

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

台灣扁柏森林冠層間之雲霧化學
及其沉降量估算

Size-fractionating fog chemistry and deposition at different
canopy heights in a yellow cypress forest.



研究生：黃昭豪

中華民國九十六年一月

Abstract

Fog water chemistry in two droplet size classes was investigated at four heights of a *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana* forest in northeastern Taiwan from December 2005 to June 2006. The size-cuts of the home-made “sf-CASCC type” fog collectors were 30 and 7 μm for the front and rear compartments, respectively. Purposes of this study were to investigate the effects of forest canopy on fog water chemistry and to compare the ion deposition fluxes estimated by separating the canopy into two layers and the traditional one-layer approach.

From June 2003 to June 2006 the average annual fog duration of this site was 3118 hr. Daily fog duration showed a strong seasonality, with more fog occurred in spring and winter. The occurrence of fog had a strong correlation with wind direction.

SO_4^{2-} was the dominant ion in both size classes of the fog water. Compared to bulk precipitation, fog water had 2- to 27-fold higher ion concentrations. Differences in ion concentrations existed between large and small droplets too, especially for NH_4^+ . Ocean might be not the sole source of fog water ions. HNO_3 and H_2SO_4 were the main source of acidity, which was partly neutralized by NH_3 and the resulting pH of fog water were higher than 3.5 during the study period. Ion concentrations were altered when fog entered the canopy: the changes in ion concentrations from L1 (above the canopy) to L2 (middle of the canopy) were more noticeable for Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , and Cl^- of the small fog droplets; on the other hand, significant increase in ion concentration for large droplets was found at L3 (height of the lowest branch). The relative composition of ions in large droplets did not change much between collectors, which might imply a similar chemical composition of droplets larger than 30 μm and a homogeneous interception of them by the canopy. On the contrary, the canopy intercepted the smaller fog droplets in different efficiency, resulting in a change in relative ion composition of the smaller fog droplets from top to bottom of the canopy.

The estimated fog deposition rate from May 2005 to April 2006 was 204 mm, which accounted for 4% of total atmospheric water deposition. The fog water deposition from January 2006 to March 2006 was estimated to be 13.2 and 32.3 mm to the top- and bottom-layer of the canopy, respectively, while the ion deposition at the same period was 1700 and 3250 g ha^{-1} for the two layers. Compared to the results of this study, the traditional one-layer approach overestimated the NO_3^- and SO_4^{2-} deposition by 54% and 28%, respectively, and underestimated the K^+ deposition by 17%.

Keywords: *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana* forest, fog deposition, canopy, cloud forest, fog chemistry.

摘要

本研究自 2005 年 12 月至 2006 年 6 月間，在台灣東北部的台灣扁柏天然下種更新林中，進行四種高度、兩個顆粒區間的雲霧收集。所使用的儀器為自製 sf-CASCC 型的雲霧收集器，size cut 在前後依序為 $30\ \mu\text{m}$ 以及 $7\ \mu\text{m}$ 。研究的目的是為森林冠層對於雲霧化學的影響，以及比較將冠層區分成兩層估算離子沉降與不予分層估算之間的差異。

在 2003 年 6 月至 2006 年 6 月此區的年平均雲霧籠罩時間為 3118 小時。每日的雲霧籠罩時間有很強的季節性，雲霧大多發生在冬季至春季間。另外雲霧的產生與風向有明顯的相關。

兩個粒徑區間的雲霧皆以 SO_4^{2-} 為優勢離子。與降雨相比，雲霧水的離子濃度要高於降雨 2-27 倍。大小雲霧顆粒間離子濃度也具有差異，尤其在 NH_4^+ 特別明顯。海洋可能不是雲霧水中離子唯一的來源。 HNO_3 與 H_2SO_4 為本區主要的酸源，部分酸源受 NH_3 的中和作用，因此使得本區在研究期間的 pH 要高於 3.5。當小顆粒雲霧自 L1(冠層頂端)進入至 L2(冠層中間)時， Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 的離子濃度有明顯的變化，而大顆粒雲霧則僅在 L3(冠層下緣)的位置離子濃度增加。比較所收集的大顆粒雲霧離子組成並未有明顯的變化，可能是因為 $30\ \mu\text{m}$ 以上的大顆粒雲霧間有相似的化學組成，並受到冠層均勻的攔截。冠層對於小顆粒雲霧的攔截則有不同的攔截效率，因而導致自冠層外部進入冠層內的小顆粒雲霧離子組成的變化。

