

烏石坑地區 18 年生台灣杉人工林雨水之質量組成
Throughfall, Stemflow, Rainfall Interception, and Their Ionic
Fluxes at a 18-year Taiwan-fir (*Taiwania cryptomerioides*)
Plantation in the Wushyrkeng Area of Central Taiwan

薛美莉*

Mei-Li Hsueh*

行政院農業委員會特有生物研究保育中心 南投縣集集鎮民生東路 1 號

Endemic Species Research Institute, Jiji, Nantou, Taiwan

*通訊作者：shiu@tesri.gov.tw

*Corresponding author: shiu@tesri.gov.tw

摘 要

本研究於 1998 年 2 月到 1999 年 5 月收集烏石坑地區 18 年生台灣杉人工林降雨並分析其水質以瞭解其穿落水、幹流和截留量及化學組成之改變。試驗期間烏石坑之年降雨量為 2,050 mm，台灣杉人工林穿落水量為 1,771 mm，幹流量為 23.5 mm，截留量為 255.6 mm，各占降雨量之 86.4%、1.1%和 12.5%。分析結果顯示穿落水及幹流均與降雨強度呈顯著線性迴歸。雨水流經台灣杉時電導度及大部分離子濃度自林外雨、穿落水及幹流逐漸增加，只有 pH 值及 HCO_3^- 呈現穿落水 > 林外雨 > 幹流。穿落水增多係數由 1.18 (Na^+)到 21.89 (K^+)，幹流的增多係數由 1.83 (F^-)到 90.41 (K^+)，顯示幹流中離子濃度變化較穿落水高。林內雨之年輸入量(穿落水加幹流)，在陽離子中以 Ca^{2+} 最高 (44.38 kg/ha)， K^+ (36.22 kg/ha)及 NH_4^+ (11.04 kg/ha)次之；陰離子依序為 HCO_3^- (85.13 kg/ha)、 NO_3^- (48.49 kg/ha)及 SO_4^{2-} (36.01 kg/ha)。穿落水的 pH 值與 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 有顯著相關，幹流的 pH 值則與 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 及 HCO_3^- 有顯著相關。整體而言，林內雨 H^+ 淨輸入量為 -0.03 kg/ha/year， HCO_3^- 淨輸入量為 53.23 kg/ha/year，台灣杉冠層保留部分的 H^+ 並增加 HCO_3^- 的量，對於酸沉降具有中和能力。

Abstract

Throughfall, stemflow and rainfall interception were collected and their ionic concentrations were analyzed for each of the rainfall events at a 18 year-old Taiwan-fir (*Taiwania cryptomerioides*) plantation in the Wushyrkeng area of central Taiwan, February 1998 to May 1999. The total annual flow were 1,771 mm for throughfall, 23.5 mm for stemflow, and 255.6 mm for rainfall interception, representing, respectively, 86.39%, 1.15% and 12.46% of the total annual rainfall of 2,050 mm. Annual fluxes of main cations from throughfall and stemflow were 44.38 kg/ha for Ca^{2+} , 36.22 kg/ha for K^+ , and 11.04 kg/ha for NH_4^+ , while the fluxes of main anions were 85.13 kg/ha for HCO_3^- , 48.49 kg/ha for NO_3^- , and 36.01 kg/ha for SO_4^{2-} . The pH-values were significantly correlated to SO_4^{2-} and HCO_3^- for throughfall but to NO_3^- , SO_4^{2-} and HCO_3^- for stemflow. The annual stemflow flux of H^+ was negative -0.03 kg/ha but positive 53.23 kg/ha for HCO_3^- , indicating that some of the H^+ ions were retained by the forest canopies. This suggested that the Taiwan-fir plantation functions as a buffer for acid rain.

關鍵詞：台灣杉、穿落水、幹流、截留

Key words : Taiwan-fir (*Taiwania cryptomerioides*), throughfall, stemflow, rainfall interception

收件日期：97年6月16日

接受日期：97年11月20日

Received: June 16, 2008

Accepted: November 20, 2008

緒 言

降雨進入森林生態系後，一部分經由森林冠層滴落地面(穿落水, throughfall)，部分流經枝條及樹皮到達地面(幹流, stemfall)，另外有一部分雨水在林冠就被攔截或蒸發，稱為截留(rainfall interception) (林 1976；Prebble and Strike 1980；Parker 1990)。台灣早期的森林降雨研究，著重於透過穿落水及幹流量的觀測來推估森林水分收支(周及江 1964；潘 1964, 1965, 1966；林等 1974；陸及唐 1995；林等 1996)，近來則逐漸重視森林降雨化學性質之變化及酸沉降對森林的影響(金及黃 1983；洪等 1987；劉及許 1997, 1999；林等 1998；劉

2000；King and Shiue 1992；King *et al.* 1994)。由整個森林生態功能來看，林木對於空氣污染或酸雨具有物理過濾、化學中和、離子交換、淋溶及吸收等作用(Miller 1983)，當雨水接觸植群時會因冠層吸收或釋放出溶解物質而造成其化學性質改變，因此林內雨不論在水質或水量均會有所變化(劉及許 1997；Ulrich 1983；Lucier and Haines 1990；Hölscher *et al.* 1998)。

以往森林砍伐及酸沉降對生態系所造成的危害近年來已逐漸顯現，因此不同森林生態系對於空氣污染或酸雨之交感作用及人工林經營方式對於森林水文及營養循環影響之研究更加重視(林等 1998；Matzner 1983；

Opakunle 1989 ; Hölscher *et al.* 1998 ; Lian and Zhang 1998)。台灣杉(*Taiwan cryptomerioides*) 為台灣原生針葉樹種，生長快且幹材利用率高，木材對於白蟻及海蟲之抵抗力佳，經濟價值極高(林及洪 1991)，其造林面積達 5,459 ha，蓄積量 333,000 m³ (林務局 1995；王等 2000)。本種雖為台灣重要的經濟造林樹種，卻少有其森林水文或養分循環之相關資料。本研究主要目的是分析烏石坑地區雨水流經台灣杉林時其水量及水質組成之影響，瞭解台灣杉之部分養分流轉過程，並評估台灣杉人工林對酸沉降之影響。

材料與方法

一、試驗地

試驗地位於台中縣和平鄉烏石坑(24°18' N, 120°55' E, 圖 1)，屬國有林大安溪事業區第 122 林班，試驗地面積為 328.4 ha，海拔由 650m 至 1,834m 之山椒山(Mt. Shan-chiao)山頂。區內植被可分為草生地、造林地、次生林及原始林等植物群落(賴及林 1997)，造林地以台灣杉、柳杉(*Cryptomeria japonica*)及杉木(*Cunninghamia lanceolata*)為主要樹種。本研究

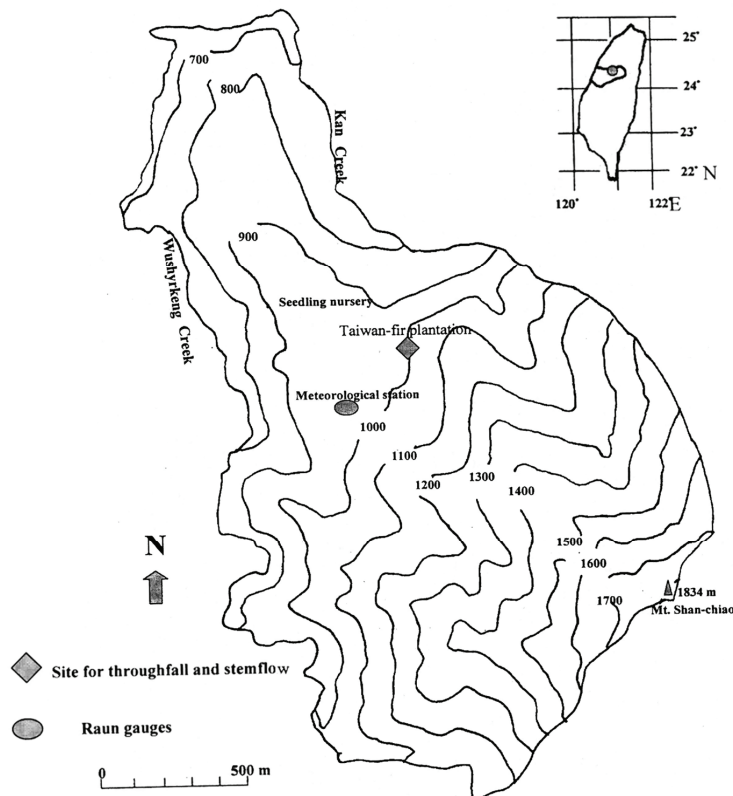


圖 1. 烏石坑地區雨水及台灣杉林內雨採樣站。

Fig. 1. Locations of the Taiwan-fir plantation and meteorological station in the study area of Wushyrkeng in the central Taiwan (solid diamond in the map of Taiwan at the upper right corner, the study area; lines with numbers, elevations in meter).

