

國立東華大學自然資源管理研究所

碩士論文

指導教授：張世杰博士

棲蘭山樣區大氣沉降之 5 年研究

*The study of 5-year atmospheric deposition at the Chi-Lan Mountain site*



研究生：簡意婷

中華民國 九十七 年 七 月

## 謝誌

盼了許久，終於盼到這一天。尚未撰寫論文的時候總想像著寫謝誌時要寫些什麼，但此時此刻浮現在腦海的卻是成長的記憶。

猶記得幼稚園即將畢業時，媽媽告訴我畢業後我接著要上小學，充滿好奇心的我接續問著「小學上完，然後呢...然後呢？」的神情。...那是我第一次聽到”碩士”這個名詞。當時的我覺得碩士很厲害！直到國小高年級的時候，我的志願是當個科學家。後來，大一的某一天，我在書桌前思索著未來。突然，腦海中閃過”繼續唸研究所”的念頭。如今看到自己竟然取得小時以為很厲害的碩士學位，亦在學位中學習做科學家，心中不免訝異自己居然完成了夢想！

然而，完成這個學位並非是我一己之力，而是受到許多人的幫忙、支持與鼓勵。我最為感謝的是我的爸爸媽媽。感謝爸爸媽媽從小到大對我的栽培，讓我在衣食無缺的環境下成長，和毋須擔心學費的狀況下安然讀書。研究期間則格外感謝指導教授張世杰老師耐心的教導與不時信心的加給，引導我逐步完成人生第一本著作。同時感謝夏禹九老師、林登秋老師，和許桂榮老師口試時對我論文的指正，我的論文才能更加完善。此外，亦感謝實驗室所有學長姐、同學和學弟妹的苦力。因為有你們，我才能擁有棲蘭山樣區長期的水樣資料做為我論文的題材。當然這一路也多謝酒肉朋友昭豪的陪伴；妍綾、銘哲、佳佳、嘉新、銑智，和育民的鼓勵；靜莉和家欣美味的佳餚與點心；開心果天翊和顥達的笑話；志偉、子弘，和欣民在野外工作的幫忙；小花學姊統計軟體上的協助；4人幫姊妹淘懿真、香君、貞好和科論無腦的八卦話題；夜深人靜時，荷包 msn 的打氣與胡扯；回家時，雅文親切的問候、鄰居蘇伯父和伯母將我視如己出的照顧；房東阿姨和叔叔不時的關心；小狗布丁和麻吉、小貓 Nono 和 Sasa 的陪伴；還有我的 2 個寶貝弟弟，在我研究期間，幫我分擔家務的辛勞。

這些日子非常感謝大家的陪伴，未來我還是需要大家支持與鼓勵的！看著小時的梦想已達成，人生也在此告一段落。未來我會再因新的夢想締造新的目標。雖然通往目標的路總是佈滿荊棘，但我想在經過這段期間的磨練之後，我已更加堅強。如果有機會，也讓我陪伴大家。讓我們在互相砥礪下，共同成長吧！

## 摘要

本研究選擇位於霧林帶的棲蘭山樣區，設置雨水、霧水、幹流水和穿落水收集器收集水樣，並做化學分析。以長期(5年)的資料企圖了解棲蘭山樣區上述各水樣的化學組成和冠層的水分與養分流量，探討：(1)樣區大氣沉降養分的可能來源；(2)冠層對酸性物質的中和能力；(3)雲霧對樣區水分及養分的貢獻；和(4)樣區是否因過量的酸性物質而遭受森林衰退的威脅。研究結果顯示：(1)本樣區雨量集中在夏、秋季，研究期間颱風貢獻約37%的總雨量；霧水水量在冬、春季較高；而幹流水和穿落水量的季節變化趨勢與雨量相近( $p < 0.05$ )。2003~2006年的年平均雨量、霧水、幹流水和穿落水量分別為4005、241、129和3467 mm。由離子相關矩陣發現：雨水  $\text{Na}^+$  與  $\text{Cl}^-$  的濃度相關性高 ( $r > 0.70$ )，表示雨水離子來自海鹽的比例高，推測是受本樣區鄰近海洋的影響。而由  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_4^+$  濃度彼此高的相關性發現：雨水和霧水受長程傳輸和當地污染的程度均高，雨水受長程傳輸的影響較明顯，霧水則是受當地污染的影響較明顯。(2)雨水進入冠層後，穿落水的 pH 較雨水高，而幹流水則較雨水低。且幹流水和穿落水的  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  濃度均降低，陽離子濃度均升高。推測  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  濃度的降低為扁柏葉和附生植物吸收所致，而陽離子濃度升高則為雨水與葉內陽離子進行離子交換的結果。(3)雖然霧水僅提供冠層6%的水分，卻提供27%森林的養分，可見雲霧對本樣區水分與養分收支的重要性不容忽視。雲霧森林若忽略雲霧攔截，除低估森林總水分和養分的輸入外，亦可能低估截留水量，和誤判冠層的交互作用。(4)樣區的  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 和 N 年沉降量，分別為14.1和  $15.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，且可能已面臨森林衰退的威脅，和森林 N 淋洗的現象發生。最後，利用本研究的雨水、霧水、幹流水和穿落水量結果，以水文平衡的概念，估算本樣區年土壤滲流量為3341 mm，是雨量的83%。

**關鍵字：**雲霧森林、大氣沉降、冠層交互作用、水文平衡、養分、流量、雨水、霧水、幹流水、穿落水、截留、酸沉降、臨界負荷、森林衰退

## Abstract

A study of 5-year atmospheric deposition in a *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana* forest ecosystem was performed at the Chi-Lan Mountain site in northeastern Taiwan. The site is a typical cloud forest subjected to the influence of fog. A monitoring program of biweekly measurements of bulk precipitation, fogwater, stemflow, and throughfall was started in 2002 at the site. Objectives of this study were to analyze: (1) the potential nutrient sources of the atmospheric deposition; (2) the canopy interactions; (3) the contribution of fog in water and nutrient input, and (4) the potential threat of forest decline of the site by excessive amount of acidic depositions. The results indicated that: (1) the rainfall was peaked in summer and autumn. Typhoons contributed about 37% of the total water flux of rainfall. Fogwater input was higher in winter and spring. The seasonal pattern of stemflow and throughfall water fluxes was similar to that of rainfall. From 2003 to 2006, the average annual rainfall, fogwater, stemflow and throughfall were 4005, 241, 129, and 3467 mm, respectively.  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  was highly correlated in rainfall, indicating an effect of sea salt. High correlations among  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , and  $\text{NH}_4^+$  indicated that rainfall and fogwater were influenced both by long-distance transport and by the local pollutants. Long-distance transport had higher influence on the chemical composition of rainfall, while fogwater was subjected more to the influence of local pollutants. (2) The pH values of throughfall were higher than those of rainfall, but stemflow was less acidic than rainfall. Stemflow and throughfall had lower  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{NH}_4^+$  concentrations but higher cation concentrations than rainfall.  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{NH}_4^+$  might be absorbed in the canopy by leaves and epiphytes. The increase in cation concentrations might result from ion exchanges in the canopy. (3) Fog contributed 6% of total atmospheric water input, but provided as high as 27% of total nutrient input. It is thus important to take fogwater into account in the calculation of water and nutrient budgets at the site. (4) Annual  $\text{SO}_4^{2-}$ -S and N deposition were 14.1 and 15.0  $\text{kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , respectively, which might lead to a consequence of forest decline, and N leaching. However, a further estimation of the critical loads of S and N of the site is needed. Finally, the water fluxes of this study and the transpiration rate of the site were used for the estimation of the seepage, which amounted to 3341 mm, about 83% of rainfall.

**Keywords:** cloud forest; atmospheric deposition; canopy interaction; water balance; nutrient; flux; rainfall; fogwater; stemflow; throughfall; interception; acid deposition; critical load; forest decline

# 目錄

1. 前言.....	1
1.1 大氣沉降概述.....	1
1.1.1 大氣沉降對森林水分與養分收支的重要性.....	3
1.1.2 酸沉降對森林生態系的影響.....	4
1.2 國內外大氣沉降的相關研究.....	5
2. 研究目的.....	7
3. 材料與方法.....	9
3.1 樣區概述.....	9
3.2 收集器設置.....	12
3.2.1 雨水收集器.....	13
3.2.2 雲霧收集器.....	14
3.2.3 幹流水收集器.....	16
3.2.4 穿落水收集器.....	18
3.3 化學分析.....	19
3.4 資料運算.....	21
3.4.1 水量.....	21
3.4.2 養分流量.....	23
3.4.3 資料補遺.....	24
3.5 統計分析.....	24
4. 結果.....	29
4.1 化學組成.....	29
4.2 水量.....	33
4.2.1 雨水、霧水、幹流水和穿落水量的季節性變化.....	33
4.2.2 水文平衡.....	37
4.3 養分流量.....	38
4.3.1 雨水、霧水、幹流水和穿落水的養分流量.....	38
4.3.2 冠層交互作用.....	39

5. 討論.....	43
5.1 化學組成.....	43
5.1.1 雨水和霧水化學組成的差異.....	43
5.1.2 雨水進入冠層後，化學組成的變化.....	44
5.2 水文平衡.....	45
5.2.1 不同樣區水文平衡之比較.....	45
5.2.2 雲霧森林若忽略雲霧攔截對截留水量的影響.....	47
5.3 養分流量.....	48
5.3.1 雲霧對森林養分收支的貢獻.....	48
5.3.2 酸沉降對森林生態系養分循環的影響.....	51
5.4 土壤滲流水量的估算.....	53
6. 結論.....	55
7. 未來研究建議.....	57
8. 引用文獻.....	59
9. 附錄.....	65

## 圖目錄

圖 1 大氣沉降對森林養分循環影響的示意圖。.....	2
圖 2 冠層水文平衡示意圖。.....	2
圖 3 棲蘭山樣區位置與等高線圖。.....	10
圖 4 2002 年 6 月~2007 年 5 月棲蘭山樣區的月雨量與月均溫。.....	11
圖 5 雨水、穿落水、幹流水、霧水與氣象資料的收集期間。.....	12
圖 6 雨水收集器與傾斗式雨量計。.....	13
圖 7 雲霧收集器。.....	14
圖 8 氣象塔。.....	15
圖 9 螺旋式幹流水收集器。.....	16
圖 10 棲蘭山樣區幹流水與穿落水收集器的相對位置圖。.....	17
圖 11 穿落水收集器。.....	18
圖 12 水樣處理流程圖。.....	20
圖 13 2002 年 5 月~2007 年 5 月雨水收集器收集的雨量與傾斗式雨量計測量的雨量的關係。.....	21
圖 14 棲蘭山樣區能見度與雲霧沈降速率的關係。.....	22
圖 15 2002 年 8 月~2007 年 4 月未滿溢雨量與幹流水量的關係。.....	25
圖 16 2002 年 6 月~2007 年 5 月未滿溢雨量與穿落水量的關係。.....	25
圖 17 2002 年 5 月~2007 年 5 月雨水、霧水、幹流水與穿落水的離子濃度。.....	30
圖 18 2002 年 5 月~2007 年 5 月雨水、霧水、幹流水與穿落水的總離子濃度。.....	31
圖 19 2002 年 5 月~2007 年 5 月雨水、霧水、幹流水與穿落水的化學組成百分比。... ..	31
圖 20 2002 年 5 月~2007 年 5 月雨水、幹流水、穿落水、截留和霧水水量的時間變化。.....	34
圖 21 2002 年 5 月~2007 年 5 月總水分沉降量與颱風貢獻的雨量。.....	35
圖 22 2002 年 8 月~2007 年 5 月月總降水量與雲霧降水量比例。.....	37
圖 23 2003~2006 年雨水、霧水、幹流水與穿落水的年平均養分流量。.....	38
圖 24 2003~2006 年樣區養分的年平均輸入量。.....	39
圖 25 棲蘭山樣區冠層養分的交互作用。.....	40

圖 26 忽略雲霧攔截，棲蘭山樣區冠層養分的交互作用。 .....	49
圖 27 棲蘭山樣區水文收支。 .....	53

## 表目錄

表 1 棲蘭山樣區土壤的基本特性。.....	11
表 2 各幹流水收集器上推 1 公頃樣區的幹流水量為平均幹流水量的倍數。.....	26
表 3 各穿落水收集器上推 1 公頃樣區的穿落水量為平均穿流水量的倍數。.....	26
表 4 各幹流水收集器上推 1 公頃樣區的幹流水量與平均幹流水量的關係。.....	27
表 5 各穿落水收集器上推 1 公頃樣區的穿落水量為平均穿流水量的關係。.....	27
表 6 2002 年 5 月~2007 年 5 月雨水、霧水、幹流水與穿落水的導電度和 pH。.....	29
表 7 雨水各離子濃度間的相關分析。.....	32
表 8 霧水各離子濃度間的相關分析。.....	32
表 9 2002 年 5 月~2007 年 5 月，為棲蘭山樣區帶來降水的颱風。.....	36
表 10 不同雲霧森林的截留水量。.....	47
表 11 台灣森林 $\text{SO}_4^{2-}$ -S 年沉降量與臨界負荷量。.....	51

## 附錄目錄

附錄 1 2002 年 5 月~2007 年 5 月雨水、霧水、幹流水與穿落水的導電度、pH 和養分濃度。 .....	65
附錄 2 2003~2006 年雨水、霧水、幹流水與穿落水的水量與養分流量。 .....	66
附錄 3 2002 年 5 月~2007 年 5 月雨水離子濃度的時間變化。 .....	67
附錄 4 2002 年 5 月~2007 年 5 月霧水離子濃度的時間變化。 .....	69
附錄 5 2002 年 5 月~2007 年 5 月幹流水離子濃度的時間變化。 .....	71
附錄 6 2002 年 5 月~2007 年 5 月穿落水離子濃度的時間變化。 .....	73

## 1. 前言

近數十年，歐洲和北美不尋常的森林衰退(forest decline)引起相當多大眾和科學家的關注。對於森林衰退的因果關係，科學家提出許多假設(Pitelka and Raynal 1989)。然而，森林衰退並非一新現象。在過去 2 世紀，歐洲和北美的森林亦曾經歷嚴重的森林衰退。但過去的森林衰退歸因於乾旱和疾病等自然壓力。相較於過去，人為造成的空氣污染被認為是造成現今歐洲和北美森林衰退的主要原因(Smith and Smith 2000)。為印證空氣污染與森林衰退的因果關係，20 世紀中期起，便興起許多大氣沉降對森林影響的研究(Gorham 1998)。以下先概述大氣沉降及其在水文與生物地球化學循環(biogeochemical cycling)的重要性，並介紹現今大氣沉降的研究。隨後再以過去棲蘭山區的研究引入本研究的研究目的。

### 1.1 大氣沉降概述

大氣沉降是水分與養分輸入到森林生態系的重要途徑，能影響森林的生物地球化學循環(圖 1)。大氣沉降依沉降型態分為濕沉降(wet deposition)和乾沉降(dry deposition)。濕沉降包括雨、霧和雪；而乾沉降為氣體和懸浮微粒的沉降(Stumm et al. 1987, Smith and Smith 2000)。而依沈降方式，大氣沉降則分為重力沈降(precipitation deposition, PD)與攔截沈降(interception deposition, ID) (Matzner 1989)。雨、雪等受重力作用而沈降者，即為重力沈降；大氣的物質由植被攔截而沈降者，稱為攔截沈降，包括雲霧、氣體及懸浮微粒的沈降。水分和氣體、懸浮微粒透過重力或攔截沈降進入森林後，部分水穿過冠層抵達森林地表，或由葉子、枝條攔截匯成水滴落至地面，形成穿落水(Throughfall, TF)；部分水則附著於葉子、枝條上，隨後順著樹幹流向森林地表，形成幹流水(Stemflow, SF)；而另一部分則由葉片、枝條攔截者，稱截留(Interception, I)，截留再蒸發返回大氣(圖 2)。因此，冠層的水文平衡能以公式 1 表示：

$$PD + ID = SF + TF + I \quad \text{公式 1}$$

其中，重力沉降、幹流水，和穿落水可以儀器或收集器直接測量，而攔截沉降較難量化，需以精密的收集器或數學模式求得。截留則常是以水文平衡公式之餘項求得。

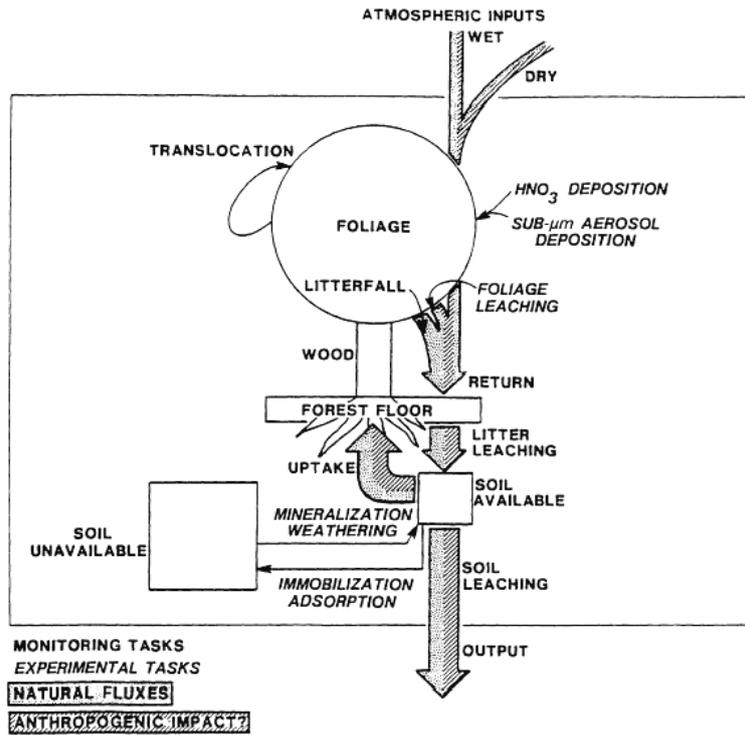
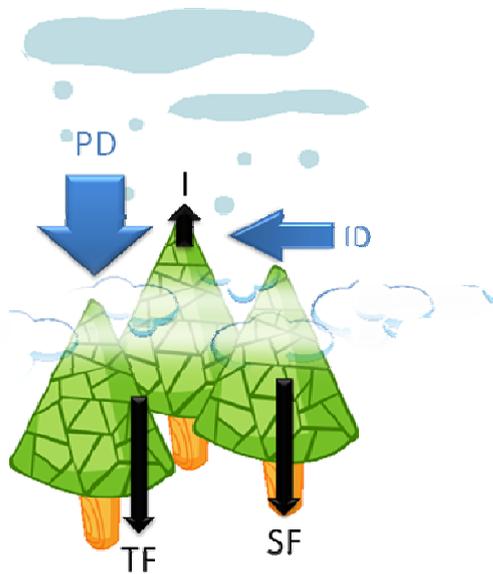


圖 1 大氣沉降對森林養分循環影響的示意圖(Johnson and Lindberg 1992)。



- TD : total deposition (總沈降)
- PD : precipitation deposition (重力沈降)
- ID : interception deposition (攔截沈降)
- TF : throughfall (穿落水)
- SF : stemflow (幹流水)
- I : interception (截留)

圖 2 冠層水文平衡示意圖。↑表輸入冠層的水分；↓表輸出冠層的水分。冠層的水文收支為：總沈降(TD) = 重力沈降(PD) + 攔截沈降(ID) = 穿落水(TF) + 幹流水(SF) + 截留(I)。

### 1.1.1 大氣沉降對森林水分與養分收支的重要性

大氣沉降是森林的水分及養分來源。對雲霧森林而言，大氣沉降雲霧攔截所攜入的水分及養分極其重要。許多學者在研究森林水分與養分收支時，對雲霧森林的研究尤其感興趣。因除雨水與雪水分外，雲霧是另一重要的水分及養分來源，可以調節森林水分需求(Dawson 1998, Chang et al. 2002)。Dawson (1998)於加州紅杉林研究，發現雖然森林與非森林地區雨量極為相似，但雲霧的輸入卻有相當大的差異。森林的雲霧輸入是非森林的 2 倍。另外在雨水豐沛的年分，雲霧輸入的水分佔沈降量的 15%；但在較乾旱的年分中，雲霧水的輸入比例高達 37%。Cavelier et al.(1997)於巴拿馬熱帶山區雲霧森林，進行降水分配的研究發現：該森林 140 次降雨事件中，有 6 次森林內部沈降量(幹流水+穿落水)>重力沈降量的記錄，推測是雲霧沈降供給森林內部額外的水分。以及 Chang et al. (2002)於鴛鴦湖自然保留區研究附生苔癬對雲霧的攔截沈降，發現由附生苔癬所攔截的霧水佔總大氣總沈降量的 36%。均顯示雲霧攔截可調節森林水分，是森林重要的水分來源。此外，由 Chang et al. (2002)於鴛鴦湖自然保留區研究附生苔癬對雲霧的攔截沈降的研究結果顯示：森林一半以上的養分由雲霧提供，說明雲霧沉降在森林生態系養分循環的重要性。因此，若忽略雲霧輸入，將嚴重低估森林總水分與養分的輸入(Lovett et al. 1982)。

而隨樹幹匯集而下的幹流水為森林地表水與養分局部的點輸入，能顯著影響逕流的生成、土壤沖蝕、地下水補充能力、土壤濕度、土壤水化學，和林下層植被和附生植物的分佈，對森林生態系水文和生物地球化學循環為其重要(Levia and Frost 2003)。另外，藉由比較雨水和穿落水的化學組成的差異，則有助於了解森林對酸性物質的中和能力。

### 1.1.2 酸沉降對森林生態系的影響

大氣中的致酸物質(如  $\text{SO}_x$  和  $\text{NO}_x$ ) 沉降到生態系可能對生態系造成影響。這些酸性物質的沉降，通稱為酸沉降。酸沉降對森林生態系的影響，包括損害植物、改變植物的養分，和土壤的化學。酸沉降直接損害樹的葉子，使樹易受霜、害蟲、真菌、乾旱與疾病的損害(Taylor et al. 1994, Krupa 2003)。同時，酸沈降亦造成森林葉片  $\text{Ca}^{2+}$  (Igawa et al. 2002)、 $\text{Mg}^{2+}$  流失。而  $\text{Ca}^{2+}$  則是營養平衡機制，大量流失，植物將生長遲緩(Igawa et al. 2002)；至於  $\text{Mg}^{2+}$  是葉綠體重要成分(Smith and Smith 2000)，如不足將影響光合作用。此外，酸沉降對陽離子含量低和緩衝能力低的土壤有重大的影響。酸沉降以  $\text{H}^+$  置換土壤的陽離子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ )，造成陽離子的淋洗，進一步增加土壤的酸度。如果土壤離子的淋洗速率大於母岩的風化速率，酸沉降即擾亂了森林的養分平衡(Smith and Smith 2000)。由土壤養分的損失，影響植物的根的發展，和水與養分的吸收，進而降低森林的淨初級生產力(Schulze 1989, Taylor et al. 1994)。此外，酸沉降對土壤最嚴重的影響為產生有毒的元素，尤其是  $\text{Al}^{3+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$ 。它們是由  $\text{H}^+$  對土壤顆粒置換而來。 $\text{Al}^{3+}$  影響細根的結構與功能，阻礙自土壤吸收  $\text{Ca}^{2+}$  的能力，亦抑制樹形成層的生長，減少邊材的形成。當邊材體積小於 25% 的總樹幹體積，針葉樹即死亡(Smith and Smith 2000)。故當酸沉降狀況嚴重時，森林因而可能面臨森林衰退的威脅。因此，許多學者便著手探討酸沉降究竟沉降到什麼程度便會危及森林生態系，亦即森林生態系對酸沉降的容忍臨界負荷量(critical load)為何。所謂臨界負荷量是指某依汙染物對特定生態系無不利影響的最大沉降量。換言之，一但汙染物的沉降量超過生態系的臨界負荷量，將對生態系造成有害的影響。國立中央大學大氣物理所(2004)曾經對台灣 6 個森林生態系進行  $\text{SO}_4^{2-}$  臨界負荷量的估算，並與實際沉降量比較。發現所有森林生態系的  $\text{SO}_4^{2-}$  降量均大於臨界負荷量。因此，若酸沉降確實會對森林生態系造成影響，此 6 森林可能已受酸性沉降的威脅。

## 1.2 國內外大氣沉降的相關研究

目前世界上主要大氣沉降研究的議題有：(1)酸沉降的監測或模擬(薛美莉 2000, 陳雄文等 2002, 彭啟明等 2003, 林文龍和林能暉 2004, 國立中央大學大氣物理所 2004, 黃威巽 2006, Hsiao et al. 2007)；(2)降水分配(Weaver 1972, Cavelier et al. 1997, Levia and Frost 2003, Xu et al. 2005, Llorens and Domingo 2007, McJannet et al. 2007)；(3)冠層交互作用(Cronan and Reiners 1983, Lindberg et al. 1986, Bredemeier 1988, Amezaga et al. 1997, Chiwa et al. 2004)；(4)大氣污染物長程傳輸的氣流軌跡追蹤(國立中央大學大氣物理所 2004, Beiderwieden et al. 2007)。