估計 2004 年 5 月至 2006 年 4 月雲霧沉降 204 mm，約佔總大氣水沉降的 4%。2006 年 1 月至 2006 年 3 月雲霧在冠層上、下部分別沉降 13.2 mm 的水量，而總離子沉降依序為 1700 與 $3250\ \text{g ha}^{-1}$ 。一般不予分層的方式與本研究的沉降估算比較，一般的估算方式高估了 54% 的 NO_3^- 與 28% 的 SO_4^{2-} 以及低估了 17% 的 K^+ 沉降量。

關鍵字：台灣扁柏森霖，雲霧沉降，冠層，雲霧森林，雲霧化學

目錄

表目錄.....	vi
1. 前言.....	1
1.1 雲霧.....	1
1.2 雲霧與森林.....	2
1.3 森林雲霧沉降的估算.....	3
1.4 國內目前雲霧森林研究現況.....	4
2. 研究目的.....	5
3. 材料與方法.....	6
3.1 樣區概述.....	6
3.2 雲霧水收集.....	7
3.2.1 儀器架設.....	7
3.2.2 儀器選擇與製作.....	8
3.3 化學分析.....	15
3.4 雲霧沉降估算.....	16
4. 結果.....	20
4.1 雲霧氣象資料.....	22
4.2 基礎雲霧化學.....	25
4.3 冠層雲霧變化.....	28
4.4 雲霧沉降估算.....	33
5. 討論.....	34
5.1 雲霧物理.....	34
5.2 雲霧化學組成.....	35
5.3 冠層雲霧變化.....	38
5.4 雲霧沉降.....	38
6. 結論.....	40
7. 建議.....	40
8. 引用文獻.....	41

圖目錄

圖 1	研究位置及地形等高線圖。.....	6
圖 2	氣象塔近攝圖。.....	7
圖 3	雲霧收集器架設位置與冠層關係示意圖。.....	8
圖 4	上圖為收集器風速測量圖，下圖為風剖面測量示意圖。.....	12
圖 5	收集器風速剖面圖。.....	13
圖 6	分隔式雲霧收集器效能圖。.....	14
圖 7	各粒徑雲霧在收集器前後室遭到攔截的比例。.....	15
圖 8	台灣扁柏葉攔截量實驗設置圖。.....	16
圖 9	不同能見度下，以冠層為一攔截體雲霧沉降實際值與統計回歸式。.....	19
圖 10	不同能見度下，以冠層上部冠層下部，雲霧沉降實際值與統計回歸式。.....	19
圖 11	2003 年 6 月至 2006 年 6 月每月雲霧籠罩時數圖。.....	23
圖 12	2005 年 5 月至 2006 年 5 月間雲霧籠罩時的平均風向。.....	24
圖 13	2006 年 3 月 10 日單日能見度與風向示意圖。.....	24
圖 14	2006 年 1 月 5 日至 2006 年 5 月 25 日雲霧樣本與雨水離子濃度平均值。.....	25
圖 15	2006 年 1 月 5 日至 2006 年 5 月 25 日雲霧樣本與雨水離子濃度百分比例組成。	26
圖 16	2006 年 2 月至 2006 年 5 月間雲霧 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 K^+ 濃度的變化。.....	27
圖 17	自 2006 年 2 月至 2006 年 5 月間雲霧 Na^+ 、 Cl^- 和 Mg^{2+} 濃度的變化趨勢圖。....	28
圖 18	2006 年 1 月 5 日至 2006 年 5 月 25 日的雲霧樣本以各次冠層頂端 L1 水量為 100%，各層間的水量變化。.....	29
圖 19	雲霧離子濃度在冠層間變化趨勢較一致的離子。.....	30
圖 20	2006 年 1 月 5 日至 2006 年 5 月 25 日冠層內雲霧離子濃度變化圖。31	
圖 21	2006 年 1 月 5 日至 2006 年 5 月 25 日期間，大顆粒雲霧離子在冠層內外組成比例 的差異。.....	32
圖 22	2006 年 1 月 5 日至 2006 年 5 月 25 日小顆粒雲霧離子在冠層內外組成比例的差 異。.....	33
圖 23	2005 年 5 月至 2006 年 4 月雲霧降水量比例。.....	34

表目錄

表 1 各種主要雲霧收集器形式以及其特性。.....	9
表 2 sf-CASCC 收集器各項基本規格表。.....	14
表 3 不同能見度下林分各層台灣扁柏葉沉降速率實測值。.....	18
表 4 2005 年 12 月 8 日至 2006 年 6 月 8 日雲霧樣本基本資料。.....	21
表 5 自 2006 年 1 月 5 日至 5 月 25 日樣本水量及各離子濃度表。.....	21
表 6 2006 年 1 月 5 日至同年 3 月 13 日冠層上下部各雲霧各離子沉降量。.....	34
表 7 2006 年 1 月 5 日至 2006 年 5 月 25 日冠層頂端各離子間的相關性分析結果。.....	37
表 8 以一般估算方式計算 2006 年 1 月 5 日至同年 3 月 13 日的沉降結果，並與本研究的計算及同時段雨水沉降比較。.....	40