幹流及穿落水之量測設置在台灣杉造林地，造林時間為 1980 年(18 年生)，面積 14.32 ha，海拔 1,060m，西南坡向。土壤質地為粉質壤土，土壤 pH 值在 3.2 至 3.6 間，屬極酸性土壤(楊等 1994)。

根據中央氣象局雙崎測候站 1995-1997 年之氣象資料，本區因受山勢阻擋風勢較弱，年平均風速為 0.5 km/hr，年平均氣溫為 20.0°C，全年最高溫出現在 7 月份(24.7°C)，最低溫為 1 月份(13.4°C)。平均年雨量為 2,509 mm，雨季及乾季明顯，4 月到 8 月為雨季，其降雨量占全年 83%，10 月至翌年 1 月為乾季，月降雨量低於 60 mm (薛 2000)。在氣候分類上本區屬台灣典型之夏雨型氣候(Su 1984)。

二、森林降雨之採樣與計算

(一)林外雨(rainfall, RF)

試驗區之降雨收集由 1998 年 2 月起至 1999 年 5 月止，以每一場雨(event)為採樣單位收集雨水，且降雨停止 6 hr 後即為收集的時機(林等 1996)。共有 3 組雨水的收樣器設置於特有生物研究保育中心低海拔試驗站之烏石坑氣象站(圖 1)。每組有 3 個直徑 19 cm 之塑膠漏斗，以水管接至 25L 容量之塑膠筒，材質為高密度聚乙烯(HDPE)，為避免受地面飛濺干擾，架設高度為 100 cm。由於漏斗為常年開口，因此收集物為混沉降(bulk precipitation)。每次採樣同時量測收集筒中的雨水，換算為降雨量(金 1987)。

(二)穿落水(throughfall, TF)

在台灣杉樣區中設置 4 組收集穿落水之收集筒，其中兩組採用直徑 19 cm 之塑膠漏斗 3 個，以水管接至 25L 容量之塑膠筒。另兩組則因地勢差異不易架設鐵架，改以直徑 24 cm 之塑膠漏斗，直接裝設於 30L 容量之塑膠筒。每次採樣同時量測每一收集筒中的水樣量，除以其個別承雨面積，換算出單位面積之穿落水量(Brooks *et al.* 1991)。

(三)幹流(stemflow, SF)

設置 4 個 10m × 10m 的樣區，測量樣區內林木平均胸高斷面積。樣區之林木胸徑由 7.1-40.4 cm，其胸徑級集中分布在 25-35 cm (圖 2)，因此選定胸徑為 27.9 cm、31 cm 及 32 cm 之台灣杉 3 株，每株於樹高 150 cm 處以塑膠管(直徑 4 cm，上方穿鑿小孔)纏繞約 3 圈，塑膠管外圈直徑 1 cm 透明管圍繞防止幹流溢流，其間隙均以矽膠填實，再將水管接至 25L 容量之塑膠筒(洪等 1987)。每次採樣同時量測每一收集筒中的水樣量，依下列公式求其單位面積之幹流量(陸及唐 1995)：

$$SF = VOL \times (6884 / ABH) / 10^5$$

SF：幹流量(mm)；

VOL：每場雨於幹流採樣桶所量測的量(ml)；

ABH：植株之胸高斷面積(cm²)；

10m × 10m 樣區內台灣杉之平均胸高斷面積為 6,884 cm²。

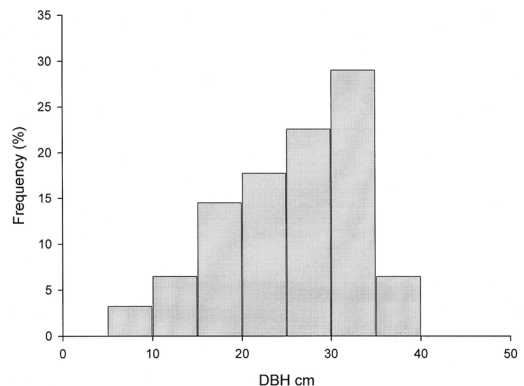


圖 2. 烏石坑地區 18 年生台灣杉人工林胸高直徑分布圖。

Fig. 2. The distribution of tree diameters at breast height (DBH) at the 18-year old Taiwan-fir plantation in the Wushyrkeng area.

(四)截留量(rainfall interception, IL)

將林冠截留量定義為林外雨與穿落水及

幹流之差，截留量之估算式(潘 1964; Brooks *et al.* 1991)：

$$IL = RF - (TF + SF)$$

三、化學分析

上述之雨水、穿落水及幹流現場採樣後於當地測定電導度及 pH 值，電導度(conductivity)以電導度計(WTW LF537)測定，pH 值以玻璃電極(WTW pH95)測定。所有水樣均立即冷藏儘速攜回實驗室分析，每一樣品重複分析 2 次。水樣以 0.45 μm 之濾膜過濾後以離子層析儀(DIONEX 100)測定，其中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 以陽離子管柱分析， F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 以陰離子管柱分析。 HCO_3^- 的測定以 0.01N H_2SO_4 滴定水樣至 pH 值為 4.52 為止，水樣 pH 值低於 4.6 以下者，則不滴定(金及楊 1984; 劉 2000)。

四、離子濃度及年輸入量之估計

各種離子濃度以離子當量濃度(micro-equivalent concentration, $\mu\text{eq/l}$)來表示，分別以穿落水及幹流各離子濃度與林外雨離子濃度相比較，求出其增多係數(TTF/RF, SF/RF enrichment ratio)，以了解雨水流經台灣杉後化學物質的變化(Parker 1990)。

年輸入量(annual flux)則由 1998 年 3 月至 1999 年 2 月底之總雨量再與各離子濃度平均計算，估算雨水輸入之營養鹽量。淨輸入量(net canopy exchange, NEC)由穿落水的年輸入量(total annual throughfall, TTF)加上幹流年輸入量(total annual stemflow, TSF)再減去林外雨的年輸入量(total annual rainfall, TRF)，算出森林的淨輸入量〔 $\text{NEC} = (\text{TTF} + \text{TSF}) - \text{TRF}$ 〕。

五、統計分析

(一)水質變化

森林不同降水化學性質組成之差異採用變異數分析(analysis of variance)來檢測調查期

間降雨、穿落水及幹流水質的差異，並以鄧肯分析(Duncan's multiple range test)檢測其變異是否顯著。穿落水及幹流的 pH 值與各成分之相關性採用皮爾森相關強度分析(Pearson correlation analysis)檢測，以上統計分析軟體為 SAS 8.0。

(二)降雨量與穿落水及幹流之相關性

降雨量與穿落水、幹流量及截留量以統計繪圖軟體 SigmaPlot version 8.0 進行直線迴歸分析(linear regression)，並建立其迴歸式。

結 果

一、雨水的分配

研究期間烏石坑地區各月份林外雨、台灣杉穿落水及幹流之水量及比率如表 1 所示。自 1998 年 3 月至 1999 年 2 月止一整年的資料來看，烏石坑的年降雨量為 2,050 mm，穿落水量 1,771 mm，平均穿落率為 86.39%，幹流量 23.5 mm 占降雨之 1.15%，截留量為 255.6 mm 占降雨量之 12.46%。其結果與林(1976)於溪頭地區觀測台灣杉人工林(36 年生)，穿落水、幹流及截留量分別占林外雨之 88.13%、1.80%及 11.69%相近。

二、季節差異

穿落水及幹流占降雨之最高比率出現在 1998 年 6 月(穿落水 94.25%，幹流 1.62%)，最低比率出現於 1999 年 1 月(穿落水 57.42%，幹流 0.06%)，截留量占降雨比率最高為 1999 年 1 月(42.51%)，最低在 1998 年 6 月(4.13%)，截留率的兩個高峰期出現在 1998 年的 7、8 月及 1999 年的 1、2 月。截留率受到降雨特性、氣候條件與森林狀況之影響，就調查期間烏石坑地區之生態氣候圖(Walter 1985)與林內降雨之截流率來看(表 1，圖 3)，1998 年的 7、8 月截留率高峰可能受高溫影響，使降雨迅速蒸發。而 1999 年 1、2 月的高峰則因 1998 年 11 月起

進入乾季(11月降雨量為0)，1999年1-2月則為絕對乾旱期(雨量低於溫度2倍)，連續乾旱造成樹冠層乾燥，一旦降雨枝葉層及樹幹吸附

並截留大部分的雨水，因此穿落水及幹流占降雨量之比率相對減少。

表 1. 烏石坑地區台灣杉 18 年生人工林降雨、穿落水、幹流及截流之月變化量 (1998 年 2 月至 1999 年 5 月)