而位於熱帶與亞熱帶的台灣，森林面積約佔全島總面積的 60%<sup>1</sup>。台灣中海拔山區由於受地理位置、地形地勢、季風等影響，森林長期受雲霧籠罩。相較於國外，國內鮮少對雲霧森林水分及養分收支進行研究。台灣棲蘭山樣區(Chi-Lan Mountain site, CLM site)是國內少數進行雲霧森林水分及養分收支的研究樣地，目前已完成許多研究。在眾多研究中，與大氣沉降相關的研究有：穿落水及幹流水量的收集與測量(陳子弘 2006, 林志偉 2007)、雲霧降水量的估算與化學分析(吳敏如 2003, 葉青峯 2004, Beiderwieden et al. 2007, 黃昭豪 2007)，以及雨水、霧水、穿落水，和幹流水化學組成、水量與養分流量的初步估算(陳耀德 2003)。

---

<sup>1</sup> 林務局(2005)，統計與出版品，林務局年報，台灣森林資源現況。<http://www.forest.gov.tw/autumn.htm>。



## 2. 研究目的

雖然在台灣棲蘭山樣區已有許多大氣沉降的研究，但研究的期間並不長，且大多專注於單一水樣的研究。相較於單一水樣的研究，陳耀德(2003)曾初步估算樣區 1 年分水雨水、霧水、穿落水，和幹流水量和養分流量。然而，陳耀德(2003)由於部分水樣未收集滿 1 年，因此未對樣區的水分和養分的年沉降量進行估算。同時亦未探討雲霧沉降對水分及養分收支的重要性。而棲蘭山樣區自 2002 年 5 月設立至今，已累積超過 5 年的雨水、霧水、穿落水、幹流水水量與化學組成資料。因此，本研究選擇此長期的水樣資料(2002 年 5 月至 2007 年 5 月)，企圖了解棲蘭山樣區：各水樣的化學組成和冠層的水分與養分流量。由各水樣的化學組成探討：(1)樣區大氣沉降可能的養分來源，和(2)冠層對酸性物質的中和能力。而由冠層的水分與養分流量釐清：(1)雲霧對樣區水分及養分的貢獻，和(2)樣區是否因過量的酸性物質而遭受森林衰退的威脅。



### 3. 材料與方法

本研究於棲蘭山樣區進行。故本節除概述棲蘭山樣區的地理位置、氣象、植被及土壤狀況外，亦對本研究所採用的水樣收集器與其設置方式進行陳述。對於水樣化學分析的流程、樣本水量上推樣區水量的方式、養分流量的計算方式，以及闕漏資料的補遺方法，亦在此節一一說明。

#### 3.1 樣區概述

棲蘭山研究樣區位於台灣東北部(24°35'N, 121°25'E) (Chang et al. 2006)，為海拔1400~1700 m (圖 3)，面積約為 310 公頃的暖溫帶針闊葉混合林。樣區以前是台灣扁柏 (*Chamaecyparis obtusa* var. *formosana*)老齡林，1960 年代左右曾進行天然下種更新林造林作業<sup>2</sup>。相較於老齡林，本樣區的冠層結構較為均質，且坡度較為平緩(14°)。由於更新林相等的林齡和相對均質的地形特性，在台灣相同海拔高度相當罕見。因此，2002 年劃設其中 1 公頃為長期研究樣區，以研究生物地球化學循環(biogeochemical cycle)。此外，由於樣區幾乎每天均受雲霧籠罩，故特別強調雲霧沉降與其對台灣扁柏的影響 (Chang et al. 2006)。樣區的北邊有座 23 m 的氣象塔，其上設有能見度儀(MIRA visibility sensor 3544, Aanderaa Instruments, Norway)等儀器(Chang et al. 2006)，用以監測樣區長期的氣象資料。

本樣區與鴛鴦湖自然保留區相距約 2.5 km。Chang et al. (2002)於鴛鴦湖自然保留區的研究指出：鴛鴦湖自然保留區的夏季降雨來自地形雨與颱風，冬季則來自東北季風，且無明顯乾濕季。隨後，陳耀德(2003)於本樣區進行 1 年分初步大氣沉降的研究指出：本樣區夏季降雨受颱風影響極大。顯示本樣區與鄰近的鴛鴦湖自然保留區有相似的氣候。由樣區 2002 年 8 月~2007 年 5 月的氣象資料顯示，樣區年均溫為 13.5°C，月均溫最低 4.1°C，最高 20.5°C。2002 年 6 月~2007 年 5 月，年平均雨量為 3763 mm，月雨量由 35~1440 mm (圖 4)。2003 年 3 月~2004 年 2 月，雲霧籠罩時數為 3331 hr，佔全年總時數的 38% (Chang et al. 2006)。

---

<sup>2</sup> 天然下種更新：對欲行天然下種更新的森林進行砍伐，同時遺留數棵母株，使森林能藉由母株掉落的種子進行更新(Chang et al. 2006)。

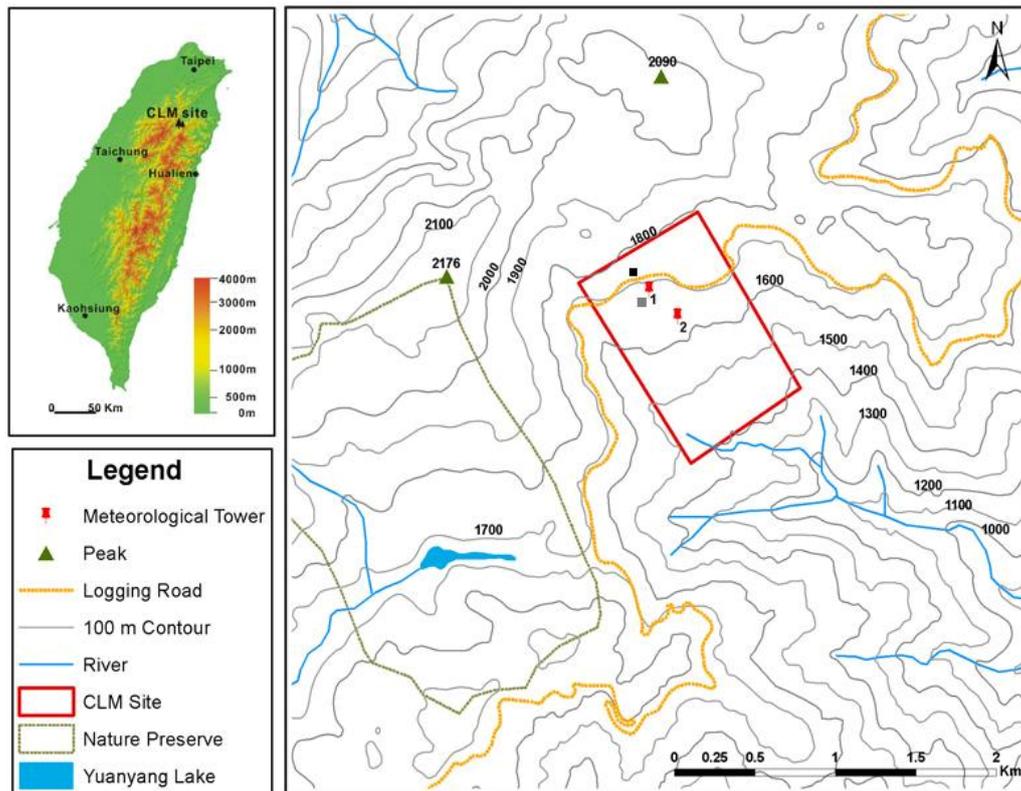


圖 3 棲蘭山樣區(Chi-Lan Mountain site, CLM site)位置與等高線圖。

樣區植被組成的資料顯示：主要優勢樹種為台灣扁柏，佔總胸高斷面積的 82% (陳耀德 2003)，森林密度為  $1820 \text{ stems ha}^{-1}$ 。台灣扁柏的平均胸高徑為 16.7 cm (陳耀德 2003)，樹高為 10.3 m，葉面積指數約為  $12.6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  (葉片正反面) (吳敏如 2003)。扁柏的樹幹與枝條有豐富的附生苔蘚，其於樹幹與枝條的覆蓋面積為樣區面積的 13.7%，且大部分集中於扁柏主幹，佔總苔蘚生物量的 82% (鄧振華 2006)。本樣區的土壤為 Lithic Leptosol (WRB 1998)，土壤層薄，黏土含量高 (Chang et al. 2007)。植物的細根主要分布於有機層和礦質土上層 (10 cm) (朱慧君 2005)。此外，樣區的土壤非常地酸 ( $\text{pH} < 4$ )，陽離子養分 ( $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ) 亦非常貧瘠 (Chang et al. 2007) (表 1)。

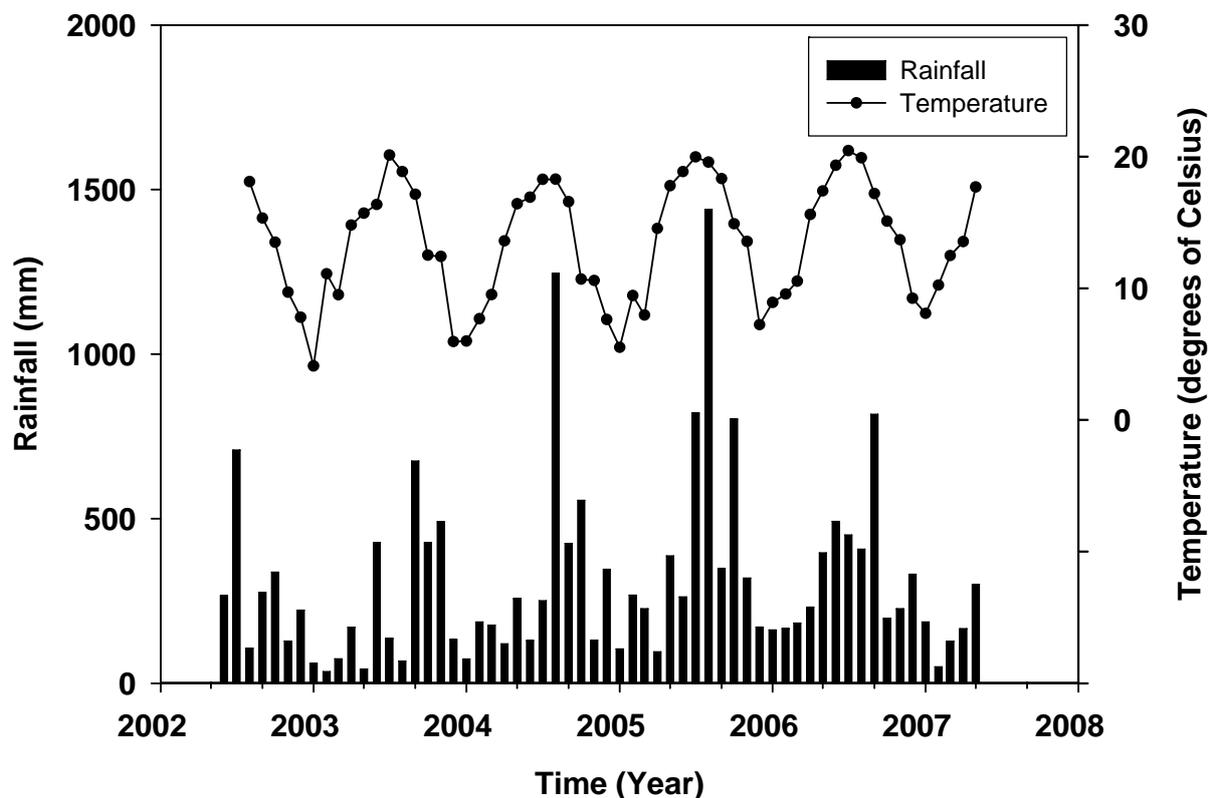


圖 4 2002 年 6 月~2007 年 5 月棲蘭山樣區的月雨量(mm)與月均溫(°C)。月雨量最低為 35 mm (2003 年 2 月)，最高為 1440 mm (2005 年 8 月)，月均溫最低為 4.1°C (2003 年 1 月)，最高 20.5°C (2006 年 7 月)。(註：2005 年 2 月氣溫資料遺失，以 2003、2004、2006 和 2007 年 2 月的平均值替代。)

表 1 棲蘭山樣區土壤的基本特性(Chang et al. 2007)。

Deap (cm)	Soil texture	pH		Exchangeable cations (mmol kg <sup>-1</sup> )						
		H <sub>2</sub> O	CaCl <sub>2</sub>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>
10~0		3.54	2.83	n.d.	19.9	35.6	12.2	2.8	4.4	11.5
0~5	Loamy clay	3.51	2.78	n.d.	2.7	5.6	1.8	0.3	2.7	6.8
5~25	Sandy-loamy clay	3.85	3.03	n.d.	n.d.	0.6	0.4	n.d.	1.0	9.9
25~40	Sandy-loamy clay	4.01	3.17	n.d.	n.d.	0.2	0.03	n.d.	1.1	12.4

Note: Exchangeable cations determined by ICP-AES in 1 N NH<sub>4</sub>Cl extracts. n.d. means not detectable.

### 3.2 收集器設置

為了解棲蘭山樣區的水分與養分收支，2002 年 5 月樣區劃設完成後，便陸續設置雨水(n=3)、霧水(n=1)、穿落水(n=12)，與幹流水(n=5)收集器。其中，雨水、幹流水，和穿落水收集器為陳耀德(2003)所架設。而雲霧收集器共有 2 型，2002 年 9 月~2005 年 12 月上半月(SN001~087)<sup>3</sup>使用陳耀德(2003)設計的不區分雲霧顆粒的收集器、2005 年 12 月下半月~2007 年 5 月(SN088~124)則改用黃昭豪(2007)設計的可區分雲霧顆粒的收集器。每 2 週記錄雨水、穿落水、幹流水與霧水水量，同時採集樣本，攜回工作站與實驗室進行化學分析。2002 年 5 月至 2007 年 5 月，5 年研究期間，共完成 124 次取樣。由於各收集器設置時間的不同，因此水樣資料分別始自 2002 年不同的月份。雨水、穿落水、幹流水與霧水的水樣資料分別記錄自 5 月、6 月、8 月與 9 月(圖 5)。Levia and Frost (2003)回顧不同氣候區的幹流水研究指出：由於幹流水量相較於穿落水量是很小的，部分研究忽略幹流水在水文和生物地球化學的重要性。類似的結果也在陳耀德(2003)對本樣區大氣沉降的初步研究發現。陳耀德(2003)的研究結果指出：本樣區的幹流水與穿落水量分別為雨量的 3.2%和 84.2%。說明本樣區幹流水量相對於穿落水量確實很小。故本樣區的幹流水於 2007 年 4 月停止採集，而其餘水樣則持續採集至 2007 年 5 月(圖 5)。各收集器的設置詳見以下各小節。

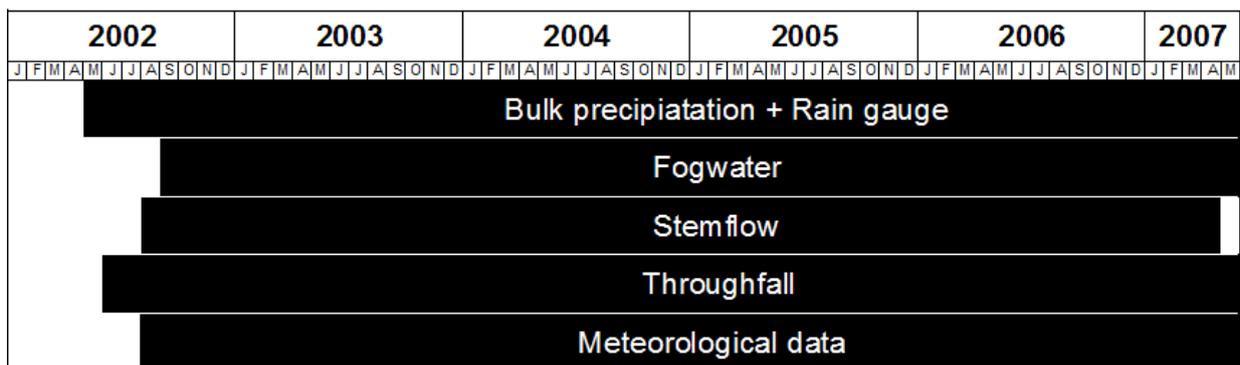


圖 5 雨水、穿落水、幹流水、霧水與氣象資料的收集期間。

<sup>3</sup> SNXXX 表示第 XXX 次取樣。

### 3.2.1 雨水收集器

雨水以 3 個 20 公升聚乙烯(polyethylene, PE)材質的雨量桶收集，每個雨量桶上置一直徑 20 cm 的漏斗，漏斗內置網目 2 mm × 2 mm 的紗網，以防止雜物進入。並校正水平，以固定雨量收集的截面積。在雨量桶外包覆鋁箔遮陽片，以防止藻類滋生影響雨水的化學組成。同時以傾斗式雨量計(Rain gauge, RG) (解析度 0.5 mm, TIC-1, 竹田計器工業株式會社, Japan)測量雨量，其數據以資料處理器(CR10x, Campbell, U.S.A.)記錄。2002 年 5 月 31 日開始記錄至 2005 年 2 月 17 日 18:00，每 5 分鐘記錄 1 筆該時段的累積雨量；2005 年 2 月 17 日 18:00~2005 年 3 月 2 日 18:00，則改為每 30 分鐘記錄 1 筆；2005 年 3 月 2 日 18:00~2007 年 5 月研究結束，則為每 10 分鐘 1 筆。雨量桶與傾斗式雨量計均架設於距離樣區約 500 m，天頂角 45° 內無遮蔽物的空曠地，高度為 3.5m 的鐵塔上(圖 6)。

(a)



(b)



圖 6 雨水收集器與傾斗式雨量計。(a)架設於天頂角 45° 內無遮蔽物的空曠地，高度為 3.5m 的鐵塔上。(b)雨量桶外包覆鋁箔遮光板，以防止藻類滋生影響雨水的化學組成。

### 3.2.2 雲霧收集器

研究期間使用 2 種雲霧收集器。2002 年 9 月~2005 年 12 月上半月(SN001~087)<sup>4</sup>使用不區分雲霧粒徑大小的 CASCC2 型收集器(圖 7-a)(陳耀德 2003)。但陳耀德(2003)對本樣區大氣沉降的初步研究結果指出：不同冠層高度的雲霧養分的差異，可能是受冠層和附生植物攔截或吸收影響。然而，不同雲霧粒徑的截留程度和養分可能不盡相同。為了解此狀況，2005 年 12 月下半月~2007 年 5 月(SN088~124)則改用可區分雲霧粒徑大小的 Sf-CASCC 型收集器(圖 7-b)(黃昭豪 2007)。2 種收集器的架設位置相同，皆位於氣象觀測塔 21 m 處。收集器的抽風扇由塔頂 22.3 m 的能見度儀控制(圖 8)。由於世界氣象組織(World Meteorological Organization, WMO)已明確定義當水平能見度低於 1000 m 時為有霧<sup>5</sup>，故設定當水平能見度低於 1000 m 時即判定為有霧，啟動收集器；而能見度超過 1000 m，則停止收集。收集器底部設有 PE 水樣收集瓶，同樣以鋁箔遮陽片包覆，避免藻類滋生。2002 年 9 月~2005 年 1 月，每 5 分鐘由資料處理器(DL2e, Delta-T, U.K. and CR10X, Cambell, U.S.A.)記錄 1 筆該時段能見度的平均值；2005 年 2 月~2007 年 5 月，則改為每 10 分鐘紀錄 1 筆。

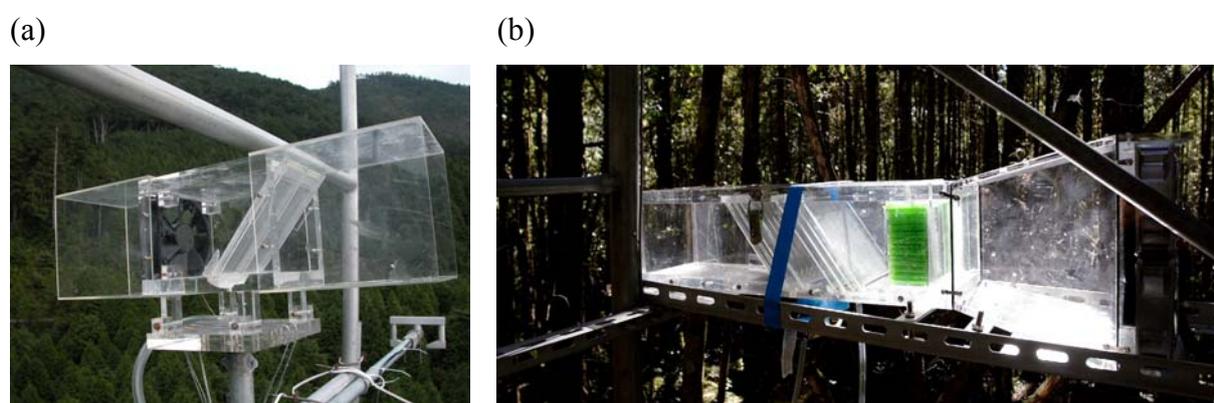


圖 7 雲霧收集器。(a) CASCC 2 型；(b) Sf-CASAA 型。

<sup>4</sup> SNXXX 表示第 XXX 次取樣。

<sup>5</sup> British Atmospheric Data Centre (BADC) (2008). <http://badc.nerc.ac.uk/data/surface/code.html>.

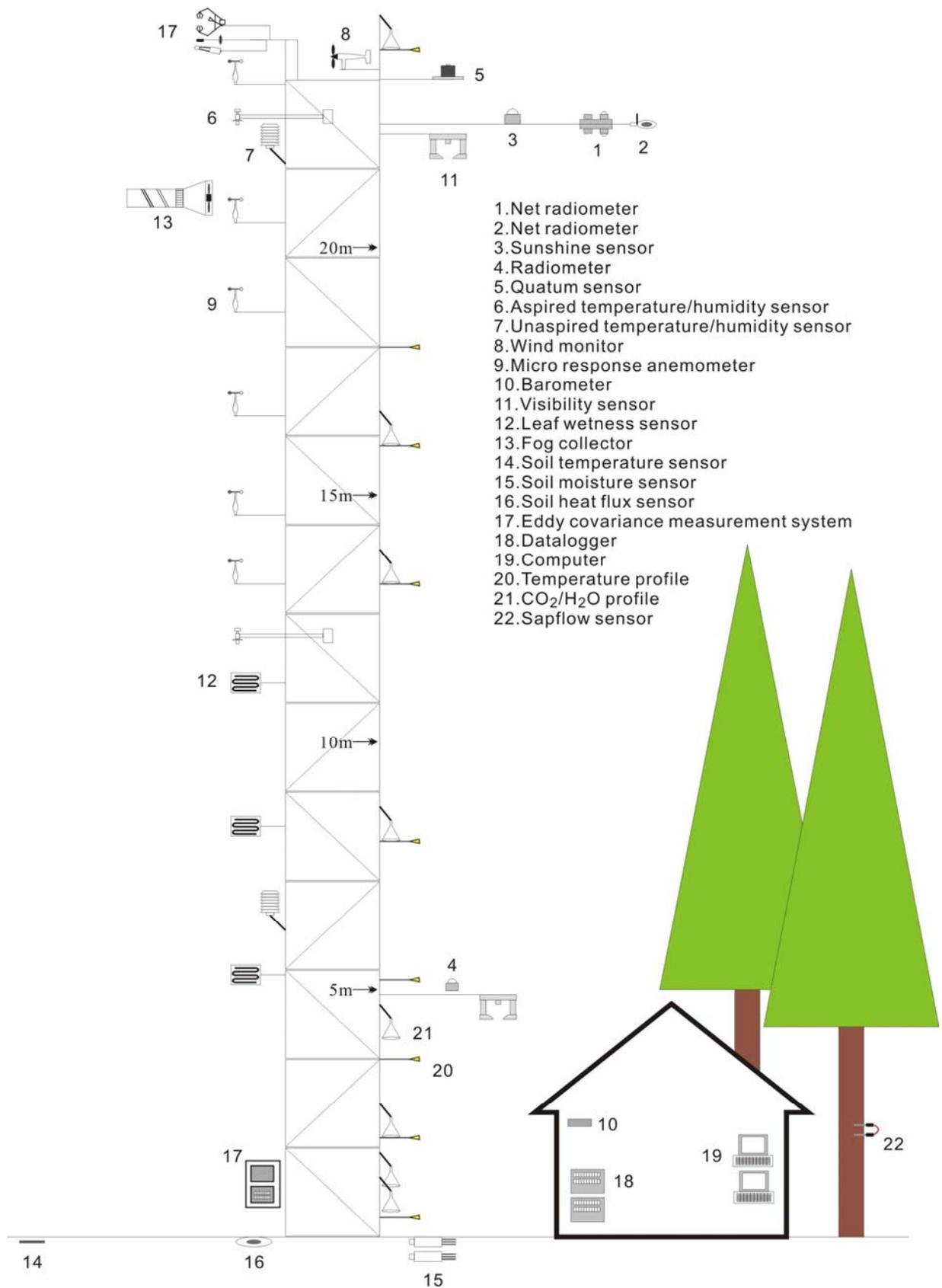


圖 8 氣象塔。高 23m。雲霧收集器(☂)與能見度儀(☐)分別位於塔上 21 與 22.3 m。

### 3.2.3 幹流水收集器

幹流水以螺旋型收集器收集。螺旋型收集器乃由聚氨酯(polyurethane, PU)的溝槽、水管和 200 公升聚乙烯的水桶所構成。聚氨酯的溝槽聚集幹流水，水管引導幹流水並收集於 200 公升聚乙烯的水桶中(圖 9)。為防止雜物進入，於水管末端加上濾網，每次採樣進行更換。由於樣區的優勢樹種為台灣扁柏，故選擇接近林分平均胸高徑(16.7 cm)的 5 棵台灣扁柏作為幹流水取樣個體，製作幹流水收集器<sup>6</sup>。幹流水收集器於樣區的位置如圖 10 所示。