1. 前言

隨著人類活動、工業排放、農業耕作所產生的氣體、化合物以及微小的顆粒物質進入大氣層，受到大氣運動的傳送，而又以降雨、植被攔截等不同沉降的方式回到陸地。此些經由大氣活動轉移至其他地區的物質，可能會造成當地生態的影響。特別是雲霧出現頻繁的地區，經由雲霧所輸入的部份，往往對該地區生態環境的離子動態產生重要的影響。

1.1 雲霧

雲霧的產生受到水氣、風向、溫度、地形等複雜的因素影響，雲霧中水分含量以及顆粒大小具有高度的變異。雲霧中的離子狀況同樣受到凝結核來源、雲霧時期的化學變化、雲霧顆粒體積等因素影響，各次雲霧事件中離子濃度的差異也難以預料。

懸浮於大氣中的水滴稱之為雲霧，以世界氣象組織(World Meteorological Organization)的定義¹當水平能見度低於 1000 m 時稱之為有霧。雲霧的產生是由於空氣中過飽和的濕氣凝結於凝結核上形成，通常雲霧在低風速，以及穩定的氣團狀態下較易生成。若依大氣水汽凝結的原因分類，可將雲霧區分成多種的類型，例如平流霧與輻射霧。輻射霧是由地表和貼近地表的空氣因輻射冷卻而形成，多發生在晴天的夜裡；而平流霧則是由於濕熱的暖氣團爬升至較高的位置，或與其他冷氣團交會造成氣團冷卻水氣達到過飽和而形成。

在山岳位置所產生的霧大多為地形雲，是由潮濕空氣沿山坡爬升而產生。而在下列條件的山區，常常會形成長時間或密集的雲霧壟罩(Blas *et al.*, 2002)。

- 該地地貌為突出狀態
- 暴露在水平運動的潮濕海洋氣團中
- 山區位置鄰近海岸
- 在上風位置並無其他山丘阻隔

雲霧中水分含量差異甚大，液態水含量 (Liquid Water Content, LWC, 單位為 g/m^3) 由能見度約 1000 m 的 0.2 g m^{-3} 到能見度僅數公尺的 3 g m^{-3} 皆有，主要受到雲霧顆粒大小組成的影響。雲霧顆粒直徑通常介於 5-50 μm 之間，而形成降雨的水珠顆粒則大於 500 μm 。因雲霧顆粒遠小於雨水顆粒，因此並不一定會如雨水般隨重力落至地面，雲

¹ <http://badc.nerc.ac.uk/data/surface/code.html>

霧除了可能受重力落下之外，大部分則是藉由水平方向植被的攔截而進入生態系，其中大顆粒雲霧所帶有的離子較易遭到攔截進入，而小顆粒雲霧則較不易被攔截而懸浮較長久的時間(Collett *et al.*, 2001)，換言之，地區的植被型態與雲霧顆粒組成決定了當地雲霧沉降的狀況。

大氣的水分凝結於已存在的氣膠(aerosol)上形成雲霧顆粒，這些顆粒提供了大氣中水階段化學反應的場所，例如雲霧中的 SO_4^{2-} 就是由 SO_2 經過水階段的多項反應而產生，因此凝結核與大氣的形式決定了主要雲霧的化學特性(Plessow *et al.*, 2001; Wrzesinsky & Klemm, 2000)。而雲霧對大氣膠體的清除作用也有效的改變了膠體沉降的路徑，使得膠體物質不再懸浮而進入生態系(Iyobe *et al.*, 2003; Moore *et al.*, 2004)。

就不同凝結核來說，來源亦有所差異， SO_4^{2-} 與 NO_3^- 通常是人類活動所形成， NH_4^+ 及 NO_3^- 可能是由 NO_x 氣體形成，或是由於農作物施肥所產生。 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 部分來源可能是海鹽，也可能由地表所懸浮的灰塵微粒所提供， K^+ 可能由森林燃燒釋出，非鹽類的 Cl^- 則來自工業的釋放(Ali *et al.*, 2004; Khwaja *et al.*, 1995; Liu *et al.*, 2005)。

在許多的實驗中指出，雲霧的化學性質除了受到大氣膠體影響之外，雲霧所含的離子濃度會隨顆粒的大小而有很大的變異，通常而言小顆粒雲霧相較於大顆粒雲霧具有較高濃度的離子(Bator & Collett, 1997; Hoag *et al.*, 1999; Schell *et al.*, 1997)。除此之外，雲霧在產生的氣態與液態時期受到複雜的化學變化所影響，離子濃度與組成比例並非固定，變異很大(Anlauf *et al.*, 2006)。