Table 1. Monthly and annual rainfall, throughfall, stemflow, and interception loss at the 18 years old Taiwan-fir plantation in the Wushyrkeng area of central Taiwan, February 1998 to May 1999 (percentages to rainfall in parentheses)

	1998												1999				Annual total ^{1/}
	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May		
Rainfall (mm)	259.0	237.8	124.9	409.0	317.4	91.1	244.3	261.8	253.5	72.3	15.6	23.0	130.6	126.8	253.5	2050.7	
Throughfall (mm)	239.4	206.9	106.9	378.7	299.1	62.9	168.5	229.8	233.5	60.5	8.9	15.9	106.8	106.5	216.7	1771.6	
(%)	(92.43)	(87.01)	(85.55)	(92.58)	(94.25)	(69.00)	(68.99)	(87.80)	(92.09)	(83.60)	(57.42)	(69.23)	(81.82)	(83.99)	(85.46)	(86.39)	
Stemflow (mm)	2.7	2.2	1.3	4.3	5.1	0.7	2.2	3.2	3.9	0.5	0.0	0.0	0.8	1.8	2.3	23.5	
(%)	(1.05)	(0.93)	(1.06)	(1.06)	(1.62)	(0.71)	(0.89)	(1.24)	(1.55)	(0.71)	(0.06)	(0.09)	(0.64)	(1.45)	(0.92)	(1.15)	
Interception loss (mm)	16.9	28.7	16.7	26.0	13.1	27.6	73.6	28.7	16.1	11.4	6.6	7.1	22.9	18.5	34.5	255.6	
(%)	(6.52)	(12.06)	(13.39)	(6.36)	(4.13)	(30.29)	(30.12)	(10.96)	(6.36)	(15.71)	(42.51)	(30.67)	(17.53)	(14.59)	(13.61)	(12.46)	

^{1/} March 1998 to February 1999.

三、降雨量與穿落水及幹流之相關性

以每一場降雨量與穿落水、幹流進行相關性分析，發現穿落量、幹流與降雨量均呈顯著正相關，而截留量則與降雨量無顯著相關 ($R^2=0.10$, $df=28$, $p>0.05$)，再以穿落量、幹流與降雨量進行直線迴歸分析，其迴歸式詳如圖 4。陸及唐(1995)對台灣中部天然闊葉林截留量之研究，也發現截留量與雨量間並無顯著的相關性。理論上當林冠截留容量飽和後，其截留量不再增加，因此截留量占降雨之比率亦隨著降雨量之增加而降低，且截留量除受降雨強度及持續時間影響外，日照、風、氣溫等與蒸發散有關之因子亦具影響，因此其與降雨量之直線相關性甚低。

四、雨水 pH 值、電導度及無機養分濃度

調查期間該試驗區穿落水、幹流與降雨之化學性質加權平均當量濃度詳如表 2。流經台灣杉林之雨水化學性質變化主要有兩種趨勢，一為自林外雨、穿落水及幹流濃度逐漸增加(電導度及大部分離子)；另一類為離子在穿落水中增加，而幹流則降低(pH 值及 HCO_3^-)。

穿落水的陽離子以 Ca^{2+} 之濃度最高，而後依序為 $\text{K}^+>\text{NH}_4^+>\text{Mg}^{2+}>\text{Na}^+>\text{H}^+$ ，陰離子濃度依序為 $\text{HCO}_3^->\text{NO}_3^->\text{SO}_4^{2-}>\text{Cl}^->\text{F}^-$ ，幹流陽離子濃度依序為 $\text{Ca}^{2+}>\text{K}^+>\text{Mg}^{2+}>\text{NH}_4^+>\text{H}^+>\text{Na}^+$ ，陰離子濃度依序為 $\text{SO}_4^{2-}>\text{NO}_3^->\text{Cl}^->\text{HCO}_3^->\text{F}^-$ ，幹流中所有的離子濃度除 HCO_3^- 濃度明顯下降外，其他離子濃度在幹流中均大幅上升。除了

F⁻以外，幹流的化學性質與降雨及穿落水相較，其他離子均呈顯著差異，此點顯示雨水通過林冠後其化學組成會明顯改變，幹流之化學性質變化更為劇烈。

五、營養鹽年輸入量及分配

表 3 為營養鹽年輸入量及分配，陽離子營養鹽年輸入量較高的有 Ca²⁺(43.31 kg/ha/year)、K⁺(34.76 kg/ha/year) 及 NH₄⁺ (10.89 kg/ha/year)；陰離子有 HCO₃⁻ (85.13 kg/ha/year)、NO₃⁻ (48.49 kg/ha/year)、SO₄²⁻ (36.01 kg/ha/year)及

Cl⁻ (16.14 kg/ha/year)。除了 H⁺外，穿落水離子量均占林內兩年年輸入量 96%以上，幹流的年輸入量中以 H⁺占 13%最高，其他離子約占 1-4%，顯示穿落水對森林元素流轉之貢獻頗為重要。

淨輸入量以 K⁺(33.88 kg/ha/year)及 HCO₃⁻ (52.23 kg/ha/year)最高，其中 K⁺的淨輸入量占總輸入量的 94%，顯示有大量的 K⁺經由林冠投入林地。然而 H⁺(-0.02 kg/ha/year)和 F⁻(-1.55 kg/ha/year)之淨輸入量為負值，亦顯示部分離子在雨水穿過冠層反而被林冠吸收。

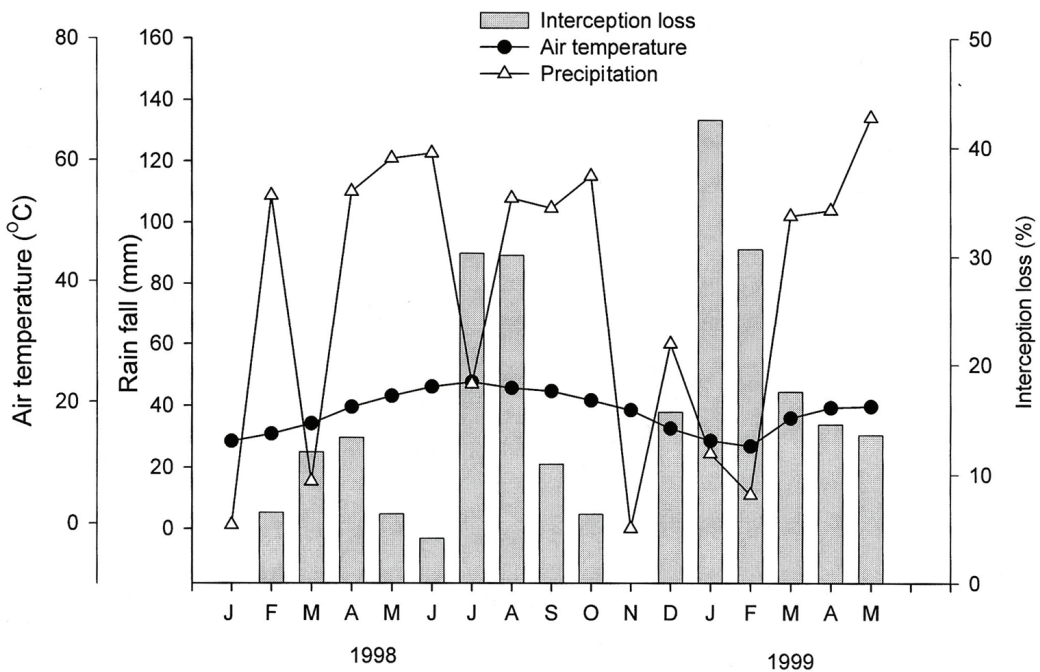


圖 3. 烏石坑地區生態氣候圖(10°C=20 mm；當降雨量大於 100 mm 時，10°C=200 mm)與台灣杉截留率月變化圖(1998 年 2 月至 1999 年 5 月)。

Fig. 3. Ecological climate diagram (10°C=20 mm; when precipitation > 100 mm, 10°C=200 mm) and percentages of monthly rainfall interception (bar chart) at the Taiwan-fir plantation in the Wushyrkeng area, February 1998-May 1999.