圖 9 螺旋式幹流水收集器。

---

<sup>6</sup> 代表樣樹法。5 棵樣木的 DBH 分別為 20.0、19.0、24.8、20.8 和 20.4 cm (陳耀德 2003)。

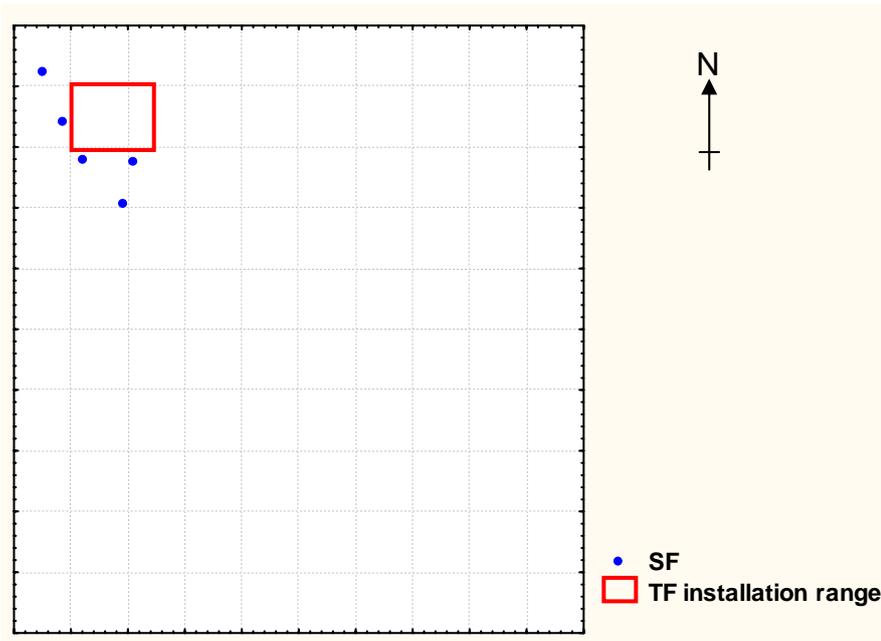


圖 10 棲蘭山樣區(100 m × 100 m)幹流水與穿落水收集器的相對位置圖。幹流水與穿落水收集器設置於樣區西北角(陳耀德 2003)。

### 3.2.4 穿落水收集器

穿落水收集裝置由相連的 2 個 10 公升收集桶與一直徑 20 cm 的漏斗所組成，置於由角鋼搭成的支架上。漏斗開口處離地面約 75 cm。為防止雜物進入，於漏斗內放置網目 2 mm × 2 mm 的紗網，並校正水平(圖 11)。穿落水收集裝置為聚乙烯材質。本樣區共設置 12 組穿落水收集裝置，以每 5 m 的距離於樣區西北角 15 m × 10 m 設置區內，以 4 × 3 的方式系統性地設置(圖 10)。



圖 11 穿落水收集器。

### 3.3 化學分析

樣本於採集後，攜回工作站立即以導電度計(WTW, Cond 340i, Germany)、pH 儀(WTW, pH340i, Germany)測量導電度與 pH，並以 0.45 $\mu$ m 醋酸纖維濾膜(cellulose acetate, Millipore, USA)過濾。過濾後，將樣品裝入 PE 瓶內，置於 0 $^{\circ}$ C 的冰桶後，攜回實驗室，保存於-18 $^{\circ}$ C 的冰箱中，儘速檢測 Cl $^{-}$ 、Na $^{+}$ 、K $^{+}$ 、Ca $^{2+}$ 、Mg $^{2+}$ 、SO $_4^{2-}$ 、NO $_3^{-}$ -N、NH $_4^{+}$ -N (或 NO $_3^{-}$ 、NH $_4^{+}$ )和 TN 濃度。由於東華大學自然資源管理研究所陸域生態實驗室沒有分析 TN 的儀器，故所有水樣的 TN 均於林試所分析。其餘離子直接在東華大學自然資源管理研究所陸域生態實驗室以離子層析儀(Ion chromatography, IC, TOA-DKK ICA-5000, Japan)分析。但 2003 年 2 月~2005 年 8 月(SN019~080)<sup>7</sup>離子層析儀故障，因此水樣改送林試所以感應耦合電漿原子放射光譜儀(Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy, ICP-OES, Jobin-Yvon Horiba group, JY200, Edison USA)、自動離子分析儀(Flow injection analysis, FIA, Lachat QuikChem 8000 series, Milwaukee USA)、分光光度計(spectrophotometer, SP8001 UV-Vis spectrophotometer, Metertech USA)分析(圖 12)。

---

<sup>7</sup> SNXXX 表示第 XXX 次取樣。

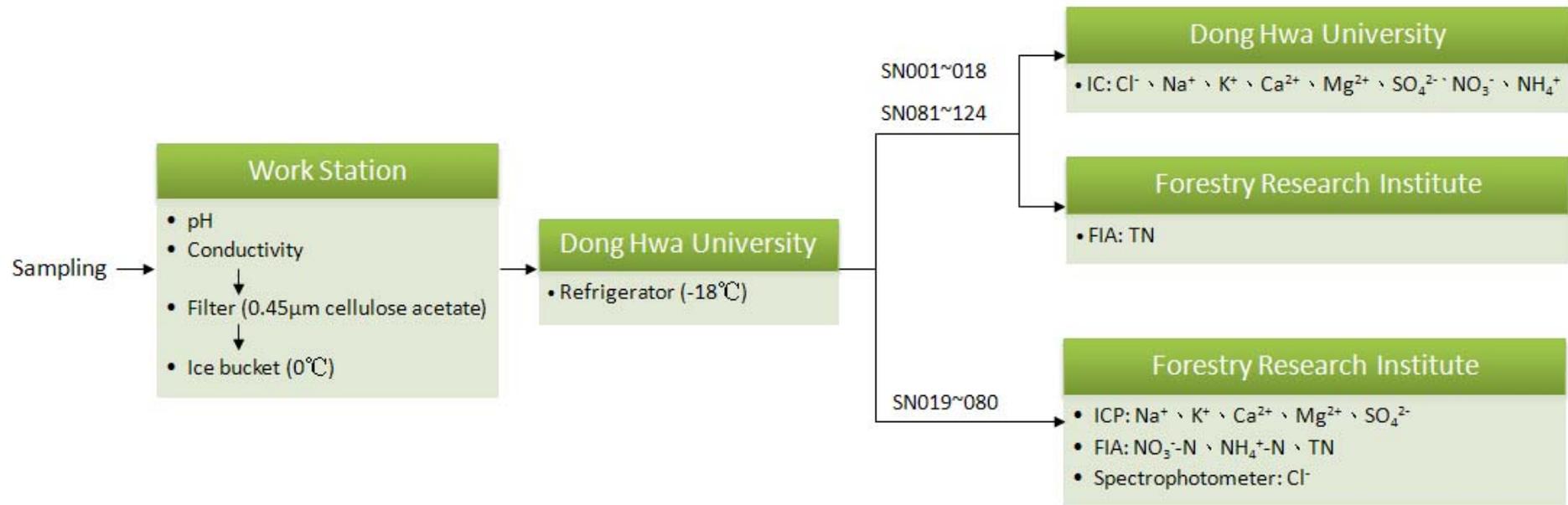


圖 12 水樣處理流程圖。註：離子層析儀(Ion chromatography, IC)；感應耦合電漿原子放射光譜儀(Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy, ICP-OES)；自動離子分析儀(Flow injection analysis, FIA)；分光光度計(spectrophotometer)；SNXXX 為第 XXX 次取樣。

### 3.4 資料運算

以下逐一介紹收集器收集到的水量上推至 1 公頃樣區的方法、養分流量運算的方式，和能見度闕漏與水量滿溢或闕漏的補遺方法。

#### 3.4.1 水量

##### ■ 雨水、穿落水

假設水量與收集面積成正比。則樣區雨水與穿落水量能由收集器漏斗的截面積和收集到的水量，依比例換算求得(公式 2)。最後將每個收集器推估樣區的水量給予平均，即為該次取樣樣區所接受的雨量和穿落水量。

$$\frac{\text{水量}}{\text{漏斗截面積}} = \frac{\text{樣區水量}(x)}{\text{樣區面積}} \quad \text{公式 2}$$

將雨水收集器所收集到的雨量與傾斗式雨量計的數值比對，檢視雨量計的精確性，發現雨量計的精確度達 98% (圖 13)。而樣區胸高徑 1 cm 以上植物的總胸高斷面積佔樣區面積的比例極微(僅 0.5%) (陳耀德 2003)。因此，由穿落水收集器收集的穿落水量，上推至樣區的穿落水量時，忽略植物的總胸高斷面積。

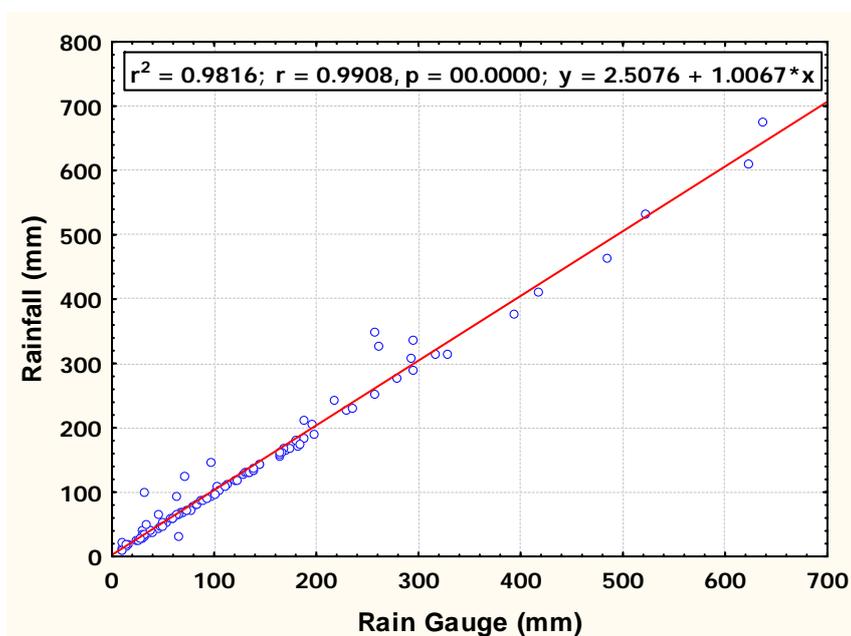


圖 13 2002 年 5 月~2007 年 5 月雨水收集器收集的雨量(y)與傾斗式雨量計測量的雨量(x)的關係。 $y=1.0067x+2.5076$ ， $r=0.99$ ， $r^2=0.98$ 。

■ 幹流水

由於幹流水量與其樹冠大小有關，因此本研究假設樹冠大小與樹幹的胸高斷面積成正相關。由樣樹所收集的的幹流水量，依比例換算樣區所接收的幹流水量<sup>8</sup>(公式 3)。最後平均每個收集器推估樣區的水量，即得該次取樣樣區所接受的幹流水量。

$$\frac{\text{樣樹水量}}{\text{樣樹胸高斷面積}} = \frac{\text{樣區水量}(x)}{\text{樣區總胸高斷面積}} \quad \text{公式 3}$$

■ 霧水

霧水水量以 Chang et al.(2006)在本樣區，以實際能見度與單位葉生物量攔截的水量所得的經驗公式進行估算(公式 4、圖 14)。求得在能見度  $x$  時，每 5 分鐘實際的雲霧沉降水量  $F$  ( $\text{kg H}_2\text{O ha}^{-1} 5\text{min}^{-1}$ )。加總取樣週期間每 5 分鐘 1 筆的雲霧沉降水量資料，即得該次取樣的霧水水量。

$$F = 2.6 * \exp\left(\frac{1587.3}{x + 361.6}\right) \quad \text{公式 4}$$

$F$ ：雲霧沉降量 ( $\text{kg H}_2\text{O ha}^{-1} 5\text{min}^{-1}$ )

$x$ ：能見度 (m)

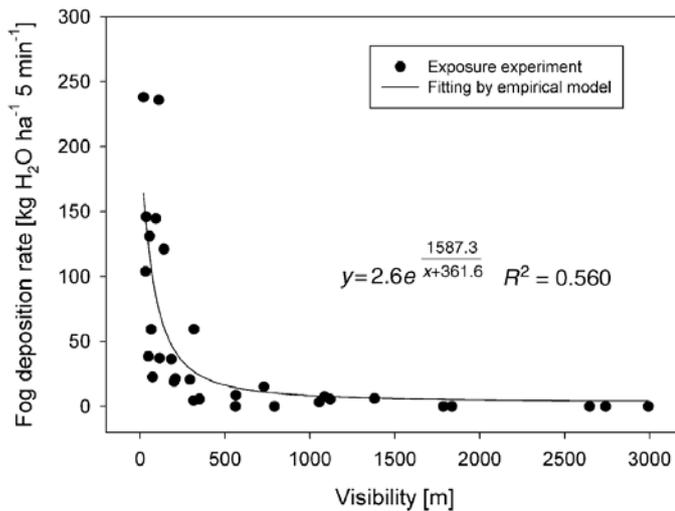


圖 14 棲蘭山樣區能見度與雲霧沉降速率的關係(Chang et al. 2006)。

<sup>8</sup> 即以胸高斷面積平均法推估樣區的幹流水量。

### 3.4.2 養分流量

養分流量的計算方式為水樣養分濃度與水量的乘積(公式 5)。水樣有多重覆時，養分的濃度以平均濃度帶入。平均濃度的計算方式為加總每個重複養分的濃度，乘以該重複的體積，再除以所有重複的總體積(公式 6)。而雲霧養分沉降量由於涉及 2 型雲霧收集器，因此分 2 部分計算。2002 年 5 月~2005 年 12 月(SN001~087)所使用的雲霧收集器為不區分雲霧顆粒的收集器，故雲霧養分沉降量直接將霧水養分濃度與估算的霧水水量帶入公式 5 計算；而 2005 年 12 月~2007 年 5 月(SN088~124)的雲霧養分沉降量，則先依公式 6 求以大小顆粒雲霧樣本的平均養分濃度，再代入公式 5 計算。

$$F_x = \bar{C}_x \times V \quad \text{公式 5}$$

$F_x$  :  $x$  離子的養分流量( $\text{mg ha}^{-1} \text{ time}^{-1}$ )

$\bar{C}_x$  :  $x$  離子的平均濃度( $\text{mg/l}$ )

$V$  : 水樣的水量( $\text{l ha}^{-1} \text{ time}^{-1}$ )

$$\bar{C}_x = \frac{\sum_{m=1}^n C_m V_m}{\sum_{m=1}^n V_m} \quad \text{公式 6}$$

$\bar{C}_x$  :  $x$  離子的平均濃度 ( $\text{mg/l}$ )

$C_m$  : 重覆  $m$  的離子濃度 ( $\text{mg/l}$ )

$V_m$  : 重覆  $m$  的體積 ( $\text{l}$ )

### 3.4.3 資料補遺

以下說明能見度資料闕漏，以及雨水、幹流水、穿落水量滿溢或闕漏的補遺方法。

#### ■ 能見度資料

2002 年 8、9、10、12 月與 2003 年 1、2 月能見度資料闕漏較多，以該月有效能見度資料換算沉降量後，依能見度資料的闕漏比回推(e.g.:有效雲霧資料佔本月的 60%，則實際沉降量為有效能見度估算沉降量/60%)。2002 年 11 月與 2003 年 3 月之後能見度資料的闕漏，短時間(數十分鐘)的闕漏，以闕漏前後能見度的平均補足；較長時間的闕漏(數小時)，以前 1 日同時段能見度資料補足；若闕漏長達 1 日以上，以前後 1 日同時段能見度的平均補足。

#### ■ 雨量

由 3.4.1 知雨量計的精確度相當地高(98%)，同時，雨量桶所收集雨量的變異亦相當地小(0.8%)，故當採樣週期所累積的降雨量超過雨水收集器所能採集的水量時，滿溢的雨量直接以傾斗式雨量計的值替代。

#### ■ 幹流水和穿落水量

滿溢或闕漏的幹流水和穿落水量，採研究期間未滿溢的水量與雨量的線性迴歸推估(圖 15、圖 16)。但幹流水與穿落水收集器所收集水量的變異大，分別為 80.3%和 20.4%。因此，個別收集器上推至樣區的水量與所有收集器上推至樣區水量的平均值有很大的差異。在幹流水，前者為後者的 17~176% (表 2)；而在穿落水，前者為後者的 71~135% (表 3)。故若以所有收集器上推至樣區水量的平均值取代個別收集器上推至樣區的水量，可能高估或低估個別幹流水收集器所收集的水量，進而影響濃度和養分流量的運算。因此，對於幹流水和穿落水個別收集器滿溢或闕漏的水量，本研究利用各收集器未滿溢的水量與平均水量做線性迴歸推估，其推估方式陳列如表 4 和表 5。

## 3.5 統計分析

本研究利用 STATISTICA 7.1 版<sup>9</sup>進行統計分析。水量與水量的相關性，以及離子與離子間的相關性以皮爾森(Pearson)簡單相關係數表示。而冠層交互作用則以 t-test 檢定。

<sup>9</sup> StatSoft, Inc. (2005). STATISTICA (data analysis software system), version 7.1. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).

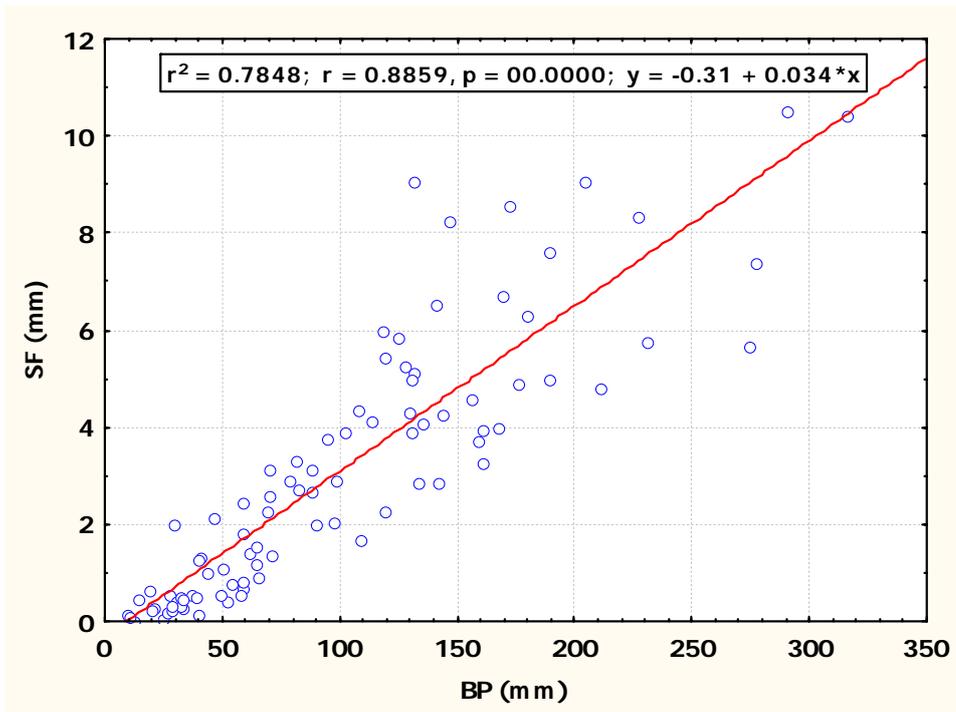


圖 15 2002 年 8 月~2007 年 4 月未滿溢雨量(x)與幹流量(y)的關係。 $y=0.034x-0.31$ ,  
 $r=0.89$ ,  $r^2=0.78$ 。

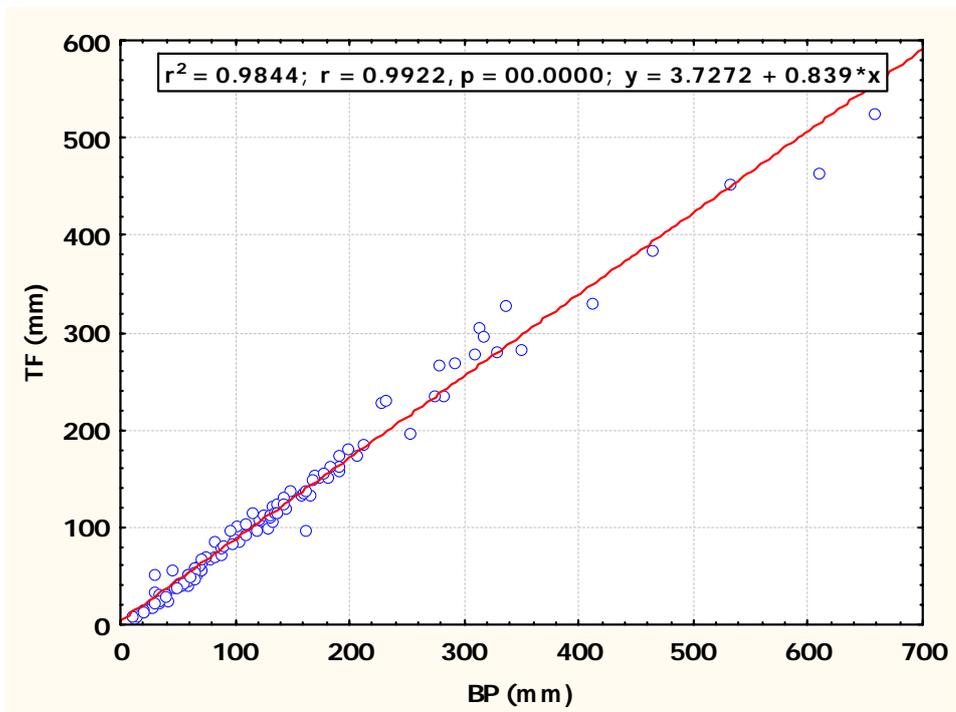


圖 16 2002 年 6 月~2007 年 5 月未滿溢雨量(x)與穿落水量(y)的關係。 $y=0.839x+3.7272$ ,  
 $r=0.99$ ,  $r^2=0.98$ 。

表 2 各幹流水收集器上推 1 公頃樣區的幹流水量為平均幹流水量(n=5)的倍數。

	$\frac{\text{樣木推估的幹流水量}}{\text{平均推估幹流水量}} (\%)$
SF 01	59
SF 02	114
SF 03	17
SF 04	176
SF 05	78

註：SFXX 表示個別幹流水收集器。

表 3 各穿落水收集器上推 1 公頃樣區的穿落水量為平均穿落水量(n=12)的倍數。

	$\frac{\text{個別收集器推估穿落水量}}{\text{平均推估穿落水量}} (\%)$
TF 01	112
TF 02	94
TF 03	135
TF 04	90
TF 05	100
TF 06	116
TF 07	96
TF 08	98
TF 09	102
TF 10	87
TF 11	71
TF 12	97

註：TFXX 表示個別穿落水收集器。

表 4 各幹流水收集器上推 1 公頃樣區的幹流水量與平均幹流水量(n=5)的關係。

Equation	r	r <sup>2</sup>	p
<b>SF 01 = 0.6557 × SF + 0.1409</b>	0.89	0.79	<0.001
<b>SF 02 = 0.9796 × SF + 1.2102</b>	0.85	0.72	<0.001
<b>SF 03 = 0.2151 × SF - 0.1242</b>	0.78	0.61	<0.001
<b>SF 04 = 0.4494 × SF + 3.5913</b>	0.59	0.35	<0.001
<b>SF 05 = 1.1293 × SF - 0.6667</b>	0.94	0.88	<0.001

註：SFXX 表示個別幹流水收集器上推 1 公頃樣區的幹流水量；SF 表示 5 個幹流水收集器上推 1 公頃樣區幹流水量的平均值(n=5)。

表 5 各穿落水收集器上推 1 公頃樣區的穿落水量為平均穿落水量(n=12)的關係。

Equation	r	r <sup>2</sup>	p
<b>TF 01 = 1.1343 × TF - 1.3415</b>	1.00	0.99	<0.001
<b>TF 02 = 1.0521 × TF - 8.7693</b>	0.99	0.98	<0.001
<b>TF 03 = 1.126 × TF + 16.8976</b>	0.99	0.97	<0.001
<b>TF 04 = 0.9609 × TF - 4.6418</b>	0.99	0.99	<0.001
<b>TF 05 = 0.9259 × TF + 7.7123</b>	0.99	0.98	<0.001
<b>TF 06 = 0.936 × TF + 20.7802</b>	0.96	0.93	<0.001
<b>TF 07 = 0.6813 × TF + 27.177</b>	0.93	0.87	<0.001
<b>TF 08 = 1.0024 × TF - 1.0054</b>	0.99	0.99	<0.001
<b>TF 09 = 0.8788 × TF + 12.7647</b>	0.95	0.90	<0.001
<b>TF 10 = 0.9915 × TF - 9.0112</b>	0.99	0.98	<0.001
<b>TF 11 = 0.8683 × TF - 13.482</b>	0.98	0.97	<0.001
<b>TF 12 = 1.0679 × TF - 9.6122</b>	0.96	0.91	<0.001