綜合上述等因素我們可以將雲霧化學組成的影響因子歸納為(1)雲霧形成的物理過程(e.g.雲霧顆粒的成長)；(2)凝結核的來源；(3)雲霧顆粒懸浮期間物質的溶解(e.g.氣體的溶解，其他膠體顆粒的碰撞)；以及(4)雲霧顆粒內的化學反應。因此我們可以理解雲霧內離子的狀態是相當的複雜且多變，且顆粒間的離子組成可能會有明顯的差異。

1.2 雲霧與森林

雲霧對於整個陸域生態系來說並沒有決定性的影響，但在海岸與山區長時間受到雲霧籠罩的地區，大氣中的物質受到雲霧清除作用的影響而進入，對於該地區生態環境的各種因子影響極為深遠(Weathers, 1999)。對森林而言，冠層攔截雲霧所帶入的水分以及離子是雲霧對森林極為重要的影響因子(Klemm *et al.*, 2005)，霧水可調節森林水分需求，以 Dawson (1998)在加州紅杉森林的實驗為例，森林與非森林地區雨量極為相似，但在雲霧的輸入部分則有相當大的差異，森林雲霧的輸入為非森林地區的兩倍。另外在

雨水豐沛的年份雲霧輸入的水分佔總輸入水量的 15%，但在較乾早年份中雲霧水的輸入比例高達 37%。

諸多的研究報告也都指出，雲霧水較雨水帶有更高濃度的離子 (Herckes *et al.*, 2002; Igawa *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2005)。在瑞士 Kerzersmoos 山區以及德國 Fichtelgebirge 森林進行的實驗發現霧水中離子濃度為同地區雨水離子濃度 5-24 倍，而農田生態系自雲霧沉降中所獲得的離子較森林生態系要低的多，森林自雲霧沉降所得的 N 約為濕沉降的 60%-85%，而農田自雲霧沉降所得的 N 僅為濕沉降的 4% (Thalmann *et al.*, 2002)。若單以森林內離子沉降情況來看，Bridges *et al.* (2002) 在歐洲 Czech Krusne Hory 估算的結果，雲霧所沉降的離子可達森林全離子沉降量的 6%~32%。

此外雲霧可使樹木葉片維持長時間的濕潤，避免水分散失，增加乾沉降的吸附，且雲霧所提供的水分能使較淺層土壤潮濕，提供植物根系利用的水分 (Lange *et al.*, 2003)。

但近年來受到人類活動的影響，大氣中增加許多的污染物質 (e.g. 硫酸鹽類與硝酸鹽類) (Collett *et al.*, 2002)，進而造成雲霧的酸化。在某些工業發達的地區，周邊山區所形成的雲霧 pH 低至 3 左右，造成該處森林的傷害，例如植物葉片的 Ca^{2+} 會遭到淋洗而流失 (Igawa *et al.*, 2002a; Jagels *et al.*, 2002)。而山岳雲霧所帶入的沉降物質通常要較雨水來得高，以 Izer 山區為例，雲霧所沉降的污染物質佔了總污染物質沉降的一半之多 (Blas *et al.*, 2002)。

森林冠層也會對雲霧的顆粒組成產生影響，DeFelice (2002a, 2002b) 在 Mt. Mitchell 南方森林同時對冠層內外的雲霧進行收集的結果發現，雲霧受到冠層的影響相當明顯。冠層內外的雲霧顆粒組成有很大的差異，4-7 μm 的雲霧顆粒在冠層內部數量遠少於冠層外，且冠層內總雲霧顆粒數 (250 drops cm^{-3}) 也遠較冠層外部的 (600 drops cm^{-3}) 為低。冠層內部的雲霧離子濃度有上升的趨勢，且各離子間濃度變化也各有差異，雲霧顆粒的離子情況明顯受到冠層的影響。

由於雲霧具有高離子的沉降量，提供穩定水份來源，以及長時間維持生態區域濕潤等特性，故雲霧對於森林的影響是不可輕忽且急待了解的，因此雲霧的研究近年來有逐漸增加的趨勢，主要原因之一即是發現雲霧對於森林有重要的影響。

1.3 森林雲霧沉降的估算

由於森林相較於其他植被更能有效的攔截雲霧 (Dawson, 1998; Lange *et al.*,

2003)，而雲霧輸入的水量及養分對森林有舉足輕重的影響，故探討雲霧在森林的影響時，雲霧沉降量的估算也是相當重要的部份。目前研究者較常使用於估算雲霧水量沉降的方式主要有