表 2. 1998 年 2 月至 1999 年 5 月烏石坑地區 18 年生台灣杉人工林降雨、穿落水及幹流化學成分之容積加權平均($\mu\text{eq/l}$)

Table 2. Ionic concentrations (volume weighted means \pm standard deviations, $\mu\text{eq/l}$) of rainfall, throughfall and stemflow for the 18-year Taiwan-fir plantation in the Wushyrkeng area of central Taiwan, February 1998 to May 1999

	n=87 Rainfall	n=115 Throughfall	n=87 Stemflow
Cond. ($\mu\text{s/cm}$)	13.25 \pm 0.58 ^{bl}	22.65 \pm 3.83 ^b	63.15 \pm 14.78 ^a
pH	5.04 \pm 0.20 ^b	5.88 \pm 0.08 ^a	4.76 \pm 0.38 ^c
H ⁺	19.30 \pm 6.06 ^b	3.42 \pm 1.37 ^c	34.57 \pm 16.92 ^a
Na ⁺	9.64 \pm 2.30 ^b	8.62 \pm 1.45 ^b	21.94 \pm 6.26 ^a
NH ₄ ⁺	25.82 \pm 1.06 ^b	46.48 \pm 18.15 ^{ab}	46.83 \pm 12.42 ^a
K ⁺	3.55 \pm 0.53 ^c	50.49 \pm 9.16 ^b	173.67 \pm 152.98 ^a
Mg ²⁺	13.50 \pm 5.49 ^b	31.35 \pm 4.47 ^b	95.95 \pm 9.26 ^a
Ca ²⁺	51.95 \pm 15.17 ^b	129.31 \pm 36.23 ^b	254.12 \pm 49.79 ^a
F ⁻	9.03 \pm 3.91 ^a	8.82 \pm 5.18 ^a	17.83 \pm 1.82 ^a
Cl ⁻	18.02 \pm 0.98 ^b	23.76 \pm 3.57 ^b	83.37 \pm 27.94 ^a
NO ₃ ⁻	22.61 \pm 2.45 ^b	48.24 \pm 11.96 ^b	98.43 \pm 16.26 ^a
SO ₄ ²⁻	35.92 \pm 2.13 ^b	45.40 \pm 4.98 ^b	153.23 \pm 32.21 ^a
HCO ₃ ⁻	22.98 \pm 12.55 ^b	69.54 \pm 4.00 ^a	18.95 \pm 9.60 ^b

^{l/} Different superscripts (a, b and c) between columns of a line indicating significant difference at 5% level ($p < 0.05$).

表 3. 烏石坑地區 18 年生台灣杉人工林林外雨、穿落雨、幹流的年輸入量和離子年淨輸入量(kg/ha/year), 1998 年 3 月至 1999 年 2 月

Table 3. Annual ion in fluxes from rainfall, throughfall, stemflow and net canopy exchange (NCE, kg/ha/year) in the Wushyrkeng area of central Taiwan, March 1998 to February 1999 (percentages to total in parentheses)

	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Rainfall	0.39	2.67	7.61	2.34	2.57	15.52	4.61	12.32	24.11	31.13	31.90
Throughfall	0.32	2.78	10.89	34.79	6.38	43.31	2.98	15.59	47.30	34.68	84.31
(%)	(87)	(97)	(99)	(96)	(97)	(98)	(97)	(97)	(98)	(96)	(99)
Stemflow	0.05	0.10	0.15	1.42	0.21	1.07	0.08	0.55	1.19	1.33	0.82
(%)	(13)	(3)	(1)	(4)	(3)	(2)	(3)	(3)	(2)	(4)	(1)
Total ^{l/}	0.37	2.88	11.04	36.22	6.59	44.38	3.06	16.14	48.49	36.01	85.13
NCE	-0.02	0.21	3.43	33.88	4.02	28.86	-1.55	3.82	24.38	4.88	53.23

^{l/}Throughfall + Stemflow.

表 4. 台灣地區不同林分穿落雨、幹流和截留率之比較

Table 4. Comparison of percentage compositions of throughfall, stemflow and interception loss to rainfall among different forest types in Taiwan

Annual rainfall (mm)	Throughfall	Stemflow (%)	Interception losses	Forest type	Reference
2050	86.39	1.15	12.46	Taiwan-fir plantation	This study
2821	88.13	1.8	11.69	Taiwan-fir plantation	林 1976
2533	68.28	5.99	18.92	Cryptomeria plantation	林 1976
1608	62-84	3.2-8.6	7.8-29.9	Chinese red pine	周及江 1964
1608	60-83	3.6-12.7	14-38	China-fir plantation	周及江 1964
1165	91.64	0.8	7.56	China-fir plantation	潘 1964
2822	77	14	9	China-fir plantation	劉及許 1999
2090	90.87	1.41	7.72	Taiwan zelkova plantation	潘 1965
2822	76	5	19	Secondary hardwood	劉及許 1999
2707	84.47	4.2	11.3	Mixed hardwood	陸及唐 1995
2346	88.9	<1	11.1	Mixed hardwood	林等 1996
2822	74	3	23	Mixed hardwood	劉及許 1999

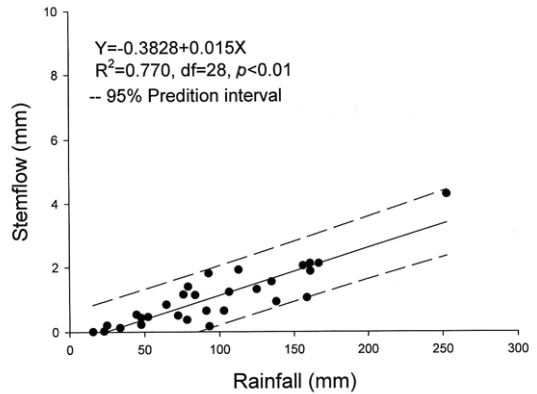
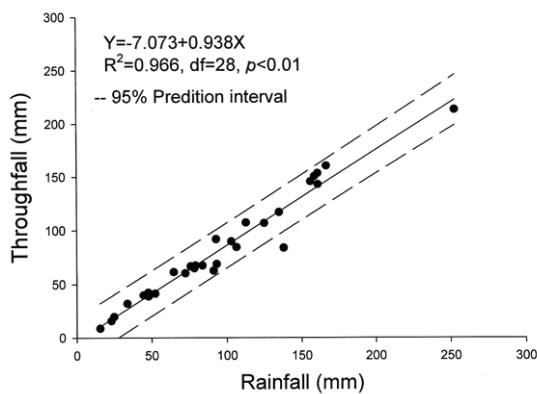


圖 4. 烏石坑地區台灣杉穿落水、幹流和降雨量之迴歸分析圖。

Fig. 4. The linear relationships between throughfall and rainfall (left figure) and between stemflow and rainfall (right figure) at the Taiwan-fir plantation in the Wushyrkeng area, February 1998-May 1999 (solid lines, regression lines; dashed lines, 95% confident levels).

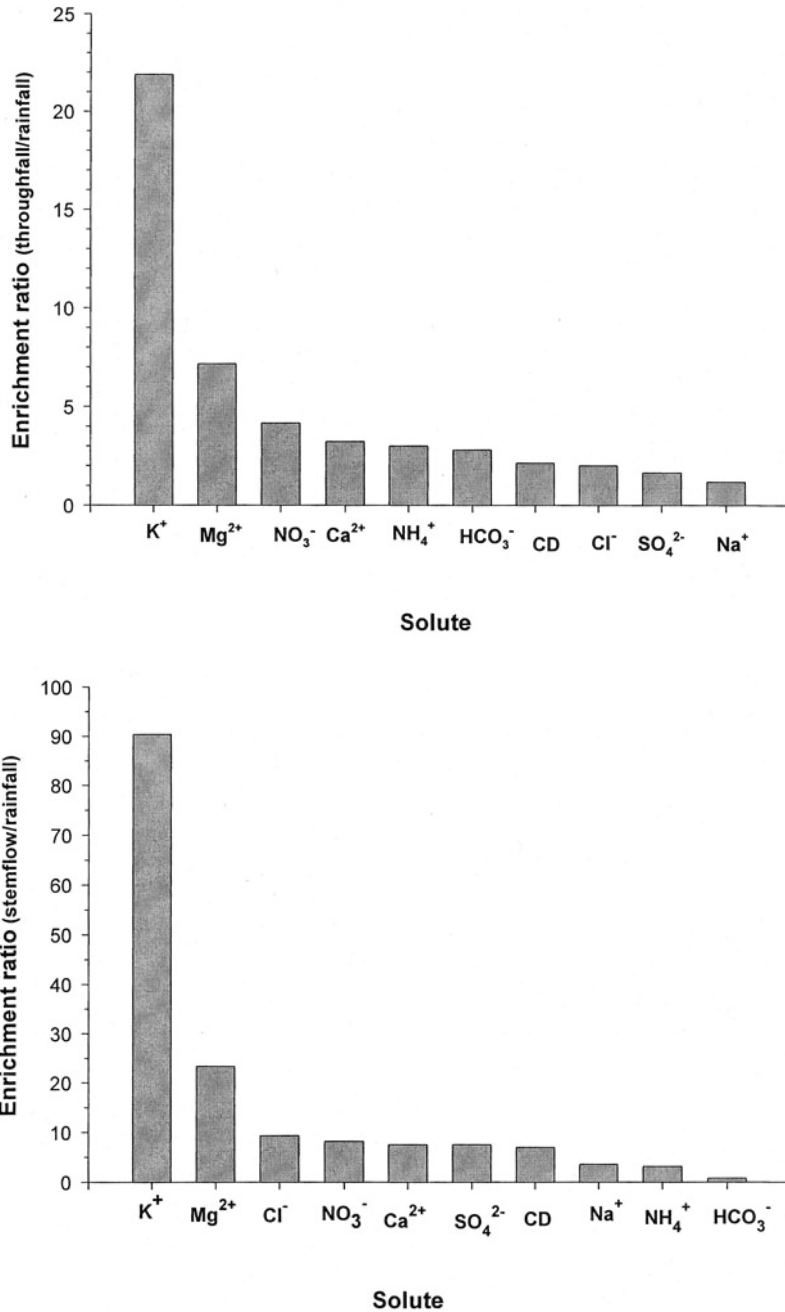


圖 5. 烏石坑地區台灣杉穿落水、幹流主要化學性質之富集率。

Fig. 5. Mean enrichment ratios of major solutes from throughfall (upper figure) and stemflow (down figure) at the Taiwan-fir plantation in the Wushyrkeng area, February 1998-May 1999.

