而遞減。

江永哲(1972)於惠蓀林場對不同樹種截留量的研究發現，相思樹(*Acacia confusa*)及馬尾松(*Pinus massoniana*)枝條傾斜角度分別為 66.6°、32.6°，且相思樹的樹皮比馬尾松光滑，兩者的穿落水量占林外雨量分別為 82.8%及 75.8%，顯示枝條傾斜角度及樹皮粗糙度對穿落水量造成影響，使相思樹的穿落水量明顯高於馬尾松。

陸象豫和唐凱軍(1995)於中部蓮華池地區天然闊葉林截留研究，分析 64 場降雨(包含兩場颱風)發現，該林分之樹冠截留容量為 1.9 mm，穿落水占總沈降 85%，穿落雨之降雨中心較林外降雨之雨量中心約晚 29 min 發生。研究也發現，截留流失量雖然僅佔全期降雨 11.3%，但各月間之變異卻很大，冬季某些場次可達 100%，颱風時僅佔 3.9%。

林登秋等(1996)於台灣東北部福山地區天然闊葉林林內降雨及樹冠截留的研究，1994 年共有效收集 53 次降雨，而截留流失量佔林外雨量的 11.1%。夏季穿落水量佔林外降雨 91.4%，而冬季為 87.0%，此結果顯示樹冠截留容量夏季高於冬季，但樹冠截留率則冬季高於夏季。冬季高截留率可能的原因包括：降雨量小使樹冠截留量佔林外降雨的比率高；較小的降雨強度使冠層能有效截留降雨，若降雨強度大，雨滴動量過大會無法被樹冠截留。Lin et al.(1997)在同一地區的研究結果顯示，穿落水的水量及化學組成有高度空間變異，穿落水量測誤差小於 10%時，約需 16 個取樣值，而化學組成間空間變異更大，需更大量的收集器，推測是該地樹種多樣，冠層組成複雜造成水量及化學組成的空間變異。

賴鴻寬(2002)在南投縣塔塔加地區之雲杉(*Picea morrisonicola*)天然林進行林內降水量與林外降水量觀測，結果顯示雲杉林穿落水量占林外降雨 72.1-94.5%，樹冠截留容量約為 6.6 mm。影響截留作用的主要影響因子為林外降雨量、降雨強度與林外降雨延時，以及風速與風向的影響。

盧惠生等(2003)在南投蓮花池的天然闊葉林、檳榔(*Areca catechu*)園及開闊地進行試驗，以每個樣區放置 81 個收集器量測穿落水的空間分佈特性。變異係數以檳榔園(0.65)最大，天然闊葉林(0.24)次之，而空曠地(0.017)最小。穿落水占重力沈降的比例，當降雨量小於 100 mm 時，天然闊葉林的穿落水約 81.5%，檳榔園的穿落水約 51.8%；降雨量大

於 100 mm 時，天然闊葉林的穿落水約 90.2%，檳榔園的穿落水約 56.9%。

蔡欣育(2005)針對八卦山台地香楠(*Machilus zuihoensis*)、相思樹(*Acacia confusa*)及血桐(*Macaranga tanarius*) 三種主要樹種對雨水截留作用進行研究。結果顯示，穿落水量的大小依序為血桐>相思樹>香楠，樹冠截留容量量香楠(48.32 mm)>相思樹(35.35 mm)>血桐(31.28 mm)，顯示香楠為三樹種之中截留能力最佳的樹種。此結果與測量三樹種的光線攔截率(light interception)也與截留趨勢相同，顯示樹冠鬱閉度與樹冠截留能力呈正相關，而香楠為此三樹種之中截留能力最佳的樹種。

陳耀德(2003)於鴛鴦湖地區對大氣養分輸入的探討，研究顯示台灣扁柏更新林穿落水量佔重力沉降 84.2%，而幹流水佔 3.2%，因為受雲霧的沉降的影響，有森林內部的水分沉降高於重力沉降的情形，且雲霧所含的各種離子濃度也都比重力沉降來的高。故推論於鴛鴦湖地區台灣扁柏森林之雲霧沉降所攜帶的水分與離子，可能在總輸入量上佔有很高的比例。葉青峰(2004)在同一樣區對雲霧沉降量的研究結果顯示雲霧佔總沉降量的 10.0%，為不可忽視的重要輸入部分。

2.5 研究目的

由文獻回顧可知，穿落水的觀測方法、估雨量的比率及空間分佈特性已有不少研究，且獲得不少成果。同一樹種不同林齡穿落水的特性也多有研究，但少有同樣降雨條件下針對相同樹種但不同林齡的森林，對穿落水空間分佈做探討。

本研究於棲蘭山區兩相異林齡的台灣扁柏林中，設置穿落水空間分佈的試驗，量測並探討穿落水的空間分佈特性，以及造成穿落水空間變異的因子，並比較兩相異林齡台灣扁柏林穿落水水量空間變異的差異。

3. 材料與方法

穿落水量受到降雨形式及林分結構的影響，若欲探討林齡對穿落水水量的影響，應盡量選擇鄰近但林齡不同的樣區，才可排除降雨因子的影響。本研究選擇棲蘭山區距離鴛鴦湖保留區 2.5 km 處之兩林齡相異的森林，架設收集裝置收集穿落水，同時測量兩林份冠幅、LAI 等影響穿落水變異的因子，並加以分析探討。空間變異的分析是使用克利金法的半變異元分析，以及利用傅立葉分析瞭解穿落水水量變化的週期。

3.1 樣區概述

本研究區位於台灣東北部雪山山脈之棲蘭山區，屬蘭陽溪支流的石頭溪集水區，太平山事業區 32 林班地，位於 100 號林道 14.5km 處(24°35'N, 121°25'E)(圖 3)，樣區海拔高約 1400-1800m，為台灣扁柏天然下種更新林及台灣扁柏老齡林，。

Lai et al. (2006)分析 1994 年一月至 2004 年十二月在鴛鴦湖保留區研究區的氣象資料，結果顯示年均溫 12.7°C，二月最冷月均溫為 5.9°C，七月最暖月均溫為 18.1°C。本地的氣候深受東亞季風的影響，冬季長時間籠罩在細雨與雲霧下。夏季清晨和下午至晚上常有霧發生，後者與日夜交替的風向改變有關，有時並伴隨對流雨的發生。夏季時頻繁的颱風帶來平均 36.9%的年雨量，常有豪大雨的發生。此地富含雨水與雲霧，年雨量 3396 mm，一年中約有 40%的時間籠罩在雲霧之中，平均一年有 239 天下雨和 342 天起霧，造成此地非常濕潤的氣候特徵。

林務局在 1961 年於太平山林業事業區 100 號林道旁擇地試辦檜木天然下種造林，獲得良好成果，續於 1972、1975 兩年度在 100 號林道兩側實施檜木天然下種更新造林作業，約在林道的 13.5 至 15.0 km 兩側處，範圍包括 31、32 兩林班地 (彭令豐, 1988)，至今形成以台灣扁柏為優勢樹種之天然下種更新林，樹齡約在 10-50 年間。而台灣扁柏天然胸徑達 50cm 的立木須經 350-400yr 的生長(林作炬, 1988)，以此方法估計位於上述更新林北方的台灣扁柏林分林齡約為 300-400 年，為一座台灣扁柏老齡林。

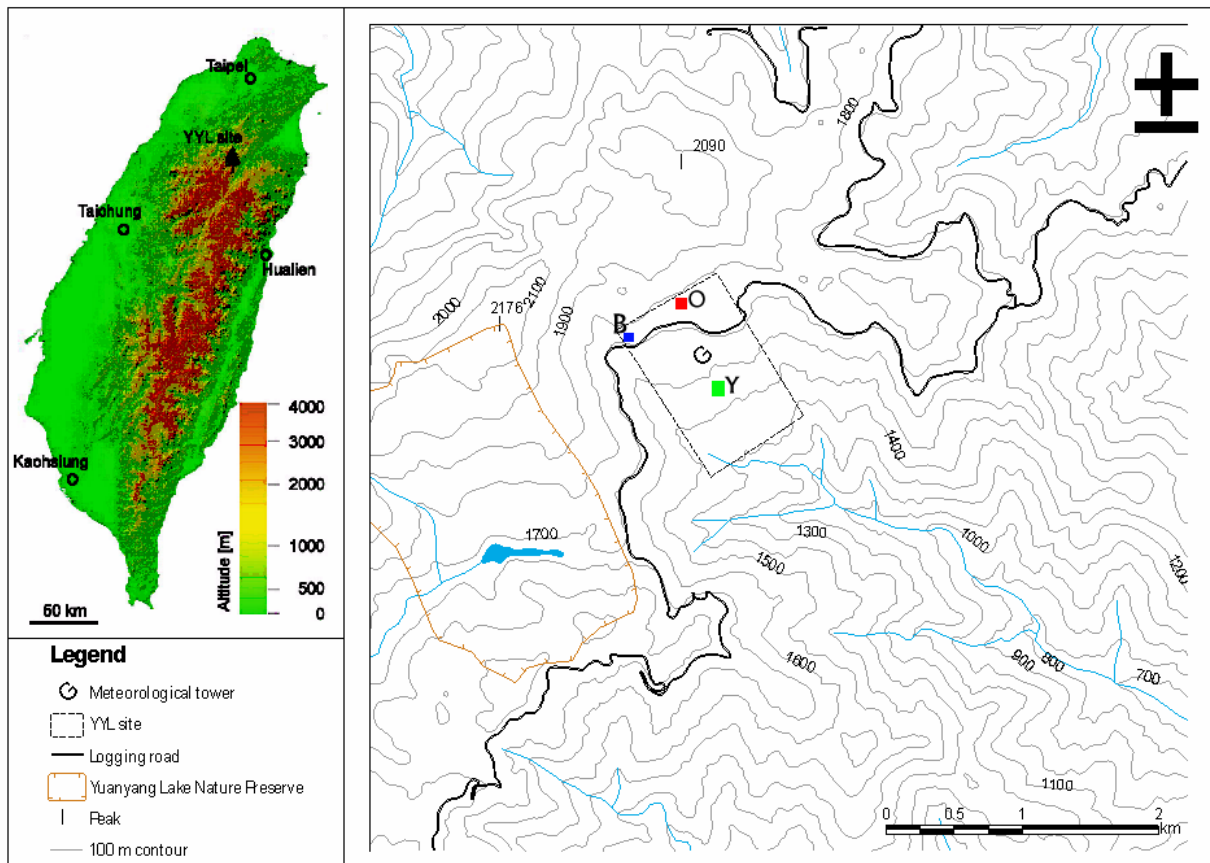


圖 3 樣區位置圖。圖號 O 為老齡林；圖號 Y 為天然下種更新林；圖號 B 為林外雨收集位置，圖號 G 為高 23m 的氣象塔。

老齡林植被調查，計有 14 科 19 屬 27 種，優勢種樹種為台灣扁柏，其平均胸高直徑為 45.9cm，胸高斷面積佔所有樹種總胸高斷面積 95.8%，約有 50%其胸高直徑級主要集中於 41-65cm(朱妍綾, 私人通訊)；更新林中共計 33 種維管束植物，優勢樹種亦為台灣扁柏，林分密度為 1820 stems ha⁻¹，平均樹高約為 10-11 m，占樣區所有植物總胸高斷面積的 81.8%(陳耀德, 2003)(表 3)。

於更新林樣區內搭建有一座 23 m 之氣象鐵塔，用來記錄各氣象參數。在 100 號林道 15 km 處的開闊地，設有一座 3.5 m 之氣象鐵塔，並於塔上架設雨量計，收集林外降雨。

更新林於 2002 年起對林內沈降進行長期監測，其中穿落水量佔重力沈降的比例極大，平均為 84.2%，而幹流量只佔 3.2%。(陳耀德, 2003)。

表 3 老齡林與更新林基本資料。

	林份開闊度 (%)	優勢樹種	胸高斷面積比 (%)	優勢樹種之 平均 DBH (cm)	優勢樹種樹齡 (yr)
老齡林	34.4	台灣扁柏	95.8	45.9	300-400
更新林	28.8	台灣扁柏	81.8	14.7	10-50

3.2 實驗設計

本研究對於兩林份穿落水的研究是沿穿越線放置穿落水收集器，實驗的設計包含選取樣線，並沿線放置穿落水收集器，每兩週量測各種沈降量，以及對兩林分所有穿落水收集器位置的相關冠層結構進行調查。

3.2.1 樣線選擇

於台灣扁柏更新林及老齡林中拉設穿越線，並沿穿越線每隔 1m 設置一個穿落水收集器。沿穿越線放置收集器有三目的：(1)使收集器與扁柏間的位置為隨機放置；(2)使半變異分析時距離能達最大；(3)使傅立葉分析所需的條件能符合。

更新林中拉設的穿越線為南北縱向，總長 100m。老齡林中因地形限制，拉設兩條各 50m 的穿越線，為南北向及東西向。

3.2.2 沈降量的量測

▪ 穿落水

穿落水收集器為一直徑 12cm 之漏斗連接 2000ml 之 PET 瓶。將瓶蓋鑽孔，漏斗頸插入瓶蓋後，以矽膠封黏接縫處，避免漏斗掉落並維持漏斗之水平；漏斗內放置尼龍網，防止雜物及昆蟲進入(圖 4a)。

由於研究樣區內地面情況複雜，多有倒木、石頭、地被苔蘚層，因此利用一直徑略大於收集瓶直徑之 PVC 管，固定於地表，再置入穿落水收集裝置，漏斗需維持水平。兩收集裝置之間相距 1m(圖 4b)。更新林中，沿單一穿越線共架設 101 個；老齡林中沿兩穿

(a)



(b)



圖 4 (a)穿落水收集器；(b)穿落水收集器野外放置情形。穿落水收集器為一直徑 12cm 之漏斗連接 2000ml 之 PET 瓶。漏斗內放置尼龍網，防止雜物及昆蟲進入。

越線，每條穿越線架設 50 個，共架設 100 個收集器。

每隔兩週測量各穿落水收集器中之穿落水的體積，再除以漏斗面積得各點穿落水沉降量。

■ 林外雨

距離樣區約 500m 外的空地上架設有傾斗式雨量計(0.5mm,TIC-1, 竹田計器工業株式會社, Japan)，測量林外降雨量，資料收集器(Campbell CR10, USA)每隔 10 min 記錄一次。藉此資料，瞭解降雨時間及降雨強度。

■ 雲霧沉降量的估算

扁柏對雲霧截留沉降無法直接收集量測。葉青峰(2004)針對台灣扁柏更新林雲霧沉降量的研究，估算 2002/9 至 2004/2 間雲霧沉降量 521 mm，顯示本樣區雲霧沉降量不可忽視。

葉青峰 (2004)所求得能見度(x)與台灣扁柏更新林雲霧截留沈降量的關係式：

$$F(t)=2.6*exp(1618.1/(x+364.7)) \quad (\text{公式 4})$$

式中：

$F(t)$: 台灣扁柏雲霧截留沈降量(kgH₂O/5min-ha)

x：能見度(m)

黃昭豪(2007)利用於離地 22.3m(樹冠頂層)的能見度修正能見度及樹冠頂層及樹冠中層扁柏對雲霧截留沈降量的關係式如下：

樹冠頂層：

$$F_{top}(t)=1.1515*exp(2083.34/(x+449.6)) \quad (\text{公式 5})$$

樹冠中層：

$$F_{mid}(t)=9.5249*exp(48.31/(x-1.1214)) \quad (\text{公式 6})$$

利用架於氣象塔離地 22.3m 的能見度儀(MIRA visibility sensor 3544, Aanderaa indtrument, Norway)測量能見度，每 10min 紀錄一筆資料，帶入公式 5、6，並相加總即為該時刻扁柏截留雲霧沈降量。

本研究假設雲霧沈降量與葉面積指數成正比，以上述的更新林雲霧沈降量乘以老齡林與更新林葉面積指數比值，來估算同一時刻台灣扁柏老齡林的雲霧沈降量。

3.2.3 兩林份調查

為瞭解冠層對穿落水水量的影響，進行對冠層的調查，包含葉面積指數及冠幅的調查，且所有量測的樹木均定位與穿越線間的相對位置的座標(附錄 6、附錄 7)，老齡林以東西向穿越線最東側的收集器座標為(0, 0)，更新林以最北方的收集器座標為(0, 0)，X 軸往東為正，往西為負，Y 軸往北為正，往南為負。

- 葉面積指數及開闊度測量

葉面積指數及開闊度是影響穿落水量的因素之一(Lovett and Reiners,1986; Rogerson and Byrnes,1968; Aboal et al.,2000)，使用樹冠半球面影像技術(Hemispherical photography)拍攝樹冠層再藉由半球面影像分析軟體如 HemiView(Delta-T Devices, UK)，以計算出葉面積指數及開闊度。

樹冠半球面影像可為拍攝當時之樹冠層留下永久記錄，包括位置、大小、疏密程度及孔隙分布(Jonckheere et al., 2004)。此法具有取樣速度快及移動性強的優點，適合較大範圍測量葉面積指數。

拍攝時以 Nikon coolpix 4500 相機(Nikon Corporation,Tokyo,Japan) 搭配 FC-E8(Nikon Corporation, Tokyo, Japan)半球面鏡頭，置於三腳架上並調整至水平，以避免因為傾斜角不同而拍攝到不同之冠層與天空影像；機身朝正北方，使所攝得之影像上方為北方，以利影像分析，鏡頭離地高 140cm，拍攝其正上方之樹冠層影像，該影像即為此取樣點之樹冠層半球面影像。

為避免直射光對影像之影響，拍攝需在清晨、黃昏或陰天無陽光直射時進行(Frazer et al., 2001; 林登秋和江智民，2002)。所攝得之半球面影像，以 HemiView 軟體進行葉面積指數之分析，分析天頂 2.5°內的畫面，以代表收集器正上方的葉面積指數。所求得之葉面積指數該攝影點單面葉面積指數，該數值乘以 2 後即為該攝影點之估算葉面積指數。

半球面影像拍照日期為 2006/3/14-3/16，分析全空域影像求兩林分的葉面積指數，分析天頂 2.5°內的畫面，以代表收集器正上方的開闊度指數。陳凱欣(2005)對台灣扁柏葉面積指數進行整年的觀測(葉面積為 5.93)，季節變動僅 4%，因此本研究只進行一次拍攝調查葉面積。

- 胸高徑(DBH)

立木胸部高度部位的直徑稱之胸高徑(diameter at breast height, DBH)，測量胸高徑時以皮尺量測位於地表高 1.3m 處的樹木的胸高直徑。測量穿越線四周台灣扁柏樹胸高徑，樹冠位於收集器上方時便會影響穿落水水量，故選取的樹木為樹冠範圍位於收集器上方的扁柏樹。

- 測量離收集器最近樹木與收集器間的距離

離樹幹距離是影響穿落水量的因子之一，故測量收集器與樹幹間的距離。測量時以皮尺量測收集器中心至最近樹木胸高的水平距離。

- 冠幅(crown width)

冠幅的測量通常測定一方向的樹冠直徑，再測定其成直角方向的第二樹冠直徑，然後求二者的平均值。

本研究測量穿越線四周台灣扁柏樹冠冠幅，選取的樹木為樹冠範圍位於收集器上方的扁柏樹。量測時取樣樹東、南、西、北四個方位樹冠邊緣距離樹幹的距離，將四個方位長度總和除於 2 後，加上 DBH 即為樹冠冠幅。

3.3 穿落水空間變異分析

空間分析包含使用半變異元分析求穿落水水量變化的空間相關距離及傅立葉分析求得各事件穿落水水量的週期變化。

- 半變異元分析

半變異元是克利金法一重要的參數，主要在作為描述不同位置間相關性之量化表示式。 $\gamma(h)$ 為半變異元，則可用下式表示(Isaaks and Srivastava, 1989)：

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2 \quad (\text{公式 7})$$

式中 h 為在間距範圍內配對點間之距離， $N(h)$ 為 x_i 和 x_i+h 距離 h 的配對數。將觀測點距離分成相同間距的等級，計算每一等級距離中的配對數及平均距離，帶入計算每個等級中的半變異元，以半變異元與距離為座標軸繪出其分佈圖，所得之結果稱為試驗半變異圖(experimental semivariogram)(呂小娟和張少同, 2000)。試驗半變異圖需以連續的函數模式表示，才可應用於克利金法的預測，本研究所使用的函數是選擇高斯函數代表半變異元的連續函數模式。半變異元在特定距離時會逼近一最大值，稱之為門檻值(sill)，門檻值對應的距離 90% 為空間相關距離(圖 5)。

由於計算克利金時計算繁瑣，地理資訊系統的應用與發展已日趨完善，而 ArcView 系統包含圖形整合、屬性建立、系統查詢、資料統計、分析及展示的功能，

並可透過內建語言自行設計分析功能。本研究使用 ArcView GIS 3.3 及 Kriging 外掛模組(Kriging Extension 2.01¹) 計算及繪製穿落水水量於兩樣區的半變異圖，再利用所繪製的半變異圖探討穿落水的空間相關距離。

■ 傅立葉分析

為瞭解穿落水水量在穿越線上的週期變化，使用傅立葉分析可幫助瞭解水量變化的週期。傅立葉分析的原理是任何周期函數都可以用正弦函數和餘弦函數構成的無窮級數來表示。本研究使用傅立葉分析是將穿落水水量使用快速傅立葉轉換，使穿落水水量及位置轉成頻率-振幅的數據，再求最大振幅時的週期。快速傅立葉轉換時，假設樣點共有 N 點，每點間隔 d ，則頻率間隔則 $1/(N*d)$ 。本研究計算週期變化使用 Statistica 7.1 統計軟體，進行快速傅立葉轉換求穿落水水量變化的週期。

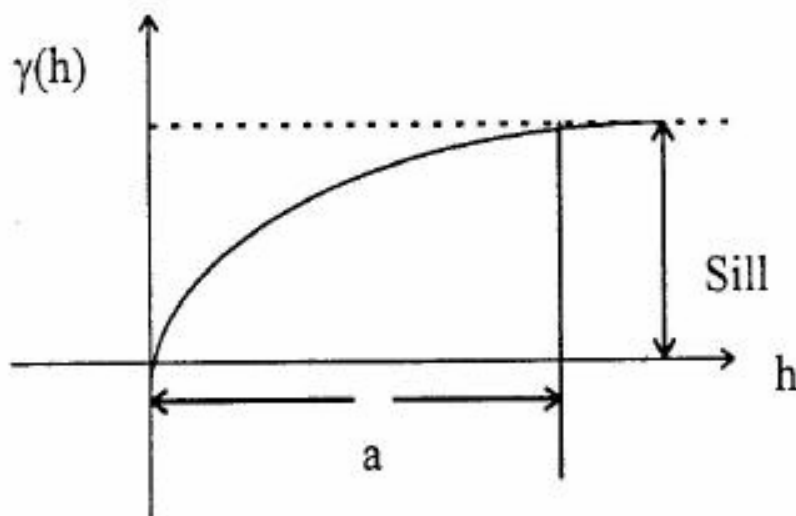


圖 5 以連續函數圖形繪製的半變異圖。半變異元($r(h)$)在特定距離時會逼近一最大值，稱之為門檻值(sill)，門檻值對應的距離 90%為空間相關距離(a)。

¹ Kriging Extension 2.01 for ArcView GIS <http://www.geocities.com/ncxiao/kriging.html>

4. 結果

本研究於 2005 年 9 月架設完畢兩樣區共 201 個收集器。因收集瓶容量為 2000ml，漏斗直徑為 12 cm，因此收集器收集上限為 190 mm 的沈降量，超過此限的沈降量便會溢出，而無法估算。

架設後即遇到龍王颱風侵台，兩日共降下超過 700mm 的雨量。於 10 月 14 日將瓶中穿落水移除後，第一筆完整紀錄兩樣區水量為 2005/10/14-2005/10/28，之後每兩星期收集一次水量。其間並於 2006/3/13-3/18、2006/3/27-2006/4/1，及 2006/4/9- 4/14 進行單次降雨事件資料的收集，單次降雨必須與上場雨間隔 4hr 以上。包含 2006/3/14、2006/3/16 及 2006/4/14 三次單次降雨事件。因此比對 10 min 一筆的林外雨資料，若每兩星期收集期間僅有一次降雨事件，則將之歸入單次降雨。2005 年 10 月至 2006 年 11 月，包含單一事件共完成 22 次收集(表 4)。

實驗期間，22 次林外降雨總和共 1884.5 mm，老齡林雲霧沈降量為 190.9 mm，更新林雲霧沈降量 162.2 mm。老齡林穿落水量共 1736.5 mm，穿落水占重力沈降 92.3%；更新林穿落水量共 1353.0 mm，穿落水占重力沈降 72.0%。重力沈降與雲霧截留沈降的總和稱之為總沈降量。2005/10 至 2006/11 實驗收集總沈降量(重力沈降加截留沈降，BP+FG)的總和，老齡林總沈降量為 2075.4 mm。老齡林穿落水占總沈降 83.6%，老齡林雲霧沈降量佔總沈降量 9.2%；更新林總沈降量為 2046.7 mm，穿落水占總沈降 66.1%，雲霧沈降量佔總沈降量 7.9%(表 5)。

2006/10/27-11/10 林外雨量為收集最大值(174.5 mm)，此次穿落水量老齡林平均為 153.2 mm (sd=33.0)，而更新林穿落水量平均為 124.8 mm (sd=35.5)。

單次降雨最大為 2005/10/28-11/1 (林外雨量 75.0 mm)，此次老齡林穿落水量平均為 70.3 mm (sd=18.9)，更新林穿落水量平均為 57.7 mm (sd=17.6)。單次降雨最小為 2006/3/15-3/16 (林外雨量 2.5 mm)，此次老齡林穿落水量平均為 2.1 mm (sd=1.0)，更新林穿落水量平均為 1.7 mm (sd=0.5)。

表 4 林外雨(BP)及穿落水(TF)資料。2005/10/14-2006/11/10 共 22 次資料。

事件	收集日期	BP (mm)		老齡林 TF(n=100)				更新林 TF(n=101)			
				平均 (mm)	min (mm)	max (mm)	SD	平均 (mm)	min (mm)	max (mm)	SD
1	2005/10/28	70.0		71.6	32.0	156.0	22.4	49.7	19.0	183.0	20.3
2	2005/11/11	75.0	s	70.3	34.5	139.0	18.9	57.7	22.0	127.0	17.6
3	2005/12/09	35.0	s	36.9	15.0	110.0	16.2	18.6	7.0	42.0	5.7
4	2005/12/22	88.5		92.4	42.5	191.0	28.2	69.5	28.0	130.5	19.6
5	2006/01/06	75.0		66.2	38.0	142.0	19.3	45.1	18.0	86.0	12.7
6	2006/02/16	14.0	s	18.3	7.0	66.0	8.4	10.7	3.0	28.0	3.7
7	2006/03/02	133.0		134.1	86.0	186.5	24.5	102.7	42.5	179.0	26.0
8	2006/03/14	24.0	s	26.8	13.0	149.5	15.1	17.0	7.5	42.5	5.0
9	2006/03/16	2.5	s	2.1	0.9	7.0	1.0	1.69	0.9	3.0	0.5
10	2006/03/28	141.0		119.9	79.0	190.0	20.5	100.1	56.0	166.5	20.6
11	2006/04/12	60.0		45.7	30.0	70.0	6.5	39.7	24.0	60.0	6.3
12	2006/04/14	6.5	s	3.2	1.4	10.9	1.4	2.6	1.0	4.9	0.8
13	2006/04/28	150.0		142.9	95.0	184.0	19.4	115.8	19.5	186.0	26.2
14	2006/5/11	146.0		127.1	60.0	192.0	21.2	115.5	49.0	170.0	21.7
15	2006/5/26	164.5		131.6	63.0	185.0	26.4	120.0	57.5	185.0	28.1
16	2006/7/7	113.5		89.6	42.0	175.0	18.0	63.2	31.0	116.0	14.1
17	2006/8/3	105.0		105.7	62.0	185.0	23.0	82.8	36.0	185.0	22.2
18	2006/8/31	112.5		105.9	51.0	185.0	23.6	95.6	40.0	157.0	21.3
19	2006/9/28	65.0		62.8	33.0	185.0	19.4	28.6	8.0	60.0	9.3
20	2006/10/12	40.0		43.1	16.0	117.0	14.9	31.0	15.0	65.0	9.8
21	2006/10/27	89.0		87.1	51.0	185.0	22.6	60.9	29.0	128.0	18.3
22	2006/11/10	174.5		153.2	32.0	190.0	33.0	124.8	34.5	190.0	35.5
總和		1884.5		1736.5(92.1%)				1353.0(71.8%)			

BP：林外雨量(mm)； s:單次降雨

表 5 各事件沈降量及穿落水所佔比例。

事件	BP	FG _{old}	TF _{old}	TF _{old} /(BP+FG _{old})	FG _{young}	TF _{young}	TF _{young} /(BP+FG _{young})
1	70.0	18.9	71.6	0.81	15.8	49.7	0.58
2	75.0	9.2	70.3	0.83	7.7	57.7	0.70
3	35.0	15.8	36.9	0.73	13.2	18.6	0.39
4	88.5	19.0	92.4	0.86	15.9	69.5	0.67
5	75.0	13.4	66.2	0.75	11.2	45.1	0.52
6	14.0	11.2	18.3	0.73	9.4	10.7	0.46
7	133.0	9.8	134.1	0.94	8.2	102.7	0.73
8	24.0	7.5	26.8	0.85	6.3	17.0	0.56
9	2.5	0.8	2.1	0.63	0.7	1.7	0.53
10	141.0	10.0	119.9	0.79	8.4	100.1	0.67
11	60.0	4.7	45.7	0.71	3.9	39.7	0.62
12	6.5	1.1	3.2	0.42	0.9	2.6	0.35
13	150.0	10.2	141.6	0.88	8.5	115.8	0.73
14	146.0	3.1	127.1	0.85	2.6	115.5	0.78
15	164.5	9.1	131.6	0.76	7.6	120.0	0.70
16	113.5	1.6	89.6	0.78	1.3	63.2	0.55
17	105.0	3.9	105.7	0.97	3.3	82.8	0.76
18	112.5	2.2	105.9	0.92	1.8	95.6	0.84
19	65.0	6.5	62.8	0.88	5.4	28.6	0.41
20	40.0	8.0	43.1	0.90	6.7	31.0	0.66
21	89.0	12.3	87.1	0.86	10.3	60.9	0.61
22	174.5	15.7	153.2	0.81	13.1	124.8	0.67
總和	1884.5	193.8	1735.2		162.2	1353.3	
佔總沈降 量比例		9.3%	83.5%		7.9%	66.1%	

BP：林外雨量(mm)；TF_{old}：老齡林穿落水平均量(mm)；TF_{young}：更新林穿落水平均量

(mm)；FG_{old}：老齡林雲霧截留沈降量(mm)FG_{young}：更新林雲霧截留沈降量(mm)。

4.1 穿落水與重力沈降、雲霧沈降的關係

穿落水佔重力沈降的比例極大且有相當大的變化，實驗期間在老齡林中穿落水平均為重力沈降的 92%(49%-130%)，而更新林平均佔重力沈降 72%(40%-85%)。顯示重力沈降轉成林內降雨時，多以穿落水形式到達地面。