註：TFXX 表示個別穿落水收集器上推 1 公頃樣區的穿落水量；TF 表示所有穿落水收集器上推 1 公頃樣區穿落水量的平均值(n=12)。



## 4. 結果

2002年5月~2007年5月為期5年的研究期間，共完成124次取樣。由於雨水、霧水、幹水與穿落水收集器設置時間的不同，使得各水樣的樣本數不盡相同。在資料呈現上，樣本數多寡對化學濃度的計算結果不致有太大的影響，故在化學濃度的計算上，本研究以各水樣全數的水樣資料做運算。而對於水文平衡及養分流量，若能取同時段的雨水、霧水、幹流水和穿落水的水樣資料，則能更正確的定量。本研究同時有此4種水樣的期間為2002年9月~2007年4月。為方便以“年”為單位呈現樣區的水分及養分流量，本研究取2003~2006年，4整年的資料，來做水文平衡及養分流量的運算。以下就各水樣的化學組成、水量和養分流量，探討棲蘭山樣區冠層的水分及養分收支。

### 4.1 化學組成

霧水是所有水樣最酸的(pH=4.16)，而穿落水是最不酸的(pH=5.30)。雨水穿過森林冠層後，以幹流水和穿落水的形式到達森林地表。幹流水的pH較雨水低，而穿落水的pH較雨水高。在所有水樣中，霧水的導電度最高( $78.5 \mu\text{s cm}^{-1}$ )，而雨水的導電度最低( $11.0 \mu\text{s cm}^{-1}$ )。雖然雨水的導電度低，但當其穿過森林冠層時，導電度增加。特別是幹流水，導電度是雨水的3.5倍(表6)。

表 6 2002年5月~2007年5月雨水、霧水、幹流水與穿落水的導電度( $\mu\text{s cm}^{-1}$ )和pH。

	Rainfall	Fogwater	Stemflow	Throughfall
Conductivity	11.0	78.5	38.8	12.8
pH	5.19	4.16	4.38	5.30

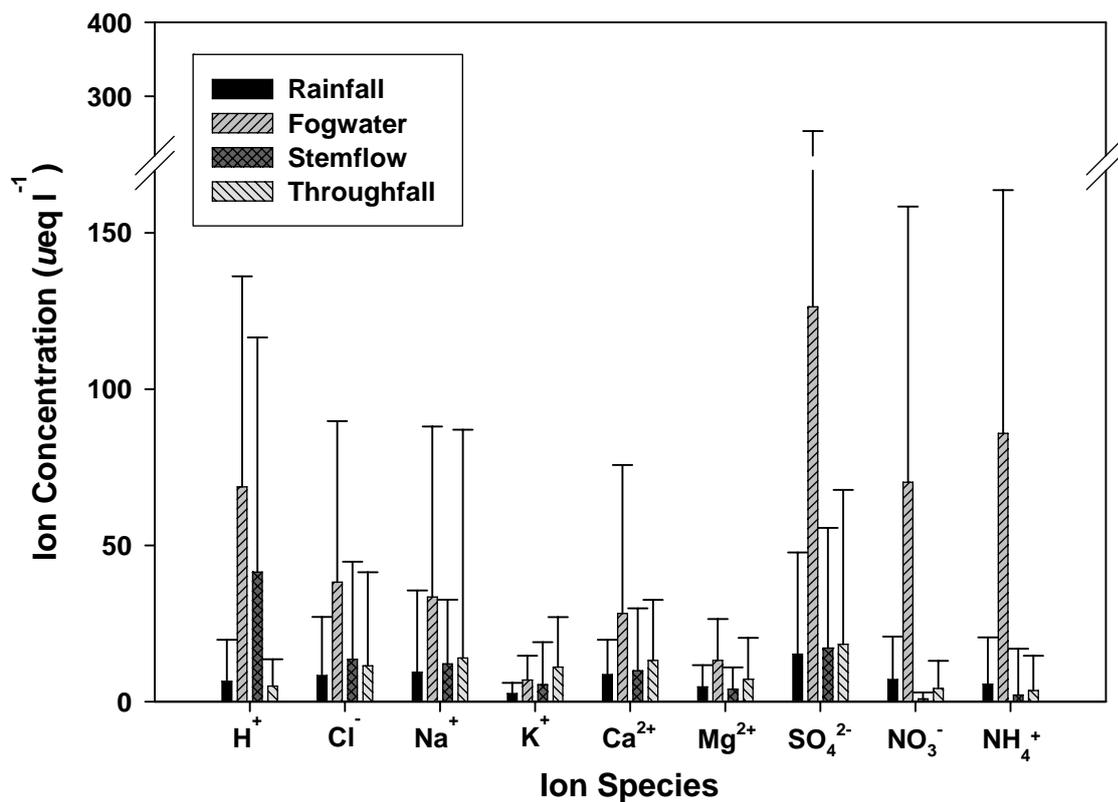


圖 17 2002 年 5 月~2007 年 5 月雨水、霧水、幹流水與穿落水的離子濃度( $\mu\text{eq l}^{-1}$ )。4 種水樣彼此的離子濃度差異甚大。I 表示標準差。

比較各水樣的離子濃度，發現水樣間的離子濃度差異甚大。除了  $\text{K}^+$  外，霧水的各離子濃度是所有水樣最高的(圖 17)，其總當量濃度( $\mu\text{eq l}^{-1}$ )約是雨水的 7 倍(圖 18)。幹流水和穿落水的離子濃度也與雨水有差異。幹流水和穿落水的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  濃度均較雨水高(除了幹流水的  $\text{Mg}^{2+}$ )，而  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  濃度均較雨水低(圖 17)。

由化學組成比例觀察各水樣離子的優勢度，可見  $\text{SO}_4^{2-}$  同是雨水、霧水和穿落水最優勢的離子，而幹流水最優勢的離子為  $\text{H}^+$ 。除了  $\text{SO}_4^{2-}$ ，雨水較優勢的離子包括  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{NO}_3^-$ ，霧水包括  $\text{H}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$ ，而穿落水則包括  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  (圖 19)。關於各水樣離子濃度的時間變化，詳見附錄 3~附錄 6。

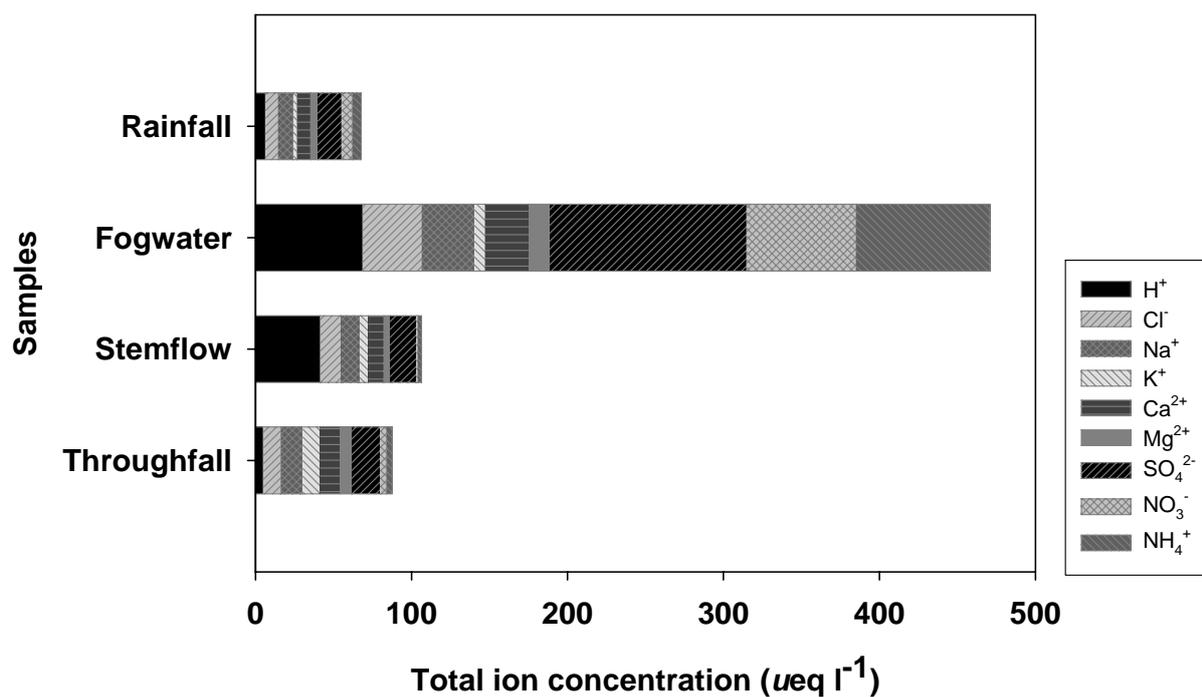


圖 18 2002 年 5 月~2007 年 5 月雨水、霧水、幹流水與穿落水的總離子濃度。

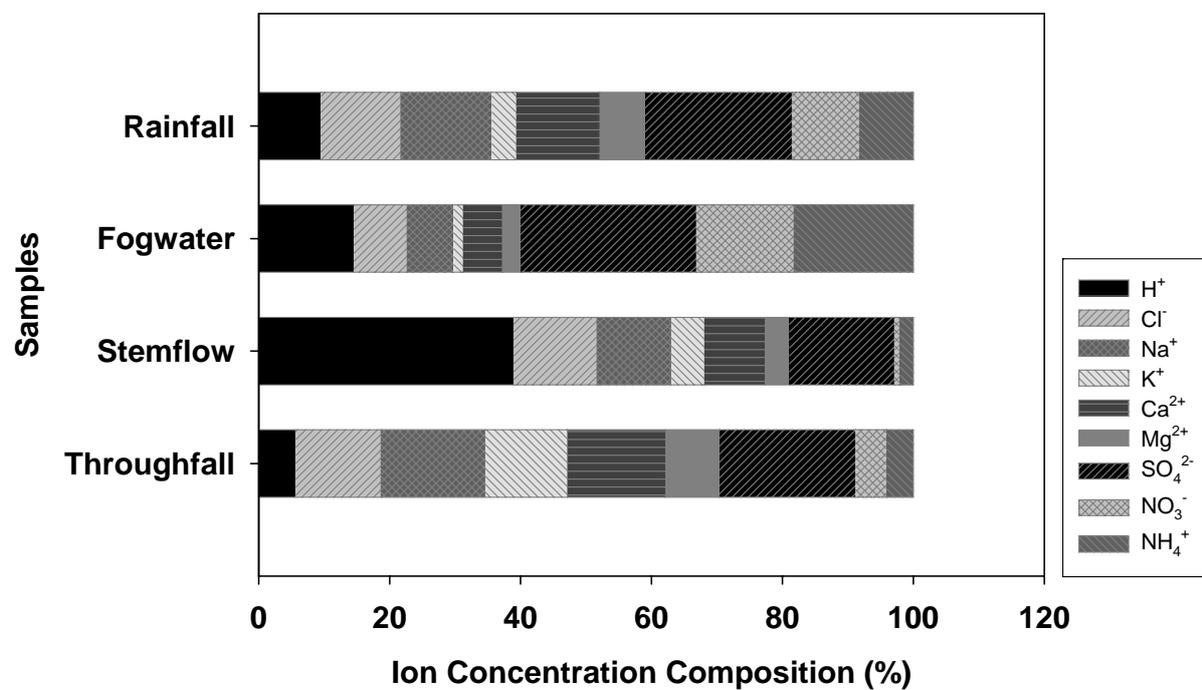


圖 19 2002 年 5 月~2007 年 5 月雨水、霧水、幹流水與穿落水的化學組成百分比。

此外，亦觀察雨水和霧水離子濃度間的相關性。由  $H^+$  與  $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-$  濃度的關係，發現雨水的  $H^+$  與  $NO_3^-$ 、霧水的  $H^+$  與所有離子均呈中度相關。由  $NO_3^-$  與  $SO_4^{2-}$ 、 $NH_4^+$  濃度的關係，發現雨水的  $NO_3^-$  和  $SO_4^{2-}$  濃度呈高度相關( $r=0.77$ )，而霧水則呈中度相關( $r=0.57$ )；雨水的  $NO_3^-$  和  $NH_4^+$  濃度呈中度相關( $r=0.58$ )，而霧水呈高度相關( $r=0.81$ )。另外，雨水和霧水的  $Na^+$  與  $Cl^-$ 、 $Mg^{2+}$  濃度呈高度相關( $r>0.61$ )，而  $Ca^{2+}$  與  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$  呈中度相關( $r>0.25$ ) (表 7、表 8)。

表 7 雨水各離子濃度間的相關分析。

	$H^+$	$Cl^-$	$Na^+$	$K^+$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$SO_4^{2-}$	$NO_3^-$	$NH_4^+$
$H^+$	1.00								
$Cl^-$	0.26*	1.00							
$Na^+$	0.13	<b>0.70*</b>	1.00						
$K^+$	0.14	0.30*	0.39*	1.00					
$Ca^{2+}$	0.24*	0.45*	0.35*	0.41*	1.00				
$Mg^{2+}$	0.17	0.61*	0.61*	0.67*	0.65*	1.00			
$SO_4^{2-}$	0.15	0.50*	0.27*	0.27*	0.56*	0.38*	1.00		
$NO_3^-$	0.31*	0.54*	0.27*	0.06	0.46*	0.27*	<b>0.77*</b>	1.00	
$NH_4^+$	0.34*	0.51*	0.64*	0.31*	0.46*	0.49*	0.42*	0.58*	1.00

\*indicate significant (<0.05). Bold indicate high correlation ( $r>0.7$ ).

表 8 霧水各離子濃度間的相關分析。

	$H^+$	$Cl^-$	$Na^+$	$K^+$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$SO_4^{2-}$	$NO_3^-$	$NH_4^+$
$H^+$	1.00								
$Cl^-$	0.40*	1.00							
$Na^+$	0.24*	<b>0.73*</b>	1.00						
$K^+$	0.04	0.42*	0.33*	1.00					
$Ca^{2+}$	0.23*	0.25*	0.36*	0.25*	1.00				
$Mg^{2+}$	0.35*	0.68*	<b>0.76*</b>	0.48*	0.64*	1.00			
$SO_4^{2-}$	0.33*	0.55*	0.50*	0.42*	0.44*	0.51*	1.00		
$NO_3^-$	0.39*	0.51*	0.31*	0.39*	0.35*	0.36*	0.57*	1.00	
$NH_4^+$	0.15	0.36*	0.19	0.58*	0.33*	0.35*	0.53*	<b>0.81*</b>	1.00

\*indicate significant (<0.05). Bold indicate high correlation ( $r>0.7$ ).

## 4.2 水量

本小節首先說明雨水、霧水、幹流水和穿落水量於季節上的變化。接著就森林冠層的水文平衡，來看冠層截留量，並求得各水樣的水量與雨量的倍數關係。水量的季節性變化結果，以研究期間所有的取樣紀錄呈現；而水文平衡僅呈現 2003~2006 年的水量資料。分析期間相異的原因，已在 4 結果中陳述。

### 4.2.1 雨水、霧水、幹流水和穿落水量的季節性變化

本樣區的雨量於夏、秋的時期高，冬、春的時期低(圖 20)。由於台灣位處熱帶與亞熱帶交接處，夏季太陽直射太平洋海面，海面的高溫和高濕的水汽，易形成熱帶性低氣壓，即颱風。受颱風行進路線與台灣特殊地理位置影響，台灣每年經歷多次颱風。然，棲蘭山樣區位於台灣的東北部，不如西部有山脈的屏障保護，因而更易受颱風的侵襲。為了解研究期間本樣區受颱風干擾的程度，本研究以中央氣象局所發布的颱風警報為基礎，配合個別颱風的行徑路線及累積雨量圖，判斷可能干擾本樣區的颱風。並將此判斷為可能干擾樣區的颱風，於中央氣象局所發布的颱風警報日期內，樣區傾斗式雨量計所記錄的雨量，視為該颱風所挾帶的雨量。結果顯示：本樣區研究期間共經歷 30 次颱風，37%的總降雨量來自颱風。2004 與 2005 年，高達 1/2 的年雨量由颱風所貢獻(圖 21)。由此可見，本樣區的雨量集中於夏、秋季，颱風對本樣區雨量的貢獻不容小覷。詳細颱風的名錄，及各別颱風對樣區雨量的貢獻如表 9 所示。

霧水水量的季節性變化與雨量的變化相異( $p>0.05$ )，乃呈現冬、春時期高(圖 20)。研究期間霧水水量為樣區月總降水量的 0.3~38.9%，較高比例的雲霧輸入發生於雨量較少的冬、春季(圖 22)。綜合上述雨水和霧水相異的季節性變化結果，顯示本樣區的氣候狀況為夏、秋季多雨少霧，冬、春季少雨多霧的情形。而幹流水與穿落水量的季節性變化趨勢則與雨量相似( $p<0.05$ ) (圖 20)。

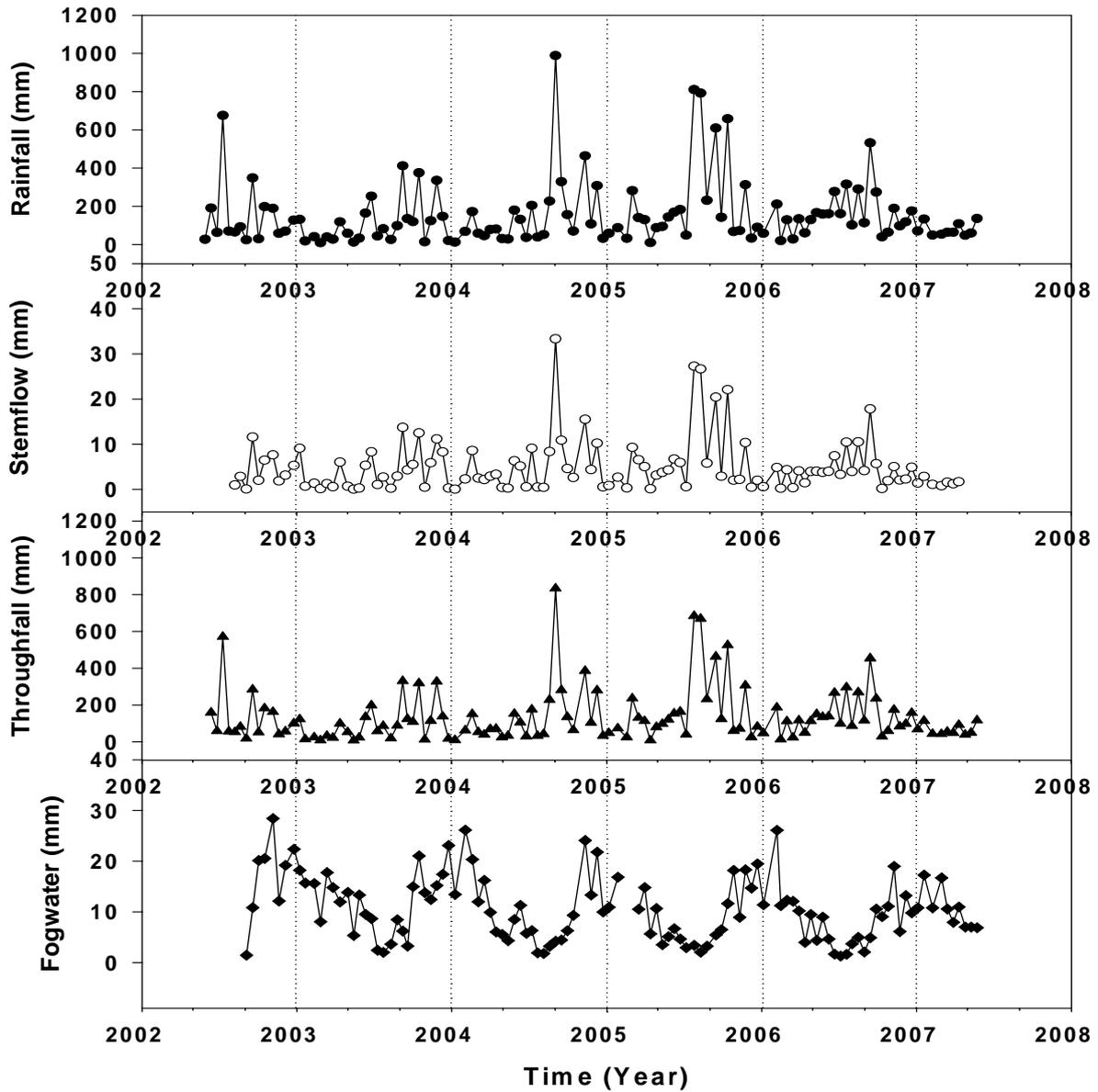


圖 20 2002 年 5 月~2007 年 5 月雨水、幹流水、穿落水、截留和霧水水量的時間變化。

(註：2005 年 2 月能見度資料遺失，致無該時段的雲霧沉降水量。)

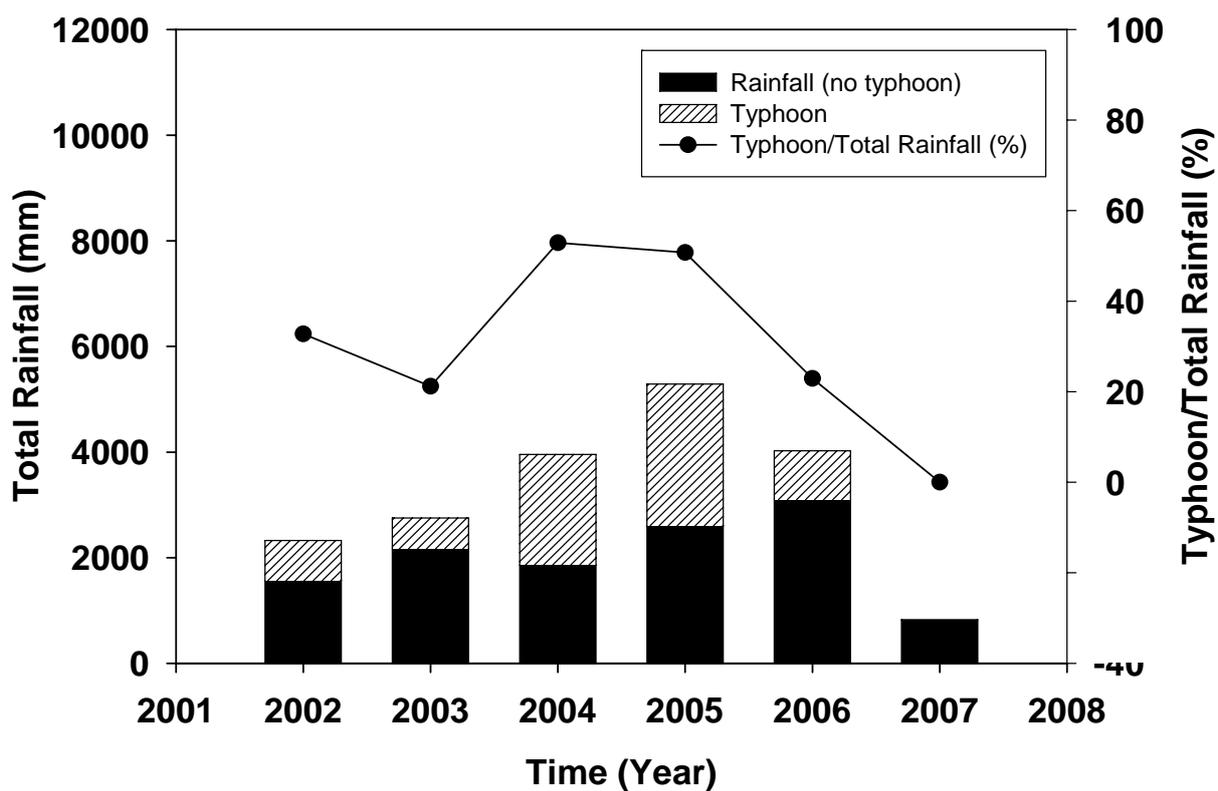


圖 21 2002 年 5 月~2007 年 5 月總水分沉降量與颱風貢獻的雨量。颱風以中央氣象局發佈的颱風警報期間，樣區傾斗式雨量計所記錄到的雨量視為颱風所挾帶的雨量。其中，2002 和 2007 年的資料未滿 1 年，2002 年為 5~12 月，而 2007 年為 1~5 月。