六、穿落水及幹流化學成分之增多作用

台灣杉穿落水及幹流中各種離子之增加係數如圖 5。穿落水中各種離子之增加係數依序為 $K^+ > Mg^{2+} > NO_3^- > Ca^{2+} > NH_4^+ > HCO_3^- > Cond. > Cl^- > SO_4^{2-} > Na^+$ ，其中以 K^+ (21.89) 最高，其餘各離子之增加係數均在 10 以下。幹流的增加係數依序為 $K^+ > Mg^{2+} > Cl^- > NO_3^- > Ca^{2+} > SO_4^{2-} > Cond. > Na^+ > NH_4^+ > HCO_3^-$ ，除了 HCO_3^- 降至 0.82 外，幹流其他各離子之增加係數均高於穿落水，顯示台灣杉幹流化學物質之增多作用遠較穿落水高而明顯，因此探討森林營養鹽循環時幹流養分輸入為一不可忽視之要素。

討 論

一、台灣地區不同林分穿落水、幹流和截留率之比較

森林生態系之降雨分配為具時間及空間變異的水文現象(陸及唐 1995)。林冠鬱閉度、林相組成、葉面積指數、降雨型態、季節(溫度、風)均會影響到穿落水的量(林等 1996; 劉及許 1999; Moreno *et al.* 2001)。幹流量隨樹種、樹冠型、樹幹粗糙度、樹冠高度及降雨型態及氣候狀況而不同(林等 1974; 陸及唐 1995; 劉及許 1999; Kostelnik *et al.* 1989; Beier and Hansen 1993)。如果氣候型態相同，穿落水比率則受植被(植物組成、鬱閉度、樹種、樹型等)之影響，就人工林而言當林齡增長使林分的鬱閉度增加，其穿落水占降雨之比率會逐漸減少，相對其截留量則會增加。此種差異不僅影響到森林的水文循環、營養循環及能量收支，與森林生產力的變動亦有密切關係。一般森林降雨中穿落水約占 60-95%，幹流占 0-35%，樹冠截留占 5-35% (Parker 1990)。表 4 為台灣對森林降雨分配之研究成果，其大都以穿落水所占之比率最高(60-92%)，截留次之(7-23%)，幹流最小(0.8-12.7%)，與本研究之結果相符。近

來有些研究注意到原生林砍伐後改植人工林及經濟作物對於森林水文及營養循環之影響 (Opakunle 1989; Lian and Zhang 1998)。例如在亞馬遜的次生林中幹流占降雨量之 41%，穿落水只占 38-65%，其雨水分配與原生林差異極大(Hölscher *et al.* 1998)，因此當天然林改變為人工林時，森林降雨之分配比率亦隨之改變。以本研究結果與同在中部山區關刀溪天然闊葉林比較(劉及許 1999)，天然闊葉林的幹流及截留率占較高的比率。

二、降雨量與穿落水及幹流之相關性

在本研究中台灣杉人工林穿落水及幹流量均隨降雨量而增加，然而截留量則與降雨量無顯著相關，此一結果與台灣其他林分之研究相同(潘 1964, 1965; 周及江 1963, 1964; 陸及唐 1995; 林等 1996)。由於森林冠層會阻截降雨，因此當降雨到達一定量時才有穿落水及幹流發生。周及江 (1963)於實際觀測相思樹 (*Acacia confusa*)、馬尾松 (*Pinus massoniana*) 及杉木等 3 種林分之林內降雨，發現當雨量達 0.47 mm、2.00 mm 及 0.69 mm 時即有穿落水發生，降雨量需達 6.2 mm、8.1 mm 及 7.8 mm 以上才有幹流發生。然就其所測得之迴歸式來推估雨量需達 3.8 mm、2.9 mm 及 3.8 mm 時才有穿落水發生，雨量達 4.5 mm、16.4 mm 及 15.2 mm 以上才有幹流，較實際觀測值高出許多(周及江 1964)。就本研究之迴歸式(圖 4)推導，當降雨達 25.52 mm 及 7.54 mm 時台灣杉林才有幹流及穿落水發生，其值較前項研究為高。此點除因為推導值偏高外，亦可能由於台灣杉皮具厚纖維質且呈長條狀溝列(劉 1980)，在降雨初期吸收較多的雨水所致(劉 2000)。

在本研究中截留量則與降雨量無顯著正相關，就理論而言截留量應有上限，當截留量達到林冠飽和即不再增加，飽和後截留率將隨著降雨的增加而減少，因此截留量並非僅隨著降雨量增加，其主要受降雨延時(rainfall

duration)影響。截留量的因素極為複雜，乾濕年、前期降雨、風、氣溫及空氣對流作用也會影響到森林的濕度及蒸發散作用(林等 1974；Brooks *et al.* 1991；Deguchi *et al.* 2006；Cuartas *et al.* 2007)。林等(1996)對台灣東北部天然闊葉林林冠截留之研究，認為冬季之林冠截留率明顯高於夏季。陸及唐(1995)認為截留量雖僅占年總雨量之 10%，但其分布極不平均，冬季乾旱期幾乎所有之降雨均被截留而未能進入土壤，而夏季高強度降雨季節截留量所占之比例甚低。本研究最高林冠截留率(42.5%)出現於 1999 年 1 月，因為前期連續乾旱且雨量少，大部分的雨水被林冠截留。最低截留率出現在 1998 年 5 月(6.36%)及 6 月(4.13%)，由於該兩個月份之降雨量均達 300 mm，且自 2 月起試驗地的月降雨量達 100 mm 以上，連續降雨使其冠層枝葉過於濕潤，導致截留量減少。

三、林內雨 pH 值之變化

當降雨流經森林時因離子置換、植物分泌、吸收及淋溶等過程而改變其 pH 值，綜合許多研究結果來看，闊葉林林冠會中和雨水酸度，針葉林卻可能使雨水酸化(洪等 1987；金等 1992；劉 2000；Cronan and Reiners 1983；Parker 1990)，林冠對於降雨的酸化或中和作用與酸沉降量的多寡有關(Schaefer 1992)。Miller (1983)認為林齡老化和養分缺乏會使針葉林內雨 pH 值降低。Cronan and Reiners (1983)認為針葉樹林冠對 NH_4^+ 吸收、硝化作用及有機酸之淋溶等過程均較闊葉樹林活絡，所以會降低林內雨之 pH 值。

在本研究中台灣杉之林外雨、穿落水與幹流，三者的 pH 值呈顯著差異(表 2)，穿落水之 pH 值較林外雨高出 0.84，然而幹流 pH 值較林外雨降低 0.28，呈現酸化現象。將台灣杉穿落水及幹流的 pH 值與各成分之相關性採用皮爾森相關強度分析，發現穿落水 pH 值與 SO_4^{2-} ($r = -0.311, p < 0.001$)、 HCO_3^- ($r = 0.543, p < 0.001$)

有顯著相關，顯示雖然台灣杉穿落水 pH 值較為提昇，惟 SO_4^{2-} 對於穿落水仍有負影響。幹流則與 NO_3^- ($r = -0.435, p < 0.001$)、 SO_4^{2-} ($r = -0.427, p < 0.001$)及 HCO_3^- ($r = 0.544, p < 0.001$) 呈顯著相關，顯示幹流 pH 值的降低主要與 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 有關，根據 Chang *et al.* (2005)研究在台灣中部此兩種離子主要來自工業排放。