兩林分穿落水量與重力沈降成線性正相關， R^2 分別為 0.97 與 0.96(圖 6、圖 7)，老齡林中穿落水與重力沈降的關係式為：

$$TF_{old}=5.08+0.86*BP \quad (R^2=0.97)$$

更新林穿落水與重力沈降的關係式為：

$$TF_{young}=-3.68+0.76*BP \quad (R^2=0.96)$$

當林外降雨量愈大時，兩林分穿落水的水量也愈大。

兩林分穿落水量與總沈降成線性正相關， R^2 分別為 0.98 與 0.95(圖 8、圖 9)，老齡林中穿落水與總沈降的關係式為：

$$TF_{old}=-0.97+0.85*(BP+FG_{old}) \quad (R^2=0.98)$$

更新林穿落水與總沈降的關係式為：

$$TF_{young}=-7.82+0.75*(BP+FG_{young}) \quad (R^2=0.95)$$

當總沈降量愈大時，兩林分穿落水的水量也愈大。

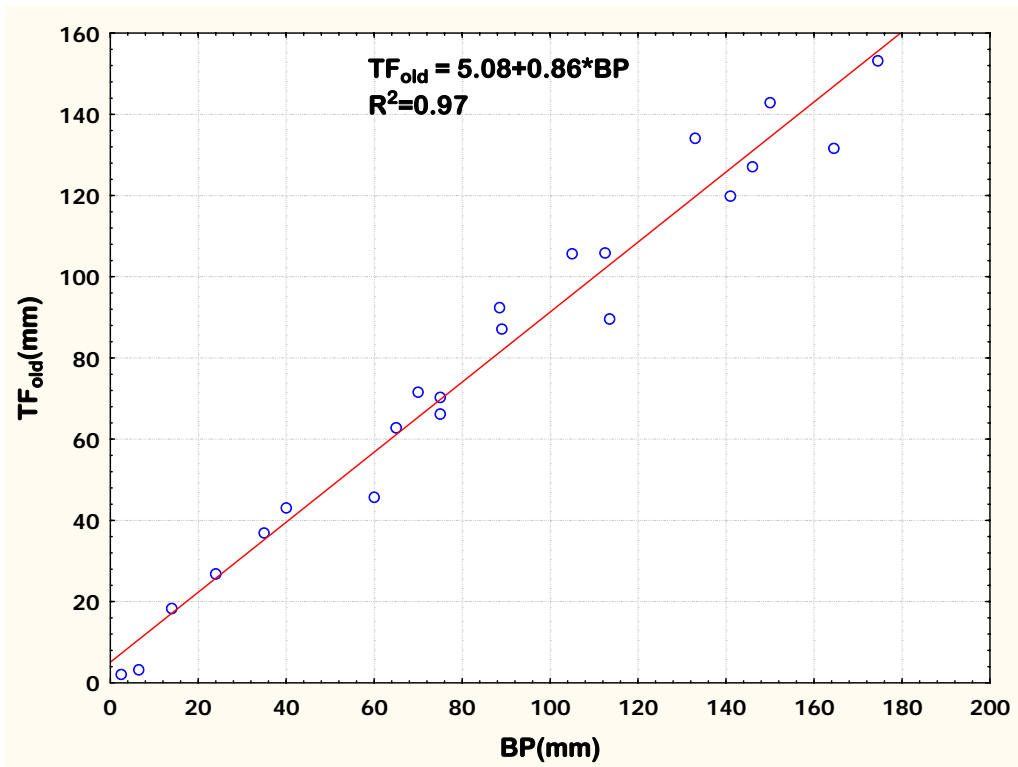


圖 6 老齡林穿落水量與重力沉降關係圖。成線性正相關(R²=0.97)

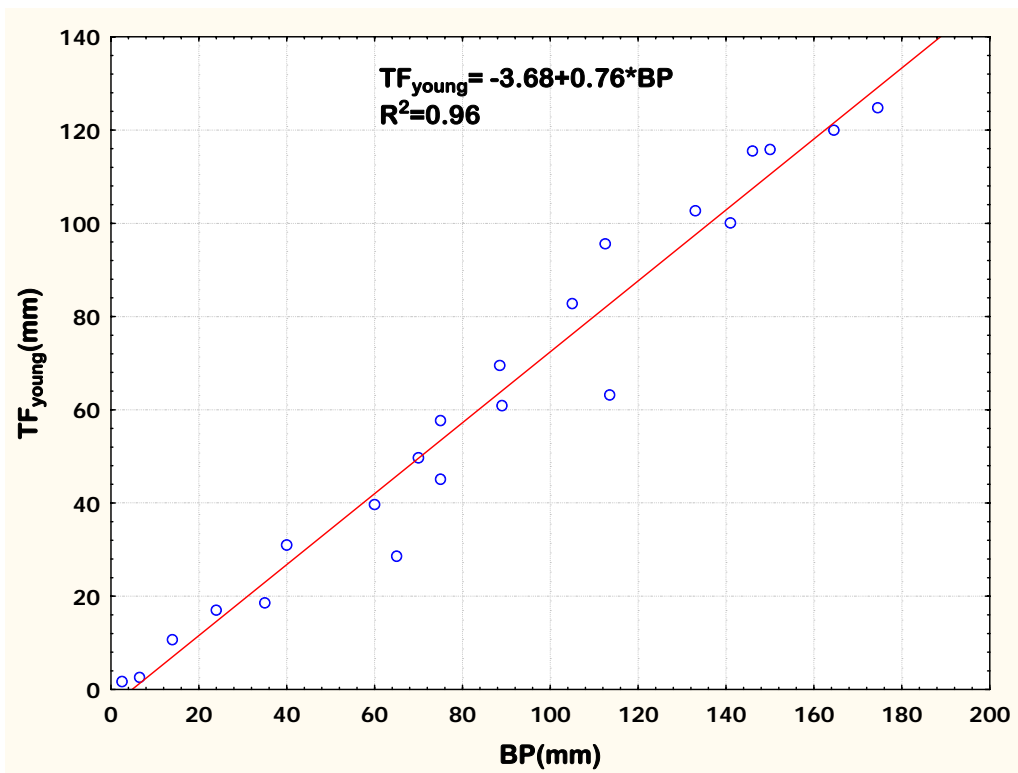


圖 7 更新林穿落水量與重力沉降關係圖。成線性正相關(R²=0.96)

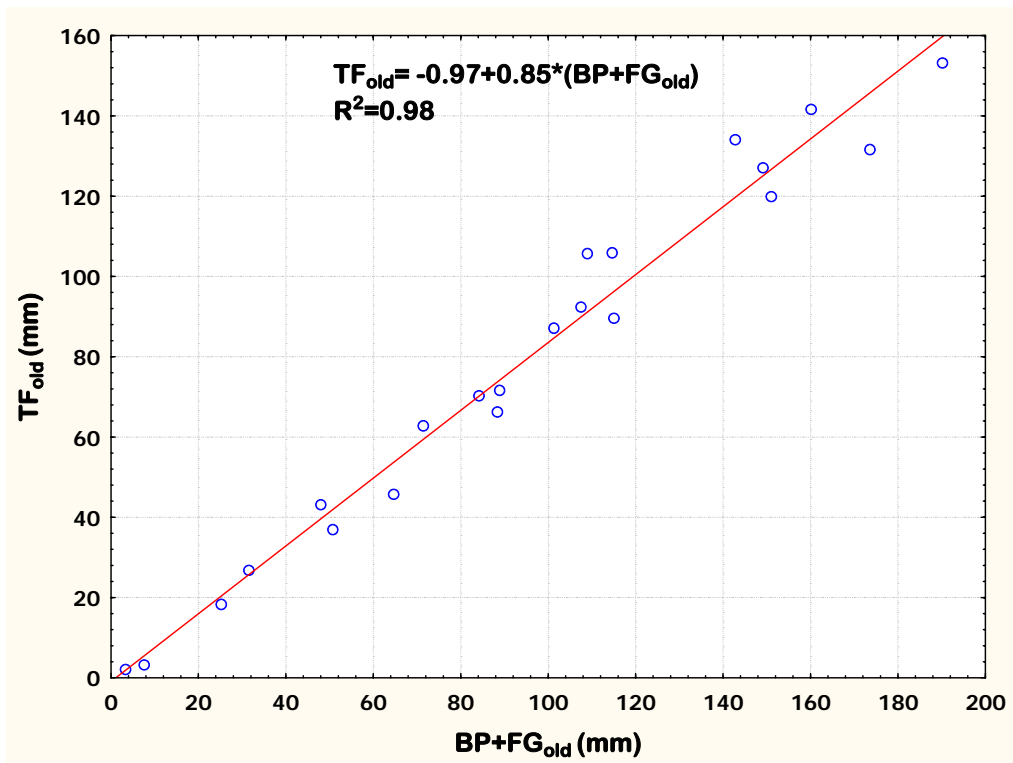


圖 8 老齡林穿落水量與總沉降關係圖。成線性正相關($R^2=0.98$)

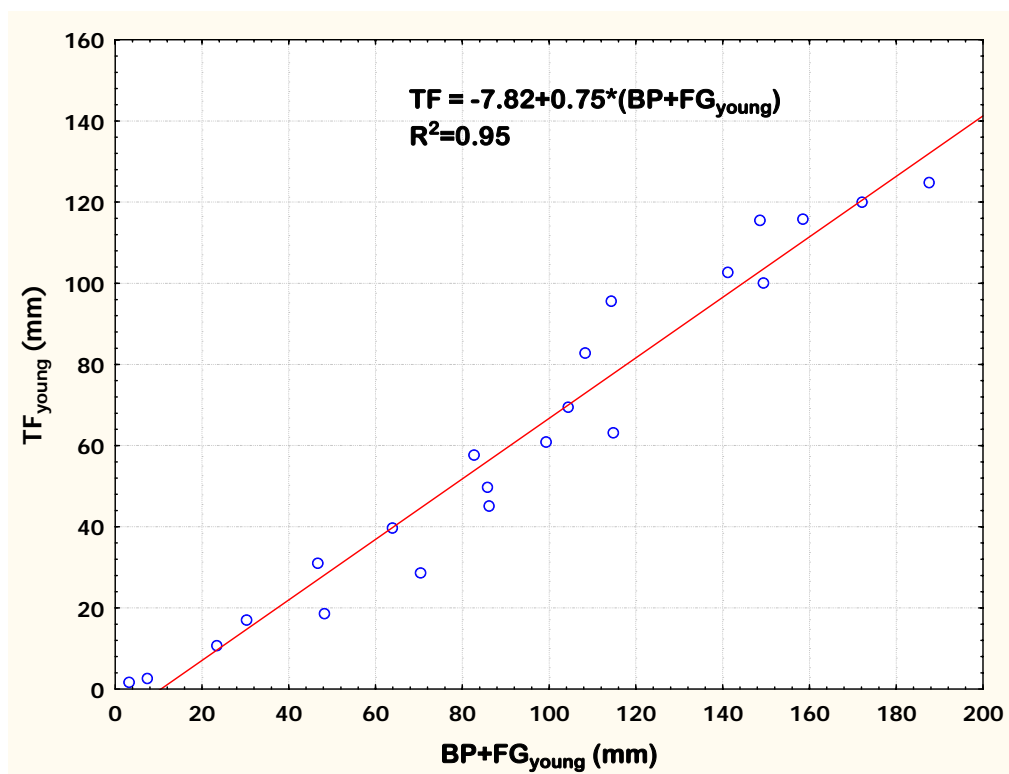


圖 9 更新林穿落水量與總沉降關係圖。成線性正相關($R^2=0.96$)

4.2 所需收集器數目

以 Kimmins(1973)發展的 power analysis 公式(公式 2)估算兩樣區所需穿落水收集器數目。結果顯示，當沈降量越小時，穿落水間的變異係數往往越大，所需收集器則越多。如老齡林在事件 9(BP=2.5 mm)時，10%誤差情況下，需 61 個收集器，事件 15(BP=146.0 mm)，在 10%誤差情況下，老齡林只需 8 個收集器，更新林所需收集器數目介於 12-33 個(表 6)。

若以實驗期間所收集的穿落水總沈降量，計算所需的穿落水收集器數量，老齡林在 5%誤差下需 26 個收集器，10%誤差需 7 個收集器(CV=15.4%)；更新林在 5%誤差下需 37 個收集器，10%誤差僅需 9 個收集器(CV=18.3%)。

表 6 不同強度降雨時，所需收集器數量。

事件	BP	老齡林			更新林		
		CV%	n' (E=5%)	n' (E=10%)	CV%	n' (E=5%)	n' (E=10%)
9	2.5	47.0	244	61	28.4	89	22
12	6.5	45.3	226	57	33.1	121	30
6	14.0	45.7	230	57	34.6	132	33
8	24.0	46.5	238	60	29.6	97	24
19	35.0	43.9	213	53	30.8	105	26
3	40.0	34.6	132	33	31.6	110	28
20	60.0	25.2	70	18	26.0	74	19
11	65.0	30.8	105	26	32.6	117	29
21	70.0	31.4	109	27	25.8	74	18
1	75.0	26.9	80	20	30.5	103	26
2	75.0	29.2	94	24	28.1	87	22
5	88.5	30.5	103	26	28.3	88	22
4	89.0	25.9	74	19	30.1	100	25
17	105.0	21.8	52	13	26.8	79	20
18	112.5	22.3	55	14	22.3	55	14
13	113.5	20.1	44	11	22.4	55	14
7	133.0	18.2	37	9	25.3	70	18
10	141.0	17.1	32	8	20.6	47	12
15	146.0	16.7	31	8	20.8	48	12
16	150.0	18.5	38	9	22.6	56	14
14	164.5	20.0	44	11	23.4	60	15
22	174.5	21.6	51	13	28.4	89	22

n'：所需收集器數量

4.3 樹冠層對穿落水的影響

4.3.1 林分資料

於穿越線上兩旁調查樹木的胸高徑及冠幅，老齡林台灣扁柏平均胸高徑為 57.1cm(n=28)，平均冠幅為 6.62m(n=28)；更新林台灣扁柏平均胸高徑為 16.3cm(n=90)，平均冠幅為 2.97m(n=90)，老齡林平均冠幅約為更新林的 2.2 倍。利用半球面影像搭配分析軟體求得各點開闊度及葉面積指數(附錄 1、附錄 2)，老齡林葉面積指數平均值為 6.2，更新林葉面積指數平均值為 5.2(表 7)。老齡林胸高徑與冠幅的關係式為：冠幅=2.72×DBH+5.08， $R^2=0.10$ ；更新林胸高徑與冠幅的關係式為：冠幅=8.91×DBH+1.52， $R^2=0.37$ 。由圖 13 及圖 14 胸高徑與冠幅的關係圖可知兩林分台灣扁柏樹冠冠幅隨胸高徑增加而增加，但兩林分冠幅與胸高徑的相關性都不高。不過整體而言，DBH 愈大冠幅愈長。

老齡林的胸高徑、樹高、冠幅均明顯大於更新林。使用 t 檢定兩林分葉面積指數，發現兩林分葉面積達顯著差異($t=3.052, p=0.029$)。

由圖 10 及圖 11 胸高徑與冠幅的關係圖可知兩林分台灣扁柏樹冠冠幅隨胸高徑增加而增加，但兩林分冠幅與胸高徑的相關性都不高。

表 7 兩林分樣線台灣扁柏基本資料。

	樹齡(years)	胸高徑(cm)	樹高(m)	冠幅(m)	葉面積指數
老齡林	300-400	57.1	26	6.6	6.2
更新林	10-50	16.3	11	2.9	5.2

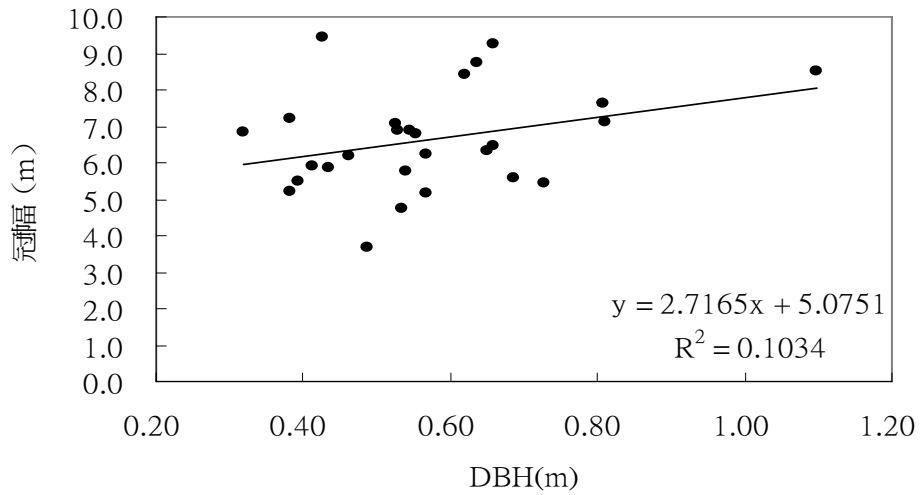


圖 10 老齡林台灣扁柏胸高徑與冠幅關係圖。關係式為：冠幅=2.72×DBH+5.08， $R^2=0.10$

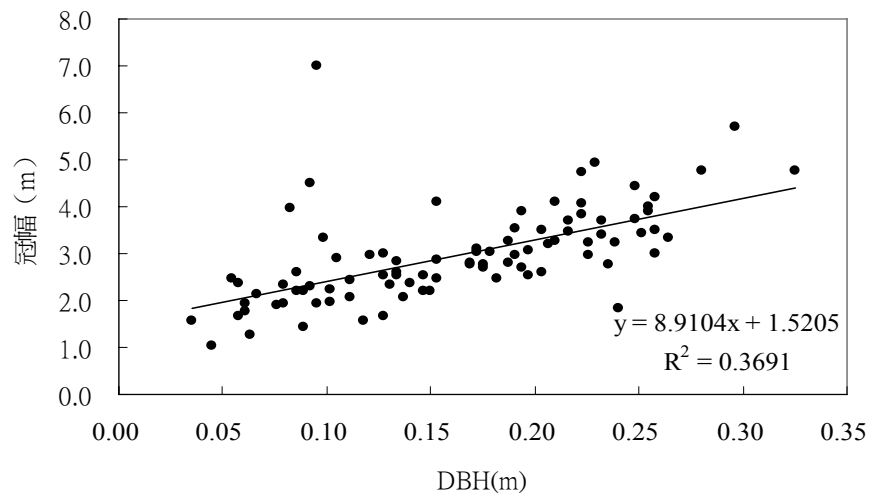


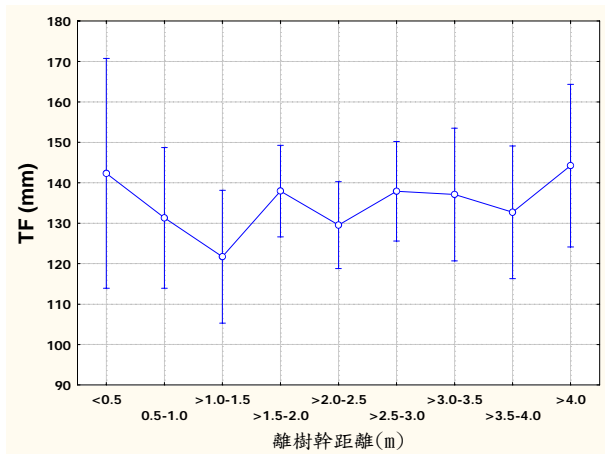
圖 11 更新林台灣扁柏胸高徑與冠幅關係圖。關係式為：冠幅=8.91×DBH+1.52， $R^2=0.36$

4.3.2 穿落水量與離樹幹距離

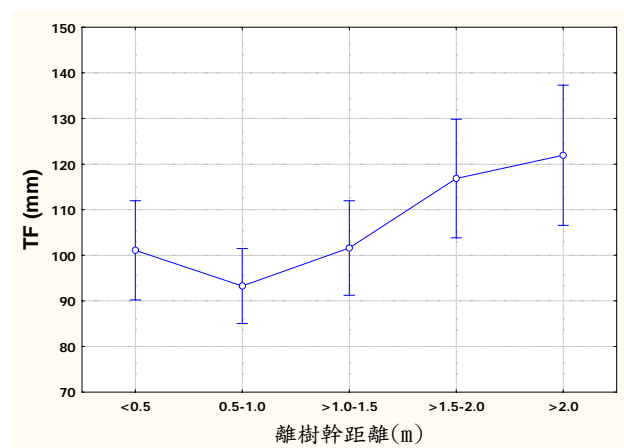
將穿落水收集器依離樹幹距離間隔分成約 0.5m 為一個區間，再比較各區間穿落水水量平均值(圖 12)。老齡林最小水量發生於離樹幹>1.0-1.5m 處；更新林穿落水最小水量發生於離樹幹 0.5-0.9m 處。離開樹冠範圍外的位置(老齡林>4m，更新林>2m)，穿落水水量平均值相當於林外降雨的水量。

穿落水水量變化特殊的位置是鄰近樹幹(<0.5m)的收集點，當降雨量大時，如事件 7(BP=133.0mm)(圖 12a)，穿落水水量在鄰近樹幹的位置有較高的水量，但當降雨量極小時，如事件 9 (BP=2.5mm)(圖 12b)，反而為緊鄰樹幹的位置穿落水量平均值最低。

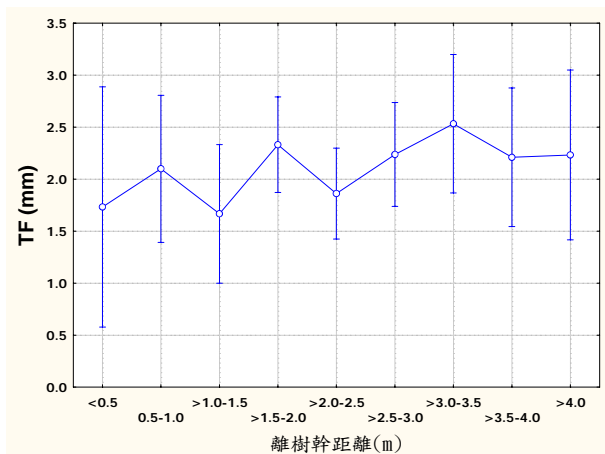
(a-1)事件 7(BP=133.0mm) 老齡林



(a-2)事件 7(BP=133.0mm) 更新林



(b-1)事件 9(BP=2.5mm) 老齡林



(b-2)事件 9(BP=2.5mm) 更新林

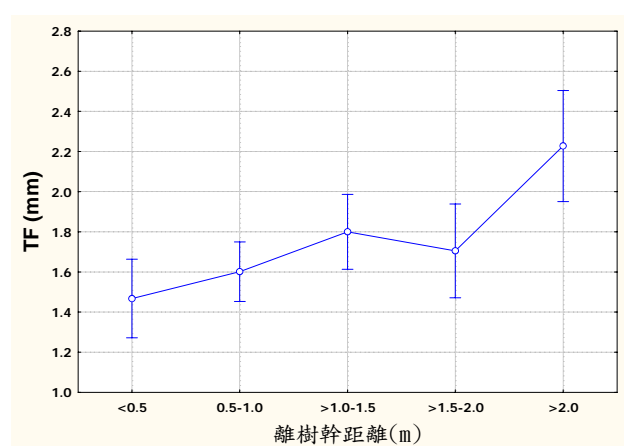


圖 12 各降雨事件時離樹幹距離與穿落水水量之關係圖，以事件 7、9 為例。

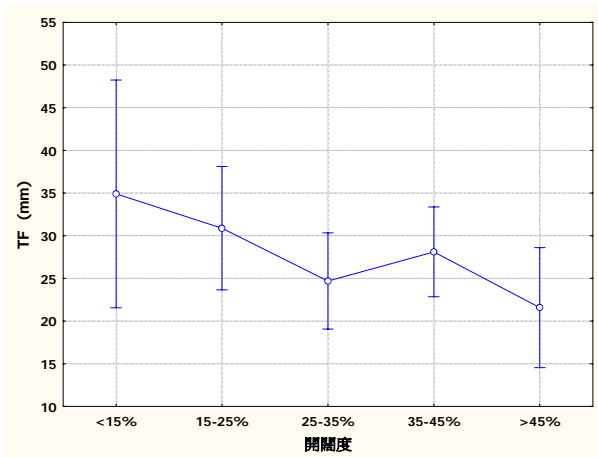
4.3.3 穿落水量與開闊度指數之關係

將開闊度分成<15%、15-25%、25-35%、35-45%及>45%五個區間，再比較各區間穿落水水量平均值，並逐次檢查水量及開闊度的關係。

以事件 8 為例，雲霧截留沈降量占總沈降量比例大 ($FG_{old}/(BP+FG_{old})=23.9\%$ ， $FG_{young}/(BP+FG_{young})=20.8\%$)，在開闊度較小的位置，穿落水水量較大，而開闊度較大的位置穿落水水量較小 (圖 13a-1、圖 13 a-2)；反觀事件 14，雲霧截留沈降佔總沈降量小 ($FG_{old}/(BP+FG_{old})=2.1\%$ ， $FG_{young}/(BP+FG_{young})=1.7\%$)，則有相反的情況(圖 13b-1、圖 13 b-2)。

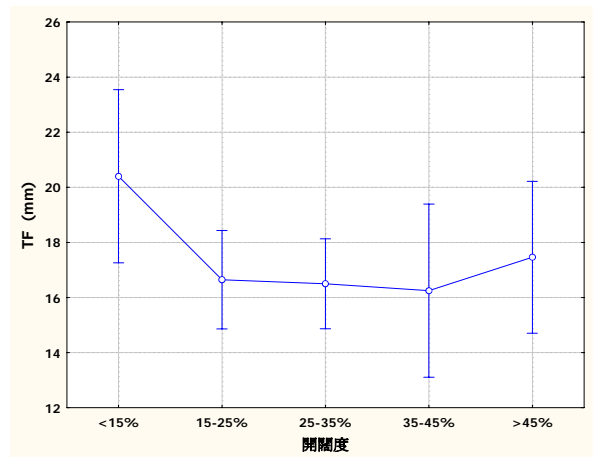
(a-1)事件 8(BP=24.0 mm , FG(%)=23.6)

老齡林



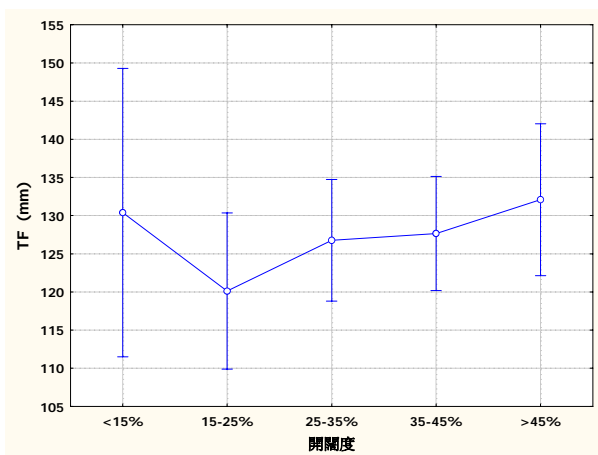
(a-2)事件 8(BP=24.0 mm, FG(%)=20.8)

更新林



(b-1) 事件 14(BP=167.0mm, FG(%)=2.1)

老齡林



(b-2) 事件 14(BP=167.0 mm, FG(%)=6.1)

更新林

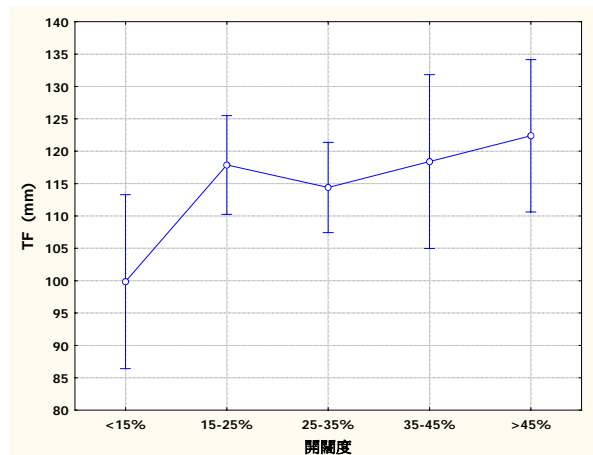


圖 13 不同降雨強度時開闊度與穿落水水量之關係圖。以事件 8、14 為例。

4.4 空間變異分析

空間變異的描述，利用克利金法求得空間相關距離，及使用傅立葉轉換計算水量變化的週期。空間相關距離表示穿落水水量變化在此距離內是相關連，將各次收集到的穿落水水量帶入公式 7，求得試驗半變異元，並利用高斯函數求得連續函數圖形(圖 14、附錄 5)，若函數有一逼近的最大值，則取最大值時所對應的距離 90%為空間相關距離。傅立葉轉換求得的週期則顯示水量變化的波動是有週期性的。本研究克利金分析所得空間相關距離及傅立葉分析所得水量變化週期列於表 8。

4.4.1 半變異元分析

老齡林穿落水水量空間相關距離為 3.0-42.0m；更新林空間相關距離為 2.0-80.0m，空間相關距離變化頗大。老齡林空間相關距離最小為事件 20(BP=40.0mm)，空間相關距離最大為事件 12(BP=6.5mm)時。更新林空間相關距離最小為事件 14(BP=146.0mm)，空間相關距離最大為事件 17(BP=105.0mm)時。更新林空間相關距離在多數事件時均大於老齡林。

兩林分穿落水水量的空間相關距離的變化與林外降雨情況並無關連，大部分的情況下空間相關距離均大於冠幅，且有部分事件穿落水空間相關距離是不明確，兩林分空間相關距離不明確的事件也不一致。

4.4.2 傅立葉分析

利用傅立葉轉換求得的週期，老齡林穿落水水量變化的週期為 2.00-16.66m；更新林穿落水週期變化為 2.13-20.00m。葉面積指數的變化週期，老齡林及更新林均為 8.33m，而開闊度指數的變化週期老齡林為 6.25m，更新林為 25.00m，穿落水水量的變化與葉面積指數及開闊度指數的變化週期並不一致。

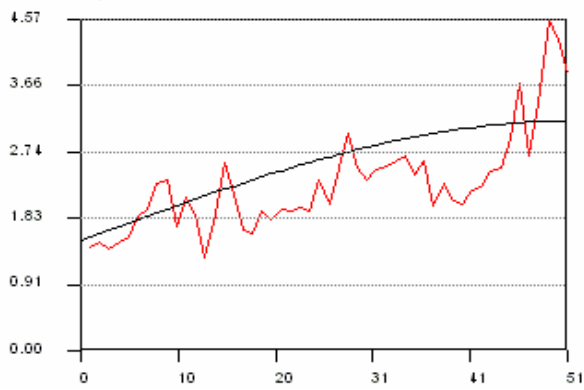
當雨量小時，穿落水水量變化的週期則趨近冠幅大小(老齡林平均冠幅 6.6 m，更新林平均冠幅 2.9 m)，甚至小於冠幅大小；但當有雲霧籠罩，穿落水水量的變化週期則較不一定。將 22 次穿落水水量的總和後，所得的水量變化週期老齡林為 6.2 m，更新林為 3.7 m(圖 15 圖 16)，與兩林分的冠幅大小接近。

表 8 兩林分各事件穿落水所得空間相關距離及傳立葉轉換週期。

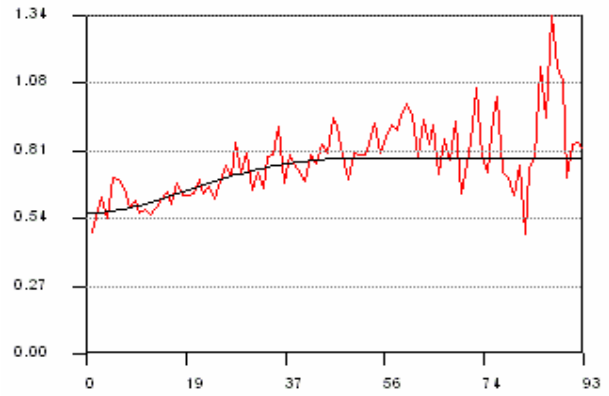
事件	BP (mm)	老齡林		更新林	
		空間相關距離 (m)	傳立葉轉換週期 (m)	空間相關距離 (m)	傳立葉轉換週期 (m)
9	2.5	40.0	2.3	7.0	20.0
12	6.5	42.0	2.2	39.0	16.7
6	14.0	14.0	2.9	76.0	16.7
8	24.0	24.0	2.9	-	2.1
3	35.0	39.0	2.00	67.0	2.6
20	40.0	3.0	16.7	-	16.7
11	60.0	-	6.3	70.0	3.7
19	65.0	40.0	6.3	-	7.7
1	70.0	32.0	3.9	75.0	3.5
2	75.0	15.0	3.8	-	3.3
5	75.0	40.0	6.3	51.0	3.7
4	88.5	16.0	2.0	-	3.7
21	89.0	40.0	3.8	3.0	2.0
17	105.0	42.0	2.1	80.0	3.7
18	112.5	37.0	5.6	-	3.7
16	113.5	38.0	12.5	73.0	3.7
7	133.0	41.0	6.3	49.0	3.7
10	141.0	-	6.3	-	3.7
14	146.0	40.0	3.5	2.0	3.7
13	150.0	-	6.3	65.0	3.7
15	164.5	30.0	12.5	-	3.7
22	174.5	-	2.5	44.0	2.3

(-：表示空間相關距離不明確)

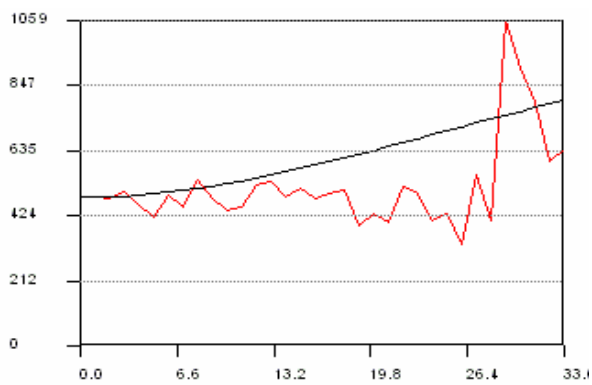
(a-1)事件 12(BP=3.0mm) 老齡林



(a-2)事件 12(BP=3.0mm) 更新林



(b-1)事件 13(BP=132.0mm) 老齡林



(b-2)事件 13(BP=132.0mm) 更新林

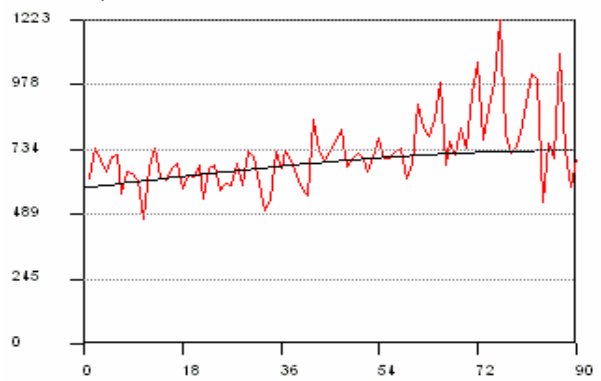


圖 14 不同降雨強度穿落水水量半變異圖。以事件 12 及事件 13 為例。一折線為試驗半變異圖，一平滑曲線為連續函數的半變異圖。(橫軸為相關距離，單位 m; 縱軸為半變異元)。