- 渦流相關法(Burkard *et al.*, 2002)。以三維的風速計，配合粒徑分析儀，在極短時間內對於研究區域的三維風向改變以及雲霧顆粒的狀態記錄，利用此資料推算雲霧受到風速推送碰撞冠層後遭到攔截的水量。
- 模式估算(Lovett, 1994)。利用數學及物理理論設定假設，依實際當地氣象條件以及各項參數的關係用以預測推論沉降量。主要須釐清影響的關鍵因子，並且將繁雜的模式修正至適合使用於可取得的資料及所需預測的地區狀態。
- 替代法(Chang *et al.*, 2006)。以葉面積或是生物量為基準，直接測定該單位下對雲霧的攔截率，並以當地的生物量或葉面積推估此地區的雲霧沉降量。
- 水量平衡法(Iyobe *et al.*, 2003)。降雨會以穿落水及幹流水的方式進入森林，雲霧遭到攔截也會循同樣的方式進入森林，因此收集森林中的幹流水與穿落水，和實際降雨量做比較，即可算出該地區藉由雲霧所沉降的水量。

但在雲霧養分的估算的部份，使用的方法並不多，一般都是以所估算的沉降水量為依據，乘上林外所收集雲霧離子濃度，藉此估算沉降的離子量，如 Elbert *et al.*(2000)、Vermeulen *et al.*(1997)與 Wrzesinsky & Klemm (2000)皆是以此方法進行離子沉降量的估算。但在不考慮雲霧化學受到冠層攔截後的改變，單以林外雲霧化學與沉降水量來作為離子輸入的估算時，往往會造成估計上的誤差(Wrzesinsky & Klemm, 2000)。

1.4 國內目前雲霧森林研究現況

在國內方面，目前對於雲霧森林的研究多集中於鴛鴦湖的台灣扁柏森林，Chang *et al.*(2002)首先在此進行長期的雲霧觀測及氣象資料收集，並以主動式雲霧收集器收集雲霧樣本進行化學分析。他們發現此區域雲霧出現頻繁，且雲霧離子濃度低，並未受到環境汙染。另外此研究以當地優勢附生植物在雲霧期間直接攔截雲霧，發現每公克優勢附生植物在此地區有 0.63g h^{-1} 的雲霧攔截率。

2002 年東華大學自然資源研究所，在距鴛鴦湖自然保留區 2 km 處選定一台灣扁柏自然更新林作永久樣區，同年於此地搭設一 23 m 的氣象塔並裝設風速計，溫濕度計，

能見度儀等氣象儀器進行監測。陳耀德(2003)利用此氣象塔架設三台主動式雲霧收集器，收集冠層頂端、底部與地面的雲霧水進行化學分析。發現雲霧水相較於穿落水及幹流水有較高的離子濃度，並發現在冠層內部不同高度雲霧離子濃度有所差異。

吳敏如(2004)以微氣候模式(Lovett, 1984)，採用德國挪威雲杉森林所測量的水平空氣阻力、邊界層阻力等參數，加上樣區氣象資料、冠層表面積指數及其垂直分佈，以不同能見度與風速為變數，估算台灣扁柏的雲霧沉降量。以2003年3月至2004年2月的估算發現模式估算的年沉降量為313 mm，佔年總濕沉降量的10%。另外以監測的雲霧化學配合水量進行離子沉降估算，發現各離子佔總沉降比例不同，在數個主要離子上佔總沉降量的40%以上，霧水的沉降對於此地生態系有一定的重要性。

Chang *et al.* (2006)將樹冠以樣區平均枝下高與平均圓錐底面高將樹冠區分成三層區，直接測量台灣扁柏葉在不同能見度下單位生物量的攔截率，並以此為依據，求得最適回歸公式後，以能見度資料推估雲霧沉降量。經過此估算後發現，2003年3月至2004年2月此樣區雲霧沉降量為328 mm year⁻¹，約佔濕沉降輸入的10%。

2. 研究目的

在國內鴛鴦湖地區數個雲霧的研究中發現，雲霧輸入此區的離子量並不亞於雨水所輸入，且受到冠層的攔截，冠層內外的雲霧離子組成並不一致。不過台灣地區的雲霧研究情形僅止於雲霧氣象、冠層差異或是沉降估算，並未有完整的描述與探討，且忽略雲霧顆粒間差異所造成的變化，整體而言，並未有研究將雲霧顆粒的化學與冠層攔截多做探討。就國外的研究結果發現，雲霧對於森林主要的影響來自於離子以及水量的輸入，此部分的輸入直接受到冠層與雲霧顆粒化學差異的影響而變動。但估算離子沉降時，卻又未將冠層內雲霧的離子濃度變化的影響納入探討。因此本研究想藉由在冠層中不同垂直位置架設可區分粒徑的雲霧收集器，探討鴛鴦湖地區台灣扁柏森林生態系中森林與雲霧下列的特性：