金等(1992)調查畢祿溪二葉松林與劉及許(1999)觀測關刀溪杉木林之幹流也出現 pH 值較林外雨低之情形，然台灣其他闊葉林中穿落水及幹流之 pH 值較林外雨高(林等 1991；金等 1992；許等 1994)。HouBao *et al.* (1999)調查福建的香杉人工林發現夏季時因為有機酸導致穿落水及幹流 pH 值降低，在冬季時乾沉的增加使穿落水及幹流的 pH 值上升。Pedersen *et al.* (1995)則認為林冠對 pH 值緩衝能力受氮循環及有機物的溶出之影響。劉(2000)在關刀溪分析香杉森林降雨，認為杉木幹流水之酸化，主要是因為杉木會釋出較多種高濃度的有機酸所致，並以陰離子當量濃度總差來估算有機酸離子濃度，其幹流陽離子總合均高於陰離子，二者間差異高達 341.65 $\mu\text{eq/l}$ 。目前台灣杉穿落水及幹流尚缺乏有機物之分析，若以上述方法來估算幹流陰陽離子之差異達 255.27 $\mu\text{eq/l}$ ，因此有機酸對於台灣杉幹流 pH 值應有一定程度之影響。

四、穿落水及幹流化學成分之增加係數

台灣杉穿落水及幹流中各種離子之增加係數如圖 5，幹流的增加係數明顯高於穿落水之增加係數，幹流由於沿著冠層及樹幹而下，可以淋溶(leaching)出更多的物質，因此其化學成分之濃度多高於穿落水。Wang *et al.* (1997)於福山實驗林雨水之研究顯示，不論穿落水或幹流均以 K^+ 和 Mg^{2+} 的增加係數最高，而幹流化學成分濃度高於穿落水。Parker (1990)收集不同林分穿落水與降雨化學性質分析其增加係數之順序為 $\text{K} > \text{Mg} > \text{P} > \text{Cl} > \text{Ca} > \text{Na} > \text{SO}_4 >$

$\text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^-$ ，與本研究之結果相符。就淋溶能力來看， K^+ 是最容易自植物體淋溶出來的離子(Lian and Zhang 1998)。因為在植物體中 K^+ 是以離子態存在，而且在氣孔開閉控制扮演重要角色，有時經由降雨淋溶出來而投入林地的鉀甚至比枯落物還多(Johnson 1992；Reynolds 1996)。 Ca^{2+} 會儲存在植物體中直到枯落才回歸林地，因此在林內雨中 Ca^{2+} 的淋溶不若 K^+ 迅速， Mg^{2+} 的循環則是介於 Ca^{2+} 與 K^+ 之間(Johnson 1992)。林內雨中增加的 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 來自冠層的淋溶作用， Na^+ 則與植群的作用無關，其在林內雨中的濃度增加主要應來自乾沉降(Cappellato and Peters 1995；Hansen 1996)。Reynolds (1996)分析英國不同林齡之西加雲杉(sitka spruce)的降雨，認為林內雨中 K^+ 主要是來自淋溶作用，而 Na^+ 及 Cl^- 不受到林冠的淋溶、離子交換及吸收的影響。

許多研究指出在缺乏氮源的森林中，當雨水流經森林時，森林冠層及植群(包括附生植物、苔蘚等)會直接吸收 NH_4^+ 與 NO_3^- ，使林內雨中的 NH_4^+ 與 NO_3^- 減少(Parker 1990；Neary and Gizyn 1994；Cappellato and Peters 1995；Hansen 1996；Aamlid *et al.* 2000)，尤其在生長季節其吸收現象更為明顯(Lovett 1992)。在烏石坑的台灣杉林內雨並無 NH_4^+ 與 NO_3^- 被吸收的現象，應與本區高氮沉降量有關。 NH_4^+ 的增加係數穿落水(3.00)與幹流(3.16)相當，顯示 NH_4^+ 沒有被植群釋出，但幹流 NO_3^- 的增加係數(8.19)卻較穿落水(4.16)提高許多，在幹流中大量釋出的 NO_3^- 可能來自樹幹表皮，或者當雨水流經冠層時硝化作用會使得雨水中 NH_4^+ 減少而 NO_3^- 增加，因此不論是幹流或穿落水其 NO_3^- 的增加係數高於 NH_4^+ (Lovett 1992)。

烏石坑地區台灣杉 SO_4^{2-} 及 Cl^- 穿落水及幹流增加係數極為相似，在穿落水中增加係數在2左右，幹流增加係數分別為 SO_4^{2-} (7.53)及 Cl^- (8.19)，推測幹流中 SO_4^{2-} 及 Cl^- 的高增加係數可能因其樹皮粗糙可攔截更多的大氣沉降所致

(Aboal *et al.* 1999)。林內雨中 SO_4^{2-} 及 Cl^- 主要源自乾沉降的淋洗(washoff)，研究顯示 SO_4^{2-} 來自冠層淋溶作用低於4%(Lindberg 1992；Mitchell *et al.* 1992)，而 Cl^- 與冠層之淋溶或吸收作用無關(Reynolds 1996)。劉(2000)分析3種林分之穿落水及幹流發現，當雨水通過林冠及樹幹除H、F、Na及杉木林幹流水的 HCO_3^- 外皆顯著增加，增多係數由1.50到65.49。本研究中也有相同之情形，除了穿落水的F、H⁺及幹流的 HCO_3^- 外其餘各離子濃度均增加，穿落水增多係數由1.18(Na^+)到21.89(K^+)，幹流的增多係數由1.83(F⁻)到90.41(K^+)，顯示幹流中離子濃度之變化較之穿落水更為劇烈。

五、穿落水及幹流養分流轉

森林降雨中離子的輸入有兩個主要來源，一為來自乾沉降的淋洗，另一為雨水流經樹冠時將植群表面或內部的各種無機與有機的物質攜出的淋溶現象(Johnson 1992)，因此幹流及穿落水的化學性質與雨水會有明顯的差異。就林內雨淨輸入量來看， K^+ 是陽離子中輸入最多的，其淨輸入量達33.88 kg/ha/year，比 Ca^{2+} 淨輸入量28.86 kg/ha/year還高。在波多黎各雨林中每年透過穿落水回歸林地的 K^+ 為52 kg/ha，而以落葉方式回歸林地卻只有20 kg/ha，可見淋溶為 K^+ 養分回歸之主要路徑，但 Ca^{2+} 主要透過枯枝落葉回歸至林地(Reynolds 1996；McDowell 1998)。 Mg^{2+} 在雨水中年輸入量2.57 kg/ha，但林內雨淨輸入量為4.02 kg/ha，顯示部分來自植物淋溶。 Na^+ 主要來自海洋，其非植物必要元素因此植物體中含量低(Ovalle and Filho 1991)，烏石坑地區因離海較遠，受海洋飛沫之影響較小，因此其林內雨 Na^+ 之輸入量與降雨相當。有些研究以葉片中主要陽離子(K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+})之濃度來評估酸沉降對森林中陽基離子之影響，發現在雨量高及酸沉降嚴重的地區會使 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 淋溶現象加劇，引起土壤及植物體中陽基離子

的缺乏，減低森林生態系對酸沉降緩衝之能力(Liechty *et al.* 1993；Austin and Vitousek 1998)。就本研究的 H^+ 淨輸入量為負數來看，表示台灣杉人工林將部分 H^+ 保留在冠層中，對於酸沈降具有中和能力。

在缺乏氮源的森林不論針葉樹或闊葉樹都會發生林冠將沉降之 NH_4^+ 和 NO_3^- 吸附保留的現象，此種無機氮之保留現象與樹種、季節及土壤的養分狀況有關(Parker 1990；Cole 1992；Neary and Gizyn 1994)。Cole (1992)認為若不考慮到乾沉降的量，樹冠應該扮演沉積(sink)的角色，因為枝葉層、森林中的附生植物、真菌、細菌會吸收無機氮(NH_4^+ 、 NO_3^-)。劉(2000)在台灣中部關刀溪集水區研究 3 種不同林分林內雨，發現杉木林有保留 NH_4^+ 之情形。Wang 等(1997)在福山天然闊葉林進行之研究亦發現 NO_3^- 因林冠吸收而減少。但在烏石坑台灣杉林內雨之 NH_4^+ 及 NO_3^- 並沒有發生保留之現象， NO_3^- 淨輸入量還高達 24.38 kg/ha/year，為陰離子中輸入最多者，顯示當地氮源並不缺乏。

Adams (1999)認為過量的氮沉降會造成養分循環的改變，並使林地土壤的陽基離子大量釋出、增加有機物分解，使植物生長過速，引發植物物候及碳分配改變，因此氮沉降量是未來監測森林生態變動的主要標的。Chadwick and Kuylenstierna (1991)研究顯示當立地中 N 的沉降量在 20 kg/ha/year 時即會影響植生的組成，因此將 N 沉降之生態環境容忍極限設定為 15 kg/ha/year，惟此一限制條件仍依土壤及立地條件而有所差異。薛(2000)調查烏石坑地區雨水中無機氮(NO_3^- -N+ NH_4^+ -N)之輸入量為 11.35 kg/ha/year，而 18 年生台灣杉林內雨無機氮之輸入量為 19.54 kg/ha/year，而 Liu *et al.* (2006)調查 35 年生香杉林雨水輸入總氮量只有 12.30 kg/ha/year，因此未來之氮沉降對於該區之影響應是長期監測的重點。