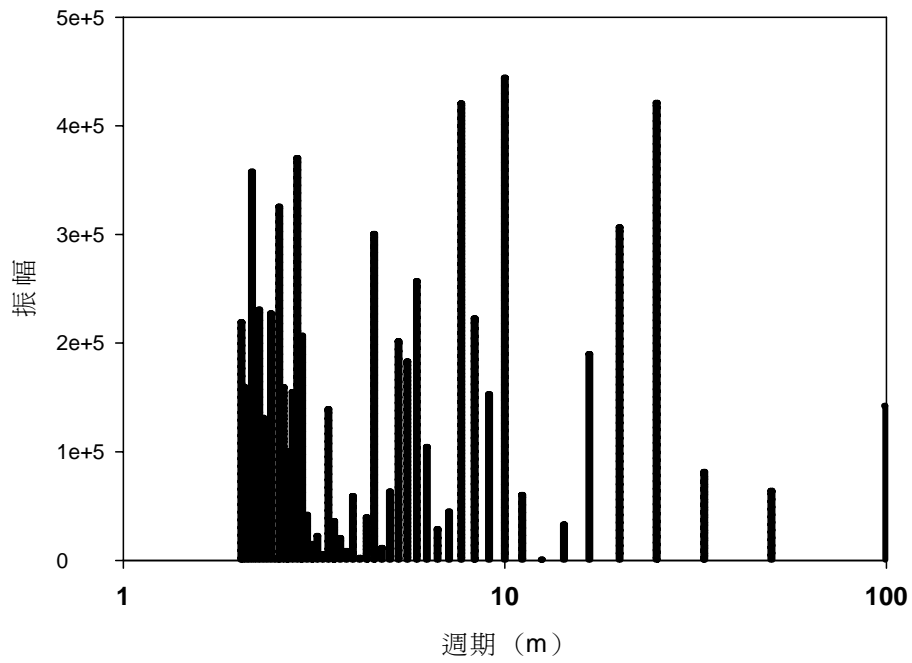


圖 15 老齡林 22 次總和水量快速傅立葉轉換分析圖。

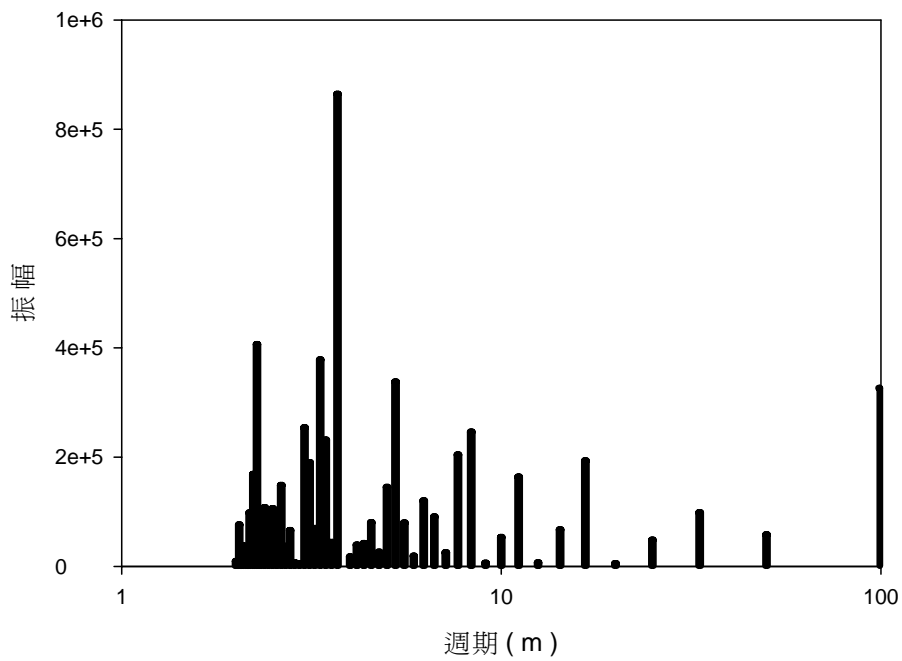


圖 16 更新林 22 次總和水量快速傅立葉轉換分析圖。

5. 討論

5.1 穿落水之比較

本研究老齡林及更新林穿落水量占重力沈降比例極大，老齡林穿落水量占重力沈降 92.2%，而更新林占重力沈降 71.2%，兩林分穿落水量皆與林外雨量呈線性相關。Johnson(1990)比較不同林齡的森林穿落水量發現林齡愈高，則穿落水量占總沈降量的比例會增高，本研究也顯示在老齡林中，穿落水水量明顯高於更新林的穿落水量，根據老齡林重力沈降與穿落水關係圖(圖 6)，在零降雨情況老齡林也有穿落水量，推測是因為本樣區雲霧籠罩時間長，台灣扁柏老齡林能有效截留雲霧沈降，因而增加老齡林沈降的比例。

本研究在台灣扁柏更新林所收集到的穿落水佔林外雨量 71.2%，較過去陳耀德(2003)在此樣區量測到的比例小(84.2%)，可能的原因有 1. 本研究收集器所使用的口徑要小；2. 本研究無法收集較大的降雨強度。

陳耀德(2003)於更新林中架設 12 個穿落水收集器，長期收集、量測林內沈降量，其收集面直徑為 20cm。以相同取樣時間(2005/10-2006/11)與本研究所使用的收集器相比，在穿落水量小於 190mm 的情況下，兩種口徑收集器所收集的沈降量成線性正相關 ($y=-2.5164+1.0293x$, $R^2=0.9537$, 圖 17)。Voigt(1960)比較 10 個不同口徑收集器，結果也顯示口徑大小不會影響收集到的沈降量，因此本研究與過去研究的不同應該並非由收集器口徑造成。

收集器所在位置的空間變異也是造成差異的原因之一。本研究某些位置也有穿落水量高於重力沈降的情形，但整體而言並非造成與過去研究不同的最大因素。

由圖 18、圖 19 及圖 20 可知，當總沈降量愈大，穿落水所佔比例愈高，而陳耀德(2003)的研究曾收集高達 700 mm 的降雨，如此大的降雨，雨滴動量大，樹冠截留比例勢必較小，因此能提高穿落水佔重力沈降的比例(圖 20)。但本研究於更新林中是使用直徑為 12 cm 的漏斗，連接 2000 ml PET 瓶，只能收集小於 190mm 的降雨，而兩種大小口徑的收集器在降雨強度不大的情況下所測得的比例也相當接近。因此本研究更新林穿落水佔重力沈降比例較過去研究小的原因，推測是本研究所能收集的降雨強度較小的關係。

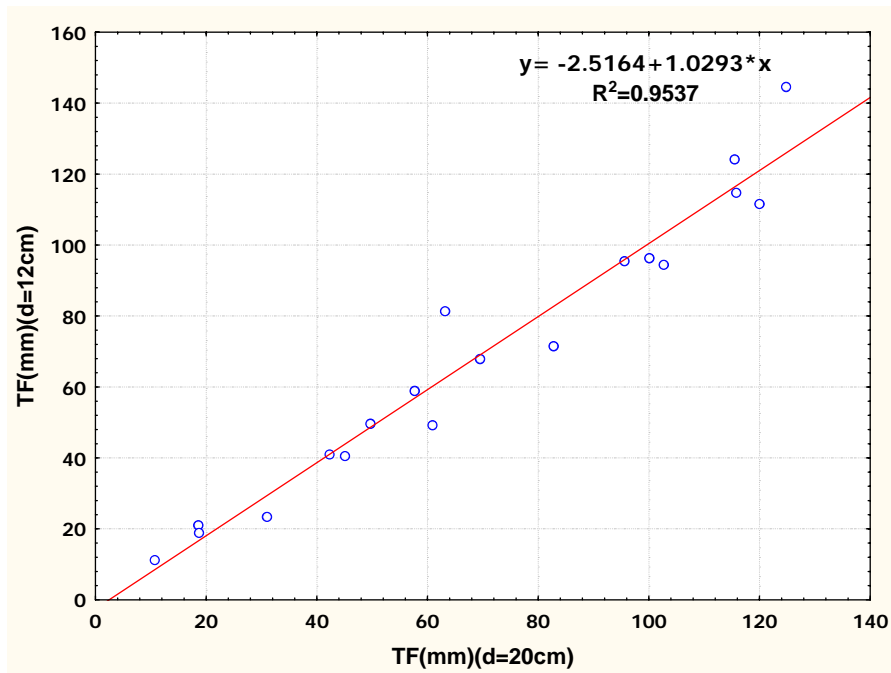


圖 17 兩不同口徑收集器穿落水量關係圖。關係式： $y = -2.1139 + 1.0645x$ ， $R^2 = 0.9537$ 。

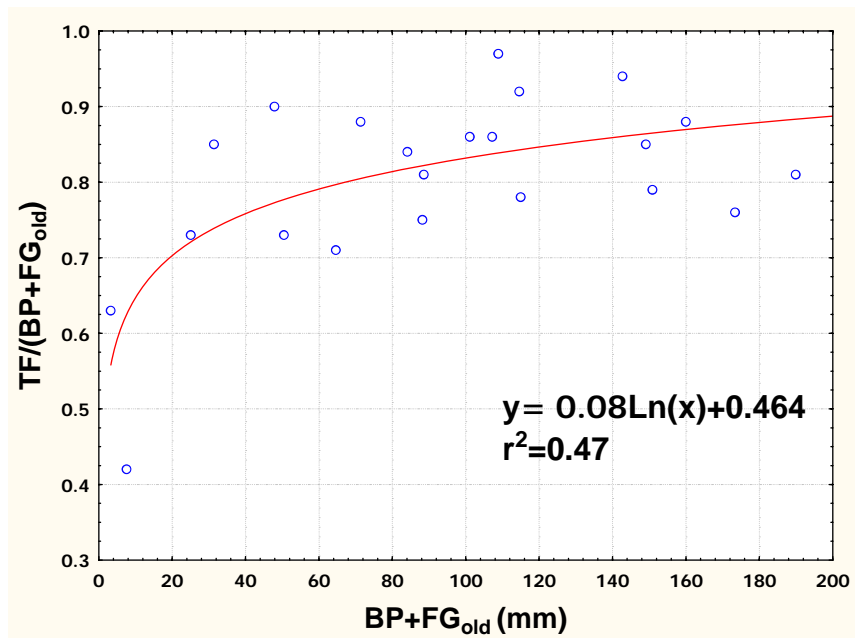


圖 18 老齡林穿落水占總沈降量比例與總沈降量之關係圖。穿落水佔總沈降比例隨總沈降量上升而增加。BP:重力沈降，TF：穿落水，FG_{old}:老齡林雲霧截留沈降

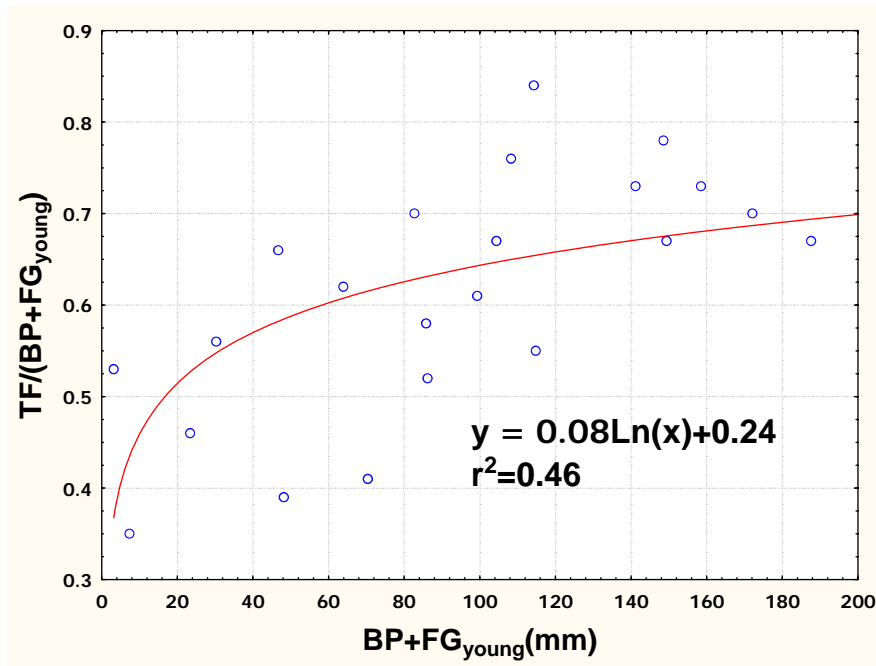


圖 19 更新林穿落水占總沈降水量比例與總沈降水量之關係圖。穿落水佔總沈降比例隨總沈降水量上升而增加。BP:重力沈降，TF：穿落水，FG_{young}:更新林雲霧截留沈降。

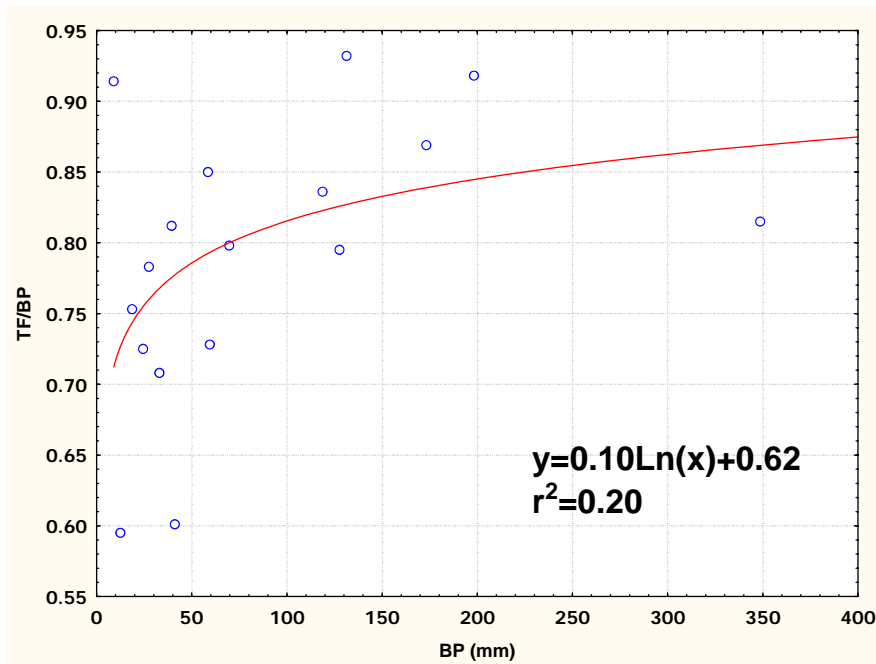


圖 20 更新林 20 cm 口徑收集器穿落水占重力量比例與重力沈降水量之關係圖(陳耀德, 2003)。穿落水佔重力比例隨重力沈降水量上升而增加。BP:重力沈降，TF：穿落水。

5.2 所需收集器數目

不同降雨情況時所需收集器數量不一，在 10%誤差情況下老齡林所需收集器數目為 8-61 個，更新林需要為 12-33 個收集器。以實驗期間所收集的穿落水量計算所需的穿落水收集器數量，則老齡林需 10 個穿落水收集器，更新林中需要 7 個。本研究在老齡林及更新林所設收集器數量達 100 及 101 個，足以估算兩林分穿落水水量。

所需的收集器數量，各地結果如表 10 所列，以長期監測穿落水量，各地所需數量約在 10-43 個之間，而 Seiler and Matzner(1995)在德國 140 年生挪威雲杉林中，設置 100 個穿落水收集器並監測 6 個月的降雨。每個收集器的水量差異極小($CV\%= 3$)，計算後如要估算水量僅需要 1 個收集器。這樣的將體積加總後計算，便會忽略季節變化及降雨強度的不同造成的差異。

在過去的研究顯示，空曠地的水量變異極小。當降雨通過樹冠層後，水滴受到冠層的截留、運輸、集中，造成同樣位在冠層下方，穿落水的水量所差異。在低強度及低持續降雨的情形下，各收集點受上方冠層截留流失量影響，各點差異較大。當降雨量大、降雨強度強，樹冠截留量達飽和或樹冠截留能力小於水滴動量時，水量較不受冠層分配各點穿落水量則較一致，此時變異較小，計算所需收集器數目較少。許多研究也發現穿落水變異係數在較大降雨量時有較小的趨勢(Price and Carlyle-Moses,2003; Carlyle-Moses et al., 2004; Rodrigo and Ávila,2001)。

本研究中穿落水水量變異係數在較大降雨量時有較小的趨勢，當降雨強度愈大時，變異係數逐漸遞減(圖 21、圖 22)。比較老齡林與更新林的變異係數，更新林變異係數與降雨量關係較不密切，可能需要更大的降雨才能證明變異係數會明顯變小。

即便較大降雨，變異係數會逐漸變小，而所需的收集器數目需要更少，但是為了能夠正確估算每場降雨，或為了長期監測不會因為特殊位置有極大、極小水量而造成實驗誤差，設置較多的收集器仍是必要的。

表 9 各地所需穿落水收集器數目。括號內為長期監測時所需收集器的數目。

樣區描述	所需收集器數目	References
天然闊葉林	7-38(16)	Lin et al. (1997)
混生闊葉林	5-22(13)	Kostelnik et al. (1989)
溫帶闊葉林	5-21(10)	Price and Carlyle-Moses (2003)
混生闊葉林	3-14(9)	Carlyle-Moses et al. (2004)
混生闊葉林	3-11	Puckett (1991)
橡木-胡桃混生林	2-96(43)	Peterson and Rolfe (1979)
花旗松	24	Lawerence and Fernandez(1993)
天然闊葉林	20-25	Levett et al.(1985)
地中海冬青櫟林	17	Rodrigo and Ávila (2001)
挪威雲杉	1	Seiler and Matzner (1995)
台灣扁柏老齡林	5-88(10)	This study
台灣扁柏更新林	7-46(7)	This study

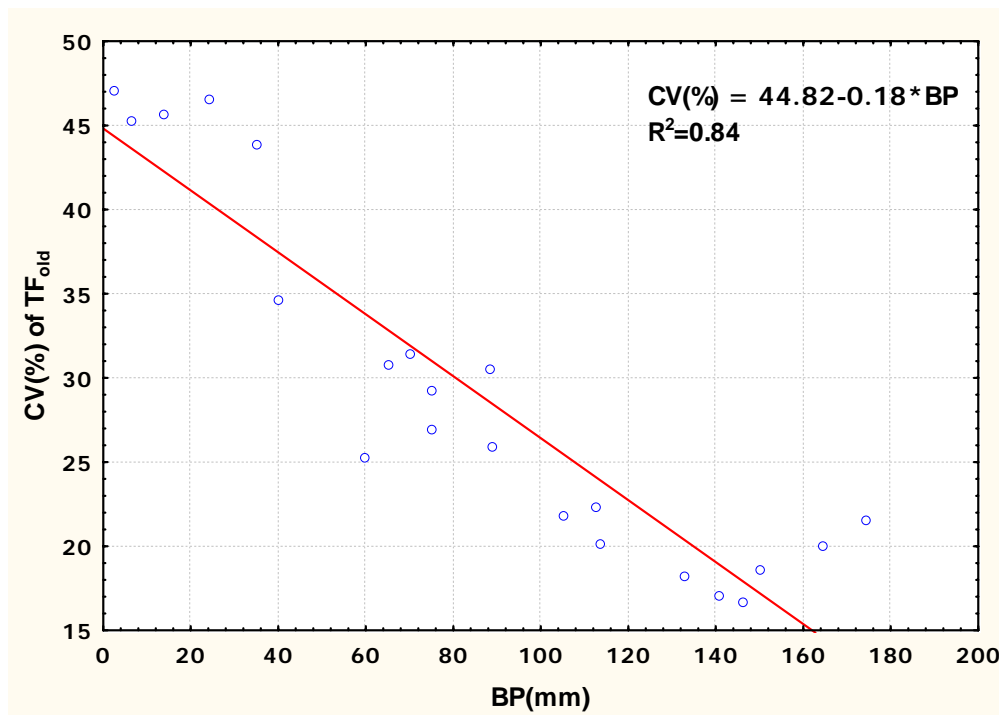


圖 21 老齡林穿落水變異係數與林外降雨關係圖。BP:重力沈降，TF：穿落水。

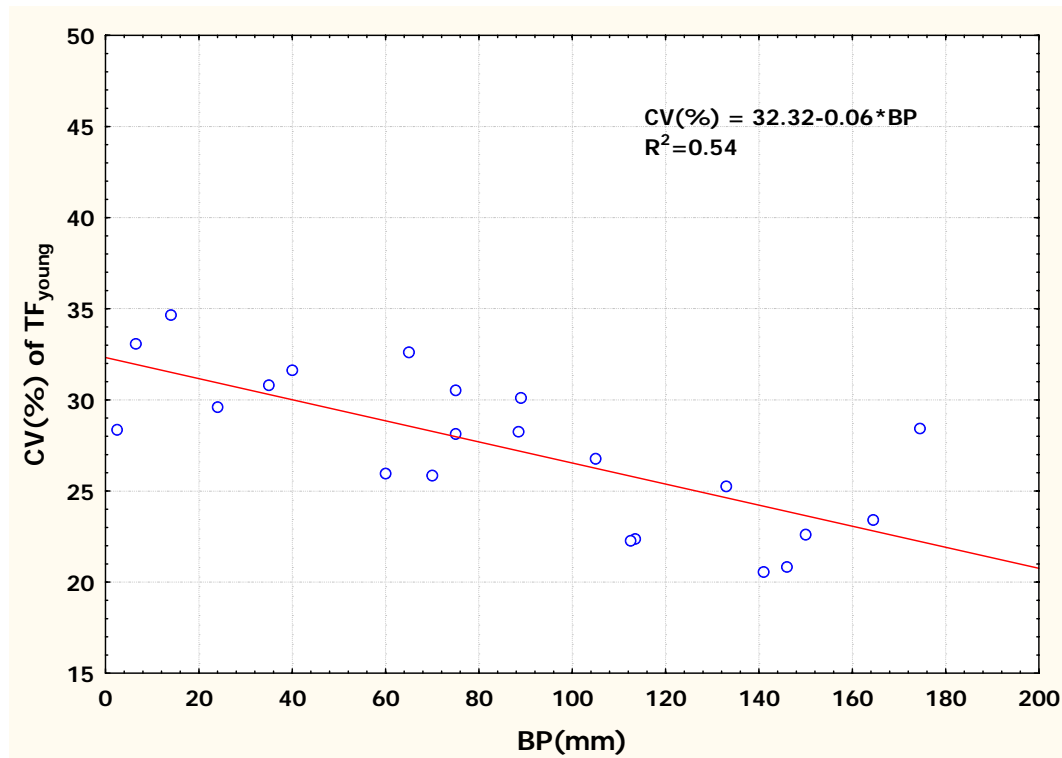


圖 22 更新林穿落水變異係數與林外降雨關係圖。BP:重力沈降，TF：穿落水。

5.3 穿落水量與離樹幹距離之關係

比較兩林分鄰近樹幹的穿落水量，在多數的情況下，鄰近樹幹的穿落水量均高。苔蘚可能是造成鄰近樹幹的穿落水量較高的原因。高當降雨時，順著樹幹的水分可能因苔蘚的阻擋，水分因而被苔蘚吸附，若降雨量較大時，超過苔蘚截留量時，部分的水會順著樹幹繼續流動，而有部分的水量會沿著苔蘚表面滴落造成穿落水的增加，幹流水的減少，甚至當強度更大時，水分未被苔蘚吸附，便會沿著苔蘚表面向樹幹附近滴落。若降雨強度較小時，水滴動量較小，水分沿著樹幹流動，便不會噴灑至樹幹附近。

鄧振華(2006)在鴛鴦湖台灣扁柏更新林中的研究顯示，台灣扁柏樹幹附生植物生物量占有生長於扁柏上的附生植物生物量的 82%，推測在較大降雨時鄰近樹幹穿落水量大，而降雨較小時鄰近樹幹穿落水量卻小的原因，是受到附生於樹幹的苔蘚的影響。

老齡林離樹幹>1.0-1.5m 處的穿落水量平均值最小，而更新林則是在位於離樹幹 0.5-1.0m 處。各地的研究也有相似的情形，如 Aussenac(1970)在法國蘇格蘭松林的研究、Ford and Deans(1978)在 14 年生的雲杉林、Staelens et al.(2006)於比利時山毛櫸林的研究及

時忠杰等(2006)在中國華北落葉松林(*Larix principis-rupprechtii*)的研究都顯示離樹幹稍遠的位置穿落水的水量偏低。推測為樹冠結構及枝條角度造成水分匯流至其他區域，造成此區水量偏低。隨著遠離樹幹穿落水的水量則逐漸增大，離開冠層後水量則與林外雨量相當。當上方無冠層攔截水分，雨水可直接滴落，因此在離樹幹較遠無冠層覆蓋的位置，穿落水水量接近重力沈降量。

5.4 穿落水量與開闊度之關係

重力沈降受冠層攔截，造成穿落水水量有所差異，在開闊度大的位置，重力沈降大部分可通過冠層，滴落形成穿落水，而在較鬱閉的位置，水分大部分受冠層攔截，穿落水的水量則較少。Asdak et al. (1998)及冀志軍和朱國全 (1990)的研究均顯示，在林內開闊度較小的位置，穿落水的水量均較少，而開闊度大的位置水量會較大。但 Aboal et al. (2000)的研究卻顯示，在雲霧森林，葉片會增加對雲霧的截留沈降量。

本研究發現，在雲霧占總沈降的比例較小的事件(如事件 10、11、14)，穿落水水量隨開闊度增加而增大。但在大部分的事件時，開闊度小的位置，穿落水的水量均較大，推測本研究樣區受雲霧影響，較鬱閉的位置截留雲霧量較大，可能增加穿落水的水量，而較開闊的位置，截留雲霧的量要少，所以開闊的位置在大部分的情況下，穿落水的水量較少，且接近林外雨的水量。

5.5 半變異元分析結果

Loustau et al. (1992)於法國松樹林中收集穿落水，7次不同強度降雨(1.1 mm-29.2 mm)穿落水彼此的空間相關距離為並不明確，他們分析各點資料發現水量差距僅 $\pm 3-10\%$ 。Bellot and Escarre (1998)於地中海測量6次降雨(5.5 mm-118 mm)，但所測得穿落水彼此的空間相關距離並不明確，認為穿落水在每一個位置都是獨立事件。Gómez et al. (2002)測得橄欖樹下穿落水彼此的空間相關距離為 1-3m，由於該實驗僅分析單棵樹的半變異元，所以測得的空間相關距離較短，忽視整個林內的變化。Loescher et al. (2002)在哥斯大黎加熱帶雨林的的研究發現穿落水彼此的空間相關距離高達 43m，結果並顯示在冠層孔隙(gap)下的穿落水彼此的空間相關距離有縮短的情形。Keim et al. (2005)於美國西北三座森林的研究，穿落水彼此的空間相關距離為 3-10m。闊葉林在生長季節時，空間關連性

最明確，於落葉時穿落水彼此的空間相關距離不明確。

本研究利用克利金法分析的結果顯示老齡林穿落水空間相關距離為 14-42m，更新林穿落水空間相關距離為 2-75m，兩林分穿落水空間相關距離均明顯大於冠幅的長度。本研究更新林樣區由於鬱閉程度極高(高達 96%)，因此造成更新林空間相關距離大於老齡林。Loescher et al. (2002)研究顯示當樣區中有樹冠孔隙時，空間相關距離會縮小，本研究老齡林鬱閉程度(65.6%)不像更新林如此鬱閉，因而空間相關距離小於更新林。

本研究穿落水空間關連距離的變動與季節變動較無關連，本區葉面積指數季節變動不大(陳凱欣, 2005)，因此空間關連與季節變動無關。

降雨強度大時，也會造成空間相關距離無法量測。以事件 8 為例，單一場降雨林外雨量達 24mm，更新林中的空間相關距離則無法測得。但此次老齡林空間相關距離為 24m，推測是因為老齡林中冠層孔隙較明確，且也可能是因為老齡林截留率較大，使此次穿落水水量空間距離仍可測得。

5.6 傅立葉轉換週期變化

Konishi et al. (2006)在馬來西亞熱帶雨林所測得的穿落水水量週期變化則為 10-15 m，水量週期變化均近似冠幅大小，且與開闊度指數變化週期相同。

本研究各事件所測得的穿落水水量週期的變化老齡林週期為 2.0-16.7 m，更新林穿落水水量週期為 2.1-20.0 m。22 次總和水量計算所得的週期老齡林為 6.3 m，更新林為 3.3 m。開闊度指數的變化週期老齡林為 6.3 m，更新林為 25.0 m，穿落水水量的變化與葉面積指數及開闊度指數的變化週期並不一致。

雲霧對穿落水週期的影響使得穿落水週期的變化縮短。在事件 4(BP=88.5 mm， $FG_{old}=18.7$ mm， $FG_{young}=15.9$ mm)，老齡林穿落水水量週期變化縮短至 2.0 m，更新林為 3.7 m。而當雲霧占總沈降比例小時，如事件 10(BP=141 mm， $FG_{old}=9.9$ mm， $FG_{young}=8.4$ mm)，水量週期變化老齡林為 6.3 m，更新林為 3.7 m，相近於冠幅大小。分析冠層開闊度指數變化的週期，老齡林開闊度指數變化的週期為 6.3 m，更新林開闊度指數變化的週期為 25.0m。更新林開闊度指數變化的週期大，使得在某些降雨事件時，穿落水變化有較大的週期。

5.7 冠層水文收支

冠層水文收支可用公式 1 計算，重力沈降可用林外雨量(BP)代表，扁柏截留沈降使用公式 5、6 推估，幹流水量使用陳子弘(2006)在本樣區中估算幹流水量的研究計算(老齡林幹流水佔重力沈降 0.95%；更新林幹流水佔重力沈降 4.20%)，以及本研究所量測的穿落水量便可推估台灣扁柏老齡林及更新林截留流失的量(表 10)。

實驗期間，老齡林雲霧沈降量為總沈降量 9.2%，老齡林穿落水量佔總沈降量 83.6%；更新林穿落水量佔總沈降量 66.1%。推估老齡林截留流失約佔總沈降量 15.5%；更新林截留流失約佔總沈降量 30.0%，本研究推估截留流失量更新林大於老齡林，與過去的研究結果類似林齡愈高，穿落水量占總沈降量的比例會增加(Johnson, 1990)，生長旺盛的森林截留流失量會高於老齡林。

根據圖 8、圖 9 穿落水與總沈降量的關係圖及迴歸公式，結果顯示老齡林總沈降量必須大於 0.9mm，而更新林總沈降量必須大於 7.8mm 才會滴落形成穿落水。

研究發現當總沈降量愈大，兩林分的截留率均愈小(圖 23、圖 24)。潘家聲(1964; 1965; 1966)穿落水量隨著林外雨增加而遞增，截留率卻隨林外雨增加而遞減，林登秋等(1996)認為較小的降雨強度使冠層能有效截留降雨，若降雨強度大，雨滴動量過大會無法被樹冠截留。

本研究推測水分受到冠層攔截後會蓄積成更大的水滴，然後因重力而滴落形成穿落水或幹流水，因而當總沈降量增大時，穿落水及幹流水隨總沈降量增大而增大。但是較大的降雨情況，水滴動量較大，因而截留率隨總沈降量增加而遞減，為對數負相關。