- 樣區中大小雲霧顆粒基礎的化學特性。
- 大小雲霧顆粒在冠層垂直空間的差異。
- 比較將冠層區分成兩層估算沉降與不予分層估算之間的差異。

3. 材料與方法

3.1 樣區概述

本研究樣區位於宜蘭縣大同鄉棲蘭山區(24°35'N, 121°25'E)，太平山事業區 100 號林道 14.5 km 處，海拔約 1,400 至 1800 m 處。此區主要為台灣扁柏天然下種更新林，根據陳耀德(2003)於此區 1 ha 樣區的調查，台灣扁柏胸高斷面積佔全樣區的 81.8%，為此地的優勢樹種。

根據 2003 年 6 月至 2006 年 6 月的資料顯示，此地年均溫 13.4°C，冬、春季籠罩時間長。年雨量介於 2109mm 至 4727mm 之間，雲霧年平均籠罩時間為 3118 小時，季節雲霧籠罩變化差異甚大。

樣區的北端架設有總高度為 23 m 之氣象觀測塔(圖 2)；高於樹冠層約 10 m。頂端架設有風速風向計 (Wind monitor model 05103, R.M.Young, U.S.A.)、溫濕度計 (RHT2nl, Delta-T, U.K.) 與能見度儀 (MIRA visibility sensor 3544, Aanderaa instruments, Norway) 等。

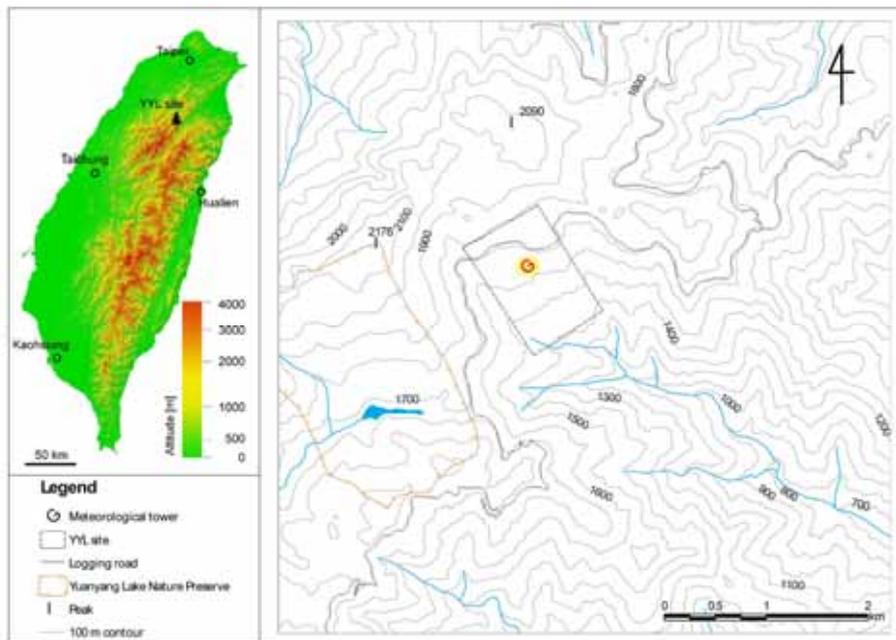


圖 1 研究位置及地形等高線圖。左圖中森林標誌為樣區所在位置，右圖則為細部等高線圖。黑色虛線外框為樣區範圍，G 為氣象塔位置，樣區左側不規則區域為鴛鴦湖保留區。



圖 2 氣象塔近攝圖，此處為氣象塔穿過冠層頂端部分，氣象塔外側為各種氣象儀器。

3.2 雲霧水收集

3.2.1 儀器架設

因本研究預計探討冠層間雲霧的化學性質，因此在樹林中的氣象塔外側架設四個雲霧收集器，分別位於地面(0.3 m)、平均枝下高(4 m)、平均冠層中間位置(9 m)及冠層頂端(24 m)處，利用垂直位置的差異，收集該處遭冠層攔截後所剩下的雲霧顆粒。

本研究所使用氣象資料如風速、能見度、氣溫和風向等，以氣象塔所架設儀器收集，資料皆以資料處理器 (DL2e, Delta-T, U.K. and CR10X, Campbell, U.S.A.) 每 10 分鐘記錄一筆該時段數據平均值。

雨水以 3 個 20 公升的雨水收集桶收集，每個收集桶上置一直徑 20 公分的漏斗，漏斗內以紗網以防雜物進入，並校正水平，整個雨水收集裝置皆為聚乙烯材質 (polyethylene, PE)。並設雨量桶 (0.5mm, 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.) 記錄之。此兩者皆架設於置於樣區旁 500 m 處，天頂角 45 度角以內無遮蔽物之空曠地，高度為 3.5 m 的鐵塔上。