表 9 2002 年 5 月~2007 年 5 月，為棲蘭山樣區帶來降水的颱風。

Year	Date	Chinese name	English name	Strength	Accumulated rainfall (mm) <sup>10</sup>	
2002	07/02~07/04	雷馬遜	RAMMASUN	middle	447.5	
	07/09~07/10	娜克莉	NAKRI	light	71.5	
	09/04~09/08	辛樂克	SINLAKU	middle	242.5	
2003	04/21~04/24	柯吉拉	KUJIRA	middle	7.5	
	06/16~06/18	蘇迪勒	SOUDELOR	middle	123.0	
	08/02~08/04	莫拉克	MORAKOT	light	16.0	
	08/31~09/02	杜鵑	DUJUAN	middle	408.0	
	11/02~11/03	米勒	MELOR	light	29.0	
	2004	06/07~06/09	康森	CONSON	middle	68.0
		06/28~07/03	敏督利	MINDULLE	middle	157.0
08/10~08/13		蘭寧	RANANIM	middle	176.0	
08/23~08/26		艾利	AERE	middle	918.0	
09/11~09/13		海馬	HAIMA	light	115.0	
09/26~09/27		米雷	MEARI	middle	21.5	
10/23~10/26		納坦	NOCK-TEN	middle	404.0	
12/03~12/04		南瑪都	NANMADOL	middle	230.0	
2005	07/16~07/20	海棠	HAITANG	strong	752.5	
	08/03~08/06	馬莎	MATSA	middle	769.5	
	08/11~08/13	珊瑚	SANVU	light	124.0	
	08/30~09/01	泰利	TALIM	strong	466.0	
	09/09~09/11	卡努	KHANUN	middle	82.5	
	09/21~09/23	丹瑞	DAMREY	light	112.0	
	09/30~10/03	龍王	LONGWANG	strong	377.0	
2006	05/16~05/18	珍珠	CHANCHU	middle	59.5	
	07/07~07/09	艾維尼	EWINIAR	middle	4.5	
	07/12~07/15	碧利斯	BILIS	light	250.5	
	07/23~07/26	凱米	KAEMI	middle	104.5	
	08/07~08/09	寶發	BOPHA	light	293.5	
	08/09~08/10	桑美	SAOMAI	middle	210.5	
	09/14~09/16	珊珊	SHANSHAN	middle	210.5	

資料來源：中央氣象局。(2007)。颱風資料庫，<http://61.56.13.28/index.php>。

<sup>10</sup> 本研究將中央氣象局發佈的颱風警報期間，樣區所收集到的雨量視為颱風所挾帶的雨量。雨量資料來自傾斗式雨量計。

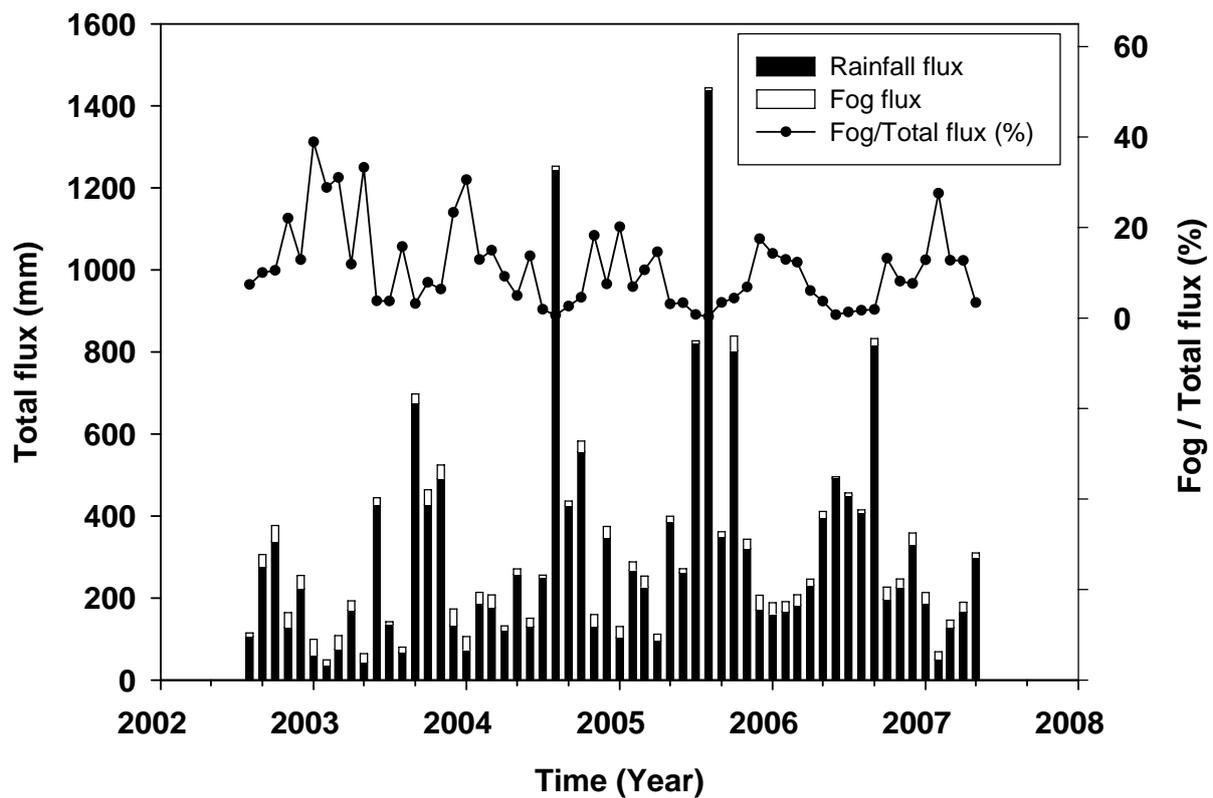


圖 22 2002 年 8 月~2007 年 5 月月總沉降水量(雨水+霧水)與雲霧沉降水量比例。月雨量為 35~1440 mm，雨量主要集中在夏、秋季；月霧水水量佔總濕沉降的 0.3~38.9%，主要在集中在冬、春季。(註：2005 年 2 月能見度資料遺失，以 2003、2004、2006 和 2007 年 2 月的平均值替代。)

#### 4.2.2 水文平衡

為了解森林冠層的水文收支情形，本研究以 2003~2006 年的年平均雨量、霧水、幹流水和穿落水水量進行計算。2003~2006 年的年平均雨量、霧水量、幹流水和穿落水量分別為  $4005 \pm 1036$  mm、 $241 \pm 42$  mm、 $129 \pm 32$  mm 和  $3467 \pm 868$  mm。因此，冠層截留的水量為  $650 \pm 103$  mm。霧水、幹流水、穿落水和截留的水量分別為雨量的 6.0%、3.2%、86.6%和 16.2%。雨水和霧水是森林冠層的水分來源，分別提供冠層 94.3%和 5.7%的水分。雨水和霧水進入冠層後，3.0%分配至幹流水、81.7%分配至穿落水到達森林地表。因此，穿落水為森林內部最主要的水分來源。其餘 15.3%的雨水和霧水則由冠層截留，最後以蒸發的方式返回大氣。

### 4.3 養分流量

本小節首先呈現雨水、霧水、幹流水和穿落水於不同離子的養分流量。隨後以雨水和霧水的養分流量，來評估樣區每年的養分輸入量。最後，探討輸入至樣區的養分，在通過冠層前後，養分流量的差異(即冠層交互作用)。所有養分流量的資料以 2003~2006 年 4 年的平均值  $\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$  表示。

#### 4.3.1 雨水、霧水、幹流水和穿落水的養分流量

2003~2006 年所有水樣的年養分流量如圖 23 所示。雨水、霧水、幹流水和穿落水的年養分流量分別為 48.6、18.3、2.0 和 59.4  $\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ 。亦即雨水和霧水分別貢獻樣區 72.6%和 27.4%的離子；而森林地表的離子輸入 3.2%來自幹流水、96.8%來自穿落水。表示樣區的大氣離子沉降主要源自雨水。雨水和霧水的養分進入冠層後，主要透過穿落水到達森林地表。另外，將霧水、幹流水和穿落水的年養分流量與雨水的年養分流量比較，得到霧水、幹流水和穿落水的年養分流量分別是雨水的 0.38、0.04 和 1.22 倍。顯示相較於雨水，幹流水所攜帶的養分非常的低，而穿落水的養分較雨水高 2 成。而樣區各離子的年平均輸入量為雨水與霧水養分流量之和，結果呈現如圖 24。其中與酸性沉降高度相關的  $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$  和 N 年沉降量，分別為 14.1 和 15.0  $\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ 。

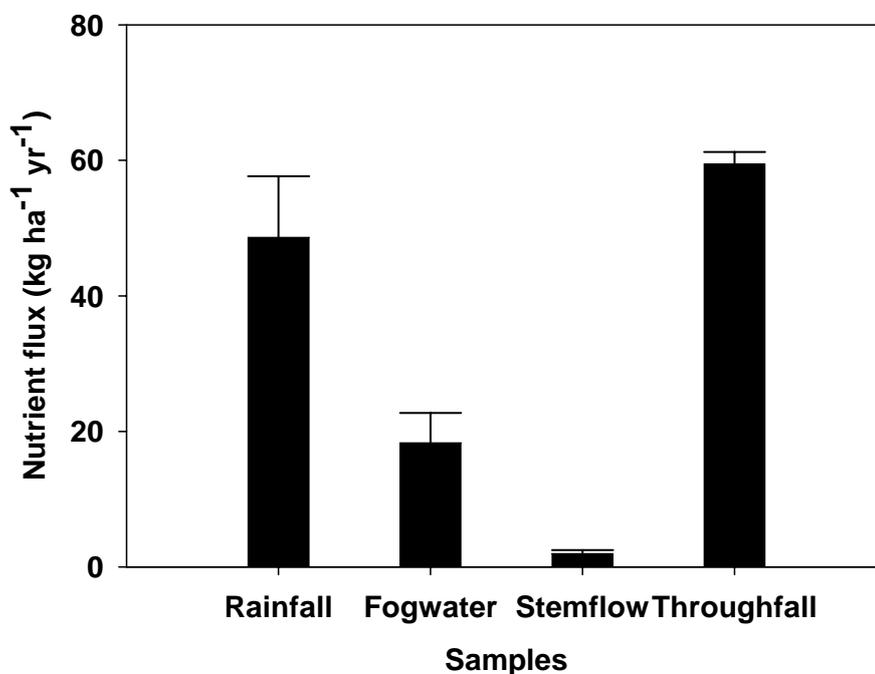


圖 23 2003~2006 年雨水、霧水、幹流水與穿落水的年平均養分流量( $\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ )。I 表示標準差。

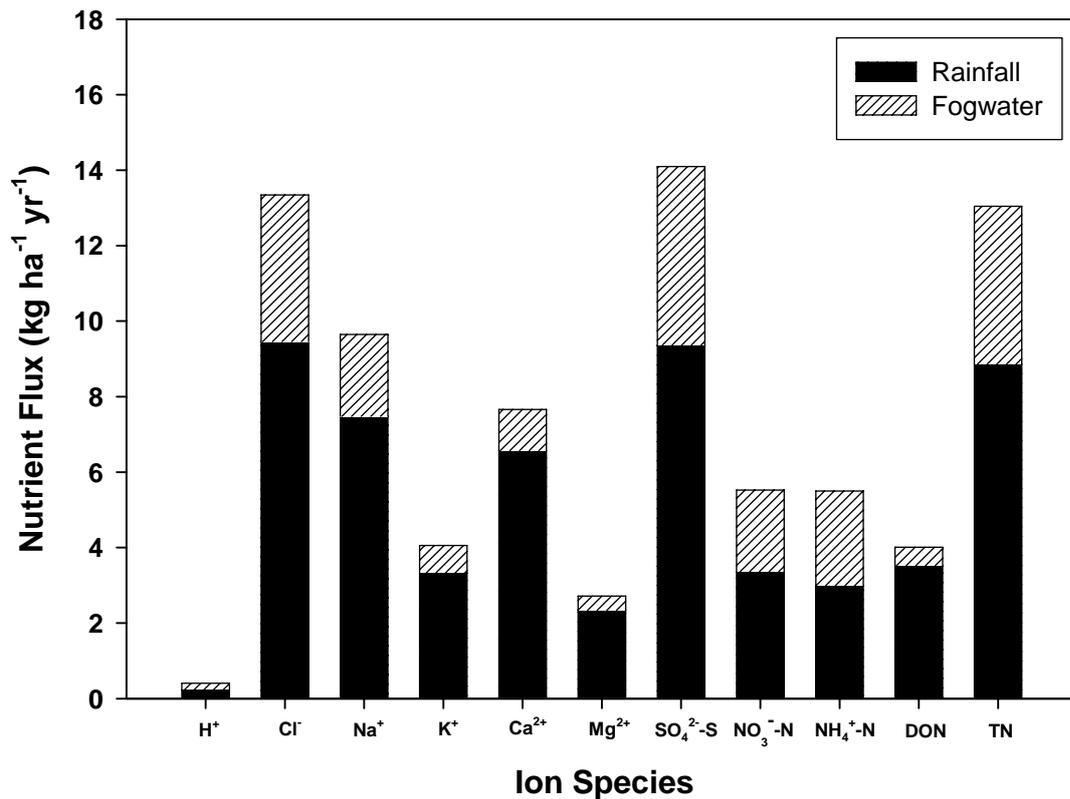


圖 24 2003~2006 年樣區養分的年平均輸入量(kg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>)。雨水所有離子的沉降量均較霧水高，其總養分流量為霧水的 2.7 倍。樣區離子的年輸入量，以 Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-S 和 N 較高。

#### 4.3.2 冠層交互作用

輸入與輸出冠層養分的差值表示冠層留置或淋洗的強度。本樣區輸入冠層的養分包括雨水和霧水，而輸出冠層的養分包括幹流水和穿落水。研究期間輸入與輸出冠層養分差值的結果顯示：樣區 H<sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-S、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N (幹流水+穿落水)的養分流量 < (雨水+霧水)的養分流量；而 K<sup>+</sup>則相反。表示 H<sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-S、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 與 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 被冠層留置；K<sup>+</sup>則由冠層淋洗(t-test, p<0.05) (圖 25)。2003~2006 年冠層 H<sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-S、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 與 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的留置量分別為 0.20、4.27、3.61 和 3.76 kg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>，各別是該離子總輸入量量的 49.1%、30.3%、65.3%和 68.3%。而 K<sup>+</sup>的淋洗量為 9.35 kg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>，為 K<sup>+</sup>總輸入量的 2.3 倍。其餘的養分，則沒有顯著由冠層留置或淋洗。整體而言，冠層淨留置 3.7%由雨水和霧水進入森林的養分。

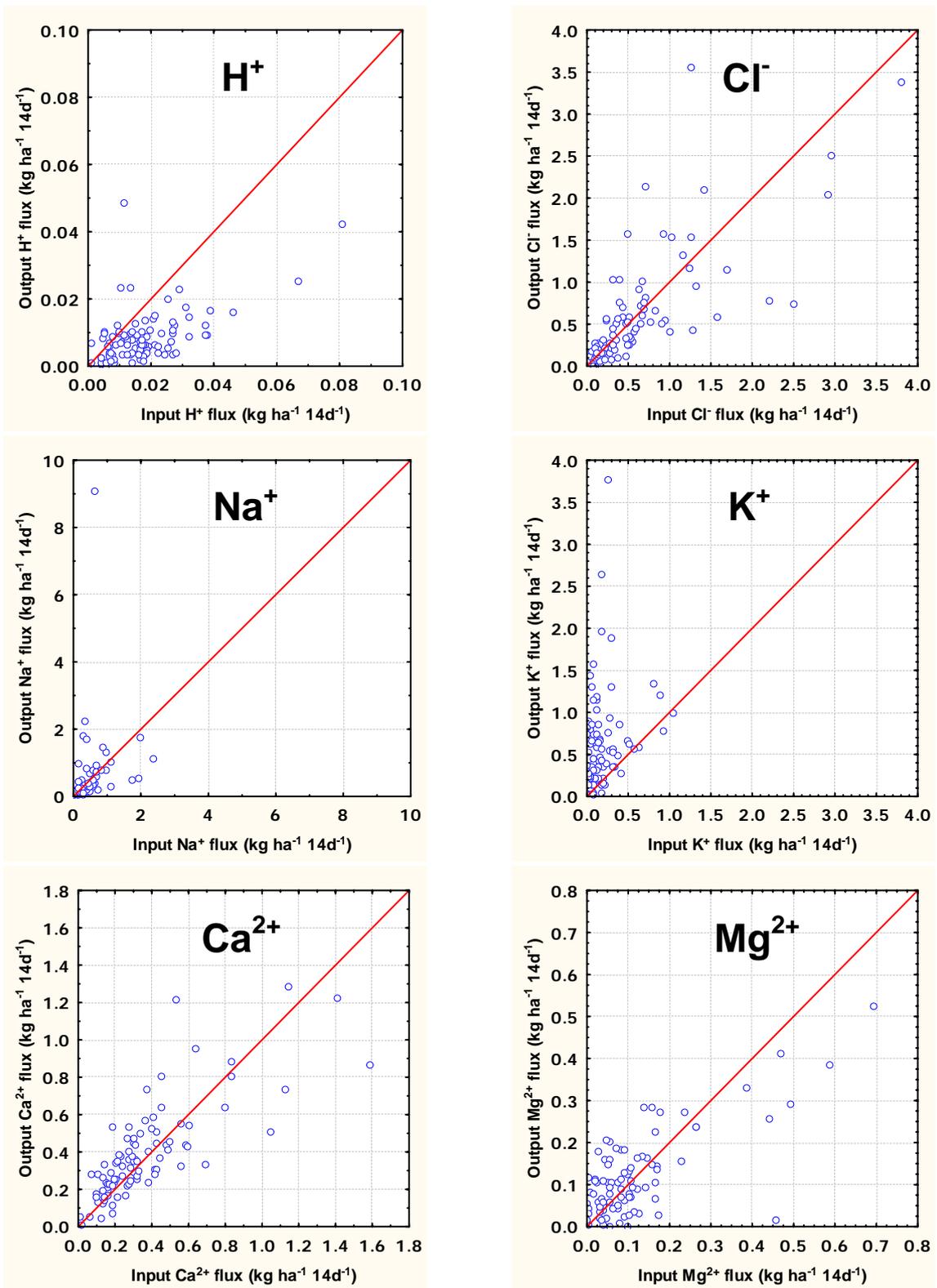


圖 25 棲蘭山樣區冠層養分的交互作用。x 軸、y 軸分別為輸入(雨水+霧水)與輸出(穿落水+幹流水)冠層的養分。空心圓點為每 2 週一次的取樣記錄。對角線為 1:1 線。當空心圓點偏 x 軸時，表養分由冠層留置；偏 y 軸時，表養分由冠層淋洗。

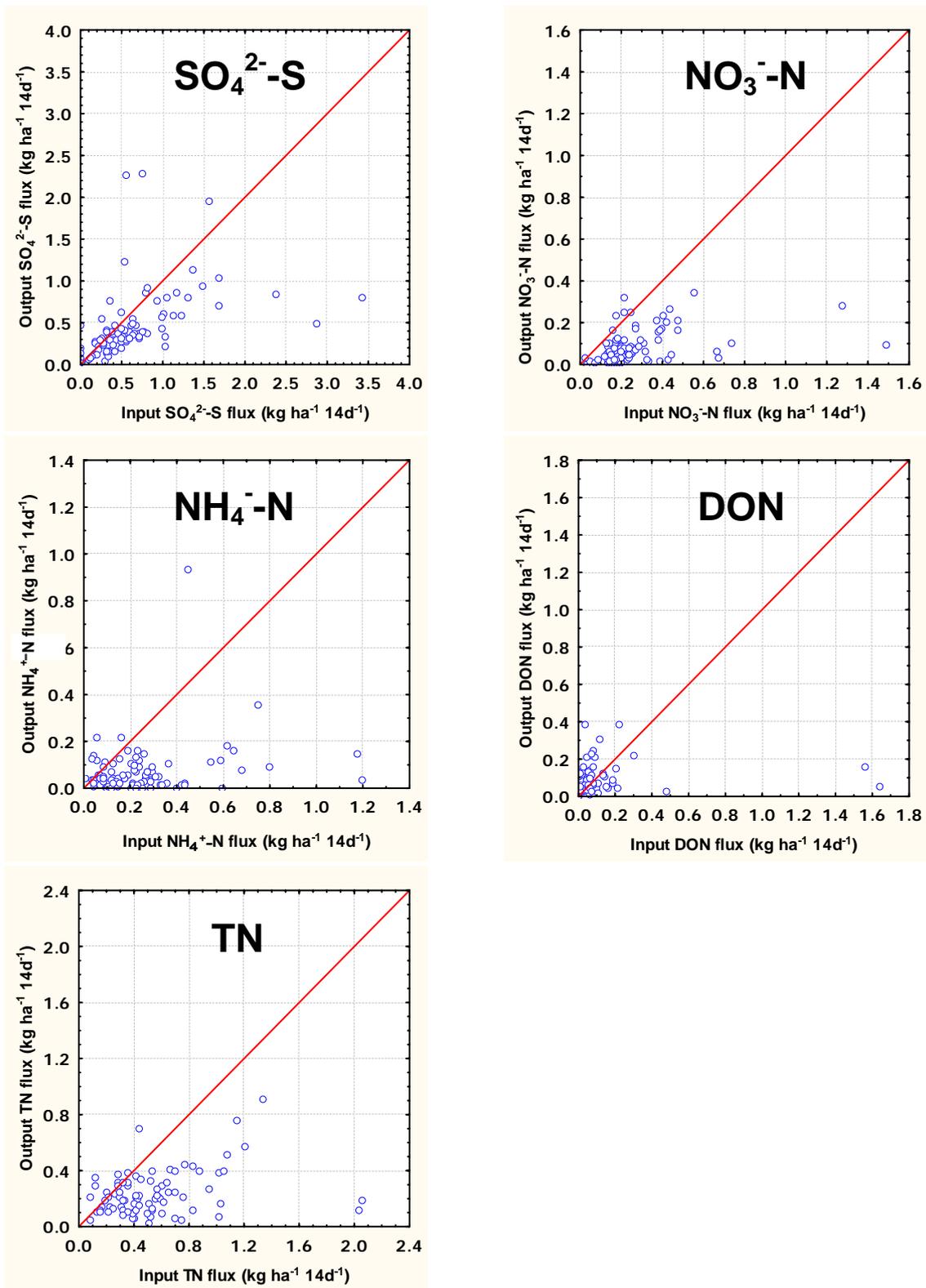


圖 25 棲蘭山樣區冠層養分的交互作用。x 軸、y 軸分別為輸入(雨水+霧水)與輸出(穿落水+幹流水)冠層的養分。空心圓點為每 2 週一次的取樣記錄。對角線為 1:1 線。當空心圓點偏 x 軸時，表養分由冠層留置；偏 y 軸時，表養分由冠層淋洗。(續)



## 5. 討論

### 5.1 化學組成

此小節先對雨水和霧水化學組成的差異進行探討，並推測離子的可能來源。隨後再對雨水通過冠層前後，化學組成的變化進行討論，推測造成化學組成變化的可能原因。

#### 5.1.1 雨水和霧水化學組成的差異

本樣區雨水的 pH 值(5.19)，而國內環保署所定義的酸雨 pH 值(5.0)。若依此定義，本樣區酸雨的發生機率為 35%。相對於酸雨，目前酸霧似乎未被明確定義。若以酸雨的定義來定義酸霧，本樣區酸霧的發生率為 84%。比較雨水和霧水的 pH 值和總當量濃度，本樣區霧水的 pH 值(4.19)較雨水酸，且總當量濃度亦較雨水高。這是因為霧由較低的氣團形成，而地表的污染物通常較高，因此霧滴較雨滴能有效地收集接近地表的污染物造成(Stumm et al. 1987, van Loon and Duffy 2000)。此外，霧滴較雨滴的粒徑小，水量相較於雨水少，加上蒸發濃縮作用，也有可能是造成霧水濃度高於雨水的原因。由  $H^+$  與  $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-$  濃度的關係，發現雨水的  $H^+$  與  $NO_3^-$ 、霧水的  $H^+$  與所有離子均呈中度相關。表示  $HNO_3$  可能是本樣區雨水酸化的原因，而本樣區霧水酸化的原因則包括  $HCl$ 、 $H_2SO_4$  和  $HNO_3$ 。

$SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-$  同為雨水和霧水優勢離子的原因，可能是受長程傳輸和行駛於林道交通工具廢氣的影響。彭啟明等(2003)以模式模擬宜蘭雨水的  $SO_4^{2-}$  濕沉降量指出：宜蘭雨水的  $SO_4^{2-}$  沉降量 35% 來自長程傳輸，以中國為最大的來源。此外，Beiderwieden et al. (2007) 曾對本樣區的雲霧事件進行逆軌跡(backward trajectory)追蹤，發現本樣區的氣流來自太平洋、菲律賓，和中國 3 個區域。顯示除中國外，太平洋和菲律賓的長程傳輸亦可能是本樣區雨水和霧水離子的來源。由雨水和霧水  $NO_3^-$  與  $SO_4^{2-}$ 、 $NH_4^+$  濃度的關係，發現雨水的  $NO_3^-$  和  $SO_4^{2-}$  濃度呈高度相關，而霧水則呈中度相關；雨水的  $NO_3^-$  和  $NH_4^+$  濃度呈中度相關，而霧水呈高度相關。表示本樣區雨水和霧水受長程傳輸和當地污染的程度均高，雨水受長程傳輸的影響較霧水較明顯，而霧水受當地污染的影響較大。此 3 個離子可能形成硝酸銨( $NH_4NO_3$ )、亞硫酸氫銨( $NH_4HSO_4$ )，和硫酸銨( $(NH_4)_2SO_4$ ) 的化合物。而山腳下蘭陽平原農業活動的動物糞肥和肥料硫酸銨( $(NH_4)_2SO_4$ ) (Hsiao et al. 2007)，亦有可能是造成本樣區霧水  $NH_4^+$  和  $SO_4^{2-}$  濃度高的原因。