表 10 台灣扁柏冠層水文收支。事件排列按重力沈降(BP)由小至大。截留流失量隨重力沈降增大而增加。

事件	BP (mm)	老齡林				更新林			
		FG _{old} (mm)	TF _{old} (mm)	SF _{old} (mm)	推估截留 流失量(mm)	FG _{young} (mm)	TF _{young} (mm)	SF _{young} (mm)	推估截留 流失量(mm)
9	2.5	0.8	2.1	0.02	1.2	0.7	1.7	0.105	1.4
12	6.5	1.1	3.2	0.03	4.3	0.9	2.6	0.126	4.5
6	14	11.2	18.3	0.13	6.8	9.4	10.7	0.588	12.1
8	24	7.5	26.8	0.23	4.5	6.3	17	1.008	12.3
3	35	15.8	62.8	0.30	13.5	5.4	28.6	1.344	28.1
20	40	8.0	36.9	0.33	4.5	13.2	18.6	1.47	14.0
11	60	4.7	43.1	0.38	18.4	6.7	31	1.68	21.7
19	65	6.5	45.7	0.57	8.0	3.9	39.7	2.52	39.1
1	70	18.9	87.1	0.61	16.6	10.3	60.9	2.688	33.2
2	75	9.2	71.6	0.67	13.2	15.8	49.7	2.94	21.9
5	75	13.4	70.3	0.71	21.5	7.7	57.7	3.15	38.0
4	88.5	19.0	66.2	0.71	14.3	11.2	45.1	3.15	31.2
21	89	12.3	92.4	0.84	13.4	15.9	69.5	3.717	34.7
17	105	3.9	105.7	0.97	2.2	3.3	82.8	4.284	21.1
18	112.5	2.2	105.9	1.08	7.7	1.8	95.6	4.767	14.0
16	113.5	1.6	141.6	1.25	24.4	8.5	115.8	5.544	46.8
7	133	9.8	134.1	1.26	7.4	8.2	102.7	5.586	32.9
10	141	10.0	119.9	1.34	29.8	8.4	100.1	5.922	43.4
14	146	3.1	131.6	1.52	20.6	7.6	120	6.699	27.0
13	150	10.2	89.6	1.52	17.1	1.3	63.2	6.741	36.4
15	164.5	9.1	127.1	1.59	40.4	2.6	115.5	7.014	45.2
22	174.5	15.7	153.2	1.80	35.3	13.1	124.8	7.938	55.5
總和	1884.5	193.8	1735.2	17.86	325.2	162.2	1353.3	78.981	614.3
估總沈降 量百分比		9.2%	83.5%	0.86%	15.6%	7.9%	66.3%	3.9%	30.0%

(FG_{old}：老齡林雲霧截留沈降量；FG_{young}：更新林雲霧截留沈降量；TF_{old}：老齡林穿落水量；SF_{old}：老齡林幹流量；TF_{young}：更新林穿落水量；SF_{young}：更新林幹流量)

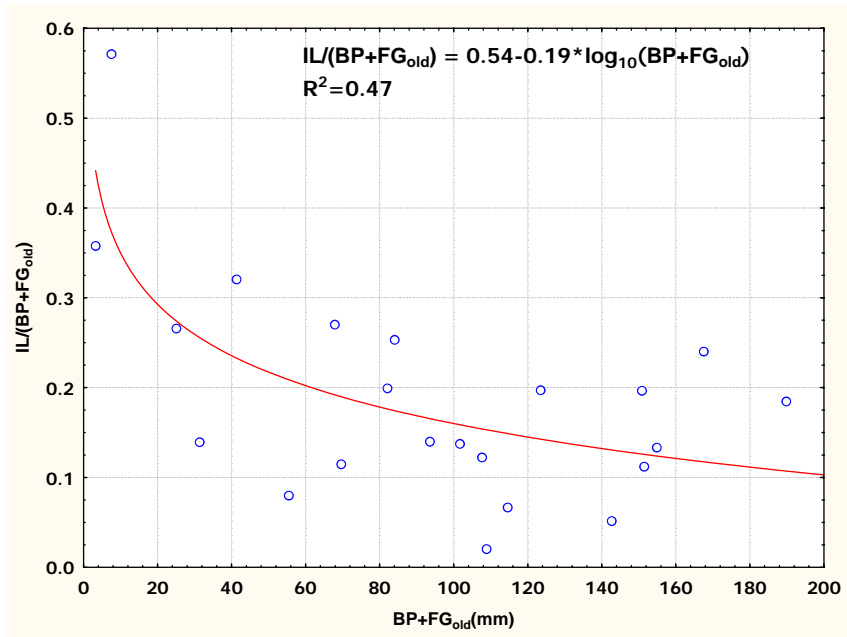


圖 23 老齡林截留率與總沈降量關係圖。IL:截留流失，BP:重力沈降，FG:截留沈降。

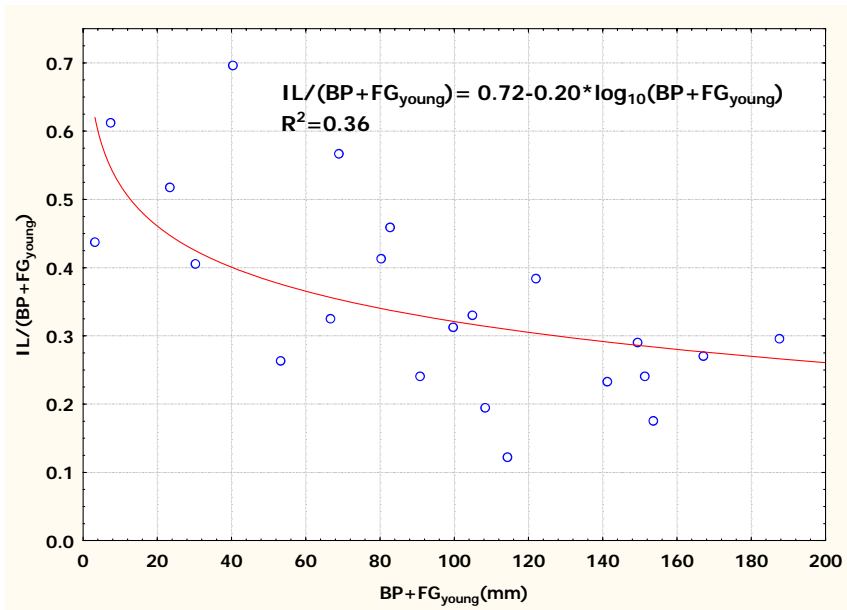


圖 24 更新林截留率與總沈降量關係圖。IL:截留流失，BP:重力沈降，FG:截留沈降。

6. 結論

本研究於台灣扁柏老齡林及更新林中量測穿落水水量及影響因子的研究，結果顯示林外降雨量及總沈降量影響兩林分穿落水水量。兩林分穿落水水量變異係數隨林外降雨量增大而變小。顯示當降雨量愈大，各點間水量的差異愈小。本研究地區雲霧沈降量大，扁柏葉截留雲霧沈降後，影響穿落水量，造成較鬱閉的位置穿落水量增加。半變異元分析結果，更新林空間相關距離在多數事件時均大於老齡林，推測是更新林較鬱閉造成。穿落水水量變化的週期，約同於冠幅大小，顯示樹冠影響扁柏林穿落水的水量。因應空間變異，於本研究老齡林樣區中至少需 7 個，更新林需 9 個收集器。

7. 引用文獻

- 江永哲, 1972. 不同樹冠截留量之測定. 中華水土保持學報, 3, 22-57.
- 呂小娟和張少同, 2000. 樣本半偏差極限值分佈的探討. 師大學報: 數理與科技類, 45, 11-19.
- 林作炬, 1988. 台灣扁柏之人工育林. 現代育林, 3, 29-32.
- 林登秋, 夏禹九和金恆鏢, 1996. 台灣東北部天然闊葉林林內降雨及林冠截留之研究. 台灣林業科學, 11, 393-400.
- 林登秋和江智民, 2002. 半球面影像在森林生態研究的應用. 台灣林業科學, 17, 387-400.
- 時忠杰, 王彥輝, 熊偉, 于澎濤, 郭浩, 張雷燕和董曉紅, 2006. 單株華北落葉松樹冠穿透降雨的空間異質性. 生態學報, 26, 2887-2886.
- 陳子弘, 2006. 鴛鴦湖地區台灣扁柏森林幹流水量之估算. 碩士論文, 自然資源管理研究所. 花蓮: 東華大學.
- 陳信雄, 1990. 森林水文學. 千華出版社, 台北, pp. 582.
- 陳凱欣, 2005. 鴛鴦湖台灣扁柏森林生物量與冠層結構. 碩士論文, 自然資源管理研究所. 花蓮: 東華大學.
- 陳耀德, 2003. 鴛鴦湖森林生態系大氣養份輸入之探討. 碩士論文, 自然資源管理研究所. 花蓮: 東華大學.
- 陸象豫和唐凱軍, 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, 447-457.
- 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, 20-23.
- 黃昭豪, 2007. 台灣扁柏森林中雲霧顆粒化學與其在冠層間的變化及沉降. 碩士論文, 自然資源管理研究所. 花蓮: 東華大學.
- 葉青峰, 2004. 台灣扁柏森林的生物量以及雲霧沈降量估算. 碩士論文, 自然資源管理研究所. 花蓮: 東華大學.
- 潘家聲, 1964. 杉木林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗. 林業試驗所研究報告, 94, 1-15.
- 潘家聲, 1965. 台灣檫木林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗. 林業試驗所研究報告, 114, 1-17.
- 潘家聲, 1966. 天然闊葉林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗. 林業試驗所研究報告, 131, 1-20.

- 蔡欣育, 2005. 八卦山台地主要樹種雨水截留量之比較. 碩士論文, 彰化: 彰化師範大學.
- 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. 碩士論文, 自然資源管理研究所. 花蓮: 東華大學.
- 冀志軍和朱國全, 1990. 油桐林冠截留雨量的觀測研究. 湖南林業科技, 4, 26-28.
- 盧惠生, 林壯沛, 黃良鑫, 胡蘇澄和陸象豫, 2003. 天然闊葉林與檳榔園穿落水空間分佈特性之研究. 台灣林業科學, 131-41.
- 賴鴻寬, 2002. 塔塔加雲杉天然林內降水之研究. 碩士論文, 森林學研究所. 台北市: 台灣大學.
- Aboal, J. R., Jiménez M. S., Morales, D. and Gil, P., 2000. Effects of thinning on throughfall in Canary Islands pine forest – the role of fog. *Journal of Hydrology*, 238, 218-130.
- Abrahamson, D. A., Dougherty, P. M. and Zarnoch, S. J., 1998. Hydrological components of a young loblolly pine plantation on a sandy soil with estimates of water use and loss. *Water Resources Research*, 34, 3503-3513.
- Asdak, C., Jarvis, P. G., van Gardingen, P. and Fraser, A., 1998. Rainfall interception loss in unlogged and logged forest areas of Central Kalimantan, Indonesia. *Journal of Hydrology*, 206, 237-244.
- Aussenac, G., 1970. Action du couvert forestier sur la distribution au sol des précipitations. *Annales des Sciences Forestières* 27, 383–399.(引自 Keim et al. (2005))
- Beier, C. and Gundersen, P., 1989. Atmospheric deposition to the edge of a Spruce forest in Denmark. *Environmental Pollution*, 60, 257-271.
- Beier, C., Hansen, K. and Gundersen, P., 1993. Spatial variability of throughfall fluxes in a spruce forest. *Environmental Pollution*, 81, 257–267.
- Bellot, J. and Escarre, A., 1998. Stemflow and throughfall determination in a resprouted Mediterranean holm-oak forest. *Annales Des Sciences Forestieres*, 55, 847-865.
- Bottcher, J., Strebel, O. and Lauer, S., 1997. Spatial variability of groundwater solute concentrations at the water table under a pine stand on sandy soil with deep ground water. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 160, 67–72.
- Bouten, W., Heimovaara, T. and Tiktak, A., 1992. Spatial pattern of throughfall and soil water dynamics in a Douglas fir stand. *Water Resources Research*, 28, 3227–3233.

- Carleton, T. J. and Kavanagh, T., 1990. Influence of stand age and spatial location on throughfall chemistry beneath black spruce. *Canadian Journal of Forest Research-Revue*, 20, 1917-1925.
- Carlyle-Moses, D. E., Laureano, J. S. F. and Price, A. G., 2004. Throughfall and throughfall spatial variability in Madrean oak forest communities of northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*, 297, 124-135.
- Chang, S. C., Lai, I. L., and 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. and 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..
- Chuyong, B.G., Newbery, D.M. and Songwe, N.C., 2004. Rainfall input, throughfall and stemflow of nutrients in a central African rain forest dominated by ectomycorrhizal trees. *Biogeochemistry*, 67, 73-91.
- Crockford, R. H., Richardson, D. P. and Sageman, R., 1996, Chemistry of rainfall, throughfall and stemflow in a eucalypt forest and a pine plantation in southeastern Australia. 1. Rainfall. *Hydrological Processes*, 10, 1–11.
- Eaton, J. S., Likens, G. E. and Bormann, H. F., 1973. Throughfall and stemflow chemistry in a northern hardwood forest. *Journal of Ecology*, 61, 495-508.
- Ford, E. D. and Deans, J. D., 1978. The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young Sitka spruce plantation. *Journal of Arid Environments*, 15, 905-917.
- Frazer, G. W., Fournier, R. A., Trofymow, J. A., and Hall, R. J., 2001. A comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and light transmission. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109, 249-263.
- Gómez, J. A., Vanderlinden, K., Giraldez, J. V. and Fereres, E., 2002. Rainfall concentration under olive trees. *Agricultural Water Management*, 55, 53-70.

- Gringarten, E. and Deutsch, C. V., 2001. Teacher's aide variogram interpretation and modeling. *Mathematical Geology*, 33, 507-534.
- Hansen, K., 1995. In-canopy throughfall measurements in Norway spruce: water flow and consequences for ion fluxes. *Water, Air and Soil Pollution*, 85, 2259-2264.
- Helvey, J. D. and Patric, J. H., 1965. Canopy and litter interception of rainfall by hardwood forests of the eastern United States. *Water Resources Research*, 1, 193-206.
- Herwitz, S. R. and Slye, R. E., 1992. Spatial variability in the interception of inclined rainfall by a tropical rainforest canopy. *Selbyana*, 13, 62-71.
- 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.
- Hoppe, E., 1986. Regenmessung unter Baumkronen. *Mittheilungen aus dem forest lichen Versuchswesen Oesterreichs*. Helf 21. 75 pp. Vienna, Austria.(引自 Kittredge et al. (1941))
- Johnson, R. C., 1990. The interception, throughfall and stemflow in a forest in highland scotland and the comparison with other upland forests in the U.K. *Journal of Hydrology*, 118, 281-287.
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M. and Baret, F., 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 19-35.
- Keim, R. F. and Skaugset, A. E., 2004. A linear system model of dynamic throughfall rates beneath forest canopies. *Water Resources Research*, 40, 1-12.
- Keim, R. F., Skaugset, A. E. and Weiler, M., 2005. Temporal persistence of spatial patterns in throughfall. *Journal of Hydrology*, 314, 263-274.
- Keim, R. F., Skaugset, A. E., Link, T. E. and Iroume, A., 2004. A stochastic model of throughfall for extreme events. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8, 23-34.
- Kimmins, J. P., 1973. Some statistical aspects of sampling throughfall precipitation in nutrient cycling studies in British Columbian coastal forests. *Ecology*, 54, 1008-1019.

- Kittredge, J., Loughead, H. J. and Mazurak, A., 1941. Interception and stemflow in pine plantation. *Journal of Forestry*, 39, 505-522.
- Konishi, S., Tani, M., Kosugi, Y., Takanashi, S., Sahat, M. M., Nik, A. R., Niiyama, K. and Okuda, T., 2006. Characteristics of spatial distribution of throughfall in a lowland tropical rainforest, Peninsular Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 224, 19-25.
- Kostelnik, K.M., Lynch, J. A., Grimm, J.W. and Corbett, E. S., 1989. Sample size requirements for estimation of throughfall chemistry beneath a mixed hardwood forest, *Journal of Environmental Quality*, 18, 274–280.
- Krupa, S. V., 2002. Sampling and physico-chemical analysis of precipitation: a review. *Environmental Pollution*, 120, 565-594.
- Lai, I. L., Chang, S. C., Lin, P. H., Chou. C. H. and Wu, J. T., 2006. Climatic characteristics of the subtropical mountainous cloud forest at the Yuanyang lake long-term ecological research site, Taiwan. *Taiwania*, 51, 317-329.
- Lawrence, G. B. and Fernandez, I. J., 1993. A reassessment of areal variability of throughfall deposition measurements. *Ecological Applications*, 3, 473–480.
- Lin, T. C., Hamburg, S. P., King, H. B. and Hsia, Y. J., 1997. Spatial variability of throughfall in a subtropical rain forest in Taiwan. *Journal of Environmental Quality*, 26, 172-180.
- Lloyd, C. R. and Marques-Filho, A., 1988. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rain forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 42, 63-73.
- Loescher, H. W., Powers, J. S. and Oberbauer, S. F. 2002. Spatial variation of throughfall volume in an old-growth tropical wet forest, Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology*, 18, 397-407.
- Loustau, D., Berbigier, P., Granier, A. and Moussa, F. E. H., 1992. Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. I. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy. *Journal of Hydrology*, 138, 449-467.
- Lovett, G. M. and Lindberg, S. E., 1984. Dry deposition and canopy exchange in a mixed oak forest as determined by analysis of throughfall, *Journal of Applied Ecology*, 21, 1013–1027.

- Lovett, G. M. and Reiners, W. A., 1986. Canopy structure and cloud water deposition in subalpine coniferous forest. *Tellus*, 38B, 319-327
- Manderscheid, B. and Matzner, E., 2000. Spatial and temporal variation of soil solution chemistry and ion fluxes through the soil in a mature Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand. *Biogeochemistry*, 30, 99–114.
- Matzner, E., 1989. Acidic precipitation: case study Solling. In: *Acidic Precipitation*. Adriano, D. C. and Havas, M. Editors. New York. 39-83.
- Parker, G. G., 1983. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Advances in Ecological Research*, 13, 58-135.
- Peterson, D. L. and Rolfe, G. L., 1979. Determining sample size in throughfall studies. *Forest Science*, 25, 582-584.
- Price, A. G., Dunham, K., Carleton, T., Band, L., 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.
- Puckett, L. J., 1991, Spatial variability and collector requirements for sampling throughfall volume and chemistry under a mixed hardwood canopy. *Canadian Journal of Forest Research* 21, 1581–1588.
- Pypker, T. G., Bond, B. J., Link, T. E., Marks, D. and Unsworth, M. H., 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, 113-129.
- Raat, K. J., Draaijers, G. P. J., Schaap, M. G., Tietema, A. and Verstraten, J. M., 2002. Spatial variability of throughfall water and chemistry and forest floor water content in a Douglas fir forest stand. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6, 363-374.
- Reynolds, B., Cape, J. N. and Paterson, I. S., 1989, A comparison of element fluxes in throughfall beneath larch and Sitka spruce at two contrasting sites in the United Kingdom, *Forestry*, 62, 29–39.
- Reynolds, E. R. C. and Leyton, L., 1963, Measurement and Significance of Throughfall in Forest Stands, in Rutter, A. J. and Whitehead, F. H. (eds.), *Water Relations of Plants*, Oxford, Blackwell Scientific Publications, 127–141.

- Rodrigo, A. and Ávila, A., 2001. Influence of sampling size in the estimation of mean throughfall in two Mediterranean holm oak forests. *Journal of Hydrology*, 243, 216-227.
- Rogerson, T. L., Byrnes, W. R., 1968. Net rainfall under hardwoods and red pine in central Pennsylvania. *Water Resource Research*, 4, 55-7.
- Rothacher, J., 1963. Net precipitation under a Douglas-fir forest. *Forest Science*, 9, 423-429.
- Rutter, A. J., Kershaw, K. A., Robins, P. C. and Monton, A. J., 1971. A predictive model of rainfall interception forests, I. Derivation of the model from observations in a plantation of corsican pine. *Agricultural Meteorology*, 9, 367-384.
- Schemid, J. M., Mata, S. A., Martinez, M. H. and Troendle, C. A., 1991. Net precipitation within small group infestation of the mountain pine beetle. USDA For Serv Res Note RM-508, Fort Co: Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 4 p.
- Schume, H., Jost, G. and Katzensteiner, K., 2003. Spatio-temporal analysis of the soil water content in a mixed Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.)-European beech (*Fagus sylvatica* L.) stand. *Geoderma*, 112, 273-287.
- Seiler, J. and Matzner, E., 1995. Spatial variability of throughfall chemistry and selected soil properties as influenced by stem distance mature Norway spruce (*Picea abies*, Karst.). *Plant and Soil*, 176, 139-147.
- Staelens, J., De Schrijver, A., Verheyen, K. and Verhoest, N. E. C., 2006. Spatial variability and temporal stability of throughfall water under a dominant beech (*Fagus sylvatica* L.) tree in relationship to canopy cover. *Journal of Hydrology*, 330, 651-662.
- Stout, B. B. and McMahon, R. J., 1961. Throughfall variation under tree crowns. *Journal of Geophysical Research*, 66, 1839-1843.
- Thimonier, A., 1998. Measurement of atmospheric deposition under forest canopies: Some recommendations for equipment and sampling design. *Environmental Monitoring And Assessment*, 52, 353-387.
- Tobón, C., Sevink, J. and Verstraten, J. M., 2004. Solute fluxes in throughfall and stemflow in four forest ecosystems in northwest Amazonia. *Biogeochemistry*, 70, 1-25.
- Voigt, G.K., 1960. Distribution of rainfall under forest stands. *Forest Science*, 6, 2-10.

Whelan, M. J., Anderson, J. M., 1996. Modelling spatial patterns of throughfall and interception loss in a Norway spruce (*Picea abies*) plantation at the plot scale. *Journal of Hydrology* 186, 335–354.

附錄 1 老齡林各點開闊度(VisSky)及葉面積指數(LAI)資料

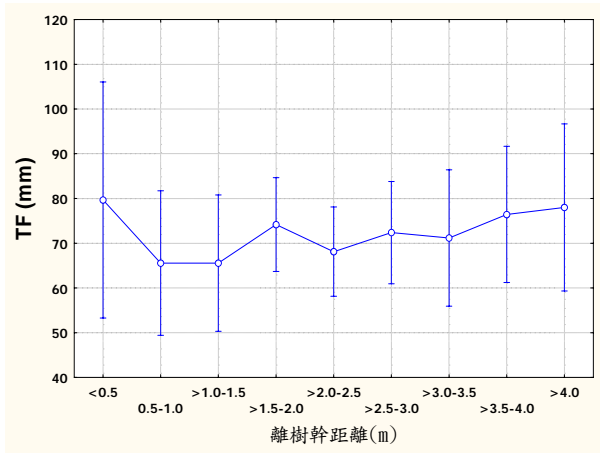
樣點	VisSky	LAI	樣點	VisSky	LAI	樣點	VisSky	LIA	樣點	VisSky	LAI
老(E-W)000	0.235	5.792	老(E-W)025	0.352	4.063	老(N-S)001	0.349	4.118	老(N-S)026	0.253	5.503
老(E-W)001	0.301	4.806	老(E-W)026	0.188	6.526	老(N-S)002	0.205	6.346	老(N-S)027	0.410	3.462
老(E-W)002	0.397	3.688	老(E-W)027	0.468	3.009	老(N-S)003	0.139	7.885	老(N-S)028	0.381	3.860
老(E-W)003	0.333	4.399	老(E-W)028	0.442	3.157	老(N-S)004	0.499	2.779	老(N-S)029	0.387	3.759
老(E-W)004	0.367	4.009	老(E-W)029	0.393	3.735	老(N-S)005	0.372	3.954	老(N-S)030	0.391	3.712
老(E-W)005	0.335	4.376	老(E-W)030	0.407	3.587	老(N-S)006	0.458	3.118	老(N-S)031	0.361	3.993
老(E-W)006	0.426	3.415	老(E-W)031	0.356	4.134	老(N-S)007	0.240	5.706	老(N-S)032	0.340	4.267
老(E-W)007	0.404	3.618	老(E-W)032	0.381	3.860	老(N-S)008	0.283	5.056	老(N-S)033	0.414	3.532
老(E-W)008	0.288	4.977	老(E-W)033	0.426	3.321	老(N-S)009	0.171	7.042	老(N-S)034	0.419	3.431
老(E-W)009	0.205	6.323	老(E-W)034	0.365	3.970	老(N-S)010	0.300	4.735	老(N-S)035	0.511	2.490
老(E-W)010	0.203	6.370	老(E-W)035	0.285	4.938	老(N-S)011	0.224	5.964	老(N-S)036	0.470	2.892
老(E-W)011	0.239	5.698	老(E-W)036	0.264	5.331	老(N-S)012	0.364	3.978	老(N-S)037	0.458	3.056
老(E-W)012	0.092	9.565	老(E-W)037	0.268	5.259	老(N-S)013	0.259	5.401	老(N-S)038	0.443	3.259
老(E-W)013	0.229	5.893	老(E-W)038	0.434	3.345	老(N-S)014	0.346	4.243	老(N-S)039	0.306	4.743
老(E-W)014	0.331	4.415	老(E-W)039	0.331	4.423	老(N-S)015	0.482	2.892	老(N-S)040	0.434	3.337
老(E-W)015	0.395	3.712	老(E-W)040	0.437	3.306	老(N-S)016	0.534	2.497	老(N-S)041	0.330	4.431
老(E-W)016	0.474	2.907	老(E-W)041	0.158	7.385	老(N-S)017	0.438	3.259	老(N-S)042	0.317	4.532
老(E-W)017	0.477	2.802	老(E-W)042	0.200	6.440	老(N-S)018	0.282	5.063	老(N-S)043	0.343	4.282
老(E-W)018	0.501	2.661	老(E-W)043	0.258	5.339	老(N-S)019	0.163	7.217	老(N-S)044	0.272	5.196
老(E-W)019	0.490	2.852	老(E-W)044	0.197	6.487	老(N-S)020	0.225	6.424	老(N-S)045	0.305	5.551
老(E-W)020	0.546	2.388	老(E-W)045	0.417	3.493	老(N-S)021	0.295	4.876	老(N-S)046	0.523	2.512
老(E-W)021	0.339	4.329	老(E-W)046	0.228	5.909	老(N-S)022	0.405	3.602	老(N-S)047	0.593	2.021
老(E-W)022	0.151	7.573	老(E-W)047	0.059	11.323	老(N-S)023	0.580	2.153	老(N-S)048	0.532	2.466
老(E-W)023	0.434	3.337	老(E-W)048	0.056	11.557	老(N-S)024	0.400	3.579	老(N-S)049	0.501	2.661
老(E-W)024	0.289	4.970	老(E-W)049	0.126	8.299	老(N-S)025	0.268	5.259	老(N-S)050	0.423	3.438

附錄 2 更新林各點開闊度及葉面積指數資料

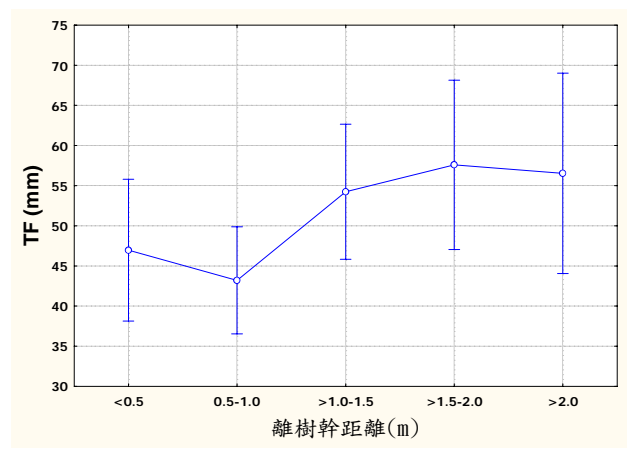
樣點	VisSky	LAI	樣點	VisSky	LAI	樣點	VisSky	LAI	樣點	VisSky	LAI
更 000	0.242	5.666	更 026	0.269	4.983	更 052	0.506	2.3099	更 078	0.290	4.814
更 001	0.229	5.893	更 027	0.318	4.579	更 053	0.335	4.2821	更 079	0.203	6.377
更 003	0.267	5.977	更 028	0.334	4.297	更 054	0.195	6.533	更 080	0.123	8.393
更 002	0.398	3.586	更 029	0.295	4.883	更 055	0.181	6.830	更 081	0.048	12.104
更 004	0.253	5.401	更 030	0.320	4.563	更 056	0.154	7.494	更 082	0.221	6.049
更 005	0.082	10.014	更 031	0.305	4.438	更 057	0.256	5.4558	更 083	0.355	4.133
更 006	0.101	9.174	更 032	0.287	4.993	更 058	0.236	5.768	更 084	0.630	1.741
更 007	0.317	4.532	更 033	0.280	5.086	更 059	0.321	4.547	更 085	0.471	3.008
更 008	0.529	2.263	更 034	0.286	5.01	更 060	0.309	4.5785	更 086	0.450	3.196
更 009	0.542	2.379	更 035	0.456	3.141	更 061	0.259	5.3933	更 087	0.435	3.133
更 010	0.383	3.755	更 036	0.476	2.969	更 062	0.265	5.117	更 088	0.220	6.049
更 011	0.549	2.278	更 037	0.411	3.563	更 063	0.299	4.8368	更 089	0.257	5.408
更 012	0.525	2.450	更 038	0.481	2.875	更 064	0.329	4.446	更 090	0.248	5.508
更 013	0.299	4.695	更 039	0.483	2.805	更 065	0.217	6.119	更 091	0.243	5.658
更 014	0.149	7.604	更 040	0.519	2.598	更 066	0.382	3.844	更 092	0.331	4.117
更 015	0.146	7.564	更 041	0.306	4.735	更 067	0.315	4.617	更 093	0.348	4.063
更 016	0.096	9.385	更 042	0.256	5.393	更 068	0.215	6.143	更 094	0.389	3.445
更 017	0.162	7.291	更 043	0.198	6.447	更 069	0.226	5.940	更 095	0.256	5.416
更 018	0.214	8.766	更 044	0.252	5.510	更 070	0.224	5.860	更 096	0.270	8.151
更 019	0.183	6.791	更 045	0.317	6.127	更 071	0.223	5.916	更 097	0.261	5.346
更 020	0.175	6.971	更 046	0.343	3.993	更 072	0.153	7.518	更 098	0.461	2.968
更 021	0.233	5.783	更 047	0.082	10.018	更 073	0.107	8.9323	更 099	0.446	3.157
更 022	0.281	5.079	更 048	0.161	7.315	更 074	0.160	7.330	更 100	0.236	5.783
更 023	0.189	6.666	更 049	0.187	6.698	更 075	0.114	8.682			
更 024	0.222	6.010	更 050	0.231	5.854	更 076	0.233	5.822			
更 025	0.315	4.6181	更 051	0.491	2.821	更 077	0.274	5.039			