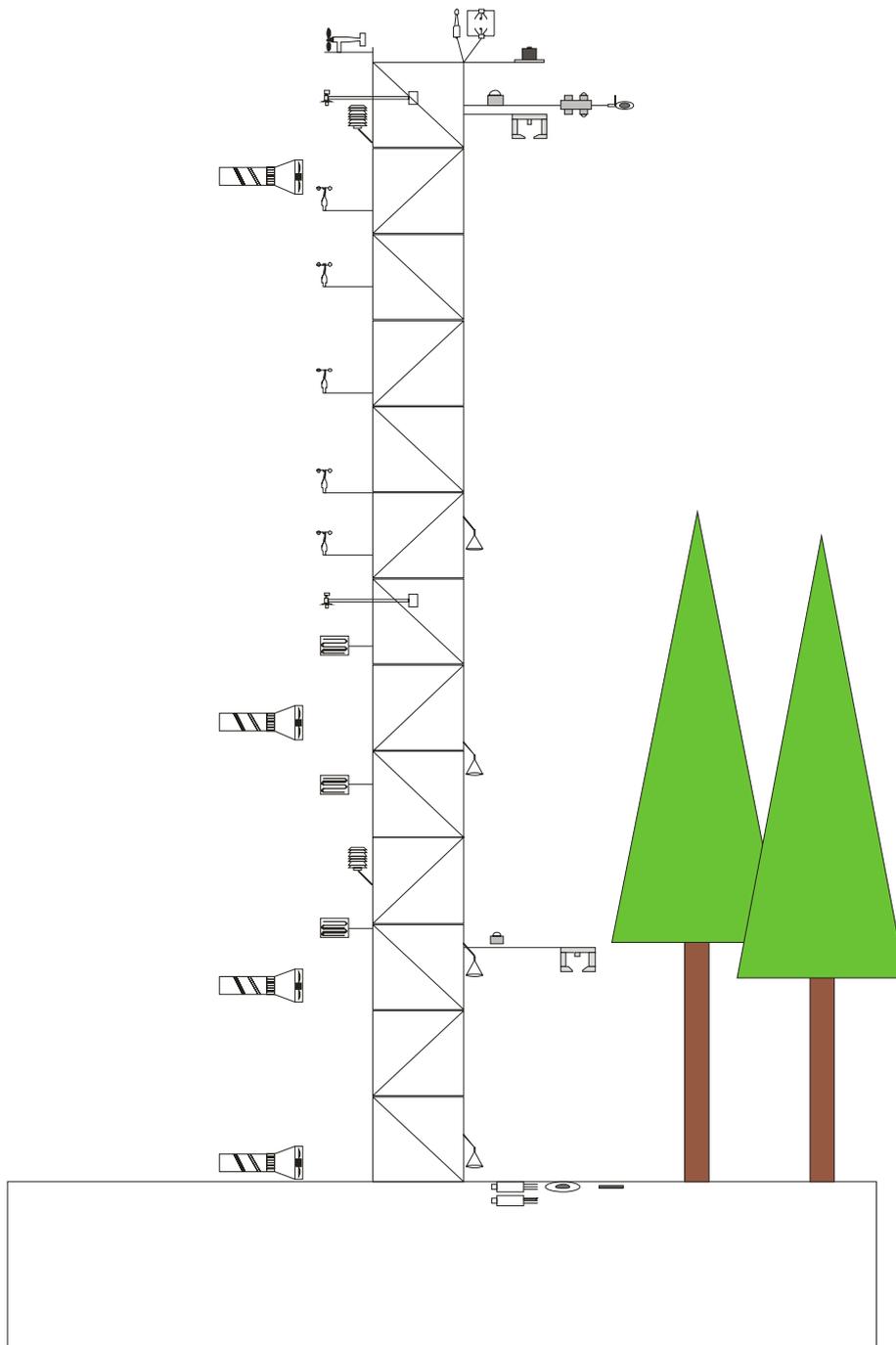


圖 3 雲霧收集器架設位置與冠層關係示意圖。四組收集器()分別架設於底部 (0.3 m)與 4 m(平均枝下高位置)、9 m(平均冠層中間位置)、24 m(冠層頂端 8 m 處)。兩組能見度儀()分別架設於 22.3、4.9 m 處。