酸性沉降中以硫酸及硝酸對雨水酸度的

影響最大， SO_4^{2-} 的來源主要是燃燒和海洋飛沫(Kennedy 1986)。林內雨中 SO_4^{2-} 主要源自乾沉降的淋洗及空氣中 SO_2 ，其可經植物的氣孔直接吸收(Mitchell *et al.* 1992；Neary and Gizyn 1994)，因此植物體中的硫含量及硫沉降量均與林內雨中的 SO_4^{2-} 有絕對的相關性(Mitchell *et al.* 1992)。在台灣中部的杉木林林內雨中 SO_4^{2-} 甚至低於降水(劉 2000)，但在福山天然林中受海洋飛沫的影響，因此當雨水流經森林時 SO_4^{2-} 成為雨水的主要成分(Wang *et al.* 1997)。烏石坑地區因離海較遠且無嚴重之硫污染，因此台灣杉人工林 SO_4^{2-} 的淨輸入量只有 4.88 kg/ha/year，與彰化市雨水 SO_4^{2-} 的淨輸入量 25 kg/ha/year (Chang *et al.* 2005)差距頗大，因此大多來自林木本身對乾沉降的攔截。

結 論

本研究 18 年生台灣杉人工林之森林降雨量分配，其平均穿落率為 86.39%，幹流量占降雨量之 1.15%，截留量占降雨量之 12.46%。由於烏石坑地區之降雨型態乾濕季極為明顯，森林降雨分配有極大的差異，在乾季時其台灣杉的截留率高達 40%。台灣杉林穿落水 pH 值與 SO_4^{2-} 顯著負相關，但幹流 pH 值則與 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 成顯著負相關。雖然台灣杉幹流有酸化之現象，然而其 H^+ 淨輸入量為 -0.03 kg/ha/year，表示台灣杉冠層保留部分 H^+ 離子，而 HCO_3^- 淨輸入量為 53.23 kg/ha/year，顯示其酸中和能力的增加，因此就整體而言，台灣杉對於酸沉降仍具有中和能力。

謝 誌

本文的完成感謝蔡住發博士及李訓煌研究員的悉心指正及對文章之校閱。林壯威先生協助野外樣品收集，吳福正先生對實驗之協助，在此一併致謝。

引用文獻

- 王兆桓、汪大雄、林文亮。2000。台灣人工林蓄積量調查推估方法之研究。中華林學季刊 33 (3): 355-370。
- 周恒、江永哲。1963。降雨時不同樹種林分下幹流之測定。台灣省立中興大學及中國農村復興聯合委員會合作試驗報告。
- 周恒、江永哲。1964。降雨時不同樹種林分下幹流之測定(第二次報告)。台灣省立中興大學及中國農村復興聯合委員會合作試驗報告。
- 林青蓉、陳信雄、陳明傑。1991。溪頭試驗集水區降水及溪流水質之研究。台大實驗林研究學報 5 (2): 67-93。
- 林務局。1995。第三次台灣森林資源及土地利用調查。台灣省農林廳林務局。
- 林登秋、夏禹九、金恆鏞。1996。台灣東北部天然闊葉林林內降雨及林冠截流之研究。台灣林業科學 11 (4): 393-400。
- 林登秋、金恆鏞、夏禹九、王立志。1998。福山試驗林硫酸根與無機氮沈降之探討。中華林學季刊 31 (2): 153-164。
- 林琚三。1976。台灣天然植生及人工造林之水分收支。中國農村復興聯合委員會補助計畫。
- 林琚三、簡文村、邱永和。1974。台灣杉、柳杉林分水文平衡之研究(I)。國立台灣大學地理學院研究報告第八期。
- 林照松、洪富文。1991。六龜地區台灣杉人工林之生長。林業試驗所研究報告季刊 6 (3): 229-248。
- 金恆鏞。1987。台北市連續六年來的雨水性質。第四屆環境污染控制技術研討會論文集。台灣大學環境工程研究所。p. 175-191。
- 金恆鏞、楊炳炎。1984。畢祿溪試驗集水區的降水及溪水化學。林業試驗所研究報告第 427 號。
- 金恆鏞、黃良鑫。1983。酸性降水對森林生態系之影響。中華林學季刊 16 (1): 79-89。
- 金恆鏞、漆陞忠、黃正良、薛美莉。1992。酸性沉降物對森林影響之研究、大尺度空氣污染調查及防治策略研究。行政院環保署八十一年計畫成果。
- 洪富文、夏禹九、金恆鏞。1987。台灣中部一個天然闊葉林林冠對於降雨酸度及其他化學性質的影響。第四屆空氣污染控制技術研討會論文集。p. 155-173。
- 許世宏、魏聰輝、姚榮肅、陳信雄、郭幸榮、陳明杰。1994。溪頭地區降雨與林內穿落水的 pH 值及鹽基離子濃度。台大實驗林研究學報 8 (3): 83-97。
- 陸象豫、唐凱軍。1995。台灣中部地區天然闊葉林降雨與截留量之探討。林業試驗所研究報告季刊 10 (4): 447-457。
- 張紹勳。1995。SAS For Windows 統計分析-高等統計。松崗電腦圖書公司。
- 張斐章、金恆鏞、陳彥璋。1991。台北市雨水 pH 值與離子關係。國立台灣大學農學院研究報告 31 (4): 88-98。
- 楊吉宗、薛美莉、伍木林、陳宗寶。1994。烏石坑低海拔試驗站分區規劃及經營管理模式建立之研究(2/4)。台灣省特有生物研究保育中心八十三年度試驗研究計畫執行成果(經營管理組及解說教育組)。74-98 頁。
- 潘家聲。1964。杉木林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗。台灣省林業試驗所報告第 94 號。
- 潘家聲。1965。台灣檫木分樹冠對於降雨截留量關係試驗。台灣省林業試驗所報告。
- 潘家聲。1966。天然闊葉樹林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗。台灣省林業試驗所報告。
- 劉業經。1980。台灣重要樹木彩色圖誌。p.

- 138。國立中興大學、台灣省林務局合作研究報告。
- 劉瓊霏、許博行。1997。台灣中部雨水與三種林分穿落水的化學組成。台灣林業科學 12 (4): 379-386。
- 劉瓊霏、許博行。1999。幹流水和穿落水的水量及水質在三種林分的變化。林業研究季刊 21 (2): 51-59。
- 劉瓊霏。2000。雨水流經關刀溪三種林分水化學的變化。國立中興大學森林學研究所博士論文。
- 賴國祥、林旭宏。1997。烏石坑森林植群型及優勢樹種演替趨勢之探討。中華林學季刊 30 (3): 257-268。
- 薛美莉。2000。台灣中部山區降雨水質及酸性沉降。特有生物研究 2: 21-23。
- Aamlid, D. K., T. K. Venn, A. O. Atuanes, S. Solberg, G. Hysten, N. Christophersen and E. Framstad. 2000. Change of forest health in Norwegian boreal forests during 15 years. *Forest Ecology and Management* 127: 103-118.
- Aboal, J. R., D. Morales, M. Herná'ndez and M. S. Jimé'nez. 1999. The measurement and modelling of the variation of stemflow in alareel forest in Tenerife, Canary Islands. *Journal of Hydrology* 221: 161-175.
- Adams, M. B. 1999. Acidic deposition and sustainable forest management in the central Appalachians, USA. *Forest Ecology and Management* 122: 17-18.
- Austin, A. T. and P. M. Vitousek. 1998. Nutrient dynamics on a precipitation gradient in Hawai'i. *Oecologia* 113: 519-529.
- Berier, C. and K. Hansen. 1993. Spatial variability of throughfall fluxes in a spruce forest. *Environmental Pollution* 81: 25-267.
- Beynolds, B. 1996. Estimating the total deposition of base cations from throughfall measurement. *The Science of the Total Environment* 180: 183-186.
- Brooks, K. N., P. F. Ffolliott, H. M. Gregersen and J. L. Thames. 1991. Hydrology and the management of watersheds. Iowa State University Press, Ames, Iowa.
- Cappellato, R. and N. E. Peters. 1995. Dry deposition and canopy leaching rates in deciduous and coniferous forests of the Georgia Piedmont an assessment of a regression model. *Journal of Hydrology* 169: 131-150.
- Chadwick, M. J. and J. C. I. Kuylenstierna. 1991. Critical loads and critical level for the effects of sulphur and nitrogen compounds. pp. 279-315. *In*: W. S. L. James (ed.). Acid deposition origins, impacts and abatement strategies. Springer-Verlag, Berlin.
- Chang C. T., T. C. Lin and M. L. Hsueh 2005. Characterizing precipitation chemistry in Changhua, central Taiwan using weather conditions and multivariate analysis. *Water, Air, and Soil Pollution* 165: 61-75
- Cole, D. W. 1992. Nitrogen chemistry, deposition, and cycling in forests. pp. 150-152. *In*: D. W. Johnson and S. E. Lindber (eds.). Atmospheric deposition and forest nutrient cycling. Springer-Verlag, New York Inc.
- Cronan, C. S. and W. A. Reiners. 1983. Canopy processing of acidic precipitation by coniferous and hardwood forests in New England. *Oecologia* 59: 216-223.
- Cuartas, L. A., J. Tomasella, A. D. Nobre, M. G. Hodentt, M. J. Waterloo and J. C. Múnnera. 2007. Interception water-partitioning dynamics for a pristine rainforest in Central Amazonia: Marked differences between