附錄 3 各降雨事件時離樹幹距離與穿落水水量之關係圖(TF：穿落水，BP：林外雨)。

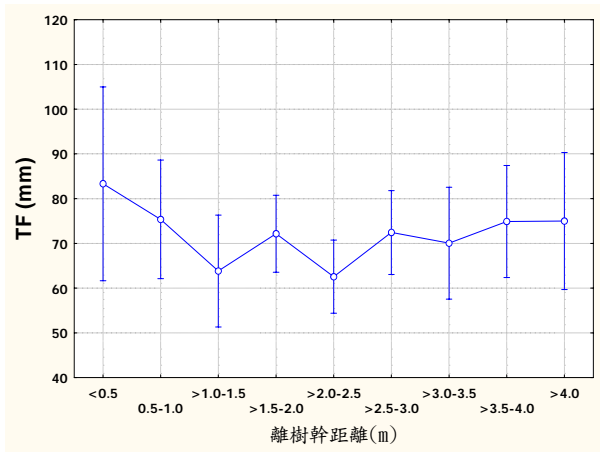
(a1)事件 1(BP=70.0mm) 老齡林



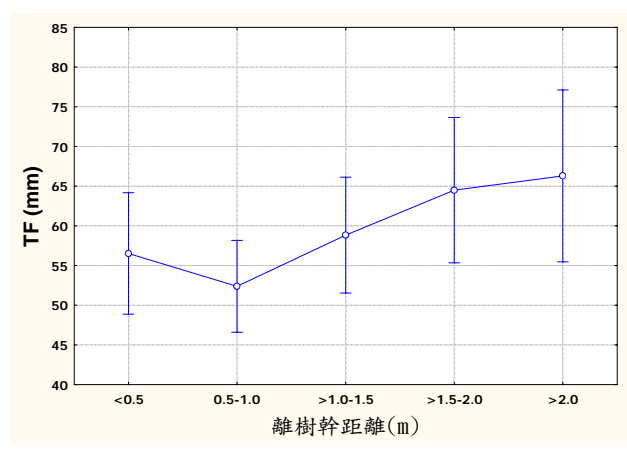
(a2)事件 1(BP=70.0mm) 更新林



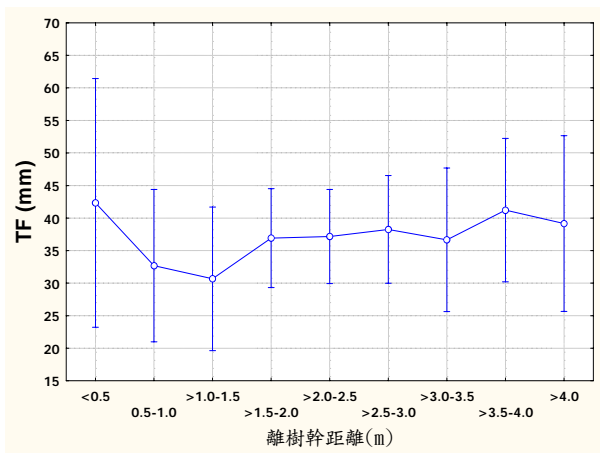
(b1)事件 2(BP=75.0mm) 老齡林



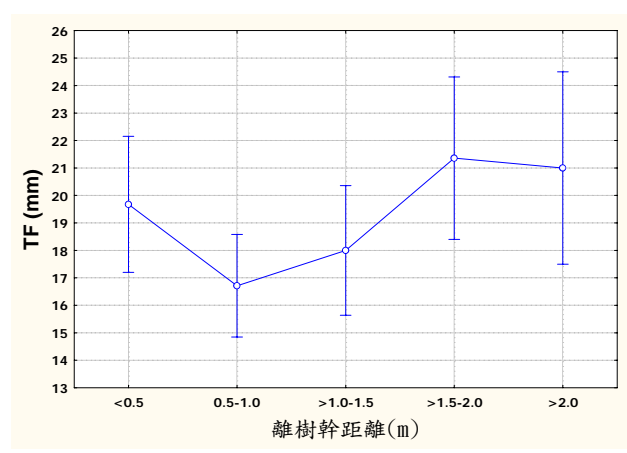
(b2)事件 2(BP=75.0mm) 更新林



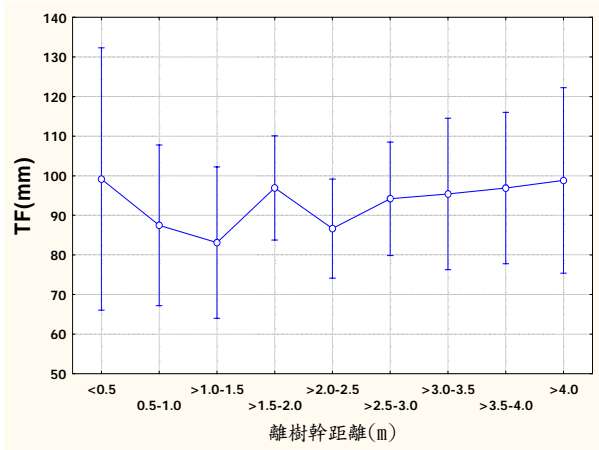
(c1)事件 3(BP=35.0mm) 老齡林



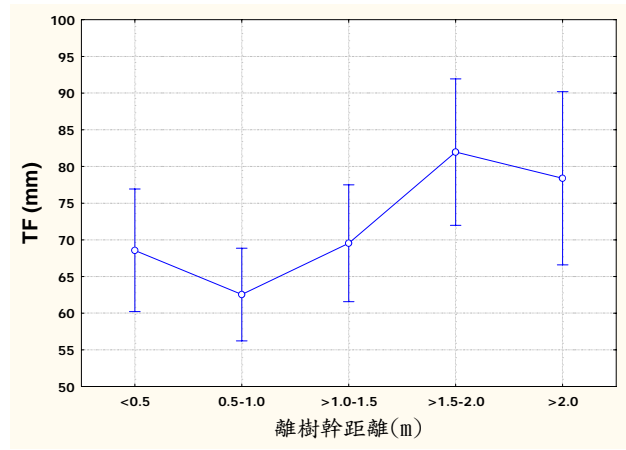
(c2)事件 3(BP=35.0mm) 更新林



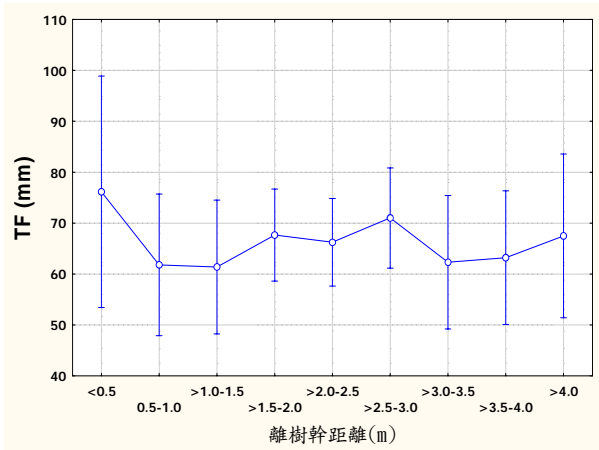
(d1)事件 4(BP=88.5mm) 老齡林



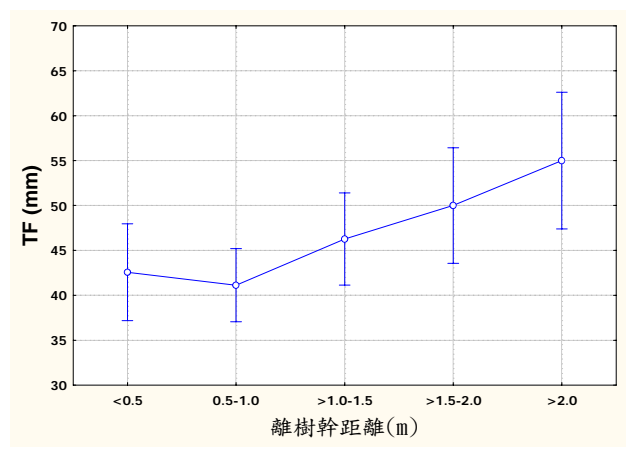
(d2)事件 4(BP=88.5mm) 更新林



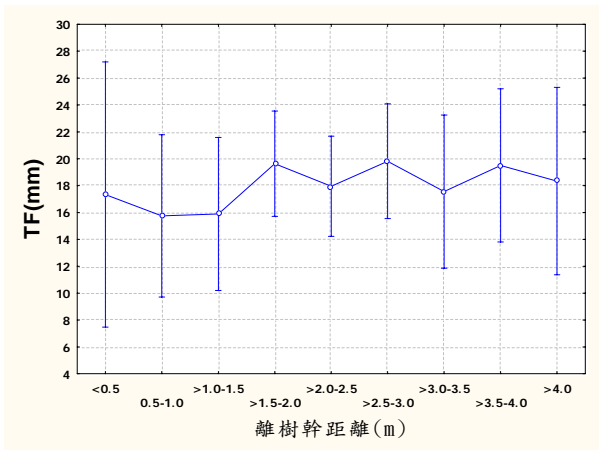
(e1)事件 5(BP=75.0mm) 老齡林



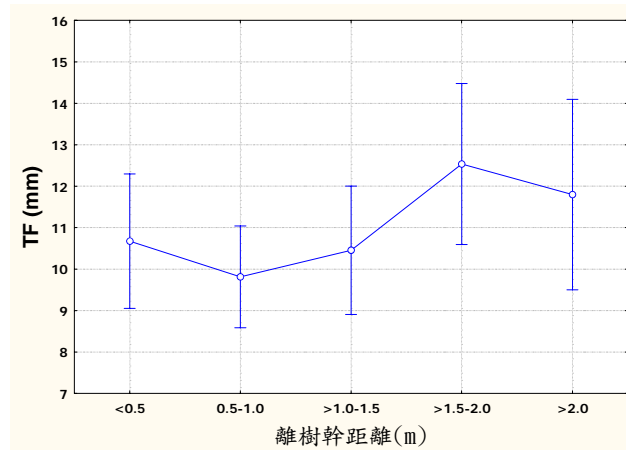
(e2)事件 5(BP=75.0mm) 更新林



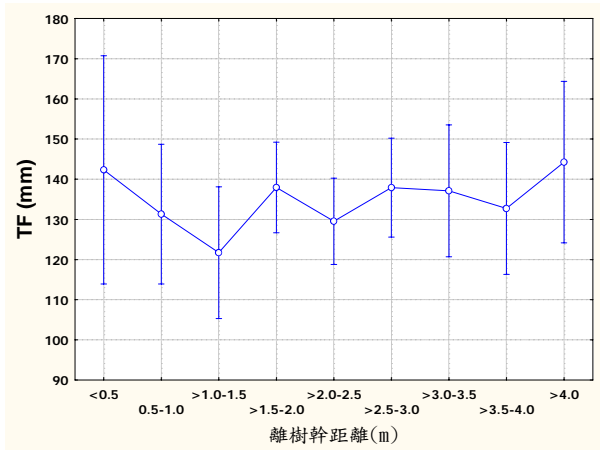
(f1)事件 6(BP=14.0mm) 老齡林



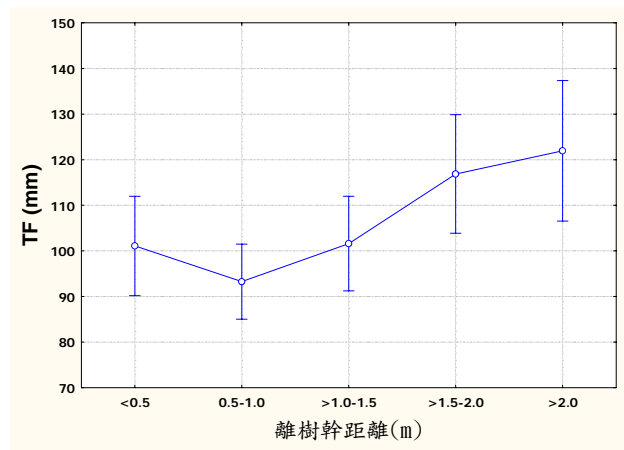
(f2)事件 6(BP=14.0mm) 更新林



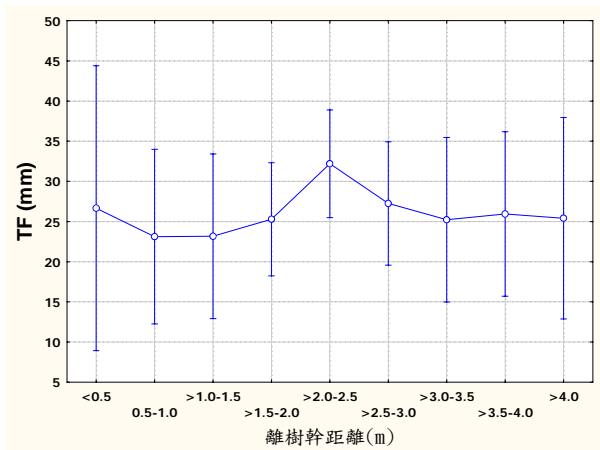
(g1)事件 7(BP=133.0mm) 老齡林



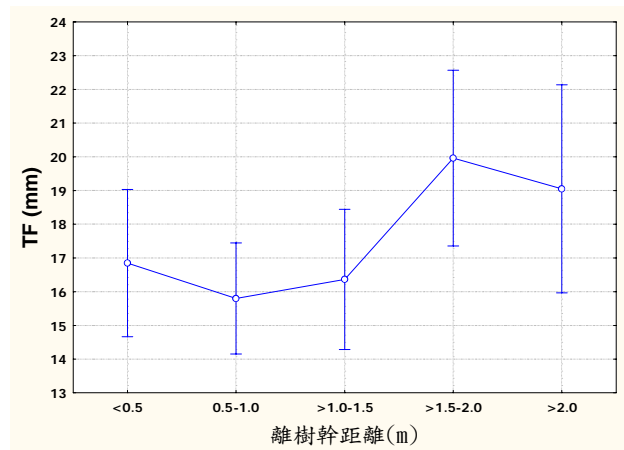
(g2)事件 7(BP=133.0mm) 更新林



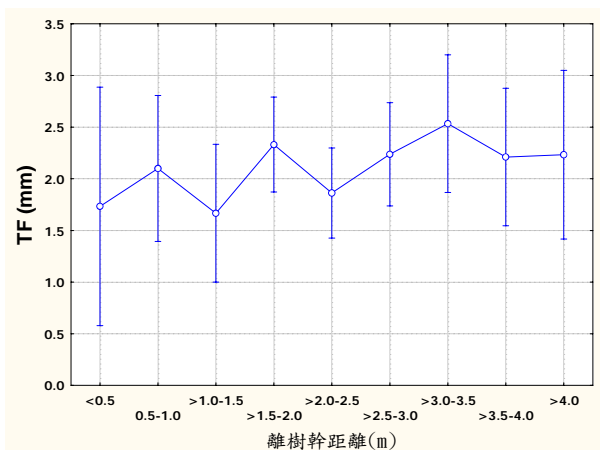
(h1)事件 8(BP=24.0mm) 老齡林



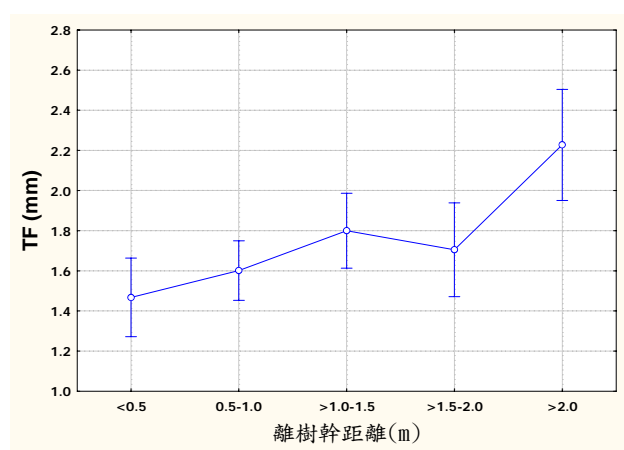
(h2)事件 8(BP=24.0mm) 更新林



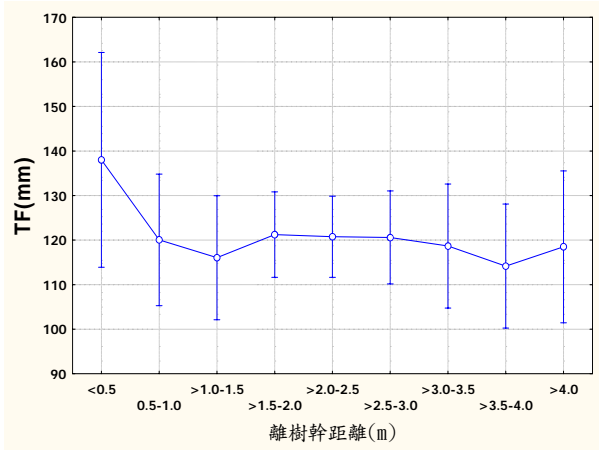
(i1)事件 9(BP=2.5mm) 老齡林



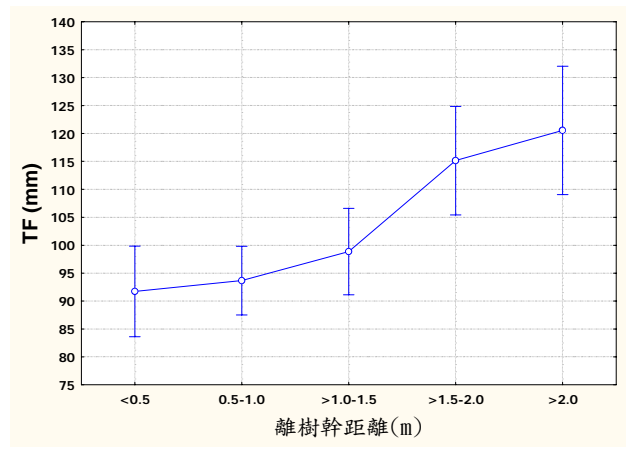
(i2)事件 9(BP=2.5mm) 更新林



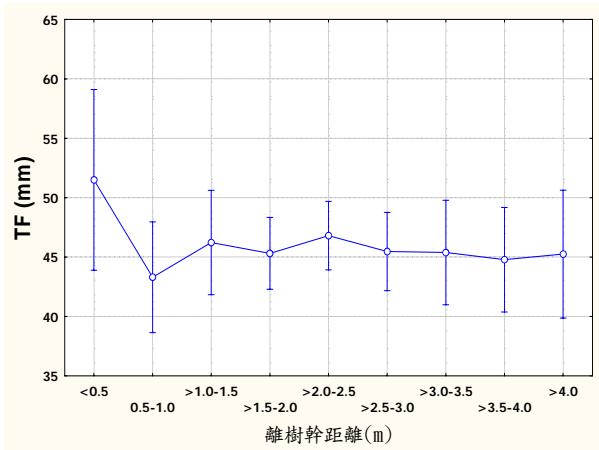
(j1)事件 10(BP=141.0mm) 老齡林



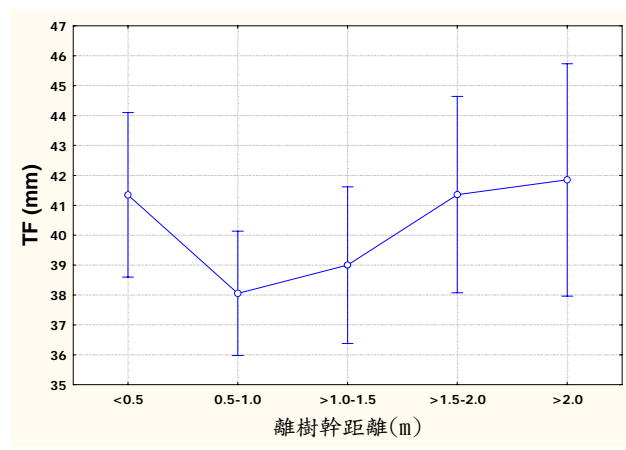
(j2)事件 10(BP=141.0mm) 更新林



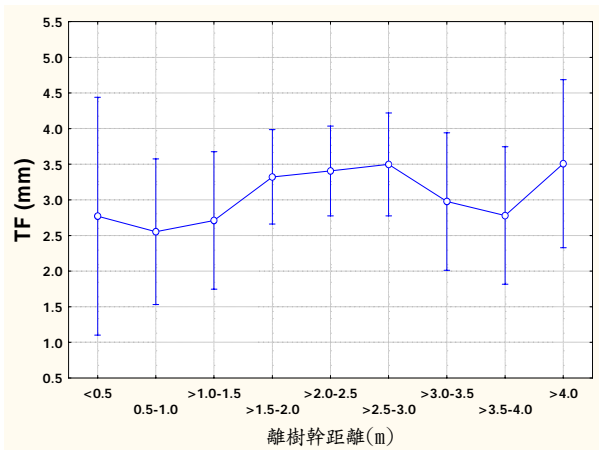
(k1)事件 11(BP=60.0mm) 老齡林



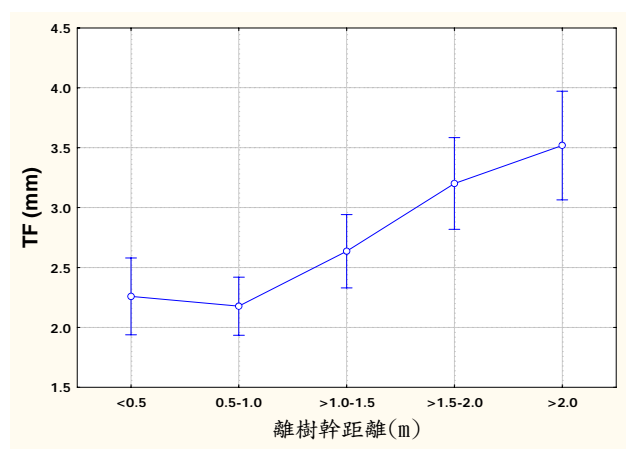
(k2)事件 11(BP=60.0mm) 更新林



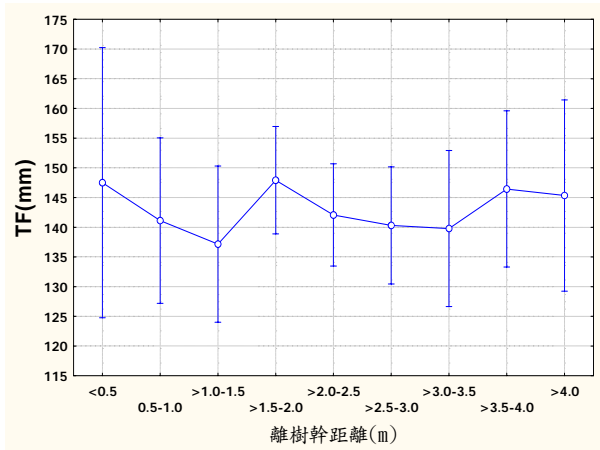
(l1)事件 12(BP=3.0mm) 老齡林



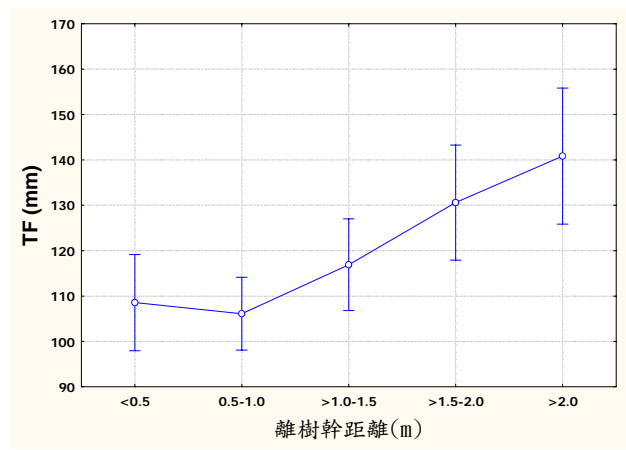
(l2)事件 12(BP=3.0mm) 更新林



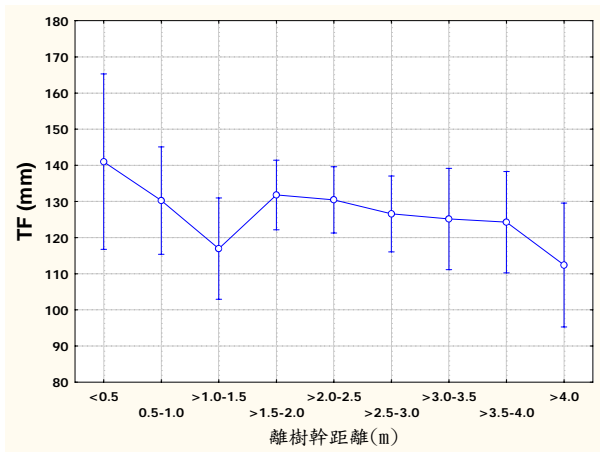
(m1)事件 13(BP=132.0mm) 老齡林



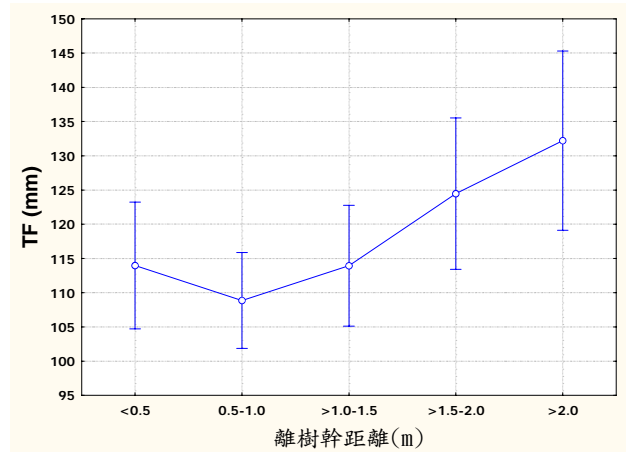
(m2)事件 13(BP=132.0mm) 更新林



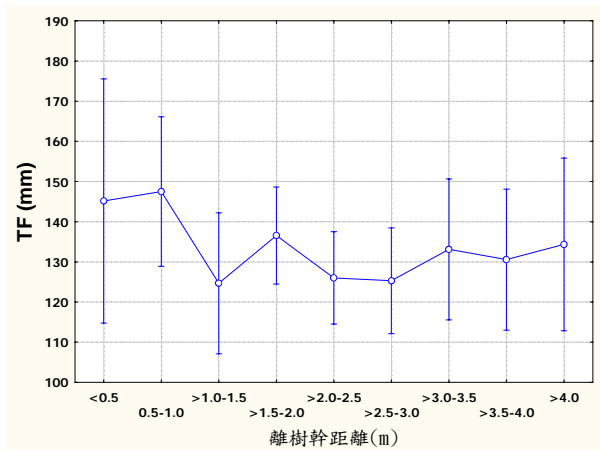
(n1)事件 14(BP=167.0mm) 老齡林



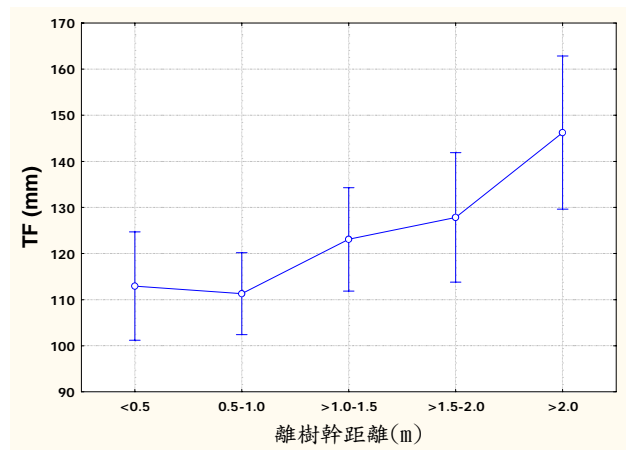
(n2)事件 14(BP=167.0mm) 更新林



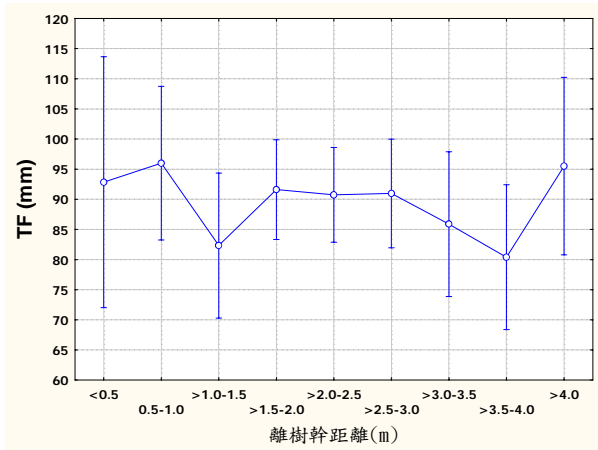
(o1)事件 15(BP=159.5mm) 老齡林



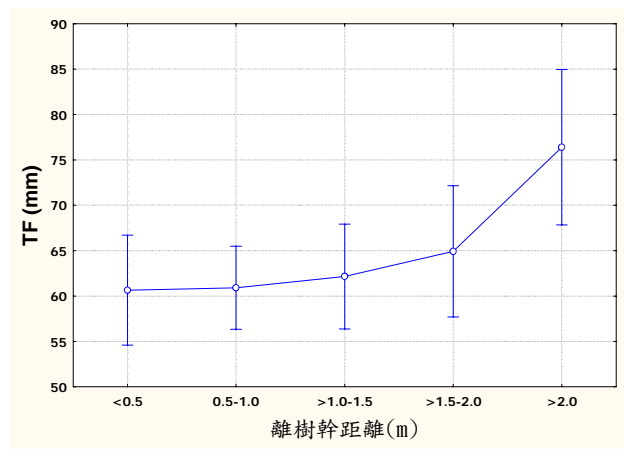
(o2)事件 15(BP=159.5mm) 更新林



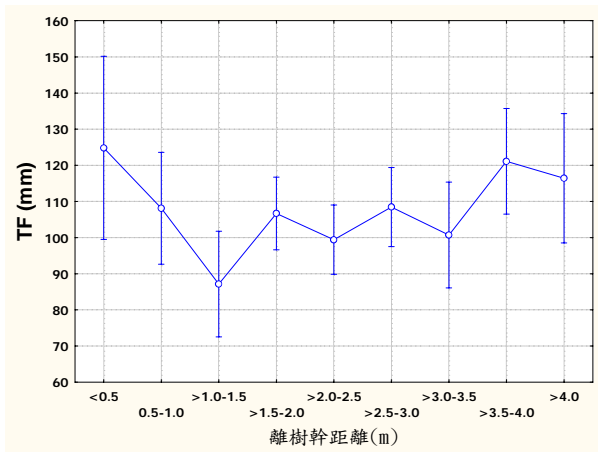
(p1)事件 16(BP=160.5mm) 老齡林



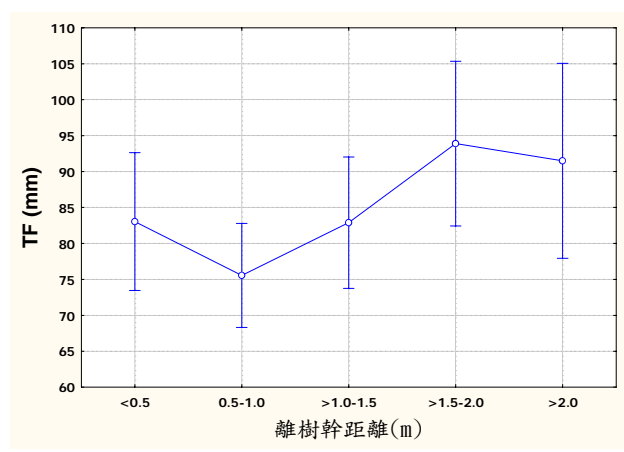
(p2)事件 16(BP=160.5mm) 更新林



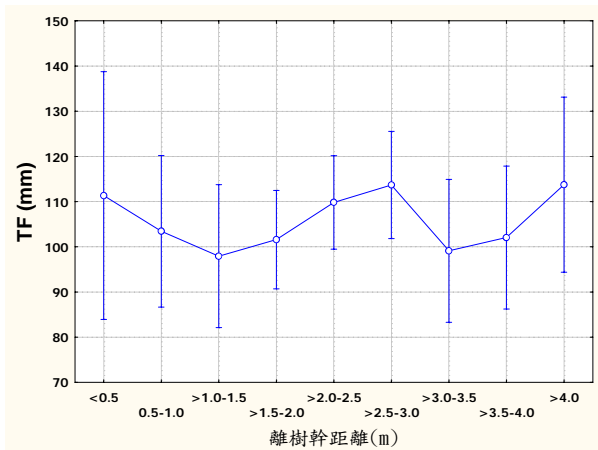
(q1)事件 17(BP=102.0mm) 老齡林



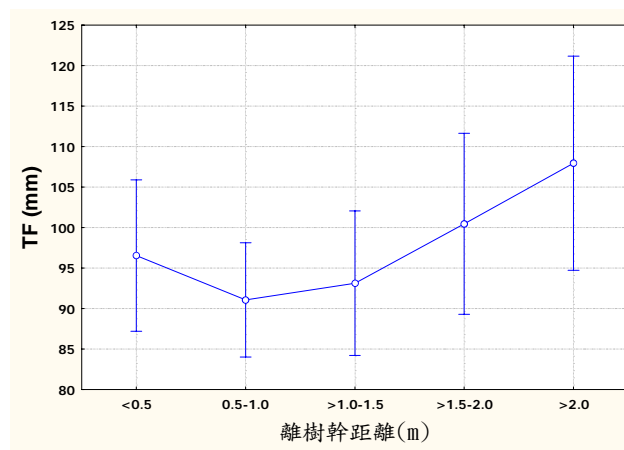
(q2)事件 17(BP=102.0mm) 更新林



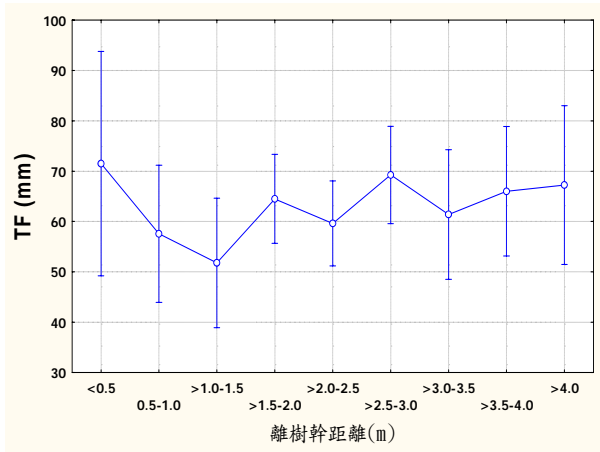
(r1)事件 18(BP=113.5mm) 老齡林



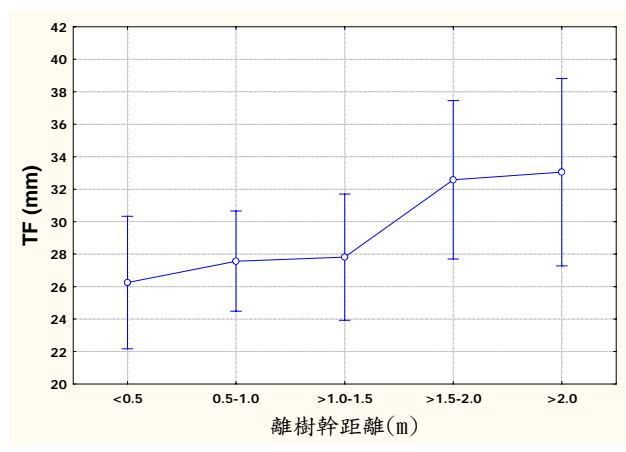
(r2)事件 18(BP=113.5mm) 更新林



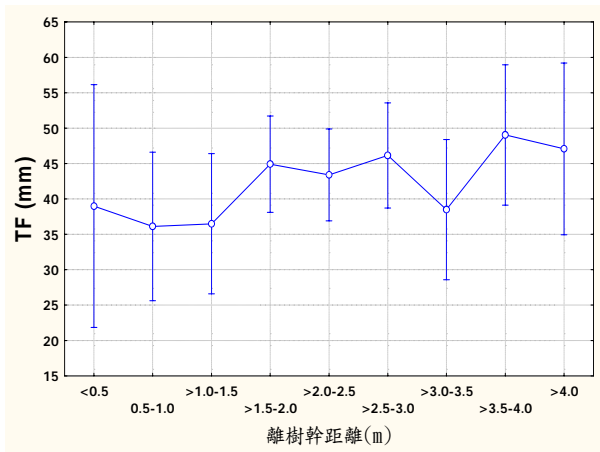
(s1)事件 19(BP=32.0mm) 老齡林



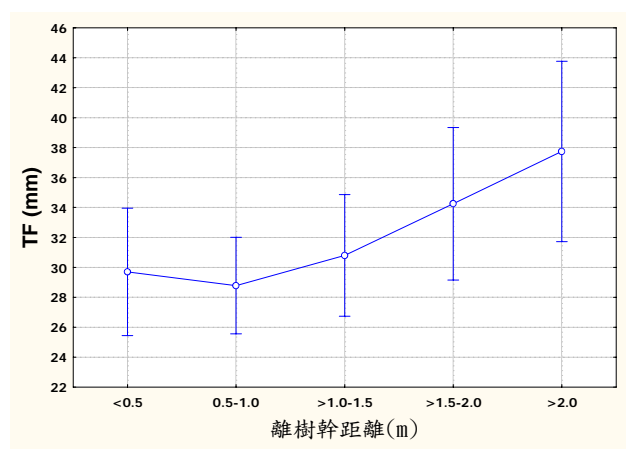
(s2)事件 19(BP=32.0mm) 更新林



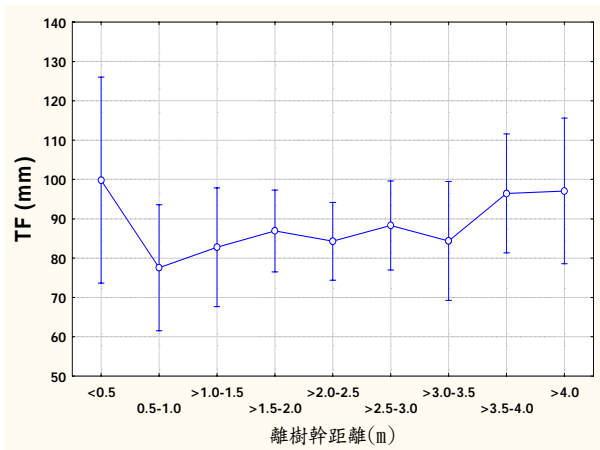
(t1)事件 20(BP=40.0mm) 老齡林



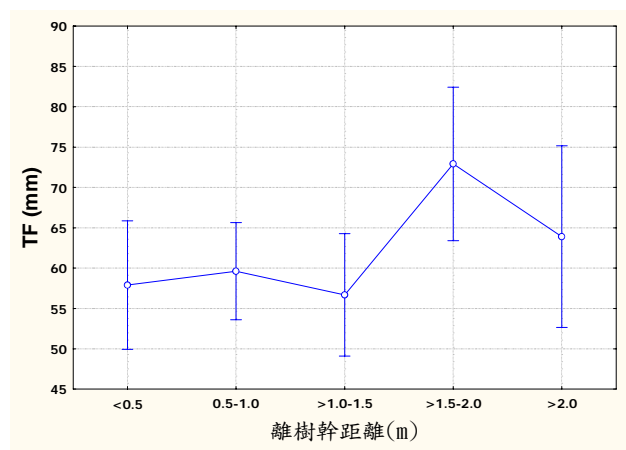
(t2)事件 20(BP=40.0mm) 更新林



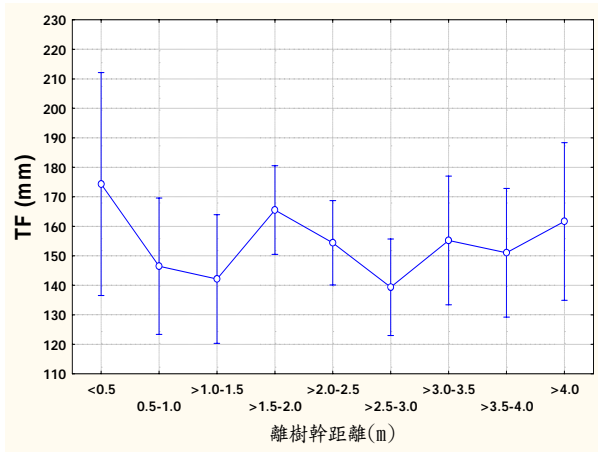
(u1)事件 21(BP=64.0mm) 老齡林



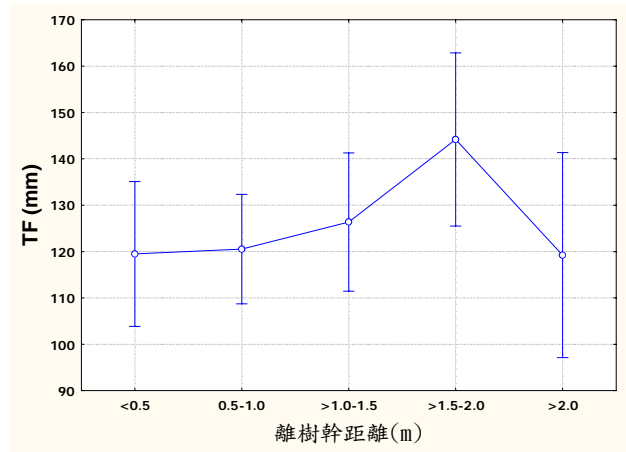
(u2)事件 21(BP=64.0mm) 更新林



(v1)事件 22(BP=189.0mm) 老齡林

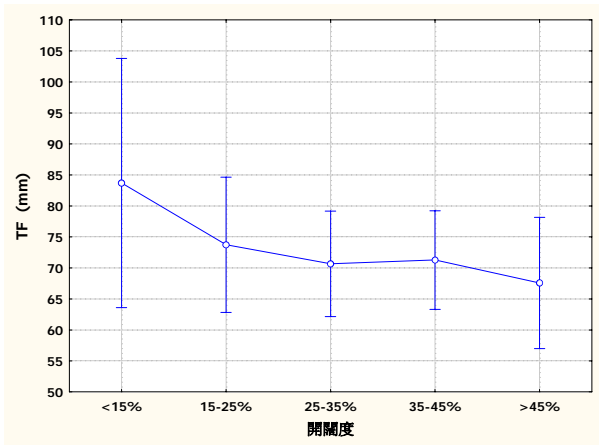


(u2)事件 22(BP=189.0mm) 更新林

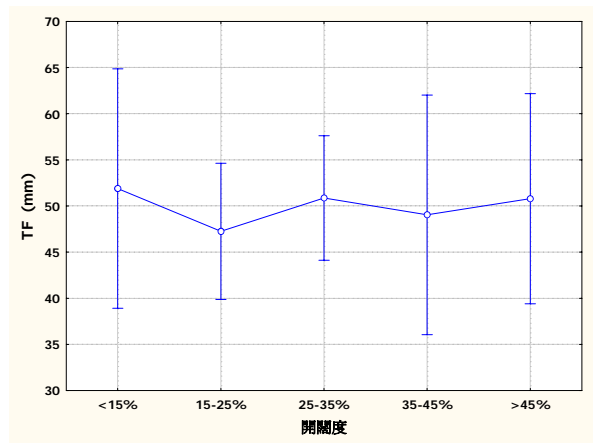


附錄 4 各降雨事件時開闢度與穿落水水量之關係圖。

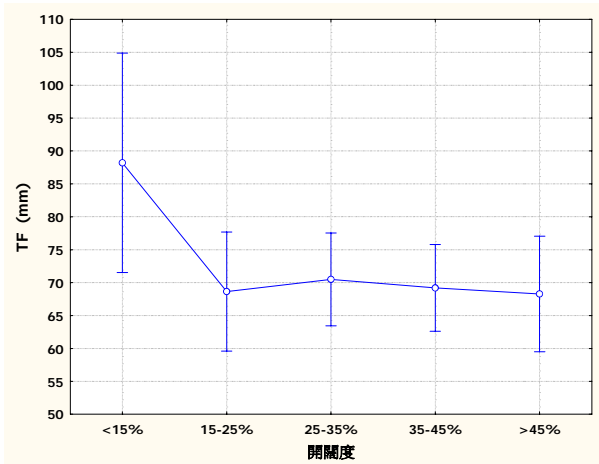
(a1)事件 1(BP=70.0mm) 老齡林



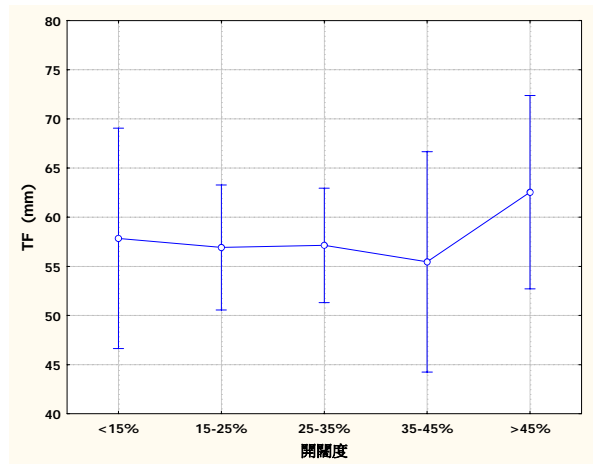
(a2)事件 1(BP=70.0mm) 更新林



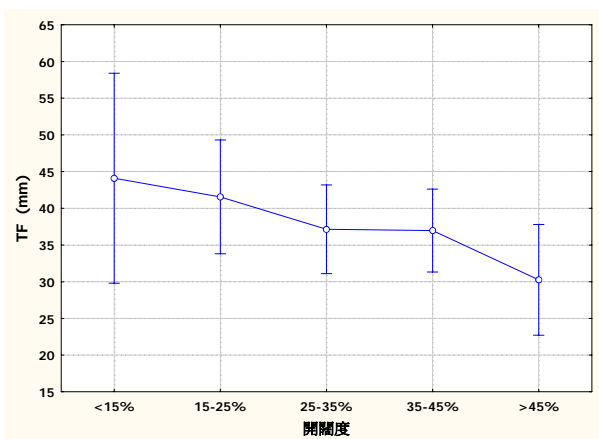
(b1)事件 2(BP=75.0mm) 老齡林



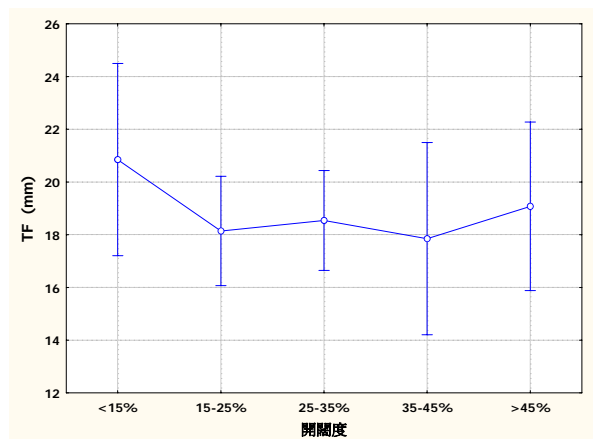
(b2)事件 2(BP=75.0mm) 更新林



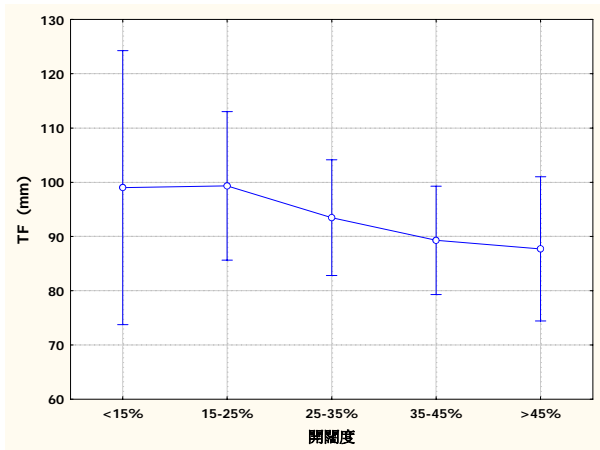
(c1)事件 3(BP=35.0mm) 老齡林



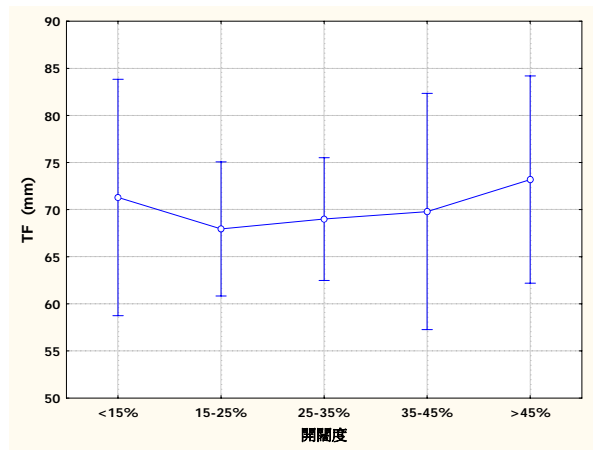
(c2)事件 3(BP=35.0mm) 更新林



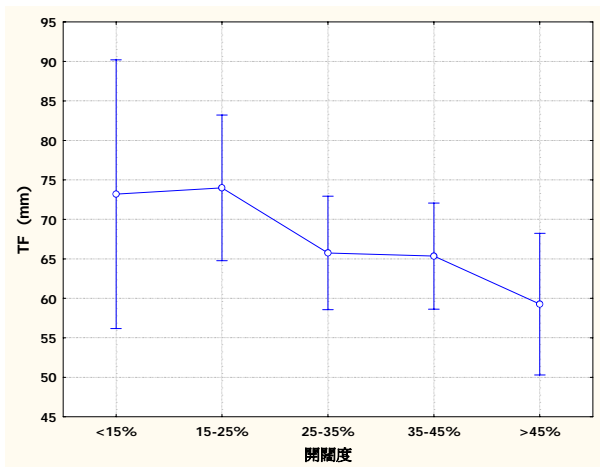
(d1)事件 4(BP=88.5mm) 老齡林



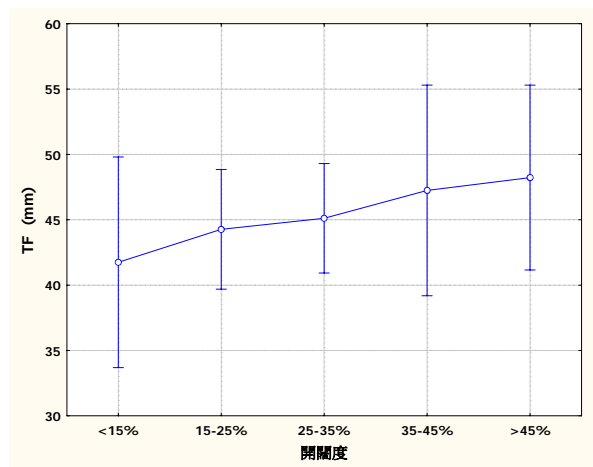
(d2)事件 4(BP=88.5mm) 更新林



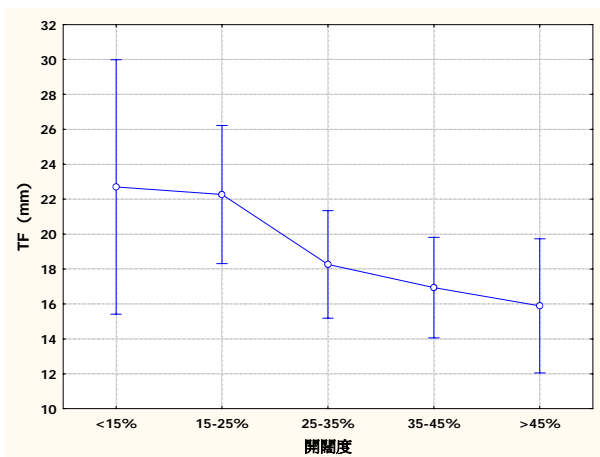
(e1)事件 5(BP=75.0mm) 老齡林