另外， $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 與 $\text{Ca}^{2+}$ 為本樣區雨水的優勢離子。雨水的 $\text{Na}^+$ 與 $\text{Cl}^-$ 濃度呈高度相關。顯示本樣區雨水離子有很大的比例是來自海鹽。霧水也有相同的結果。此可能與台灣是島嶼國家，且本樣區鄰近海洋有關(林登秋 et al. 1996)。而 $\text{Ca}^{2+}$ 是地殼物質(Taylor et al. 1994)，由岩石風化而來。由於 $\text{Ca}^{2+}$ 的粒徑與密度較大，推測主要受行駛於樣區旁，未鋪砌林道的車輛產生的揚塵影響。

### 5.1.2 雨水進入冠層後，化學組成的變化

雨水通過冠層前後化學組成的變化，受乾沉降(Fan and Hong 2001)和冠層留置與淋洗作用影響(Fan and Hong 2001, Stachurski and Zimka 2002)。但在多雨且潮濕森林，乾沉降不如濕沉降重要(林登秋等 1998, 林文龍和林能暉 2004)。本樣區雨量豐沛，無明顯乾濕季，故推測本樣區雨水進入冠層後化學組成的變化主要受冠層交互作用影響。

酸沉降對森林緩衝的影響被廣泛研究。闊葉林對酸沉降的中和能力被證實較針葉林佳(Amezaga et al. 1997)。本樣區穿落水的 pH 較雨水高，顯示本樣區能中和大氣的酸性物質。樣區幹流水和穿落水的  $\text{NO}_3^-$ 和  $\text{NH}_4^+$ 濃度較雨水低，可能是由扁柏葉和附生植物吸收(Lang et al. 1976, 劉美娟 2004)。扁柏葉和附生植物於吸收  $\text{NO}_3^-$ 的同時，亦吸收  $\text{H}^+$ 以維持電中性(Stachurski and Zimka 2002)。而幹流水和穿落水陽離子( $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ )普遍較雨水高的原因，則可能是雨水的  $\text{H}^+$ 對葉內的陽離子行離子交換的結果(Cronan and Reiners 1983)。然而，此過程僅解釋約 50%的中和能力(Chiwa et al. 2004)。而 Chiwa et al.(2004)的研究指出  $\text{H}^+$ 的吸收與陰陽離子的差呈負相關，顯示有機酸亦可能扮演中和穿落水的角色。以上 3 種可能是造成本樣區穿落水的 pH 較雨水高的原因。

Levia 和 Frost(2003)整理酸沉降和非酸沉降地區雨水與幹流水的 pH 值，發現 pH 值並無特定的變化趨勢，表示幹流水的 pH 值隨樣區特性和植被種類而異。本樣區幹流水 pH 較雨水低則可能是樹皮或附生植物表面的有機和無機酸溶於幹流水中，或者是幹流水中的陽離子和樹幹表面的  $\text{H}^+$ 進行離子交換的結果(Takenaka and Sasama 2000)。

## 5.2 水文平衡

將本研究的水文平衡結果(即霧水、幹流水、穿落水量相對於雨量的比例)與不同樣區比較，探討本樣區的水文平衡與哪類型的氣候區相近，和造成不同樣區水文平衡差異的可能原因。此外，以本研究的 2003~2006 年的年平均雨量、霧水、幹流水和穿落水量為例，說明若無估算雲霧沉降水量，直接以水文平衡求截留水量，將對本樣區截留水量(截留水量相對於雨量的比例)造成什麼影響。

### 5.2.1 不同樣區水文平衡之比較

以下比較本研究與不同樣區的水文平衡結果，探討本樣區的水文平衡與哪類型的氣候區相近，並說明造成不同樣區水文平衡差異的可能原因。

#### ■ 霧水

Bruijnzeel and Proctor (1994)整理熱帶山區雲霧森林水文平衡指出：雲霧攔截水量相對於雨量的比例範圍為 4~103% (平均值=34%)。本樣區雲霧攔截水量為雨量的 6%，此比例與熱帶雲霧森林相較是偏低的。樣區霧水相對於雨量的比例小，顯示霧水並非本樣區主要的水分來源。類似的現象也在美國田納西州的研究發現。其雲霧攔截的水量更低，僅雨量的 1% (Johnson and Lindberg 1992)。美洲巴拿馬熱帶山區雲霧森林研究森林水文平衡時，雖然沒有架設雲霧收集器收集霧水，但在其研究期間，僅觀測到少許森林內部水量大於雨量的記錄(4.3%) (Cavelier et al. 1997)。這些研究均顯示雲霧攔截並非這些樣區重要的水分來源。相對於此，美國北阿帕拉契山脈的亞高山帶香膠冷杉林有著與前述不同的結果。其雲霧攔截水量為雨量的 46%，貢獻森林近 1/3 的水量(Lovett et al. 1982)。Vogelmann (1973)於墨西哥的研究中也指出乾季的霧水攔截量非常地高，雲霧攔截水量相對於雨量的比例達 85~103%。雲霧攔截量的差異能由樣區相異的植被型態與氣候因子解釋。植被型態包括：植被的高度、冠層大小和結構、生物量，以及葉和附生植物的排列方式與物理特性；而氣候因子則包括空氣的水含量、水滴大小、風速和風向 (Bruijnzeel and Proctor 1994)。此外，Bruijnzeel and Proctor (1994)在整理熱帶山區雲霧森林雲霧攔截水量與雨量比例亦指出：雖然雲霧攔截水量與雨量沒有正相關，但是高年雨量地區的雲霧攔截比例傾向較低。因此，高的年雨量也可能是造成本樣區雲霧攔截水量之於雨量的比例較低的原因。

## ■ 幹流水

Levia and Frost (2003)回顧不同氣候區森林的幹流水量指出熱帶、溫帶，與乾旱和半乾和地區幹流水量相對於雨量比例的範圍分別為<1~14% (平均值=3.4%)、1~20% (平均值=7.6%)，和 1~45% (平均值=9.5%)。Bruijnzeel and Proctor (1994) 整理熱帶山區雲霧森林水文平衡指出：熱帶山區雲霧森林的幹流水量相對於雨量的範圍為 0.1~10% (平均值=3.3%)。本樣區幹流水量相對於雨量的比例為 3%，顯示本樣區幹流水量佔雨量的比例與熱帶森林和熱帶山區雲霧森林相近，但高於熱帶森林、低於半乾旱和乾旱灌木林。不同氣候區森林幹流水量高度變化，可能是受氣候、氣象和植被組成差異的影響。而氣候區內幹流水量的變化可能與樣區的差異，包括冠層結構、森林密度(Levia and Frost 2003)和 DBH (Weaver 1972)，以及附生植物的有無、樹皮質地的變化，和降雨事件的頻率、量、延時、強度有關(Levia and Frost 2003)。由於幹流水量相較於穿落水量非常小的緣故，故一些研究忽略幹流水的水文重要性(Johnson and Lindberg 1992)。

## ■ 穿落水

相對穿落水量在不同的研究樣區也有很大的變化。由 Cavelier et al. (1997)和 Bruijnzeel and Proctor (1994)整理熱帶山區雲霧森林水文平衡，熱帶山區雲霧森林穿落水量相對於雨量的比例為 62~179% (平均值=88%)。在輕微或沒有受雲霧影響的熱帶山區雲霧森林，穿落水量相對於雨量的比例為 62~80%，而暴露於接近海岸的斜坡或山脊，比例則為 130~180%。另外，由 Llorens and Domingo (2007)以及 Huber and Iroumé (2001)整理的歐洲地中海環境和智利的水文平衡的資料顯示：溫帶森林穿落水相對於雨量的比例為 52~88% (平均值=74%)。比較熱帶和溫帶的相對穿落水量發現 2 氣候區的穿落水量差異不大。本樣區穿落水量相對於雨量的比例是 87%，與熱帶山區雲霧森林的結果較相近。影響穿落水量的因子包括：附生植物(Weaver 1972)、海拔高度(Igawa et al. 2002b)。日本 Oyama 山，由於雲霧攔截，穿落水量隨海拔的增加而增加。山頂的穿落水量幾乎達雨量的 2 倍(Igawa et al. 2002b)。

表 10 不同雲霧森林的截留水量(相對於雨量的%)。

Location	Altitude	Rainfall	Fogwater	Throughfall	Stemflow	Interception	Reference
	(m)	(mm yr-1)	(% of Rainfall)				
America (New York)	950~1100	1147	14	103	0.1	11	(1)
America (North Carolina)	1740	2034	20	106	0.5	14	(1)
Taiwan	1400~1700	4005	6	87	3	16	(2)

(1) Johnson and Lindberg (1992); (2) This study.

#### ■ 截留

截留通常由雨水-幹留水-穿落水估算。但在雲霧森林，森林的水分除來自雨水，尚來自霧水。因此，除非霧水的水量非常地稀少，否則以此方式估算雲霧森林的截留水量是不適當的。故雲霧森林的截留應以雨水+霧水-幹留水-穿落水表示才是。本樣區截留相對於雨量的比例為 16%，與美國紐約和田納西州的雲霧森林相似(表 10)。在雲霧森林，截留量的多寡與與霧的延時有關(Bruijnzeel and Proctor 1994)。

綜和以上可見水文平衡隨樣區而異。不同樣區各水樣的相對水量均受植被型態與氣候因子影響。植被型態包括：DBH、植被的高度、冠層大小和結構、森林密度、生物量、樹皮質地的變化，以及葉和附生植物的排列方式與物理特性等(Weaver 1972, Bruijnzeel and Proctor 1994, Levia and Frost 2003)；而氣候因子則包括空氣的水含量、水滴大小、風速和風向、降雨事件的頻率、量、延時、強度有關、霧的延時等(Bruijnzeel and Proctor 1994, Levia and Frost 2003)。

### 5.2.2 雲霧森林若忽略雲霧攔截對截留水量的影響

一般森林的水分來自重力沉降，即雨水和雪水，但雲霧森林較一般森林多了雲霧攔截的水分輸入。因此，在計算冠層的水文平衡時，若忽略雲霧攔截的資訊，可能改變截留的估算結果。以本研究 2003~2006 年 4 年的年平均雨量、霧水、幹流水和穿落水量為例，發現：忽略雲霧攔截的截留水量是 409 mm，而考慮雲霧攔截的截留水量為 650 mm。表示本樣區在計算冠層水文收支時，若忽略雲霧攔截，將低估 241 mm 的截留。但截留水量的年間變異為 16% (=103 mm)。表示：忽略雲霧攔截時，截留低估的水量 > 截留的變異。此意味著計算冠層的水文平衡，若忽略雲霧攔截，將確實低估本樣區的截留水量，低估的量為雲霧攔截的水量。由此可見，欲了解本樣區的截留水量，雲霧攔截水量的資訊是不可或缺的。因此，於雲霧攔截水量 > 截留變異的雲霧森林，計算冠層水文平衡時應確實考慮雲霧攔截水量，如此才不致錯估森林的截留水量。

### 5.3 養分流量

以 2003~2006 年年平均雨水和霧水的水分與養分收支，來探討雲霧對本樣區養分的貢獻。此外，以樣區酸性物質的沉降量(S 和 N)，探討樣區是否接受過量的酸性物質而面臨森林衰退的威脅。

#### 5.3.1 雲霧對森林養分收支的貢獻

本研究結果顯示本樣區霧水的離子濃度高於雨水(圖 18)，但養分沉降量卻低於雨水(圖 23)，此現象可由水的輸入量解釋。因霧水水量僅為森林冠層總水分輸入量的 6%，相較於雨量顯得次要，故霧水的養分輸入量較雨水低。但霧水僅提供冠層 6%的水分，卻提供 27%森林的養分，可見雲霧對本樣區養分收支的重要性不容忽視。若忽略雲霧輸入，將嚴重低估森林總水分和養分的輸入(Lovett et al. 1982)。尤其在雲霧輸入比例較高的冬、春季實行短期研究，因忽略雲霧而低估森林總水分和養分輸入的情形會更加嚴重。此外，忽略雲霧輸入亦可能誤判冠層交換作用情形。比較考慮和忽略雲霧輸入的冠層交換作用結果發現： $H^+$ 和  $SO_4^{2-}$ -S 在考慮雲霧的時候，由冠層留置(t-test,  $p<0.05$ )；但在忽略雲霧時，卻呈現不受冠層留置或淋洗(t-test,  $p>0.05$ )。而  $Cl^-$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 則是在考慮雲霧時，不由冠層留置或淋洗(t-test,  $p>0.05$ )；在忽略雲霧時，呈現由冠層淋洗(t-test,  $p<0.05$ ) (圖 25、圖 26)。由此可以說明探討本樣區冠層交作用時，雲霧攔截的養分輸入是不容忽略的，否則可能誤判冠層的交互作用。

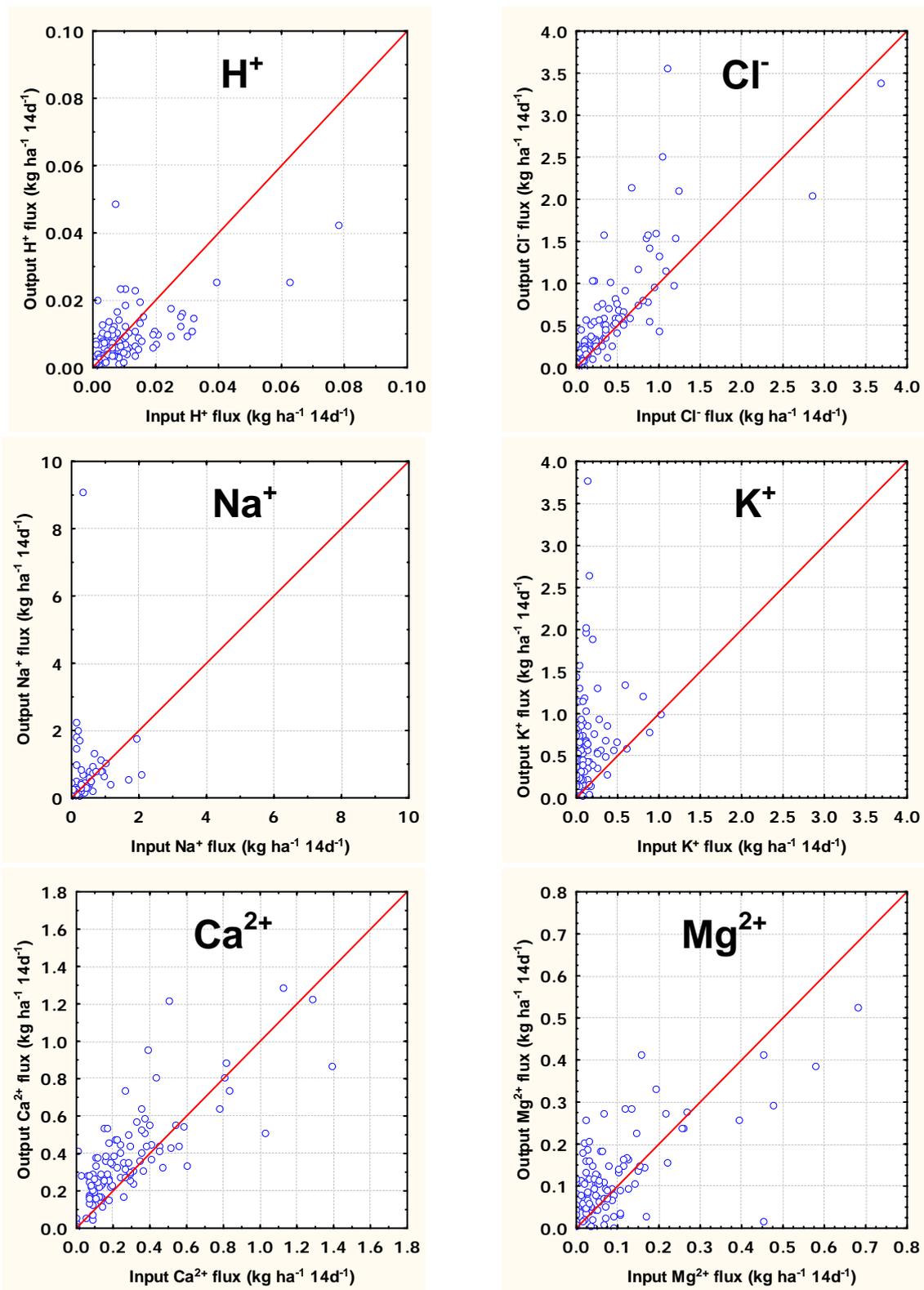


圖 26 忽略雲霧攔截，棲蘭山樣區冠層養分的交互作用。x 軸、y 軸分別為輸入(雨水)與輸出(穿落水+幹流水)冠層的養分。空心圓點為每 2 週一次的取樣記錄。對角線為 1:1 線。當空心圓點偏 x 軸時，表養分由冠層留置；偏 y 軸時，表養分由冠層淋洗。

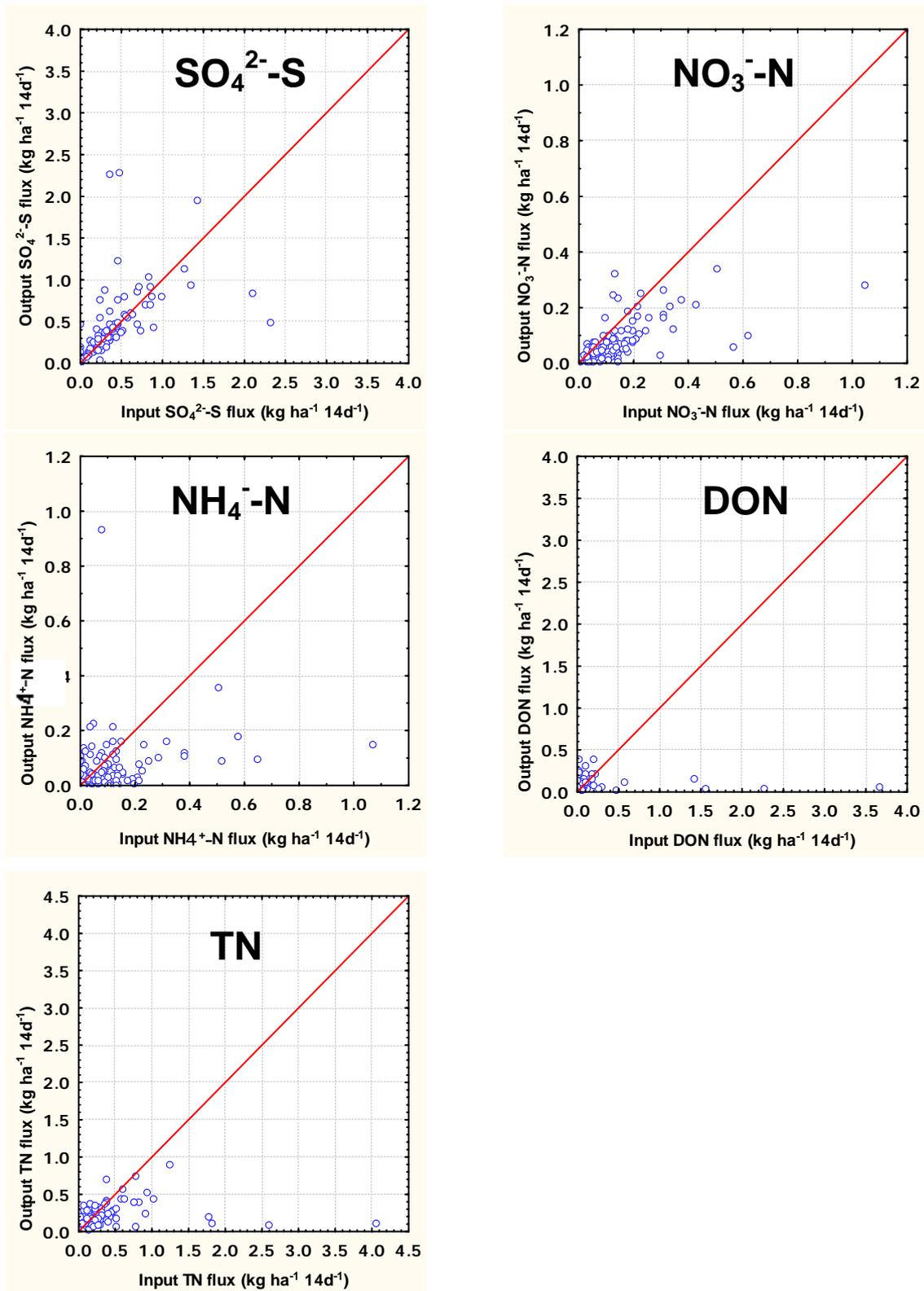


圖 26 忽略雲霧攔截，棲蘭山樣區冠層養分的交互作用。x 軸、y 軸分別為輸入(雨水)與輸出(穿落水+幹流水)冠層的養分。空心圓點為每 2 週一次的取樣記錄。對角線為 1:1 線。當空心圓點偏 x 軸時，表養分由冠層留置；偏 y 軸時，表養分由冠層淋洗。(續)

### 5.3.2 酸沉降對森林生態系養分循環的影響

許多研究證實，酸沉降對森林生態系有不利的影響。而在酸沉降的研究中， $\text{SO}_4^{2-}$ -S 和 N 沉降格外受到重視，因為  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  為主要的致酸物質，由  $\text{SO}_x$  和  $\text{NO}_x$  轉化而來。以下藉由比較  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 和 N 的實際沉降量和臨界沉降量，推測本樣區受酸沉降的可能影響，和是否遭受森林衰退的威脅。

#### ■ $\text{SO}_4^{2-}$ -S

比較本研究樣區與台灣福山、坪林、蓮華池、畢祿溪、扇平和太麻里 6 個森林生態系的  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 年沉降量，發現台灣森林  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 的年沉降量介於  $10.3\sim 44.7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。而本樣區  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 的年沉降量 ( $14.1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) 與畢祿溪 ( $10.3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) 和太麻里 ( $12.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) 相近(表 11)。然而，不同森林對酸性物質的緩衝能力可能有所不同。國立中央大學大氣物理所(2004)曾對此 6 個森林生態系  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 的臨界沉降量進行估算，並與實測資料比較，發現：此 6 個森林  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 的沉降量均遠超過其臨界負荷，其中福山  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 的沉降量更超過臨界負荷的 10 倍以上。雖然臨界負荷隨樣區而異，但除了坪林外，其餘 5 個森林  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 的臨界負荷在  $3\sim 5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。倘若以此臨界負荷做為本樣區  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 臨界負荷的參考值，本樣區與台灣其他森林結果相同，均是  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 沉降量超過臨界負荷。

#### ■ N

而本研究樣區 N 的年沉降量 ( $15.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) 與台灣福山 ( $17.9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) (林登秋 et al. 1998)、蓮華池 ( $13.9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) (Hsiao et al. 2007)，和烏石坑 ( $11.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) (薛美莉 2000) 的結果相近。相對於  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 高度變化的沉降量，台灣森林 N 年沉降量的變化小。N 的臨界沉降量隨母岩特性和  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 沉降量而異 (Schulze et al. 1989)，森林的 N 臨界負荷量約為  $10\sim 20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  (Bobbink and Roelofs 1995)。本樣區 N 的年沉降量落於其範圍內，但本樣區的 N 臨界負荷仍未知，無從觀察實際 N 沉降量和臨界負荷的關係。

表 11 台灣森林  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 年沉降量與臨界負荷量 ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ )。

	Site						
	Fushan	Pinglin	Lianhuachi	Piluchi	Shanping	Taimali	Chi-Lan Mountain
$\text{SO}_4^{2-}$ -S deposition	44.7	43.3	22.3	10.3	28.0	12.0	14.1
$\text{SO}_4^{2-}$ -S critical load	3.7	11.7	3.3	5.0	3.3	4.0	-

註：棲蘭山為本研究資料，其他樣區資料取自國立中央大學大氣物理所(2004)。

N 沉降除與酸沉降有關，亦被證實與森林的 N 淋洗有關(Bobbink and Roelofs 1995, Dise and Wright 1995)。Dise and Wright(1995)於歐洲 65 個森林和集水區的研究中指出：N 沉降量 $<10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  沒有顯著 N 淋洗、 $10\sim 25 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  一些樣區發生 N 淋洗、 $>25 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  所有樣區均發生 N 淋洗。本研究樣區 N 的年沉降量為  $15.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，因此，可能有 N 淋洗的現象發生。N 淋洗的型式與植物利用 N 的形式有關。如在德國雲杉林的根明顯地吸收  $\text{NH}_4^+$ ， $\text{NO}_3^-$  則留在土壤水中，最後淋洗，以地下水的形式離開森林生態系(Schulze 1989)。

綜合本樣區  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 和 N 沉降的結果。如果酸沉降確實是北美及歐洲大規模森林衰退的主因，本樣區和台灣其他森林則可能也已面臨森林衰退的威脅。然而，目前這些森林尚未發現有森林衰退的情形(國立中央大學大氣物理所 2004)。台灣的森林生態系尚未因酸性沉降而出現森林衰退的可能原因是：森林在承受逆壓到出現反應，有時間的延遲(Bormann 1985)。若持續污染，假以時日，亦可能出現大規模森林衰退的現象。