- normal and dry years. *Agricultural and Forest Meteorology* 145: 69-83.
- Deguchi, A., S. Hattori and H. T. Park. 2006. The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model. *Journal of Hydrology* 318: 80-102.
- Fenn, M. E. and A. Bynerowicz. 1997. Summer throughfall and winter deposition in the San Bernardino mountains in southern California. *Atmospheric Environment* 31(5): 673-683.
- Hansen, K. 1996. In-canopy throughfall measurement of ion fluxes in Norway spruce. *Atmospheric Environment* 30 (23): 4065-4076.
- Hölscher, D., T. D. Deasa, R. F. Moller, M. Denich and H. Folster. 1998. Rainfall partitioning and related hydrochemical fluxes in a diverse and in a mono specific (*Phernakospermum guyannense*) secondary vegetation stand in eastern Amazonian. *Oecologia* 114: 251-257.
- HouBao, F., H. Wei, M. Zhuang and W. Kosuke. 1999. Acidity and chemistry of bulk precipitation, throughfall and stemflow in a Chinese fir plantation in Fujian, China. *Forest Ecology and Management* 122: 243-248.
- Johnson, D. W. 1992. Base cations. pp. 223-340. *In: D. W. Johnson and S. E. Lindberg (eds.). Atmospheric deposition and forest nutrient cycling. Springer-Verlag, New York.*
- Kennedy, I. R. 1986. Acid soil and acid rain: The impact on the environment of nitrogen and sulphur cycling. Research Studies Press, Letchworth, Hertfordshire, England.
- King, H. B. and M. L. Shiue. 1992. Acidic precipitation and nutrient cycling of a subtropical montane hardwood watershed in central Taiwan. pp. 101-116. *In: C. H. Chiang and Y. N. Wanf (eds.). Proceedings of the joint international symposium on air pollution, soil microbiology and biotechnology of forestry ecosystems. School of Forestry, Auburn University, USA., and Graduate Institute of Forestry, National Taiwan University. ROC.*
- King, H. B., Y. J. Hsia, C. B. Liou, T. C. Lin, L. J. Wanf and J. L. Hwong. 1994. Chemistry of precipitation, throughfall, stemfall, and streamwater of six forest sites in Taiwan. pp. 355-362. *In: C. I Peng and C. H. Chou (eds.). Biodiversity and terrestrial ecosystems. Institute of Botany, Academia Sinica Monograph Series No. 14. Taipei.*
- Kostelnik, K. M., J. A. Lynch, J. W. Grimm and E. S. Corbett. 1989. Sample size requirements for estimation of throughfall chemistry beneath a mixed hardwood forest. *Journal of Environment Quality* 18: 274-280.
- Lian, Y. and Q. Zhang. 1998. Conversion of natural broad-leaved evergreen forest into pure and mixed plantation forests in a subtropical area: Effects on nutrient cycling. *Canadian Journal of Forestry Research* 28: 1518-1529.
- Liechty, H. O., G. D. Mroz and D. D. Reed. 1993. Cation and anion fluxes in northern hardwood throughfall along an acidic deposition gradient. *Canadian Journal of Forestry Research* 23: 457-467.
- Lindberg, S. E. 1992. Sulfur chemistry, deposition and cycling in forests. pp. 74-90. *In: D. W. Johnson and S. E. Lindberg (eds.).*

- Atmospheric deposition and forest nutrient cycling. Springer-Verlag, New York.
- Liu, C. P., H. W. Yeh and B. H. Sheu. 2006. N isotopes and N cycle in a 35-year-old plantation of the Guandaushi subtropical forest ecosystem, central Taiwan. *Forest Ecology and Management* 235: 84-87.
- Lovett, G. M. 1992. Nitrogen chemistry, deposition, and cycling in forests. pp. 152-166. *In*: D. W. Johnson and S. E. Lindberg (eds.). *Atmospheric deposition and forest nutrient cycling*. Springer-Verlag, New York.
- Lucier, A. A. and S. G. Haines. 1990. *Mechanisms of Forest Response to Acidic Composition*. Springer-Verlag, New York.
- Matzner, E. 1983. Balances of element fluxes within different ecosystems impacted by acid rain. pp. 128-147. *In*: B. Ulrich and J. Panksath (eds.). *Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystem*. D. Reidel Publishing Company, USA.
- McDowell, W. H. 1998. Internal nutrient fluxes in a Puerto Rican rain forest. *Journal of Tropical Ecology* 14: 521-536.
- Miller, H. G. 1983. Studies of proton flux in forests and hearths in Scotland. pp. 172-183. *In*: B. Ulrich and J. Panksath (eds.). *Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystem*. D. Reidel Publishing Company, USA.
- Mitchell, M. J., D. W. Johnson and S. E. Lindberg. 1992. Sulfur chemistry, deposition, and cycling in forests. pp. 97-118. *In*: D. W. Johnson and S. E. Lindberg (eds.). *Atmospheric deposition and forest nutrient cycling*. Springer-Verlag, New York.
- Moreno, G., J. F. Gallardo and F. Bussotti. 2001. Canopy modification of atmospheric deposition in oligotrophic *Quercus pyrenaica* forests of an unpolluted region (central-western Spain). *Forest Ecology and Management* 149: 47-60.
- Neary, A. J. and W. I. Gizyn. 1994. Throughfall and stemflow chemistry under deciduous and coniferous forest canopies in south-central Ontario. *Canadian Journal of Forestry Research* 24: 1089-1100.
- Opakunle, J. S. 1989. Throughfall, stemflow, and rainfall interception in a cacao plantation in south western Nigeria. *Tropical Ecology* 30 (2): 244-252.
- Ovalle, A. R. C. and E. V. S. Filho. 1991. Acid precipitation research in Brazil: A short review. pp. 51-59. *In*: W. S. L. James (ed.). *Acid Deposition Origins, Impacts and Abatement Strategies*. Springer-Verlag, Berlin.
- Parker, G. G. 1990. Evaluation of dry deposition, pollutant damage, and forest health with throughfall studies. pp. 10-61. *In*: A. A. Lucier and S. G. Haines (eds.). *Mechanisms of Forest Response to Acidic Deposition*. Springer-Verlag, New York.
- Pedersen, L. B., K. Hansen, J. Billehaansen, M. Løber and M. F. Hovmand. 1995. Throughfall and canopy buffering in three sitka spruce stands in Denmark. *Water, Air and Soil Pollution* 85: 1593-1598.
- Prebble, R. E. and G. B. Strike. 1980. Throughfall and stemflow on silver leaf iron back (*Eucalyptus melanophloia*) trees. *Australian Journal of Ecology* 5: 419-427.
- Schaefer, D. A. 1992. Processing of acidic deposition. pp. 445-447. *In*: D. W. Johnson

and S. E. Lindberg (eds.). Atmospheric Deposition and Forest Nutrient Cycling. Springer-Verlag, New York.

Su, H. J. 1984. Studies on climate and vegetation type of the natural forest in Taiwan (II) Altitudinal vegetation zones in relation to temperature gradient. Quarterly Journal of Chinese Forestry 17(4): 57-73.

Ulrich, B. 1983. A concept of forest ecosystem stability and of acid deposition as driving force for destabilization. pp. 1-33. *In*: B. Ulrich and J. Pankrath (eds.). Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystem. D. Reidel Publishing Company, USA.

Walter, H. 1985. Vegetation of the earth. 3 ed. Spring-Verlag, New York.

Wang, L. J., H. B. King, Y. J. Hsia, R. B. Harrison, T. C. Lin, J. L. Hwang and C. B. Liou. 1997. Changes in chemistry in hydrological processes of the Fushan experimental forest. Quarterly Journal of Chinese Forest 30(2): 203-215.