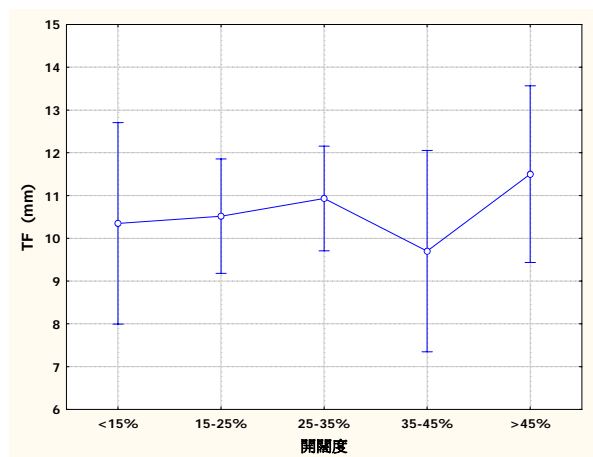
(e2)事件 5(BP=75.0mm) 更新林



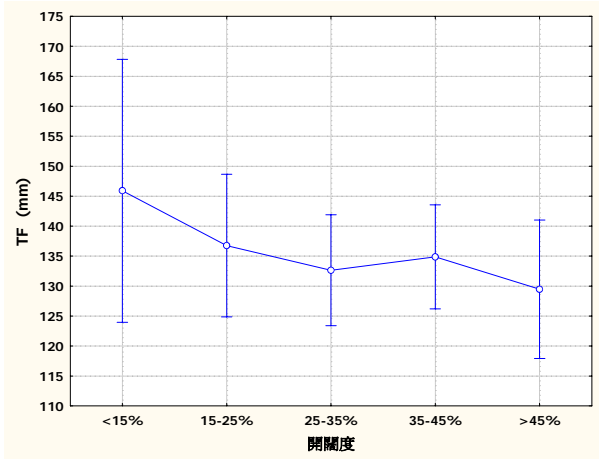
(f1)事件 6(BP=14.0mm) 老齡林



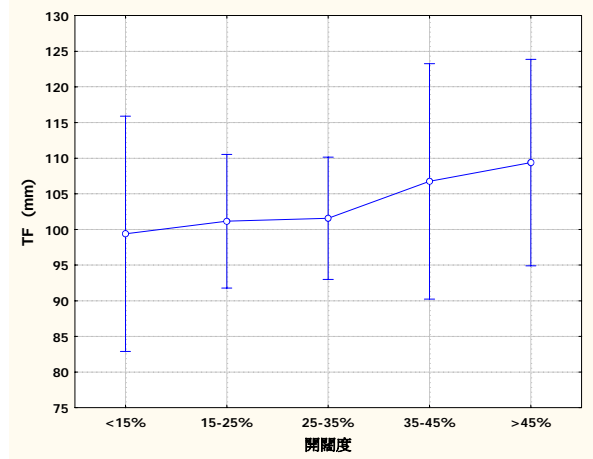
(f2)事件 6(BP=14.0mm) 更新林



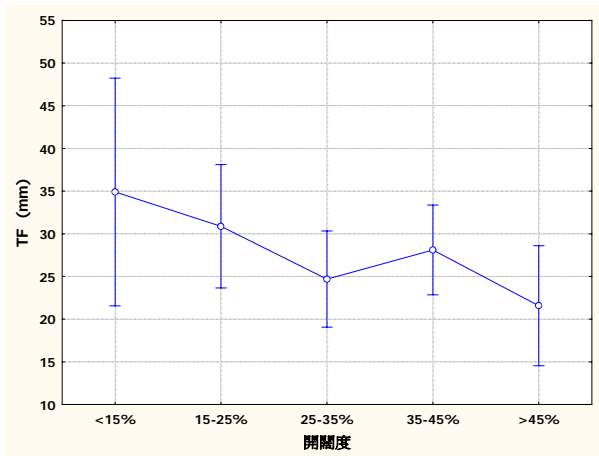
(g1)事件 7(BP=133.0mm) 老齡林



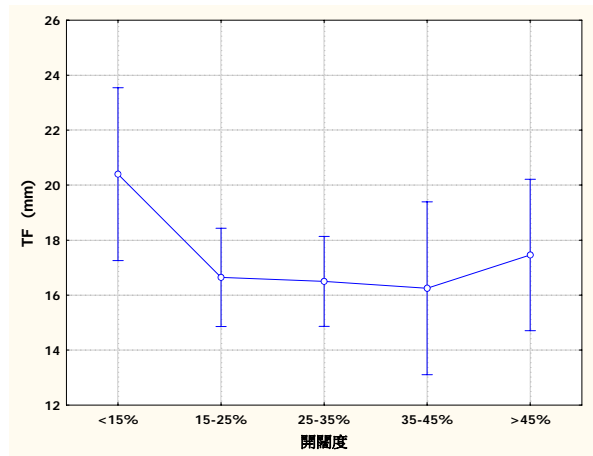
(g2)事件 7(BP=133.0mm) 更新林



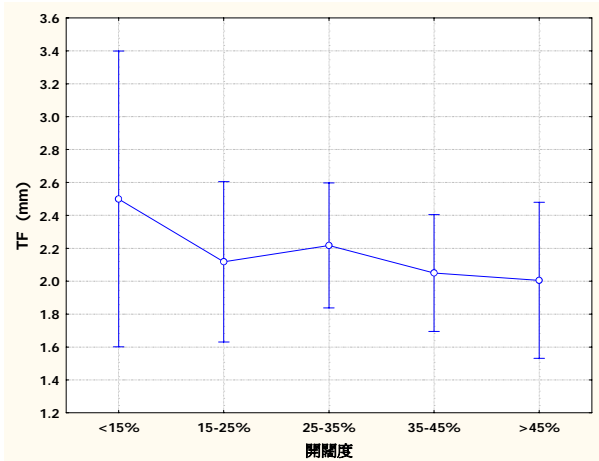
(h1)事件 8(BP=24.0mm) 老齡林



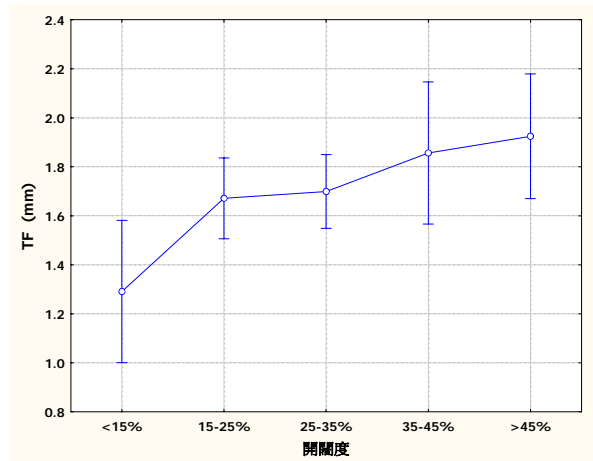
(h2)事件 8(BP=24.0mm) 更新林



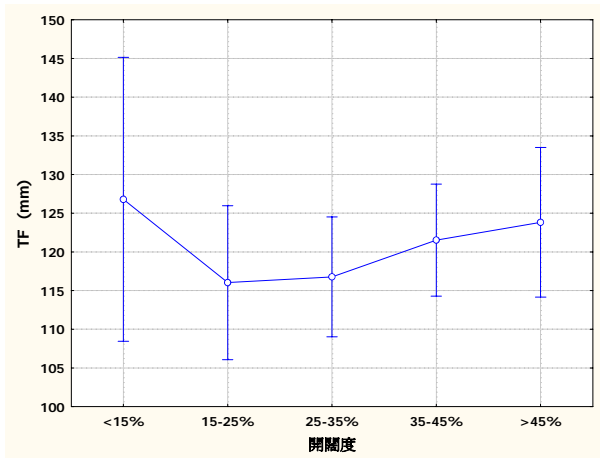
(i1)事件 9(BP=2.5mm) 老齡林



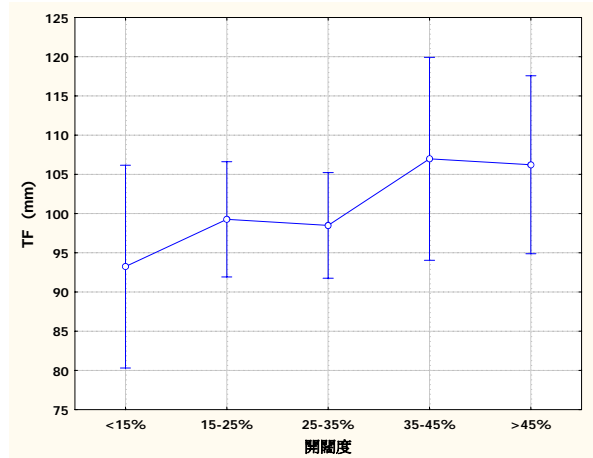
(i2)事件 9(BP=2.5mm) 更新林



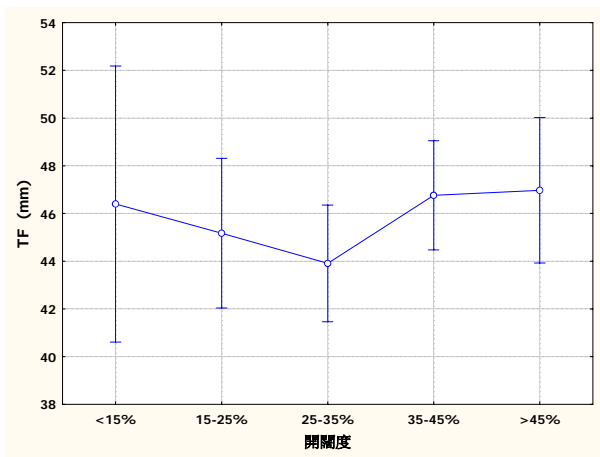
(j1)事件 10(BP=141.0mm) 老齡林



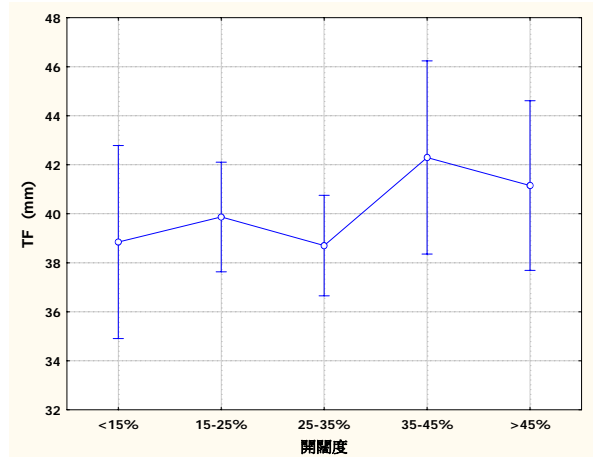
(j2)事件 10(BP=141.0mm) 更新林



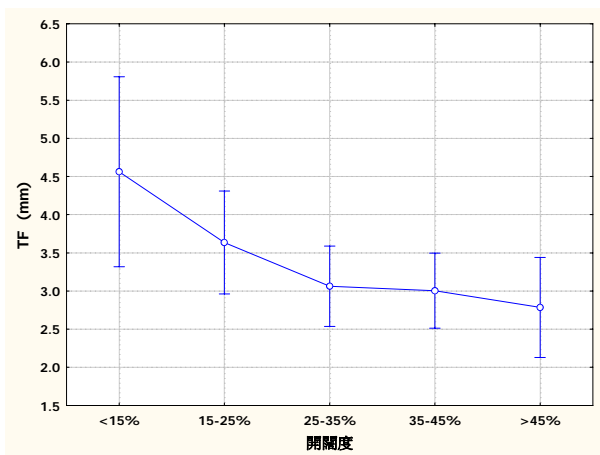
(k1)事件 11(BP=60.0mm) 老齡林



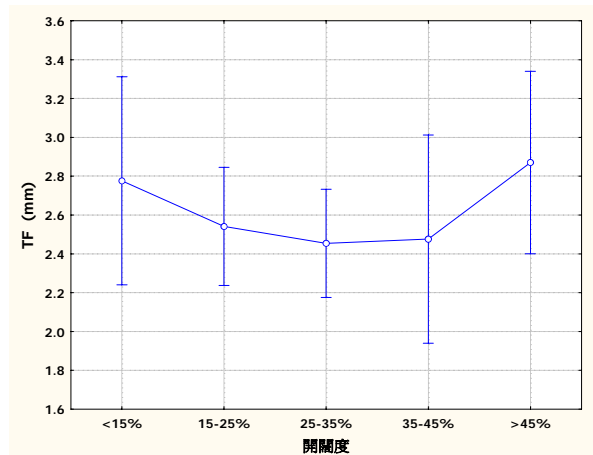
(k2)事件 11(BP=60.0mm) 更新林



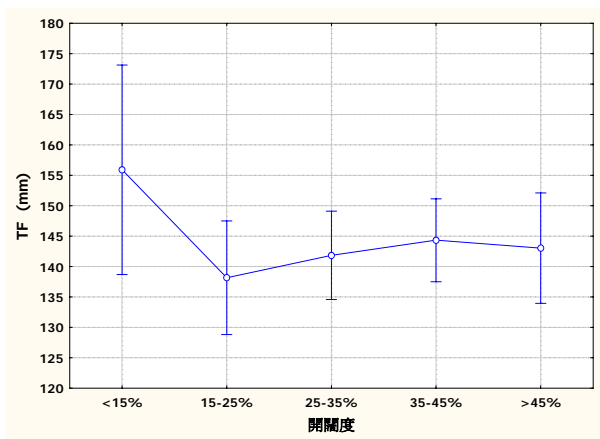
(l1)事件 12(BP=3.0mm) 老齡林



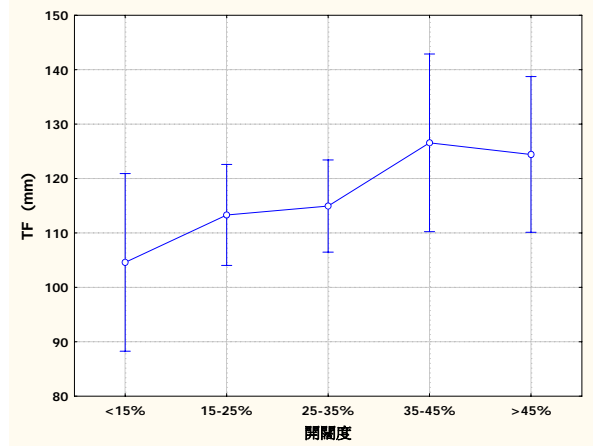
(l2)事件 12(BP=3.0mm) 更新林



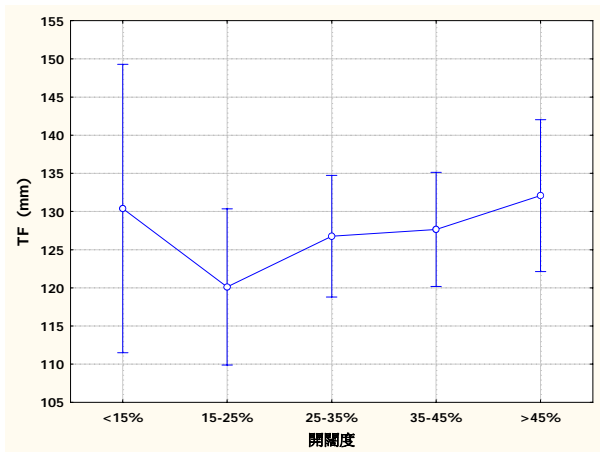
(m1)事件 13(BP=132.0mm) 老齡林



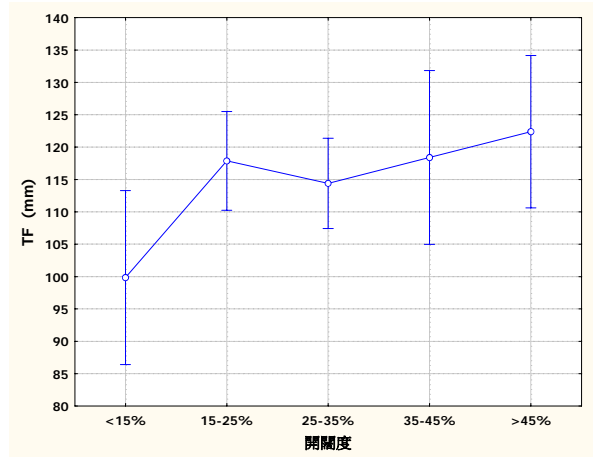
(m2)事件 13(BP=132.0mm) 更新林



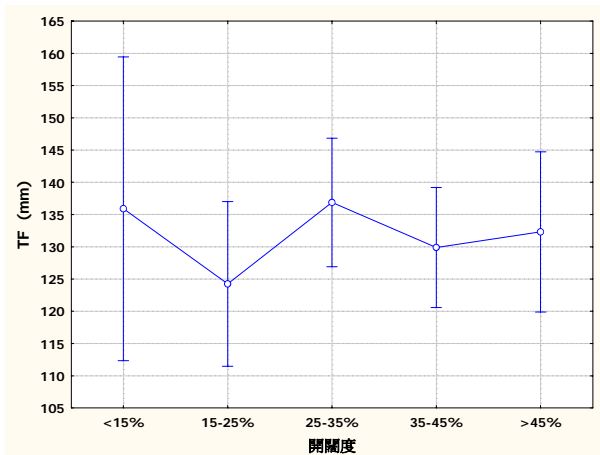
(n1)事件 14(BP=167.0 mm) 老齡林



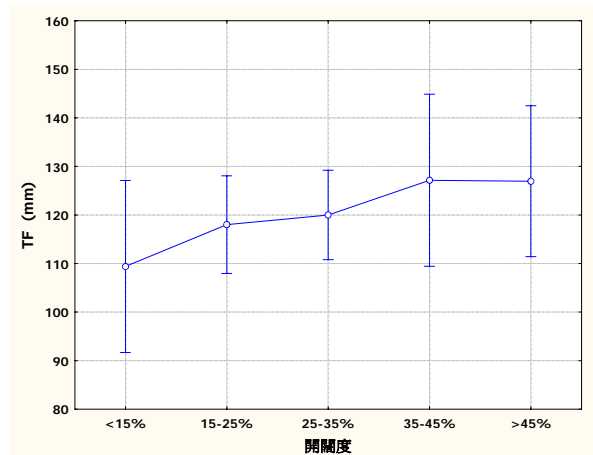
(n2)事件 14(BP=167.0 mm) 更新林



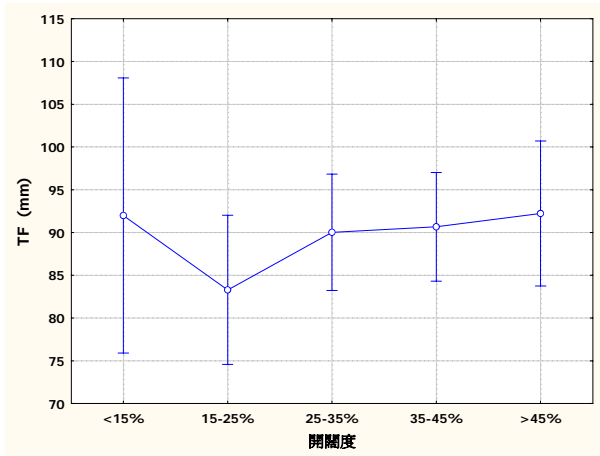
(o1)事件 15(BP=159.5mm) 老齡林



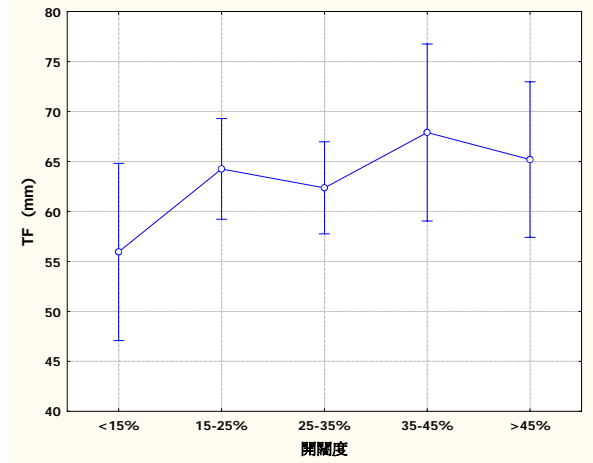
(o2)事件 15(BP=159.5mm) 更新林



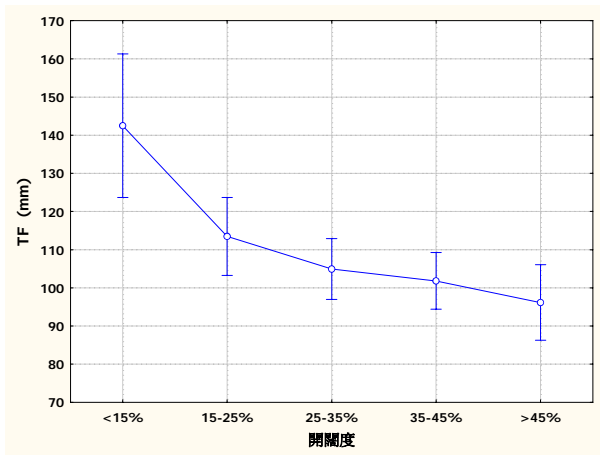
(p1)事件 16(BP=160.5mm) 老齡林



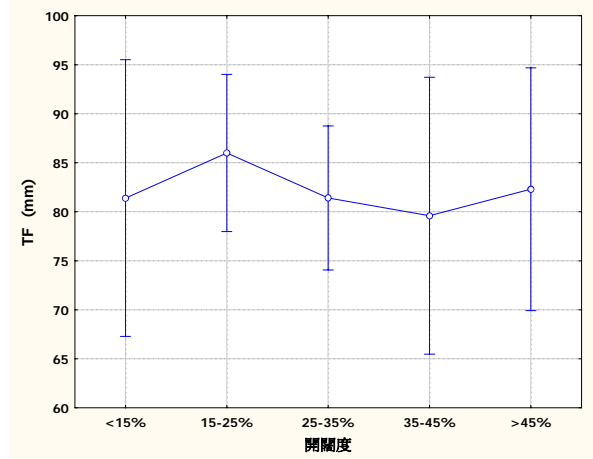
(p2)事件 16(BP=160.5mm) 更新林



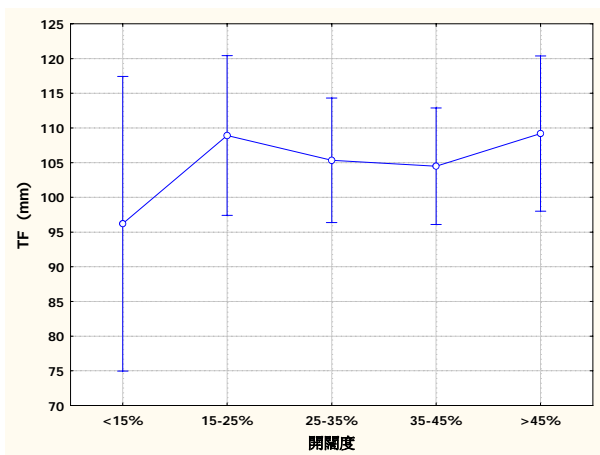
(q1)事件 17(BP=102.0mm) 老齡林



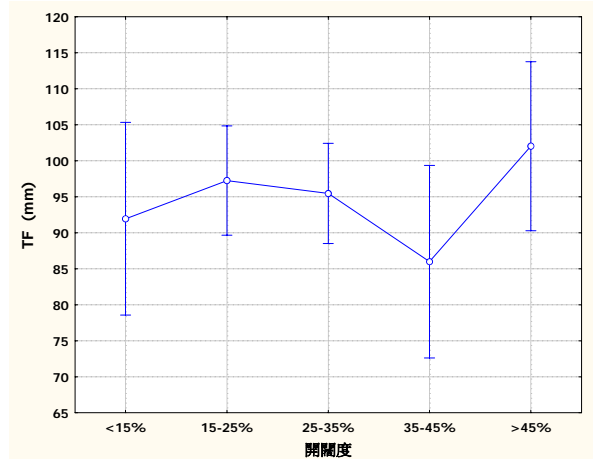
(q2)事件 17(BP=102.0mm) 更新林



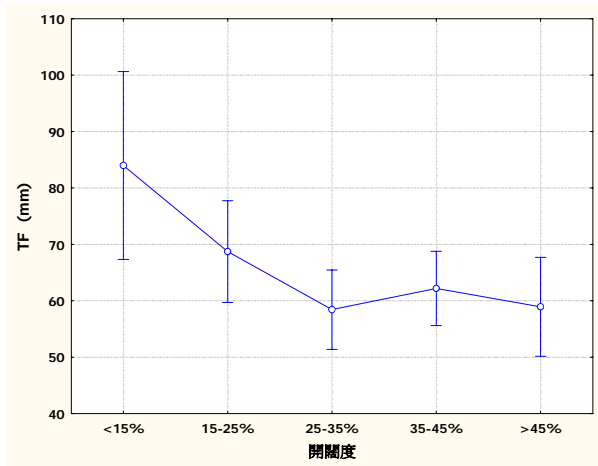
(r1)事件 18(BP=113.5mm) 老齡林



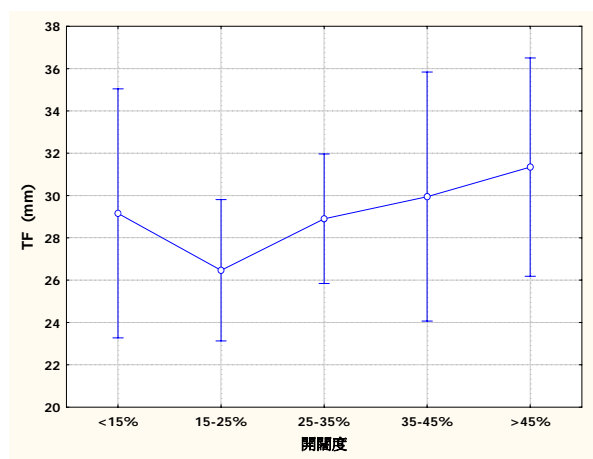
(r2)事件 18(BP=113.5mm) 更新林



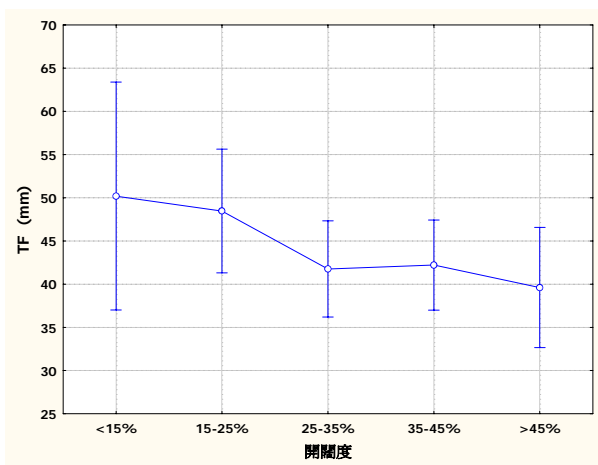
(s1)事件 19(BP=32.0mm) 老齡林



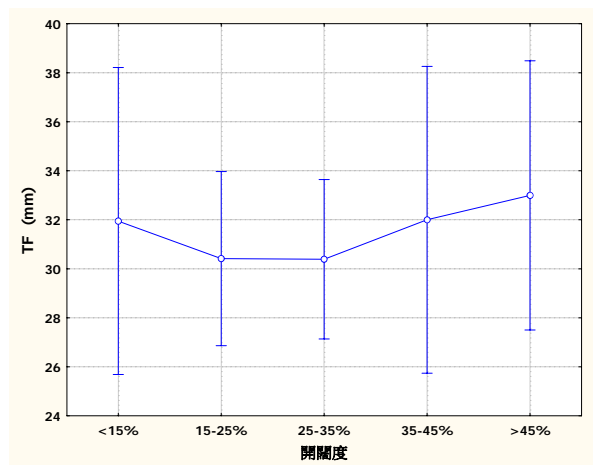
(s2)事件 19(BP=32.0mm) 更新林



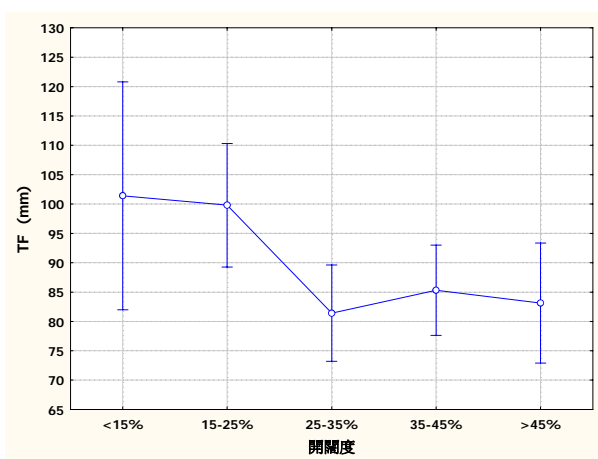
(t1)事件 20(BP=40.0mm) 老齡林



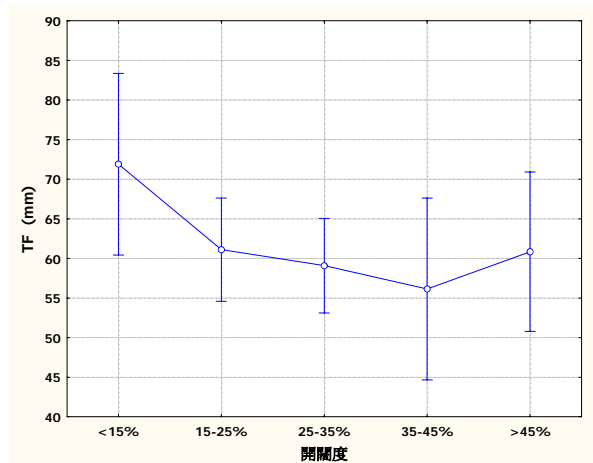
(t2)事件 20(BP=40.0mm) 更新林



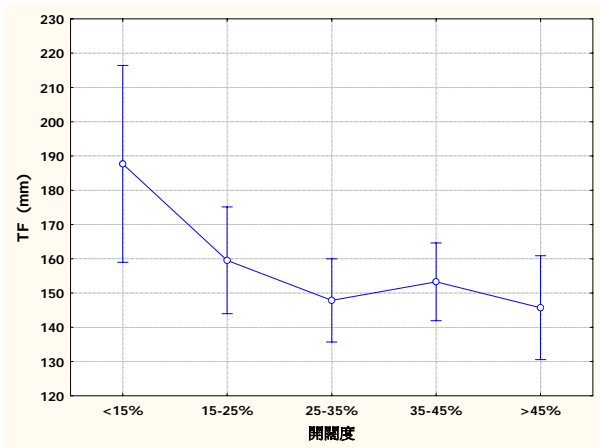
(u1)事件 21(BP=64.0mm) 老齡林



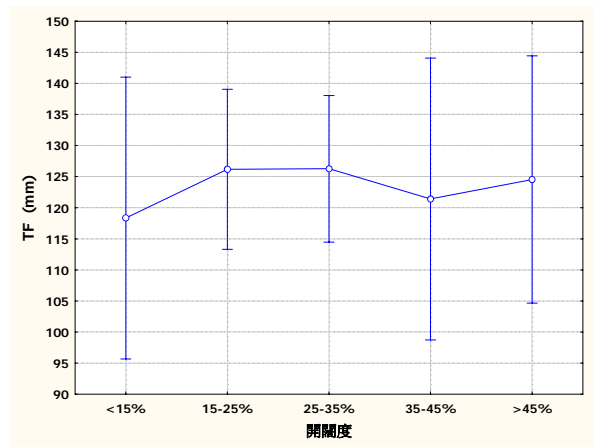
(u2)事件 21(BP=64.0mm) 更新林



(v1)事件 22(BP=189.0mm) 老齡林

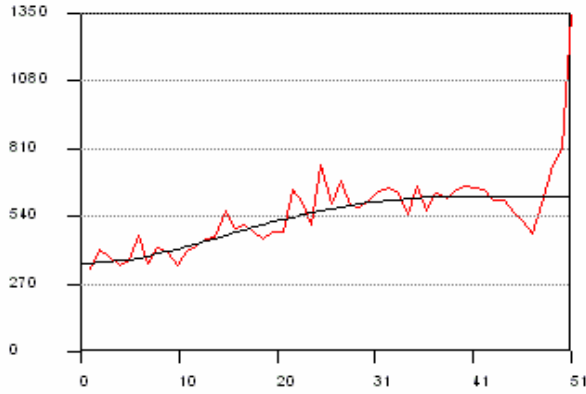


(u2)事件 22(BP=189.0mm) 更新林

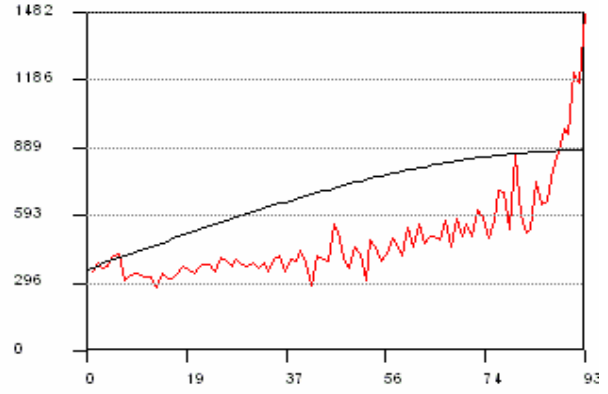


附錄 5 不同降雨強度穿落水水量半變異圖(折線為試驗半變異圖，一平滑曲線為連續函數的半變異圖)(橫軸為空間相關距離，單位 m，縱軸為半變異值)。

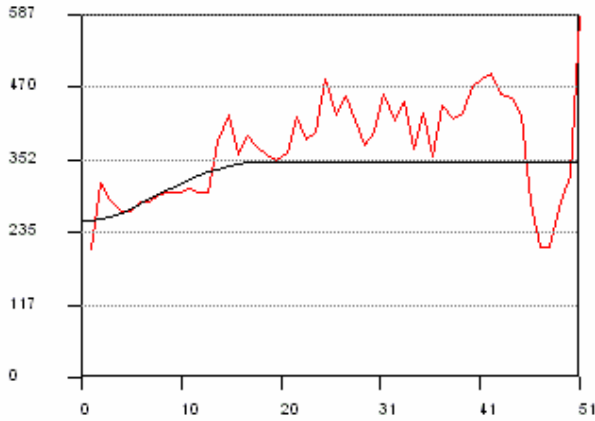
(a1)事件 1(BP=70.0mm) 老齡林



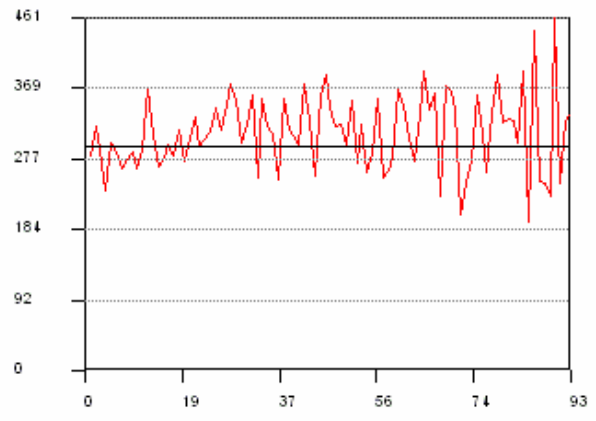
(a2)事件 1(BP=70.0mm) 更新林



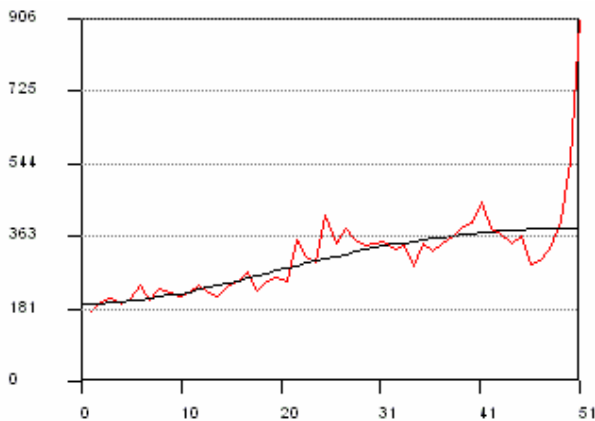
(b1)事件 2(BP=75.0mm) 老齡林



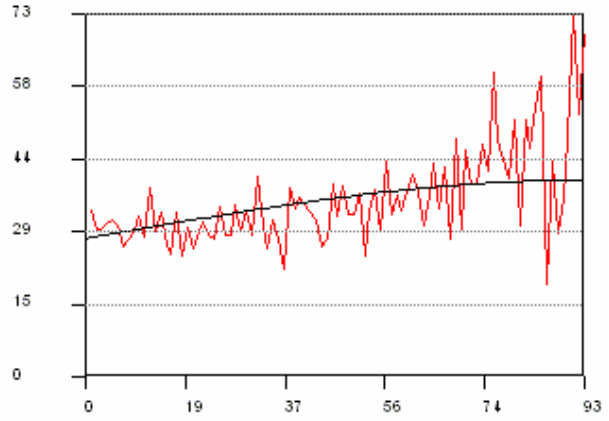
(b2)事件 2(BP=75.0mm) 更新林



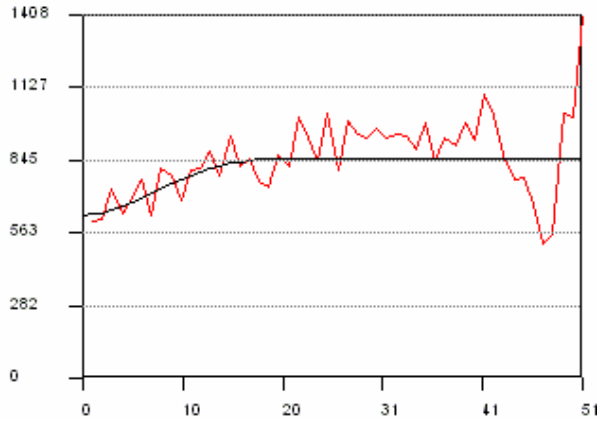
(c1)事件 3(BP=35.0mm) 老齡林



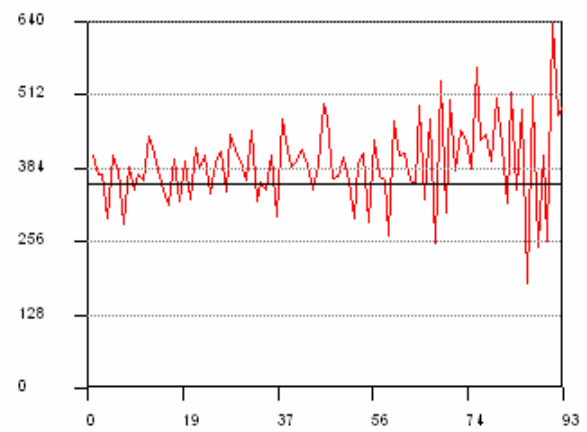
(c2)事件 3(BP=35.0mm) 更新林



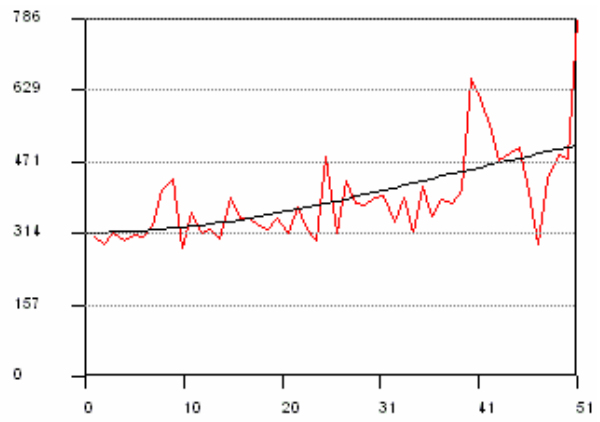
(d1)事件 4(BP=88.5mm) 老齡林



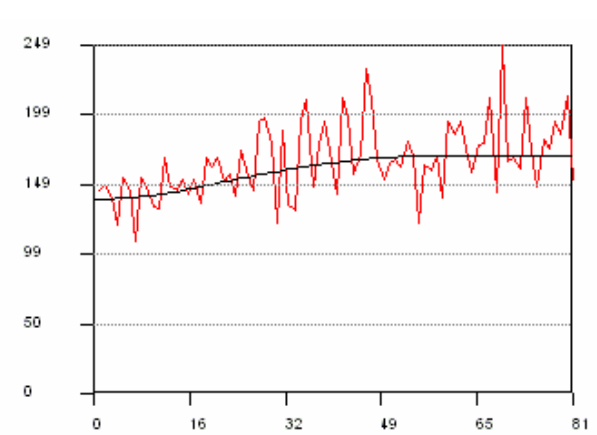
(d2)事件 4(BP=88.5mm) 更新林



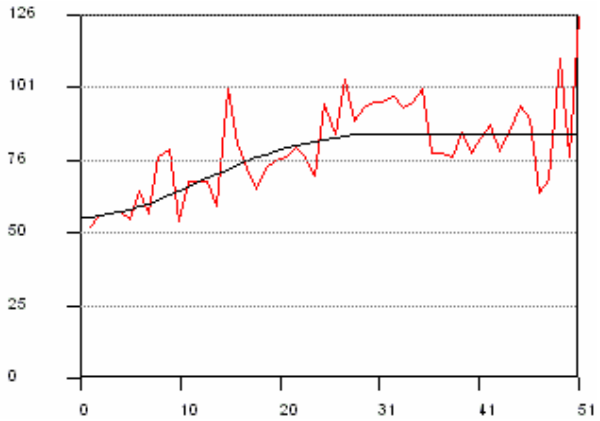
(e1)事件 5(BP=75.0mm) 老齡林



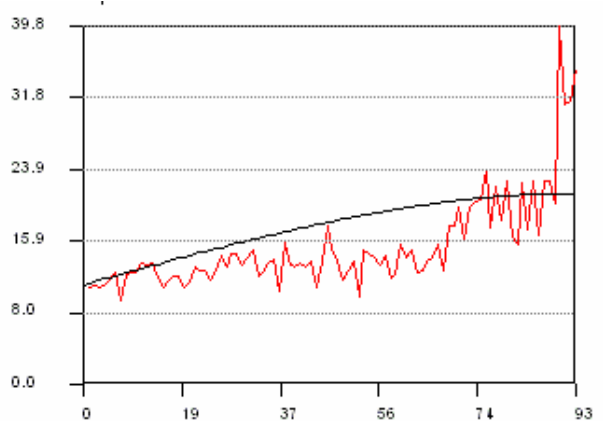
(e2)事件 5(BP=75.0mm) 更新林



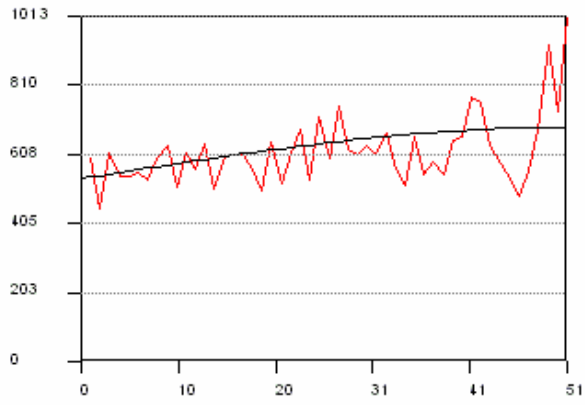
(f1)事件 6(BP=14.0mm) 老齡林



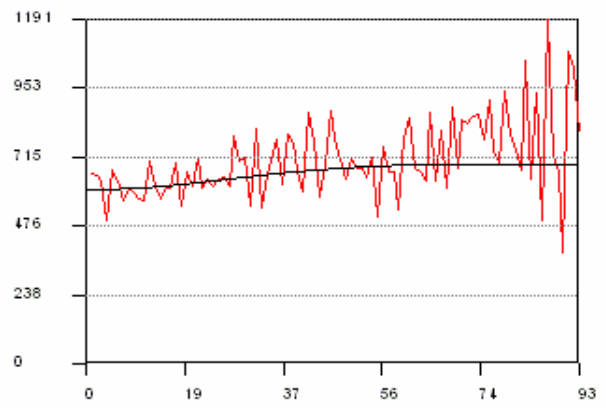
(f2)事件 6(BP=14.0mm) 更新林



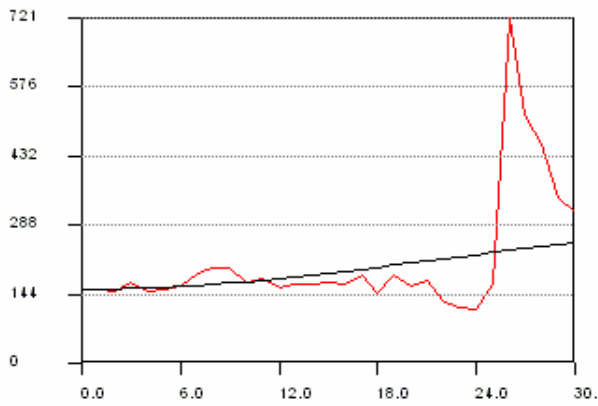
(g1)事件 7(BP=133.0mm) 老齡林



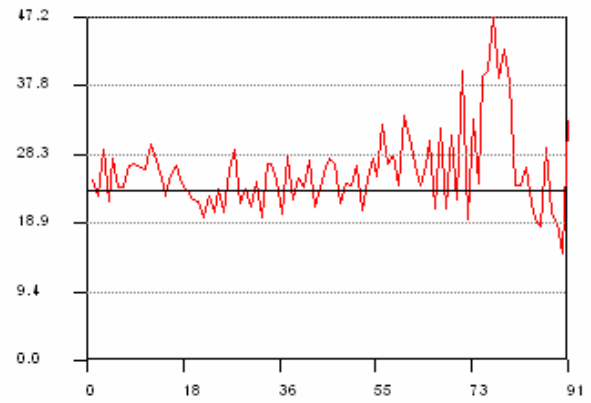
(g2)事件 7(BP=133.0mm) 更新林



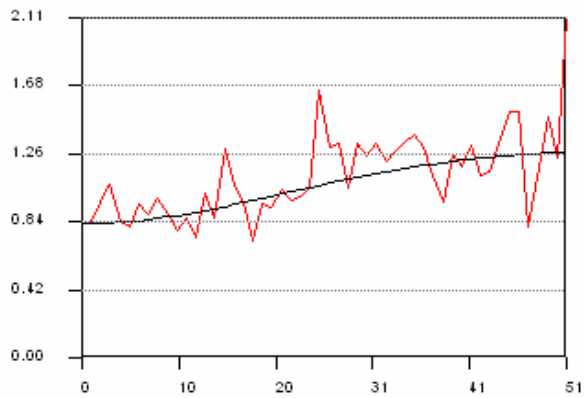
(h1)事件 8(BP=24.0mm) 老齡林



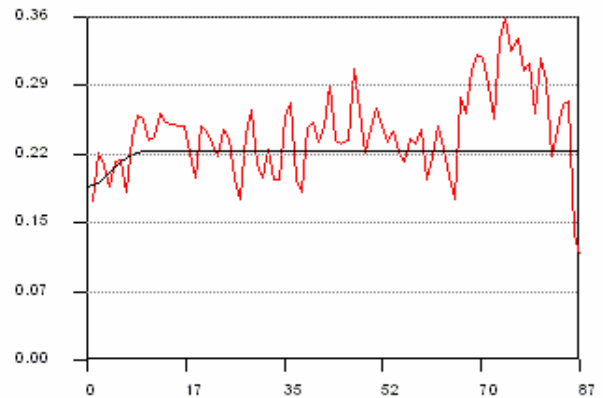
(h2)事件 8(BP=24.0mm) 更新林



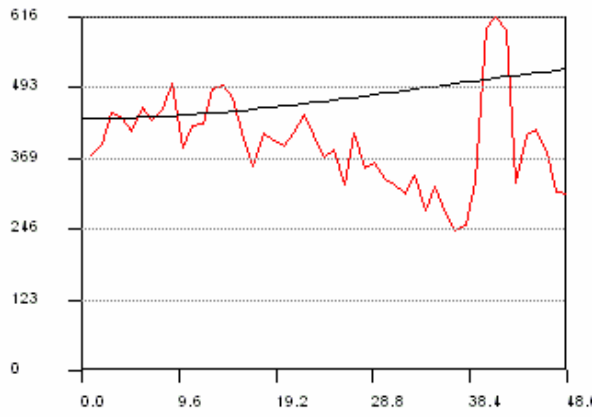
(i1)事件 9(BP=2.5mm) 老齡林



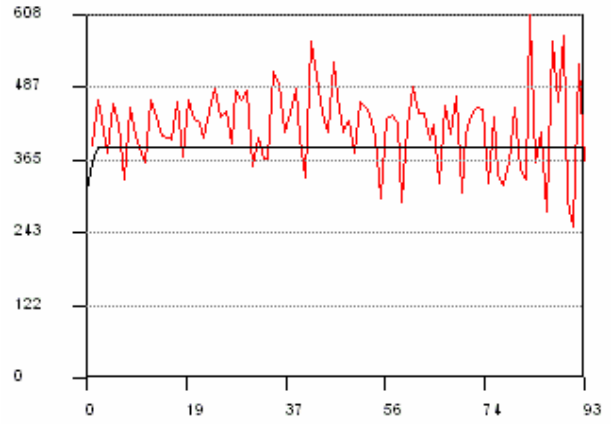
(i2)事件 9(BP=2.5mm) 更新林