## 5.4 土壤滲流水量的估算

本研究完成後，利用本研究的雨水、霧水和截留水量，以水文平衡的概念，能進而估算本樣區的土壤滲流水量。樣區的水文平衡能以圖 27 表示。假設樣區逕流的輸入量等於輸出量、土壤水的變化量為 0。樣區森林的水分來自雨水和霧水，而輸出森林的水分由截留的蒸發、蒸散，和地面蒸發 3 部分組成。但因地面的蒸發在低地雨林非常地小，大部份的山區森林將之忽略(Bruijnzeel and Proctor 1994)，故在此也忽略不計。蒸散量以羅勻謙(2004)利用樹液流估算本樣區蒸散量的實測結果帶入。羅勻謙(2004)的結果顯示：蒸散量佔總水分輸入量的 6%，經計算得 255 mm。故樣區的土壤滲流水量由輸入(雨水+霧水)與輸出(蒸發量+蒸散量)樣區水量的差值求得，為 3341 mm，是雨量的 83.4%。

$$\text{Rainfall} + \text{Fogwater} = \text{Evaporation} + \text{Transpiration} + \text{Seepage}$$

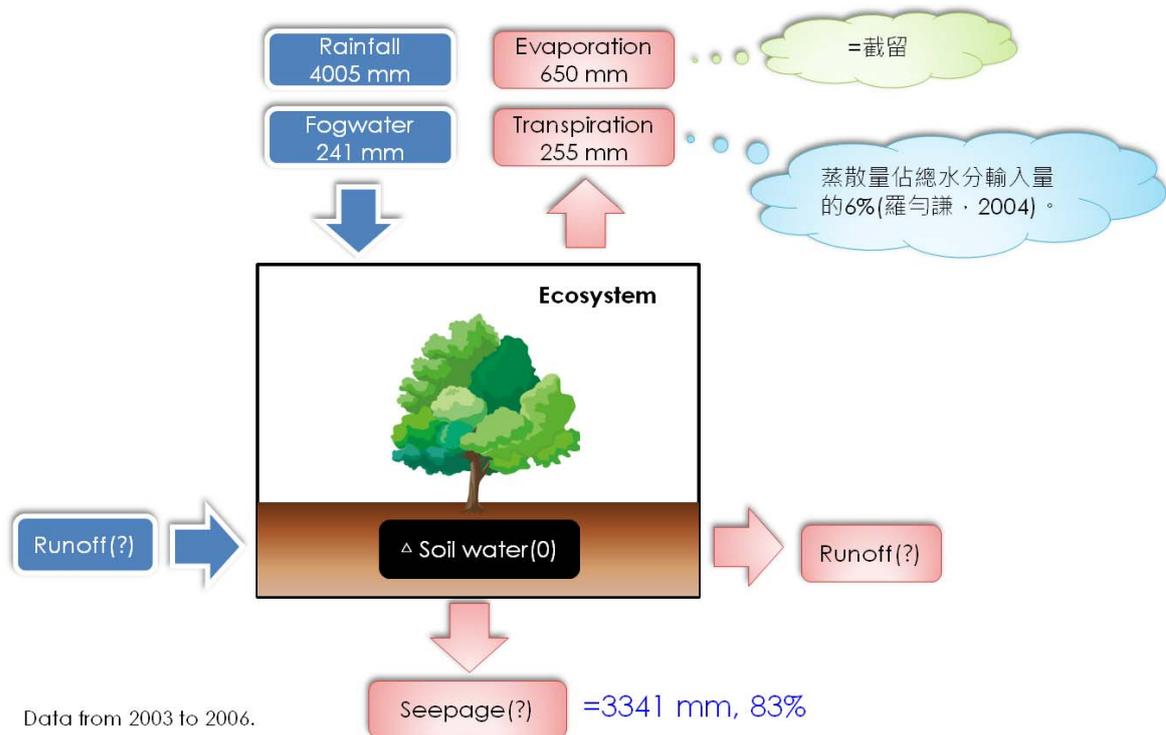


圖 27 棲蘭山樣區水文收支。黑框表示森林生態系；、 分別表示輸入、輸出森林的水分。



## 6. 結論

本研究概述棲蘭山樣區水分與養分流量的收支。5 年的研究資料顯示：(1)霧水雖僅提供本樣區極少的水量(6%)，卻提供超過 1/4 森林的養分，可見雲霧對本樣區養分收支的重要性不容忽視。忽略雲霧攔截對本樣區水文和養分收支的影響包括：低估森林總水分和養分的輸入、計算冠層水文平衡時，可能低估森林的截留水量，以及可能誤判冠層的交互作用。(2)雖然霧水的總當量濃度高於雨水，但樣區的養分卻主要由雨水所貢獻，此由霧水水量相較雨量低的輸入量解釋。(3)此外，本樣區可能已面臨酸性沉降的威脅，和森林 N 淋洗的現象發生。



## 7. 未來研究建議

本研究完成棲蘭山樣區水分與養分的收支。未來若欲再對本樣區進行大氣沉降的研究，建議可朝氣流來源和酸沉降臨界負荷量進行探討。關於氣流來源，可以 HYSPLIT (Hybrid Single-Practice Lagrangian Integrated Trajectory)<sup>11</sup> 氣流軌跡模式對樣區雨水樣本進行追蹤，試圖觀察不同季節(或氣候條件)離子來源的差異。而酸沉降臨界負荷量(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-S 和 N)的估算，可以參考國立中央大學大氣物理所(2004)的研究。此研究是利用亞洲酸雨模式先對土壤的風化速率進行估算，隨後再以土壤穩定標準來推估臨界負荷量。模式中所需土壤風化速率的參數均可在其研究中得到。因此，只要取得亞洲酸雨模式，即可求得本樣區的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-S 臨界負荷量。而 N 臨界負荷量的估算，除了須包括 N 的沉降量，尚需要氮的礦化(mineralization)和生物固定(immobilization)等資料。故只要本樣區擁有這些資料，以及亞洲酸雨模式，亦可估算 N 的臨界負荷量。

---

<sup>11</sup> <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>。



## 8. 引用文獻

- 朱慧君。2005。臺灣扁柏森林生態系養分存量與枯落物養分流量之研究。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 吳敏如。2003。以微氣候模式估算雲霧森林中台灣扁柏的雲霧沈降量。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 林文龍和林能暉。2004。福山森林生態系之大氣酸沉降。中華民國環境保護學會期刊，27:242-258。
- 林志偉。2007。鴛鴦湖地區台灣扁柏老齡林及更新林穿落水量之研究。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 林登秋、金恆鑣、夏禹九和王立志。1998。福山試驗林硫酸根與無機氮沉降之探討。中華林學季刊 31:153-164。
- 林登秋、金恆鑣、夏禹九、王立志、黃正良和劉瓊彬。1996。福山試驗林雨水成分來源之探討：多變數因子分析。中華林學季刊，29:121-131。
- 國立中央大學大氣物理所。2004。大氣污染物長程傳輸衝擊評估及酸雨監測分析。EPA-93-FA11-03-A051，行政院環境保護署。
- 陳子弘。2006。鴛鴦湖地區台灣扁柏幹流水量之估算。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 陳雄文、王正雄、鄭資英、簡宗昌、許元正、米文慧、胡雅容、李平泉、郭季華、徐美榕、董子棟和楊禮源。2002。台灣地區酸沉降物質現況調查。境檢驗所環境調查研究年報，9:1200。
- 陳耀德。2003。鴛鴦湖森林生態系大氣養分輸入之探討。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 彭啟明、林能暉和張良輝(2003)。宜蘭地區酸沉降瘦長程輸送影響之研究。宜蘭縣環境保護局，[www.ilepb.gov.tw](http://www.ilepb.gov.tw)，研究及計畫執行成果，92年度。
- 黃威巽。2006。2001年東亞硫沉降之模擬。國立中央大學大氣物理研究所碩士論文，桃園。
- 黃昭豪。2007。台灣扁柏森林冠層間之雲霧化學及其沉降量估算。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。

- 葉青峯。2004。台灣扁柏森林的生物量及雲霧沈降量估算。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 劉美娟。2004。鴛鴦湖森林生態系地表苔癩植物對養分循環之影響。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 劉啟文。2005。亞洲沙塵好發期間雲水化學特性分析。國立中央大學大氣物理研究所碩士論文，桃園縣。
- 鄧振華。2006。鴛鴦湖台灣扁柏天然下種更新林附生性苔癩植物組成、分佈與生物量之研究。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- 薛美莉。2000。臺灣中部山區降雨水質及酸性沉降。特有生物研究，2:21-33。
- 羅勻謙。2004。鴛鴦湖地區台灣扁柏森林生態系蒸散作用之研究。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文，花蓮縣。
- Amezaga, I., A. G. Arias, M. Domingo, A. Echeandia and M. Onaindia. 1997. Atmospheric deposition and canopy interactions for conifer and deciduous forests in Northern Spain. *Water Air and Soil Pollution* 97:303-313.
- Beiderwieden, E., A. Schmidt, Y. J. Hsia, S. C. Chang, T. Wrzesinsky and O. Klemm. 2007. Nutrient input through occult and wet deposition into a subtropical montane cloud forest. *Water, air ,and soil pollution* 186:273-288.
- Bobbink, R. and J. G. M. Roelofs. 1995. Nitrogen critical loads for natural and semi-natural ecosystems: The empirical approach. *Water, Air, & Soil Pollution* 85:2413-2418.
- Bormann, F. H. 1985. Air pollution and forests: an ecosystem perspective. Pages 434-441. American Institute of Biological Sciences.
- Bredemeier, M. 1988. Forest canopy transformation of atmospheric deposition. *Water, Air, and Soil Pollution* 40:121-138.
- Bruijnzeel, L. A. and J. Proctor. 1994. Hydrology and Biogeochemistry of tropical montane cloud forests: What do we really know? Pages 38-78 in: L. S. Hamilton, J. O. Juvik and F. N. Scatena (eds.). *Tropical montane cloud forest*, New York.
- Cavelier, J., M. Jaramillo, D. Solis and D. de León. 1997. Water balance and nutrient inputs in bulk precipitation in tropical montane cloud forest in Panama. *Journal of Hydrology* 193:83-96.

- Chang, S. C., I. L. Lai and J. T. Wu. 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., C. P. Wang, C. M. Feng, R. Rees, U. Hell and E. Matzner. 2007. Soil fluxes of mineral elements and dissolved organic matter following manipulation of leaf litter input in a Taiwan *Chamaecyparis* forest. *Forest Ecology and Management* 242:133-141.
- Chang, S. C., C. F. Yeh, M. J. Wu, Y. J. Hsia and J. T. Wu. 2006. Quantifying fog water deposition by in situ exposure experiments in a mountainous coniferous forest in Taiwan. *Forest Ecology and Management* 224:11-18.
- Chiwa, M., A. Crossley, L. J. Sheppard, H. Sakugawa and J. N. Cape. 2004. Throughfall chemistry and canopy interactions in a Sitka spruce plantation sprayed with six different simulated polluted mist treatments. *Environmental Pollution* 127:57-64.
- 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.
- Dawson, T. E. 1998. Fog in the California redwood forest: ecosystem inputs and use by plants. *Oecologia* 117:476-485.
- Dise, N. B. and R. F. Wright. 1995. Nitrogen leaching from European forests in relation to nitrogen deposition. *Forest Ecology and Management* 71:153-161.
- Fan, H. B. and W. Hong. 2001. Estimation of dry deposition and canopy exchange in Chinese fir plantations. *Forest Ecology and Management* 147:99-107.
- Gorham, E. 1998. Acid deposition and its ecological effects: a brief history of research. *Environmental Science & Policy* 1:153-166.
- Hsiao, H.-M., T.-C. Lin, J.-L. Hwong, C.-C. Huang and N.-H. Lin. 2007. Precipitation chemistry at the Lienhuachi experimental forest in central Taiwan. *Taiwan Journal of Forest Science* 22:1-13.
- Huber, A. and A. Iroumé. 2001. Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile. *Journal of Hydrology* 248:78-92.
- Igawa, M., T. Kase, K. Satake and H. Okochi. 2002. Severe leaching of calcium ions from fir needles caused by acid fog. *Environmental Pollution* 119:375-382.

- Johnson, D. W. and S. E. Lindberg. 1992. Atmospheric deposition and forest nutrient cycling: a synthesis of the integrated forest study. Springer-Verlag, New York.
- Krupa, S. V. 2003. Effects of atmospheric ammonia (NH<sub>3</sub>) on terrestrial vegetation: a review. *Environmental Pollution* 124:179-221.
- Lang, G. E., W. A. Reiners and R. K. Heier. 1976. Potential alteration of precipitation chemistry by epiphytic lichens. *Oecologia* 25:229-241.
- Levia, D. F. and E. E. Frost. 2003. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. *Journal of Hydrology* 274:1-29.
- Lindberg, S. E., G. M. Lovett, D. D. Richter and D. W. Johnson. 1986. Atmospheric deposition and canopy interactions of major ions in a forest. *Science* 231:141-145.
- Llorens, P. and F. Domingo. 2007. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology* 335:37-54.
- Lovett, G. M., W. A. Reiners and R. K. Olson. 1982. Cloud droplet deposition in subalpine balsam fir forests: hydrological and chemical inputs. *Science* 218:1303-1304.
- Matzner, E. 1989. Acidic precipitation: case study solling. Pages 39-83 in: D. C. Adriano and M. Havas (eds.). *Acidic precipitation, Canada*.
- McJannet, D., J. Wallace and P. Reddell. 2007. Precipitation interception in Australian tropical rainforests: II. Altitudinal gradients of cloud interception, stemflow, throughfall and interception. *Hydrological Processes* 21:1703-1718.
- Pitelka, L. F. and D. J. Raynal. 1989. Forest decline and acidic deposition. *Ecology* 70:2-10.
- Schulze, E. D. 1989. Air pollution and forest decline in a spruce (*Picea abies*) forest. Pages 776-783. *American Association for the Advancement of Science*.
- Schulze, E. D., W. Vries, M. Hauhs, K. Rosén, L. Rasmussen, C. O. Tamm and J. Nilsson. 1989. Critical loads for nitrogen deposition on forest ecosystems. *Water, Air, & Soil Pollution* 48:451-456.
- Smith, R. L. and T. M. Smith. 2000. *Elements of ecology*. 4 th edition. Addison Wesley Longmn.

- Stachurski, A. and J. R. Zimka. 2002. Atmospheric deposition and ionic interactions within a beech canopy in the Karkonosze Mountains. *Environmental Pollution* 118:75-87.
- Stumm, W., L. Sigg and J. L. Schnoor. 1987. Aquatic chemistry of acid deposition. *Environmental Science & Technology* 21:8-13.
- Takenaka, C. and T. Sasama. 2000. Ion exchange reactions on the stem surface of *Chamaecyparis obtusa* Sieb. et Zucc. *Trees - Structure and Function* 14:354-360.
- Taylor, G. E., D. W. Johnson and C. P. Andersen. 1994. Air pollution and forest ecosystems - A regional to global perspective. *Ecological Applications* 4:662-689.
- van Loon, G. W. and S. J. Duffy. 2000. Tropospheric chemistry-precipitation. Pages 90-114 *Environmental chemistry: a global prespective*. Oxford, New York.
- Vogelmann, H. W. 1973. Fog precipitation in the cloud forests of eastern Mexico. *23:96-100*.
- Weaver, P. L. 1972. Cloud moisture intereption in the Luquillo Mountains of Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science* 12:129-144.
- WRB. 1998. World Reference Base for Soil Resources.in F. a. A. O. o. t. U. Nations, editor. Rome.
- Xu, X. N., Q. Wang and E. Hirata. 2005. Precipitation partitioning and related nutrient fluxes in a subtropical forest in Okinawa, Japan. *Annals of forest science* 62:245-252.



## 9. 附錄

附錄 1 2002 年 5 月~2007 年 5 月雨水、霧水、幹流水與穿落水的導電度( $\mu\text{s cm}^{-1}$ )、pH 和養分濃度( $\text{mg l}^{-1}$ )。

	Rainfall					Fogwater				
	Min	Max	Median	Mean	SD	Min	Max	Median	Mean	SD
<b>Conductivity</b>	1.8	59.7	7.8	11.0	9.5	11.2	294.0	65.6	78.5	48.7
<b>H<sup>+</sup></b>	0.00	0.11	0.01	0.01	0.01	0.00	0.43	0.07	0.07	0.07
<b>Cl<sup>-</sup></b>	0.00	6.15	0.23	0.29	0.67	0.00	10.00	1.10	1.36	1.83
<b>Na<sup>+</sup></b>	0.00	4.13	0.15	0.22	0.60	0.01	6.73	0.66	0.77	1.25
<b>K<sup>+</sup></b>	0.00	0.97	0.08	0.10	0.13	0.00	2.02	0.26	0.27	0.30
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	0.00	1.07	0.21	0.17	0.22	0.06	7.48	0.39	0.56	0.95
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	0.00	0.63	0.06	0.06	0.08	0.00	0.83	0.15	0.16	0.16
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-S</b>	0.00	2.66	0.27	0.24	0.52	0.00	14.86	1.70	2.02	2.03
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N</b>	0.01	1.15	0.11	0.10	0.19	0.00	7.66	0.86	0.98	1.24
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N</b>	0.00	1.29	0.07	0.08	0.21	0.00	6.53	1.05	1.20	1.09
<b>DON</b>	0.00	5.38	0.04	0.08	0.68	0.00	5.33	0.11	0.20	0.63
<b>TN</b>	0.01	5.93	0.27	0.21	0.78	0.22	18.81	2.10	2.15	2.73

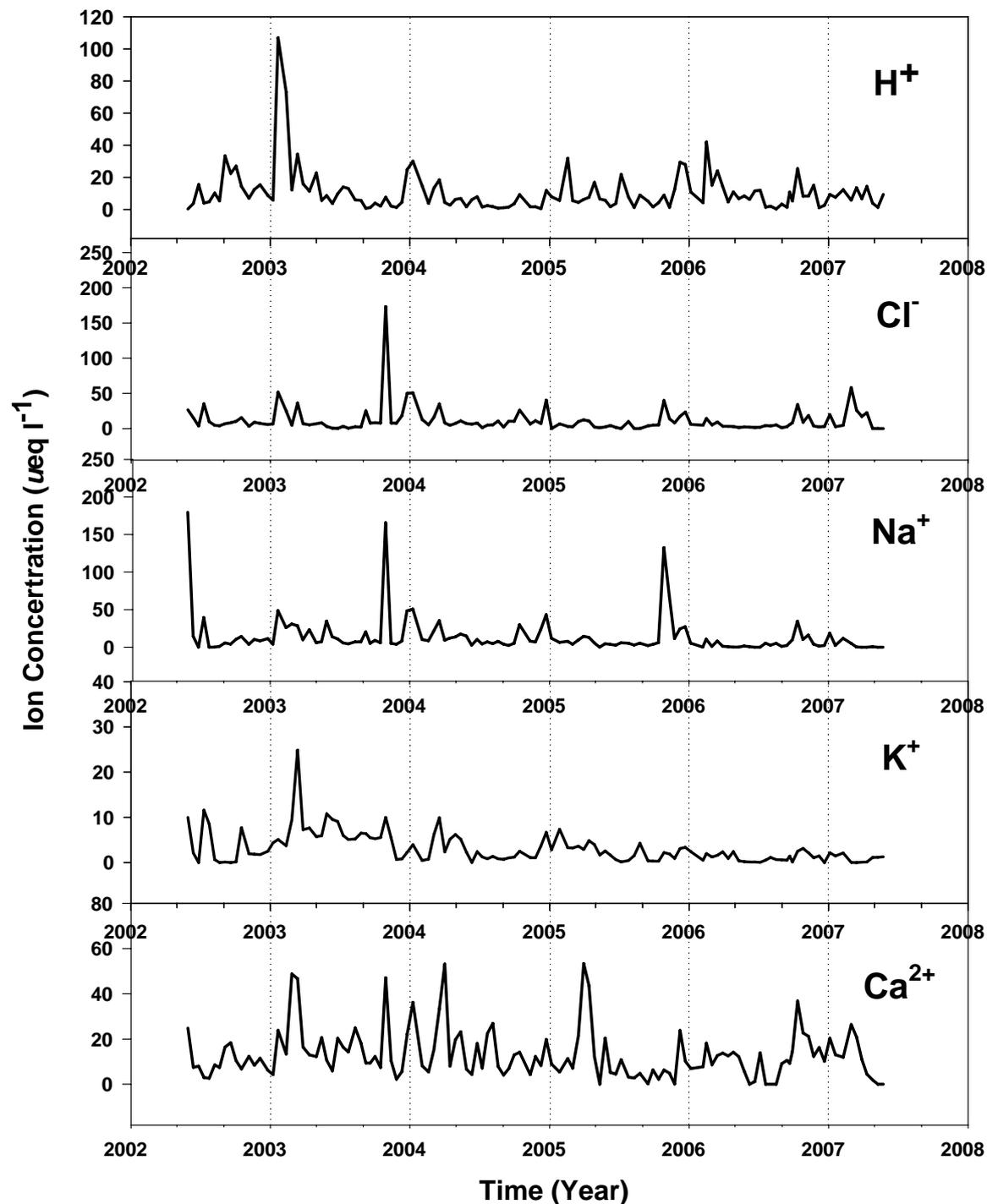
	Stemflow					Throughfall				
	Min	Max	Median	Mean	SD	Min	Max	Median	Mean	SD
<b>Conductivity</b>	4.4	167.9	31.0	38.8	29.8	2.9	70.1	9.2	12.8	10.3
<b>H<sup>+</sup></b>	0.00	0.38	0.05	0.04	0.08	0.00	0.07	0.01	0.00	0.01
<b>Cl<sup>-</sup></b>	0.00	6.89	0.55	0.48	1.11	0.00	8.33	0.43	0.41	1.06
<b>Na<sup>+</sup></b>	0.05	2.84	0.38	0.28	0.47	0.00	13.96	0.22	0.32	1.68
<b>K<sup>+</sup></b>	0.00	4.37	0.21	0.21	0.53	0.02	3.85	0.49	0.43	0.63
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	0.01	2.45	0.21	0.20	0.40	0.00	2.31	0.33	0.26	0.39
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	0.00	0.41	0.05	0.05	0.08	0.00	1.01	0.10	0.09	0.16
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-S</b>	0.00	4.40	0.31	0.27	0.62	0.01	5.20	0.30	0.29	0.79
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N</b>	0.00	0.26	0.01	0.01	0.03	0.00	0.71	0.07	0.06	0.12
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N</b>	0.00	1.70	0.02	0.03	0.21	0.00	0.85	0.04	0.05	0.16
<b>DON</b>	0.00	0.68	0.14	0.09	0.12	0.00	0.62	0.08	0.06	0.11
<b>TN</b>	0.00	1.97	0.19	0.12	0.28	0.03	1.50	0.22	0.14	0.31

附錄 2 2003~2006 年雨水、霧水、幹流水與穿落水的水量(mm)與養分流量(kg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>)。