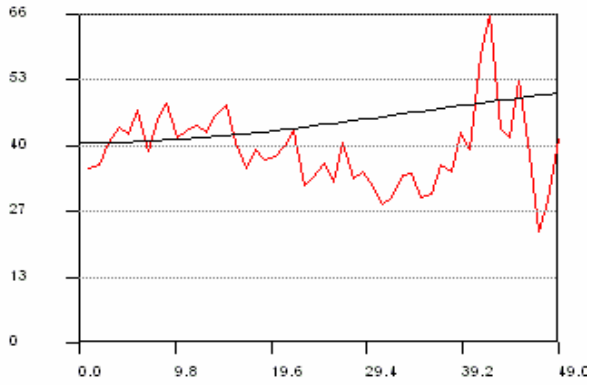
(j1)事件 10(BP=141.0mm) 老齡林



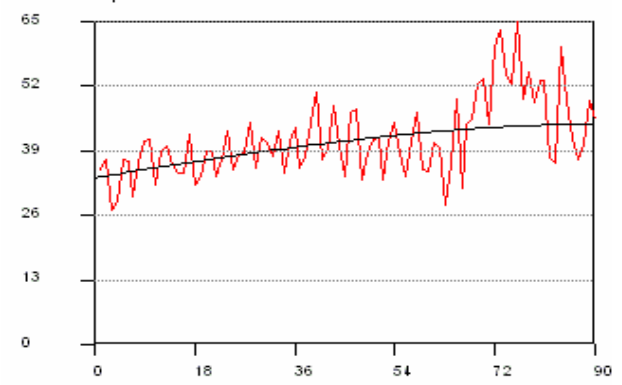
(j2)事件 10(BP=141.0mm) 更新林



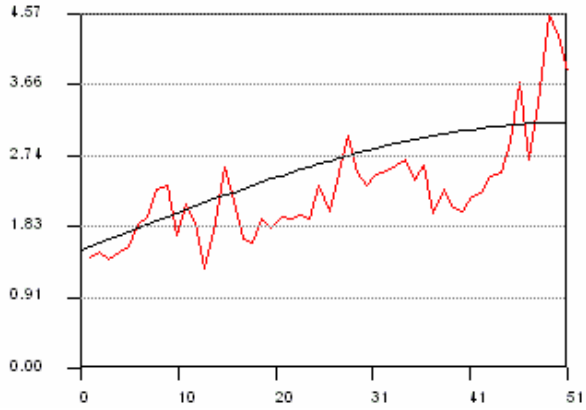
(k1)事件 11(BP=60.0mm) 老齡林



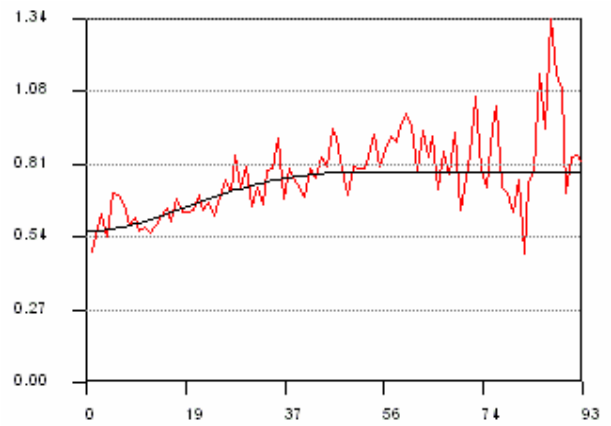
(k2)事件 11(BP=60.0mm) 更新林



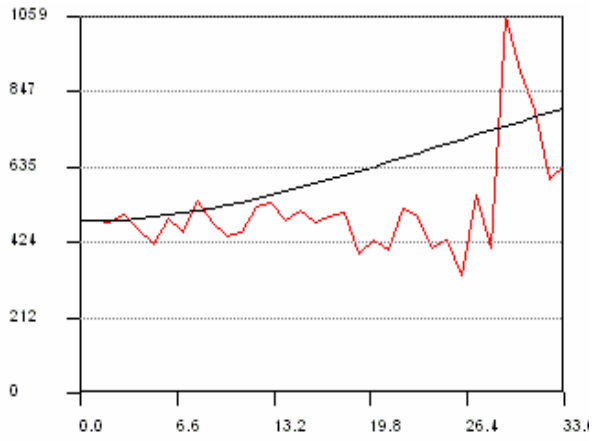
(l1)事件 12(BP=3.0mm) 老齡林



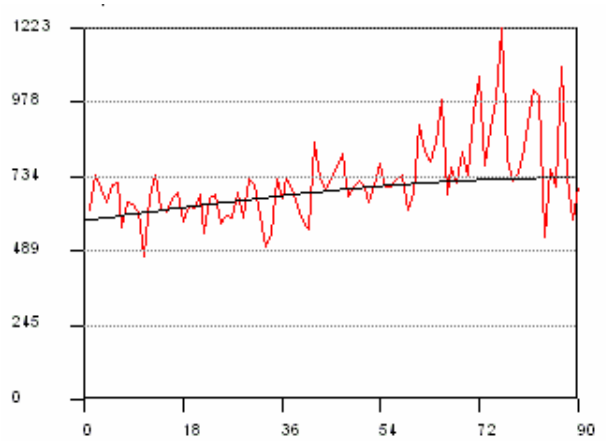
(l2)事件 12(BP=3.0mm) 更新林



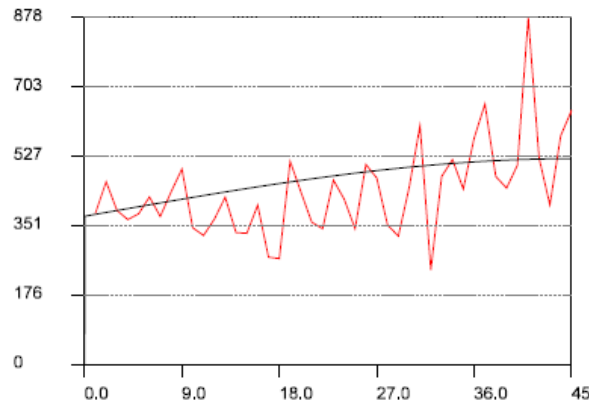
(m1)事件 13(BP=132.0mm) 老齡林



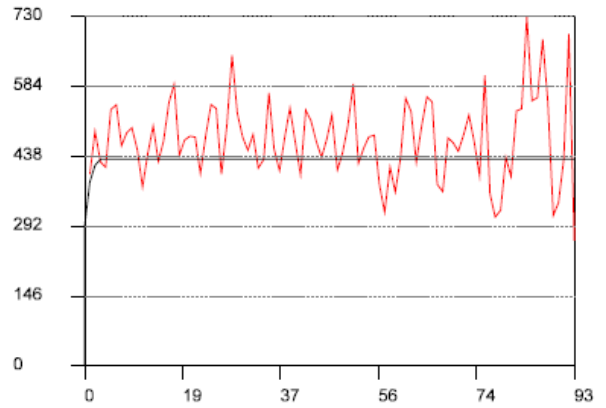
(m2)事件 13(BP=132.0mm) 更新林



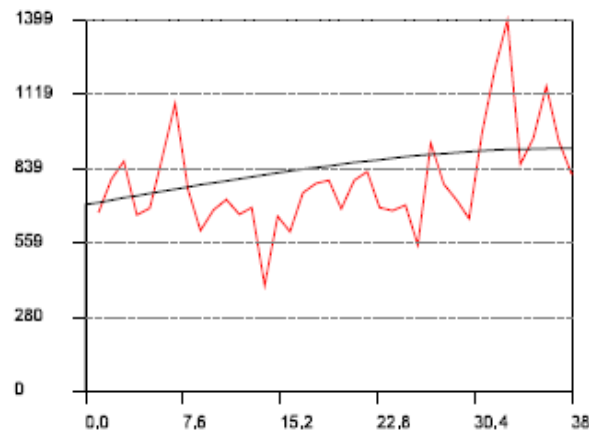
(n1)事件 14(BP=167.0mm) 老齡林



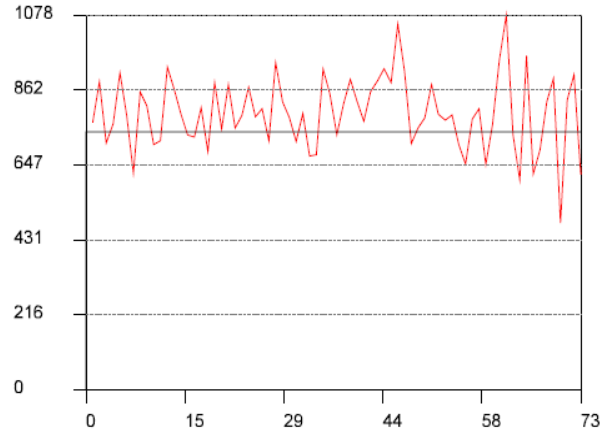
(n2)事件 14(BP=167.0mm) 更新林



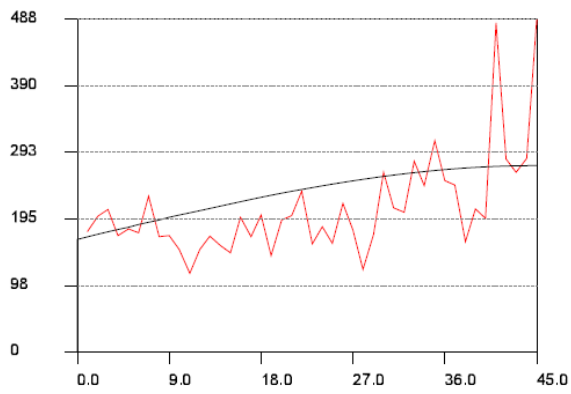
(o1)事件 15(BP=159.5mm) 老齡林



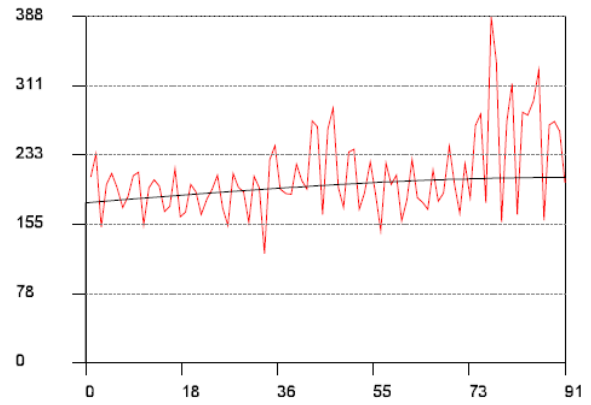
(o2)事件 15(BP=159.5mm) 更新林



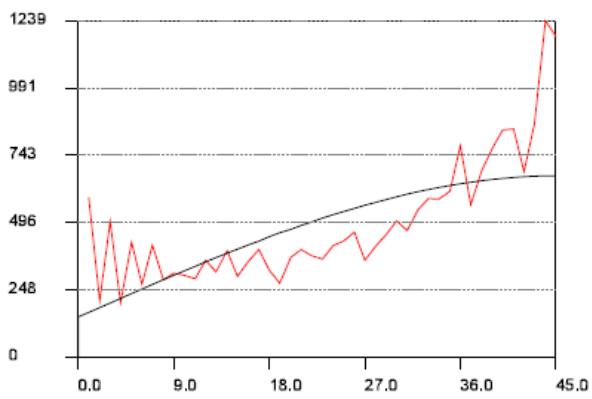
(p1)事件 16(BP=160.5mm) 老齡林



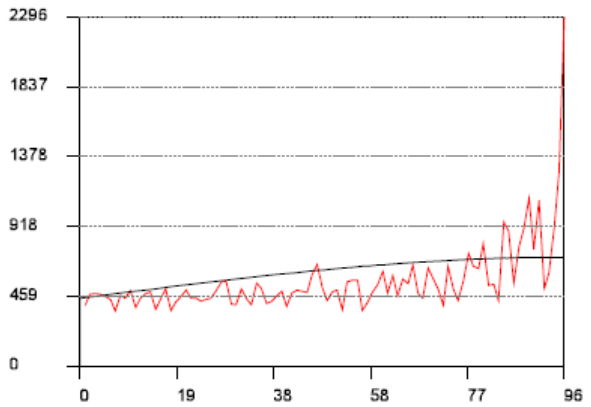
(p2)事件 16(BP=160.5mm) 更新林



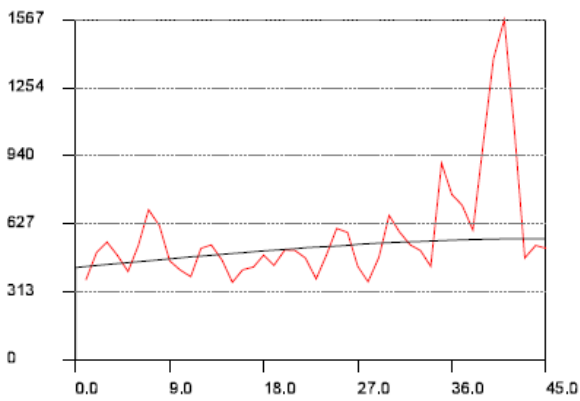
(q1)事件 17(BP=102.0mm) 老齡林



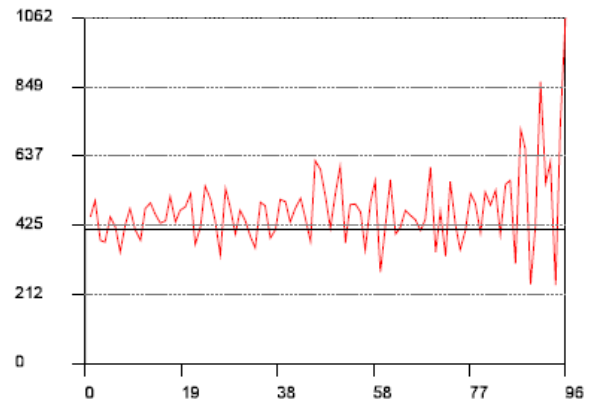
(q2)事件 17(BP=102.0mm) 更新林



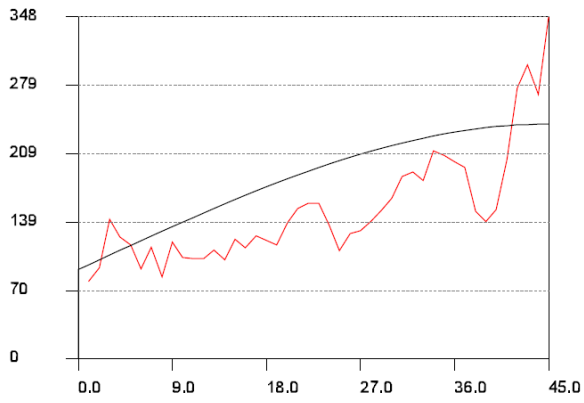
(r1)事件 18(BP=113.5mm) 老齡林



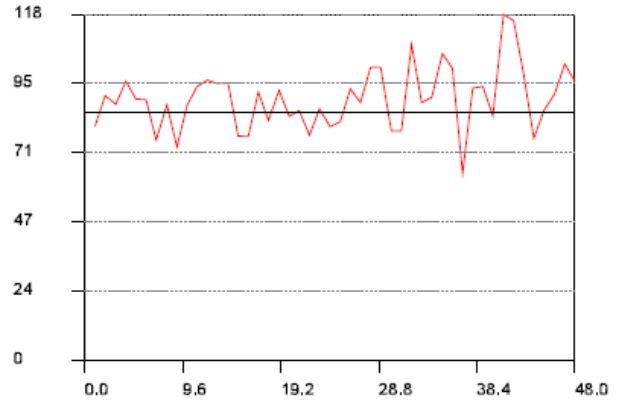
(r2)事件 18(BP=113.5mm) 更新林



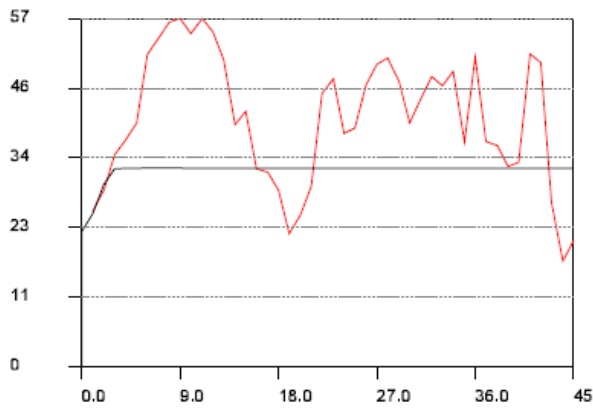
(s1)事件 19(BP=32.0mm) 老齡林



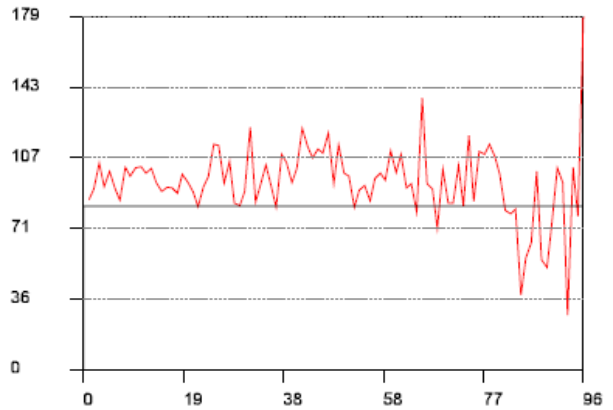
(s2)事件 19(BP=32.0mm) 更新林



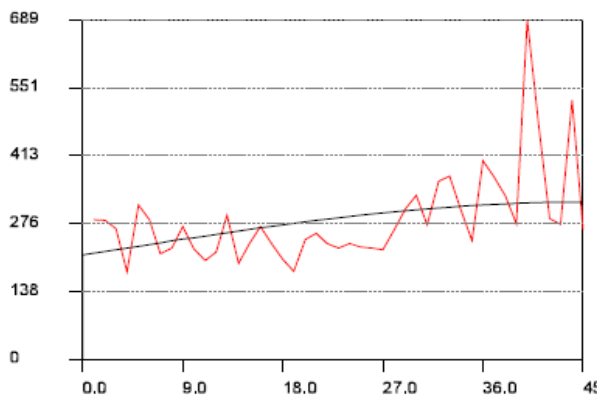
(t1)事件 20(BP=40.0mm) 老齡林



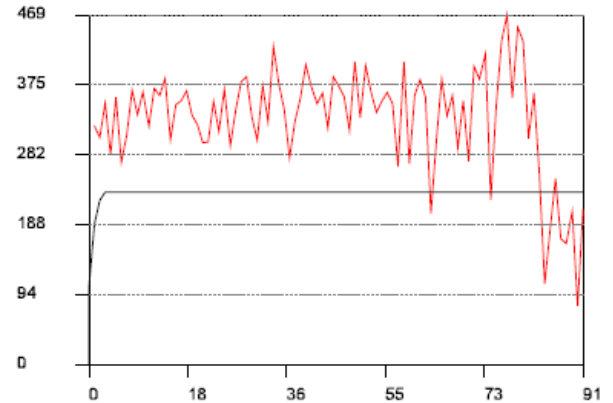
(t2)事件 20(BP=40.0mm) 更新林



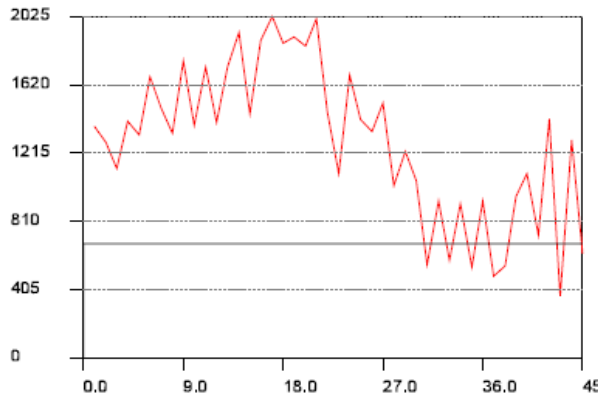
(u1)事件 21(BP=64.0mm) 老齡林



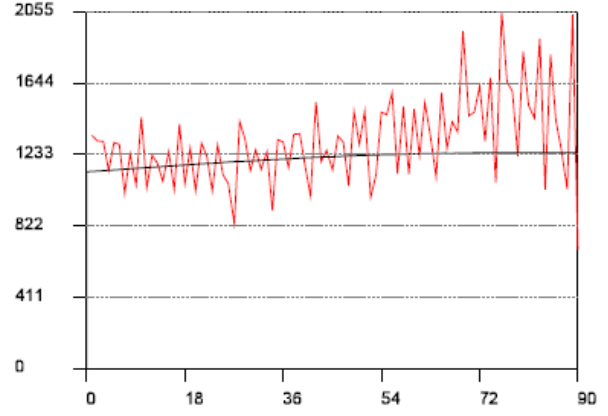
(u2)事件 21(BP=64.0mm) 更新林



(v1)事件 22(BP=189.0mm) 老齡林



(u2)事件 22(BP=189.0mm) 更新林



附錄 6 老齡林台灣扁柏樣木資料

老齡林台灣扁柏樣木資料								
編號	DBH(m)	冠幅	樹幹至樹冠邊緣長度				座標	
			N (m)	S (m)	E (m)	W (m)	x	y
			1	0.535	4.75	1.10	2.49	2.61
2	0.688	5.59	2.89	1.61	4.57	0.74	-21.55	46.00
3	0.541	5.78	1.93	3.20	4.73	0.61	-24.25	44.08
4	0.554	6.77	1.93	3.14	4.38	2.99	-20.99	37.80
5	0.382	5.19	0.43	2.88	5.69	0.62	-26.63	35.16
6	0.729	5.42	0.53	3.02	4.95	0.89	-26.45	33.20
7	0.649	6.30	1.13	5.34	2.31	2.53	-20.05	28.95
8	0.427	9.44	2.88	5.34	5.59	4.22	-25.42	23.52
9	0.462	6.20	1.95	4.03	2.92	2.57	-19.70	21.08
10	0.395	5.50	1.70	3.20	3.70	1.61	-23.52	16.51
11	0.567	6.25	2.45	3.91	3.51	1.50	-25.50	17.62
12	0.659	6.48	2.22	4.81	2.25	2.37	-19.46	11.18
13	0.812	7.12	2.68	4.12	2.60	3.22	1.00	-0.87
14	0.318	6.84	2.32	5.53	2.53	2.67	-0.85	-0.87
15	0.809	7.65	1.67	6.28	2.28	3.45	-2.08	0.77
17	0.621	8.44	1.71	4.19	6.55	3.19	-10.98	-1.00
18	0.637	8.76	2.61	4.59	4.98	4.07	-12.99	0.91
19	0.525	7.06	1.72	5.22	4.85	1.28	-14.39	-0.93
20	0.567	5.14	2.22	4.02	1.30	1.61	-21.93	0.77
21	0.659	9.26	2.71	6.42	3.93	4.15	-22.70	-0.96
22	1.098	8.52	1.37	7.25	3.91	2.32	-29.70	-0.99
23	0.382	7.23	1.69	5.43	4.11	2.46	-31.50	0.95
24	0.544	6.87	0.76	5.69	3.81	2.39	-37.47	0.69
25	0.528	6.90	0.00	4.51	8.24	0.00	-45.44	0.77
26	0.487	3.65	0.95	1.80	1.83	1.75	-46.74	-0.17
27	0.436	5.87	0.00	7.20	3.66	0.00	-51.92	-0.17
28	0.414	5.91	1.07	4.11	2.97	2.84	-51.00	0.00
平均	0.571	6.63	1.65	4.42	3.88	2.16		

附錄 7 更新林台灣扁柏樣木資料

更新林台灣扁柏樣木資料								
編號	DBH(m)	冠幅	樹幹至樹冠邊緣長度				座標	
			N (m)	S (m)	E (m)	W (m)	x	y
1	0.21	3.21	1.62	0.96	1.66	1.77	0.00	0.53
2	0.14	2.08	1.18	0.69	0.78	1.23	-2.43	-1.89
3	0.21	4.10	1.07	1.65	2.01	3.05	0.41	-2.70
4	0.15	2.48	0.86	1.32	1.21	1.26	-1.46	-2.47
5	0.17	3.09	1.39	1.23	1.82	1.39	1.95	-3.51
6	0.22	3.84	2.37	1.33	0.97	2.57	2.45	-3.83
7	0.20	3.51	2.84	1.03	1.18	1.57	-2.26	-7.16
8	0.13	2.85	3.07	0.73	0.89	0.74	-3.33	-6.35
9	0.22	4.75	2.22	2.52	2.31	2.00	3.55	-7.25
10	0.15	4.10	1.76	2.07	2.65	1.41	-1.14	-9.72
11	0.10	1.94	1.12	0.41	1.19	0.96	1.19	-12.30
12	0.28	4.77	2.20	2.44	2.99	1.35	-1.07	-13.62