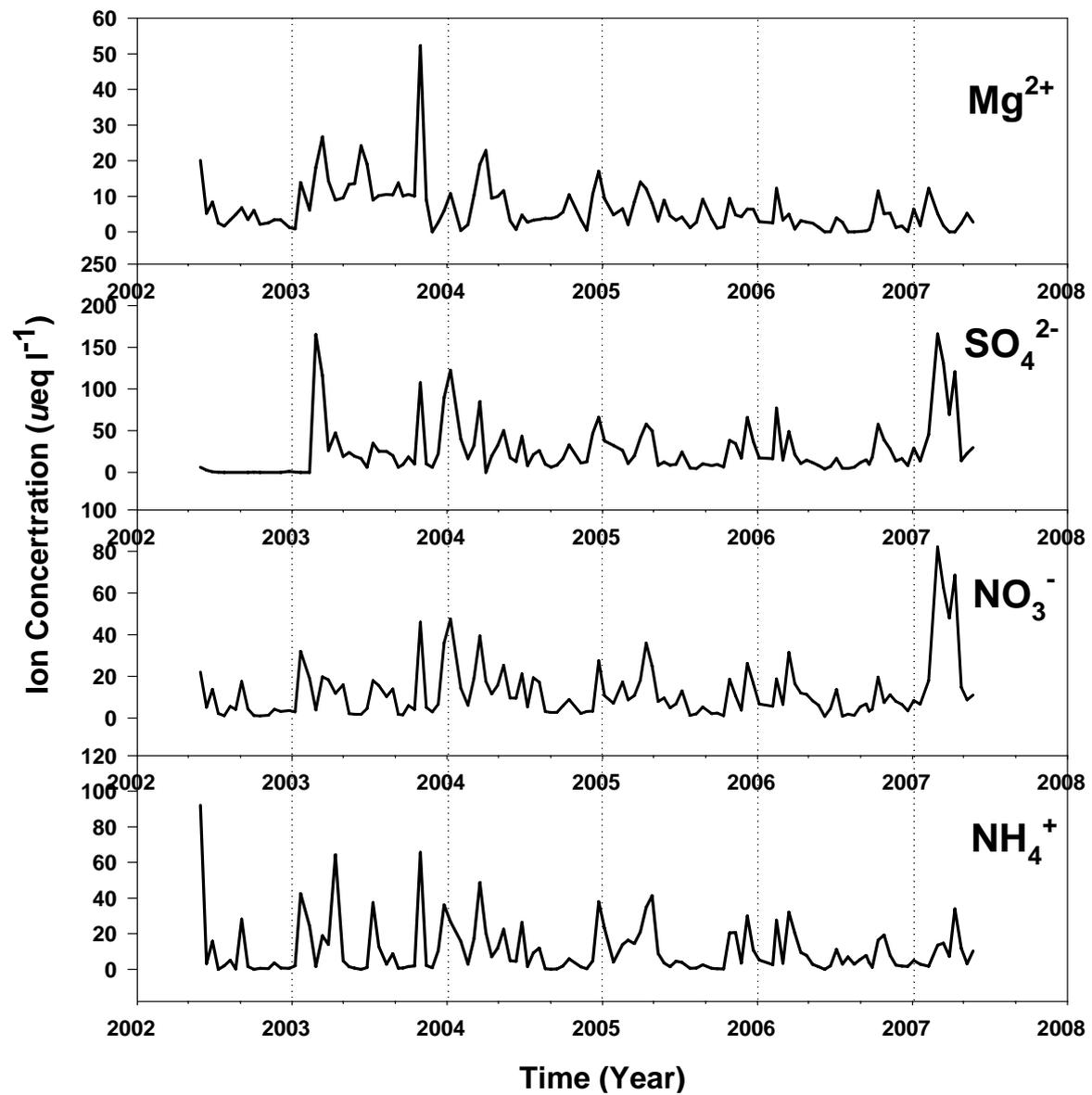
	Rainfall						Fogwater					
	2003	2004	2005	2006	Mean	SD	2003	2004	2005	2006	Mean	SD
<b>H<sub>2</sub>O (mm)</b>	2752	3953	5288	4025	4005	1036	298	245	205	217	241	42
<b>H<sup>+</sup></b>	0.19	0.11	0.34	0.27	0.23	0.10	0.24	0.26	0.09	0.11	0.17	0.09
<b>Cl<sup>-</sup></b>	10.84	9.93	10.46	6.60	9.46	1.94	5.00	5.70	2.78	2.08	3.89	1.74
<b>Na<sup>+</sup></b>	7.85	8.43	10.04	3.59	7.48	2.75	1.75	3.80	1.90	1.23	2.17	1.12
<b>K<sup>+</sup></b>	6.24	2.56	3.15	1.38	3.33	2.08	1.18	0.69	0.64	0.40	0.73	0.33
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	6.14	6.94	6.15	7.03	6.57	0.49	0.92	1.83	1.02	0.61	1.09	0.52
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	3.62	2.46	2.42	0.85	2.34	1.14	0.42	0.59	0.26	0.23	0.38	0.17
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-S</b>	7.22	10.97	10.42	8.84	9.36	1.69	3.84	5.92	5.24	3.92	4.73	1.02
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N</b>	2.48	3.53	3.81	3.63	3.36	0.60	2.72	2.02	1.99	1.92	2.16	0.37
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N</b>	2.79	2.46	3.55	3.15	2.99	0.47	3.54	2.08	2.03	2.39	2.51	0.71
<b>DON</b>	0.72	4.04	7.97	1.34	3.52	3.30	0.46	0.70	0.15	0.67	0.49	0.25
<b>TN</b>	3.87	9.10	14.73	7.74	8.86	4.50	5.74	4.76	1.91	4.33	4.18	1.63

	Stemflow						Throughfall					
	2003	2004	2005	2006	Mean	SD	2003	2004	2005	2006	Mean	SD
<b>H<sub>2</sub>O (mm)</b>	99	136	171	111	129	32	2402	3426	4527	3512	3467	868
<b>H<sup>+</sup></b>	0.06	0.05	0.04	0.03	0.04	0.01	0.08	0.13	0.23	0.20	0.16	0.07
<b>Cl<sup>-</sup></b>	0.79	0.75	0.39	0.31	0.56	0.25	11.58	16.40	10.88	10.15	12.25	2.83
<b>Na<sup>+</sup></b>	0.44	0.29	0.30	0.19	0.31	0.10	11.96	6.64	6.94	4.46	7.50	3.17
<b>K<sup>+</sup></b>	0.53	0.16	0.15	0.09	0.23	0.20	11.75	9.63	13.39	17.96	13.18	3.54
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	0.30	0.16	0.16	0.40	0.26	0.12	6.84	8.80	8.87	9.11	8.40	1.05
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	0.11	0.04	0.05	0.04	0.06	0.03	3.70	1.71	3.24	2.32	2.74	0.90
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-S</b>	0.32	0.39	0.35	0.30	0.34	0.04	7.22	9.06	11.34	10.31	9.48	1.77
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N</b>	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	1.39	1.99	2.26	1.96	1.90	0.36
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N</b>	0.04	0.03	0.04	0.06	0.04	0.01	1.80	1.32	1.45	2.24	1.70	0.41
<b>DON</b>	0.10	0.09	0.13	0.13	0.11	0.02	1.75	2.17	1.76	2.78	2.12	0.48
<b>TN</b>	0.14	0.13	0.19	0.17	0.16	0.03	4.74	4.78	5.31	5.84	5.17	0.52

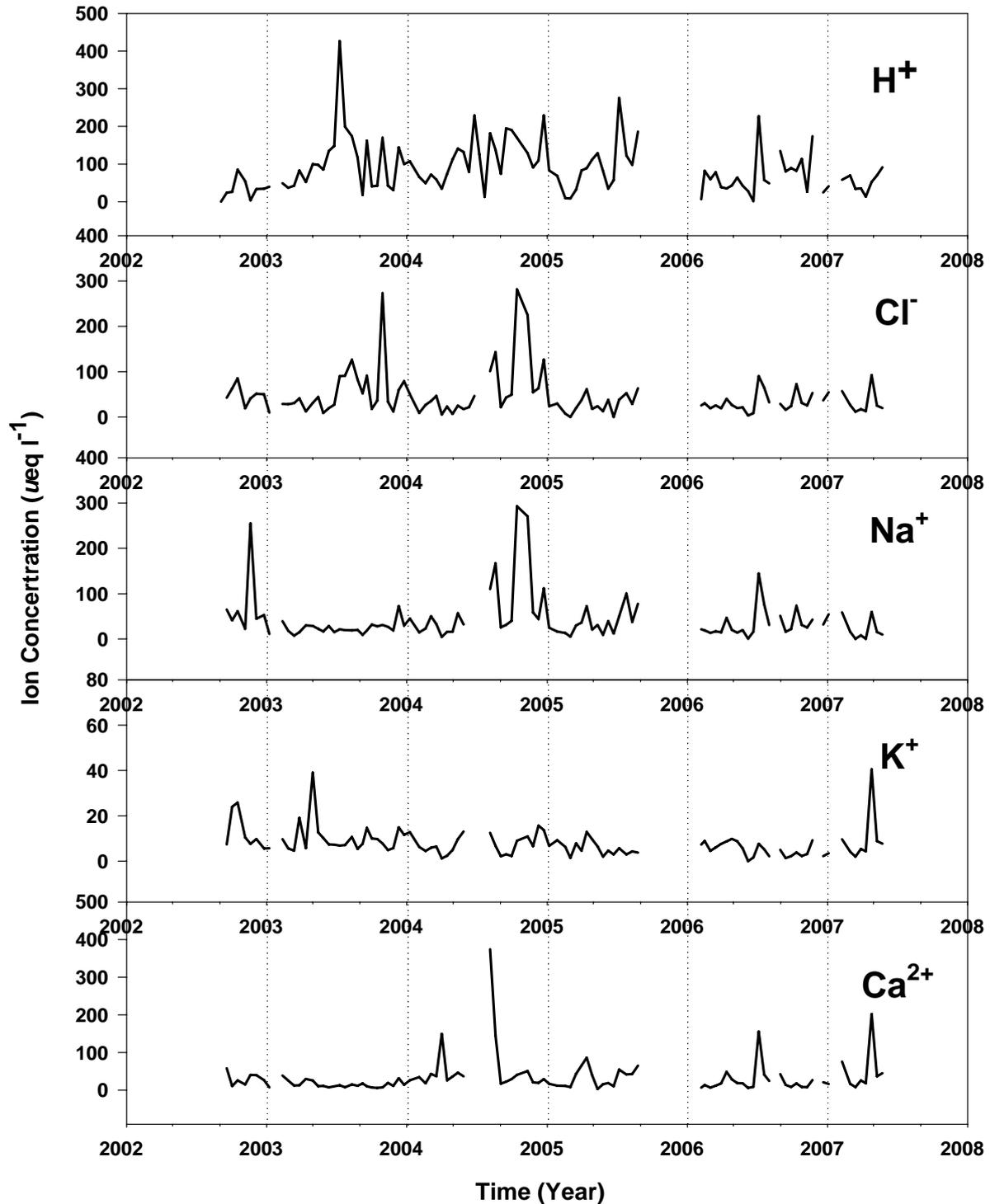
附錄 3 2002 年 5 月~2007 年 5 月雨水離子濃度的時間變化。



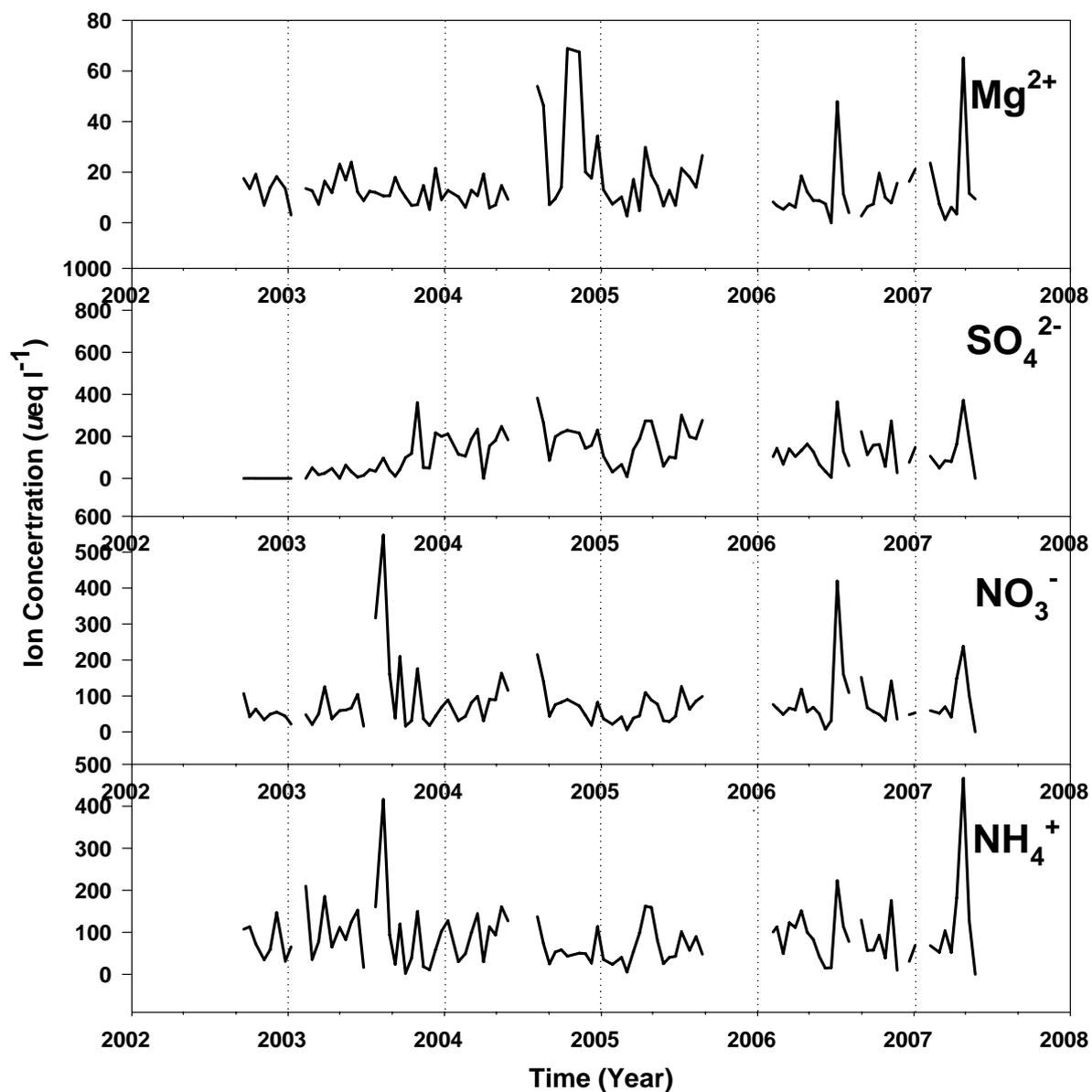
附錄 3 2002 年 5 月~2007 年 5 月雨水離子濃度的時間變化。(續)



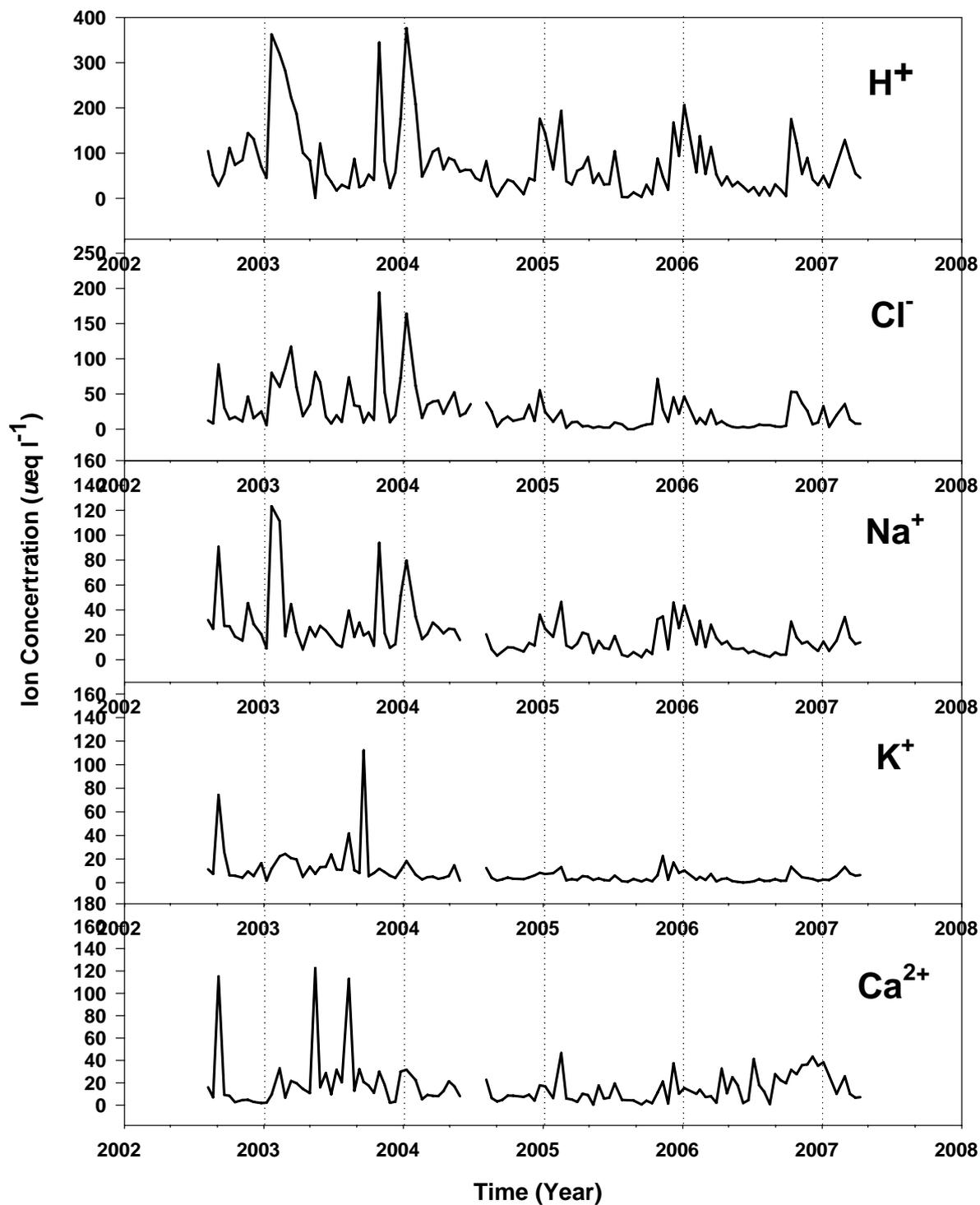
附錄 4 2002 年 5 月~2007 年 5 月霧水離子濃度的時間變化。2004 年 6~7 月樣本遺失、2005 年 9~12 月更換雲霧收集器，故無離子濃度資料。其餘時段離子濃度的闕漏為雲霧收集器沒有收集到霧水或所收集的霧水滿溢霧水收集瓶的情形。



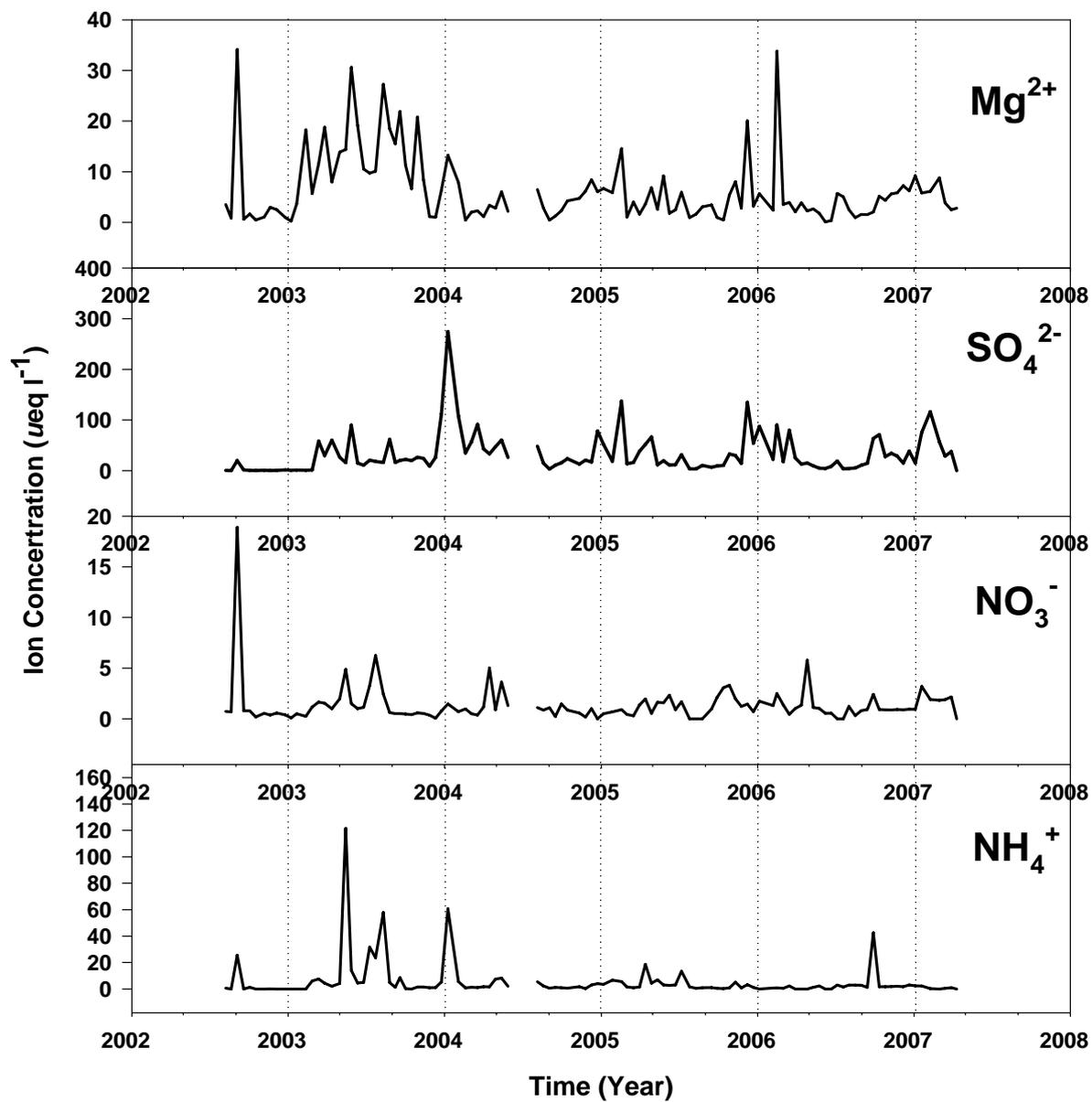
附錄 4 2002 年 5 月~2007 年 5 月霧水離子濃度的時間變化。2004 年 6~7 月樣本遺失、  
2005 年 9~12 月更換雲霧收集器，故無離子濃度資料。其餘時段離子濃度的闕漏  
為雲霧收集器沒有收集到霧水或所收集的霧水滿溢霧水收集瓶的情形。(續)



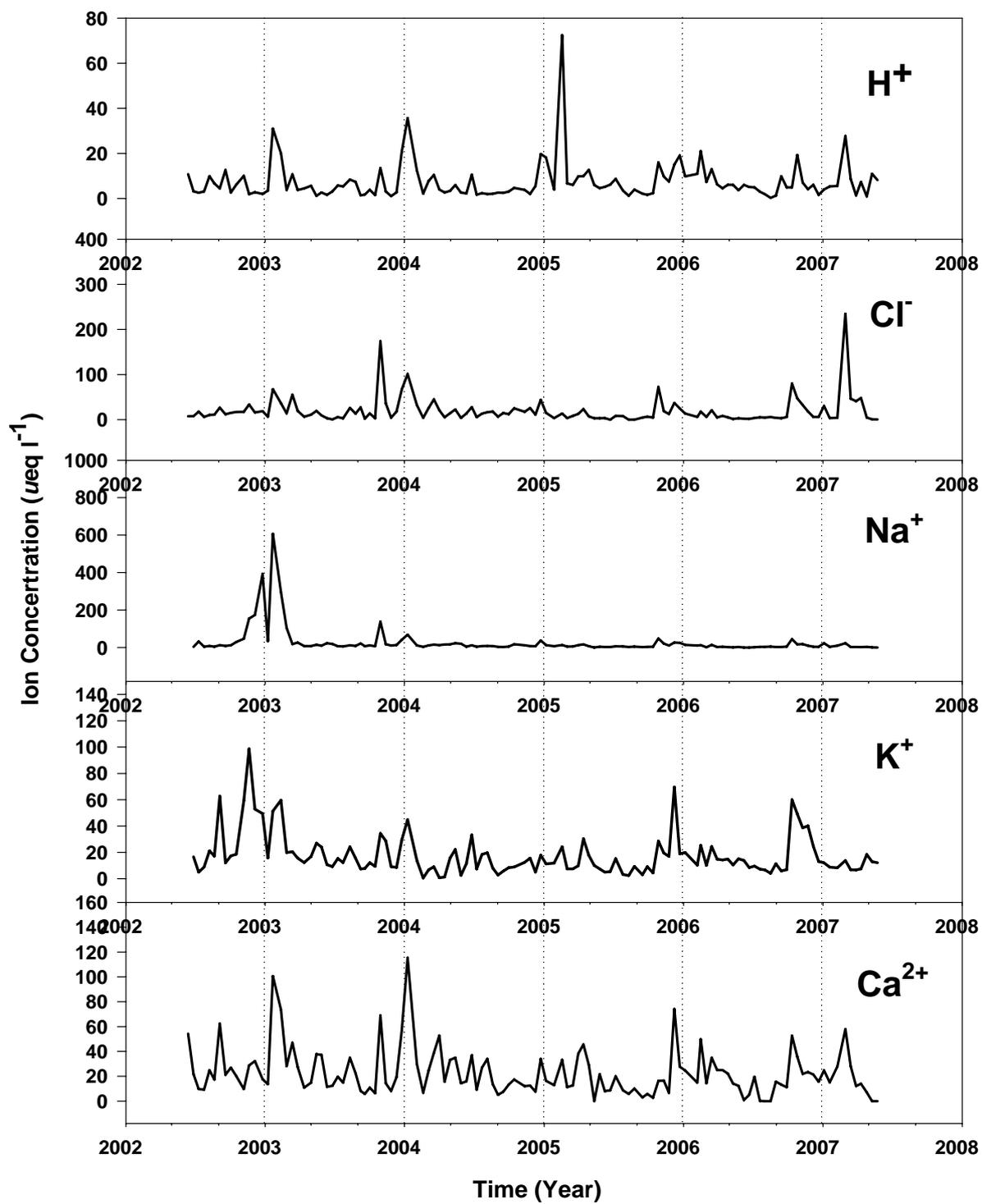
附錄 5 2002 年 5 月~2007 年 5 月幹流水離子濃度的時間變化。2004 年 6~8 月樣本遺失，  
2006 年 10 月沒有記錄幹流水量，故無離子濃度資料。



附錄 5 2002 年 5 月~2007 年 5 月幹流水離子濃度的時間變化。2004 年 6~8 月樣本遺失，  
2006 年 10 月沒有記錄幹流水量，故無離子濃度資料。(續)



附錄 6 2002 年 5 月~2007 年 5 月穿落水離子濃度的時間變化。



附錄 6 2002 年 5 月~2007 年 5 月穿落水離子濃度的時間變化。(續)