13	0.24	2.75	1.13	1.08	0.63	2.19	-0.58	-14.42
14	0.08	1.92	0.67	0.38	0.78	1.86	0.75	-15.44
15	0.09	2.61	0.91	1.88	0.72	1.53	-0.74	-16.73
16	0.13	2.52	0.36	2.06	1.26	1.10	1.58	-18.43
17	0.33	4.78	2.60	2.00	3.00	1.30	-3.46	-19.88
18	0.25	3.43	0.95	2.01	2.17	1.23	0.48	-22.77
19	0.24	1.84	1.00	0.40	0.60	1.20	1.13	-22.47
20	0.23	4.93	2.06	2.17	2.34	2.83	0.44	-26.00
21	0.10	7.00	0.83	1.43	10.70	0.84	-0.32	-29.06
22	0.19	3.90	2.20	1.66	1.68	1.87	2.34	-29.94
23	0.23	3.69	2.46	1.27	1.21	1.98	3.23	-29.23
24	0.17	3.05	1.40	1.18	1.45	1.72	-0.33	-30.76
25	0.10	2.23	2.03	0.51	0.99	0.73	0.74	-33.24
26	0.11	2.08	1.61	0.59	1.29	0.45	-0.25	-33.77
27	0.22	3.48	2.24	1.24	2.39	0.65	-1.05	-35.26
28	0.17	2.80	2.47	0.77	0.96	1.06	-0.99	-35.67
29	0.20	2.53	1.46	0.09	2.24	0.88	2.03	-37.29
30	0.19	2.97	1.54	0.90	1.87	1.24	0.34	-38.18
31	0.12	1.57	0.71	0.72	0.64	0.84	1.68	-39.45
32	0.19	2.71	1.66	1.22	1.64	0.51	-0.61	-40.27
33	0.18	2.48	1.58	1.33	0.76	0.92	-1.25	-42.02
34	0.20	3.05	1.28	1.40	1.31	1.72	1.71	-42.62
35	0.19	3.52	2.47	1.66	1.16	1.37	-2.31	-43.84
36	0.22	4.05	1.59	1.99	2.41	1.67	0.56	-46.22
37	0.25	3.99	1.77	2.32	1.71	1.68	-0.85	-49.00
38	0.23	3.23	1.79	1.56	1.44	1.21	2.76	-46.90
39	0.06	1.77	0.81	0.70	1.24	0.66	2.36	-46.04
40	0.06	1.68	0.75	0.86	0.37	1.26	2.03	-47.64
41	0.12	2.98	0.98	1.38	1.87	1.49	3.01	-49.68

更新林台灣扁柏樣木資料

樹幹至樹冠邊緣長度

編號	DBH(m)	冠幅	N (m)	S (m)	E (m)	W (m)	座標	
							x	y
42	0.19	2.80	0.69	1.66	1.88	1.00	-1.68	-52.76
43	0.18	2.77	1.12	1.11	1.69	1.27	-0.28	-53.38
44	0.17	2.76	1.96	1.01	0.63	1.59	-2.43	-53.66
45	0.15	2.55	1.69	0.98	0.87	1.26	1.26	-53.91
46	0.06	1.27	0.20	0.55	1.67	0.00	0.96	-53.61
47	0.04	1.05	0.53	0.00	1.48	0.00	1.17	-53.75
48	0.09	1.43	0.42	0.79	1.48	0.00	1.53	-53.89
49	0.13	2.32	1.12	1.35	1.04	0.87	0.31	-55.38
50	0.05	2.47	1.28	0.61	1.38	1.56	-0.87	-57.35
51	0.15	2.20	1.09	0.98	1.42	0.61	0.89	-57.32
52	0.20	2.60	1.28	1.33	0.68	1.50	0.41	-57.70
53	0.19	3.28	1.35	1.19	1.25	2.40	-0.37	-58.83
54	0.10	3.34	1.67	1.60	0.98	2.24	1.84	-59.18
55	0.06	2.36	1.59	0.71	1.84	0.46	0.92	-62.57
56	0.15	2.88	1.96	0.86	2.00	0.64	-0.22	-62.88
57	0.21	3.27	1.41	1.13	1.74	1.84	-2.01	-62.58
58	0.26	2.99	1.77	1.40	1.02	1.28	-0.40	-64.50
59	0.09	2.21	0.97	1.08	1.77	0.43	1.68	-64.61
60	0.22	3.70	0.80	2.13	2.08	1.96	0.60	-67.06
61	0.23	3.41	2.77	1.55	0.94	1.10	1.50	-69.51
62	0.25	4.45	3.17	1.87	1.30	2.06	0.70	-71.12
63	0.18	3.04	0.69	2.84	1.45	0.74	0.37	-71.02
64	0.08	1.90	0.83	1.34	0.52	0.96	0.23	-71.30
65	0.04	1.56	0.40	1.86	0.45	0.34	0.10	-71.40
66	0.10	1.98	0.67	1.71	0.53	0.85	-0.06	-71.62
67	0.15	2.19	1.22	0.85	0.95	1.07	-0.71	-72.93
68	0.18	2.70	1.86	0.53	0.66	2.00	-0.27	-73.99
69	0.13	2.60	1.61	1.06	0.92	1.35	1.55	-77.16
70	0.14	2.38	1.81	0.90	0.64	1.13	-2.27	-76.68
71	0.30	5.72	3.53	1.19	2.99	3.13	-1.18	-78.21
72	0.06	1.93	1.33	0.69	0.81	0.91	1.61	-81.06
73	0.13	1.68	1.85	0.30	0.10	0.85	-0.50	-79.52
74	0.07	2.12	1.18	0.00	0.00	2.93	-0.48	-80.02
75	0.13	3.01	0.85	1.79	1.94	1.18	-0.53	-86.31
76	0.11	2.90	0.54	2.22	2.83	0.00	1.79	-86.65
77	0.26	3.51	0.64	2.21	1.65	2.01	1.35	-87.72
78	0.09	4.49	2.53	2.31	1.37	2.58	-1.07	-88.39
79	0.26	4.20	2.16	1.90	1.97	1.85	-1.87	-91.00
80	0.11	2.43	0.56	1.90	1.49	0.68	3.03	-92.21
81	0.26	3.33	1.99	1.06	2.12	0.97	4.04	-92.71
82	0.23	2.98	1.21	1.90	1.05	1.35	3.19	-93.42

更新林台灣扁柏樣木資料

編號	DBH(m)	冠幅	樹幹至樹冠邊緣長度				座標	
			N (m)	S (m)	E (m)	W (m)	x	y
			83	0.08	3.95	1.65	1.28	2.74
84	0.24	3.23	1.77	1.14	1.55	1.52	-0.83	-94.40
85	0.13	2.55	1.39	1.54	0.84	1.06	2.01	-96.21
86	0.08	2.34	1.10	1.26	1.39	0.77	-0.22	-97.73
87	0.09	2.19	0.81	1.86	1.54	0.00	2.52	-98.09
88	0.25	3.72	1.55	2.17	1.09	2.13	2.43	-98.34
89	0.25	3.89	1.56	2.22	2.03	1.47	-0.32	-99.79
90	0.09	2.29	1.50	1.64	0.00	1.26	-0.54	-101.21
平均	0.16	2.97	1.47	1.32	1.50	1.32		