3.2.2 儀器選擇與製作

目前國內外研究較常使用的雲霧收集器型式如表 1，本研究爲了更精確的了解雲霧離子組成，除選擇適合的儀器架設位置外，尚需要可收集不同粒徑大小且易於安裝架

設的雲霧收集器。符合本研究需要且被廣泛使用的收集器中，主要有 sf-CASCC、CSU 5-Stage 與被動式兩種形式。因本研究樣區降雨頻繁，且架設在冠層中易遭穿落水滴入，被動式類型收集器並不適合於此處架設。而主動式雲霧收集器的優點為不受風力影響，可針對較稀薄的雲霧事件收集足夠的分析樣本，且不受降雨影響。雖然所收集的雲霧水量無法直接估算雲霧沉降量，但其特性較適於本樣區使用。其中雖然 CSU 5-Stage 此類收集器可提供相當精細的粒徑區分，惟因其體積過於龐大且甚為耗電，難以架設至冠層之中，故本研究選擇以 sf-CSACC 收集雲霧樣本。

Sf-CASCC 收集器的製作主要是依據 Demoz *et al.*(1996)所提出的收集器的設計原理設計，主要依據為公式一至三。

公式一是藉由收集器設計資料與實際大氣狀況參數求得 Stokes number(文後簡稱 St)。影響 St 諸多因子中，儀器製作能夠控制的為鐵氟龍絲的直徑、雲霧粒徑、空氣流速、柵欄絲與水平的夾角。

表 1 各種主要雲霧收集器形式以及其特性。

收集器類型(名稱)	類型	特性
CASCC ^a	主動式	利用風扇抽取雲霧，雲霧撞擊收集網攔截，可控制收集雲霧尺寸，且不受降雨影響
sf-CASCC ^a	主動式	改良自CASCC，可將雲霧顆粒尺寸加以區分收集，同樣不受降雨影響
CSU 5-Stage ^b	主動式	限制雲霧顆粒轉變流動方向時的空間加以收集，可將所收集雲霧水顆粒做細部區分
Passive vertical string collector ^c	被動式	利用雲霧自然撞擊環狀收集網收集，價格低廉，受降雨影響
Rotating arm collector ^c	主動式	利用懸臂撞擊雲霧收集，50%的收集效率在8~20 μ m之間
mesh impaction fog sampler ^c	主動式	在收集管內抽氣使雲霧撞擊入口處的網格，為一個手持式的簡易收集器，size cut 為2.4 μ m。
Electrostatic precipitator ^d	靜電吸附	利用電極吸附單獨雲霧顆粒，能夠對於不同大小的單顆雲霧直接進行收集

資料整理自 a: Demoz *et al.*(1996) b: Moore *et al.*(2002) c: Krupa (2002) d: Tenberken & Bachmann(1998)

$$St = \frac{\rho d_p^2 U \cos \theta}{9 \mu d_c} \quad (\text{公式一})$$

St : Stokes number ρ : 水的密度 d_c : 鐵氟龍絲直徑
 d_p : 雲霧粒徑 μ : 空氣黏滯度 U : 空氣流速
 θ : 鐵氟龍絲與水平夾角

公式二可藉由公式一中所求得的 St 代入，求得在此設計與大氣狀況下雲霧收集效能常數 η_s 。

$$\eta_s = \frac{St^3}{St^3 + 0.753St^2 + 2.796St - 0.202} \quad (\text{公式二})$$

η_s : 收集效率常數 St : Stokes number

最後可利用公式三將先前所得到的收集效能常數、柵欄層數(r)、每層柵欄中鐵氟龍絲所涵蓋的面積比(fr)代入，便可求得在此雲霧粒徑(d_p)中，收集器可得到的收集總能力。

$$\eta = 1 - (1 - \eta_s \times fr)^r \quad (\text{公式三})$$

η : 總收集能力 r : 層數
 fr : 每層柵欄中鐵氟龍絲所涵蓋面積比

在雲霧收集能力的方面，由於雲霧收集器對於不同直徑大小的雲霧顆粒收集能力不一，國外研究通常以 size cut 做為收集器能力的指標，size cut 的定義為收集器的收集能力可以達到 50% 的雲霧顆粒直徑(Demoz *et al.*, 1996)。在本實驗中利用手持式風速計(testo, Germany, 445)測定風扇實際風速(U)，並依樣區年平均氣溫與溼度決定空氣黏滯度(μ)，固定鐵氟龍絲夾角($\cos\theta$)，代入水的密度(ρ)與所使用的鐵氟龍絲直徑(d_c)，即可得到儀器設計的 size cut。

本研究第一室以壓克力圓柱、第二室以尼龍絲為材料製作收集網，整個收集器的本體則以壓克力板組合。風扇面採用四個 12*12cm 的 110V 交流電風扇(ORIX, MU1238A-21B, Japan)並排構成，穩流器則以 6 cm 吸管排列，吸管接近風扇處以單層紗

網分隔，以線香燃煙進行測試，發現未加裝整流器時，收集器氣流上下擺盪甚大，不時撞擊收集器壁，但在加裝整流器後氣流僅有小幅度的擺動，氣流明顯穩定。

風速計算方面，將已完成外型之收集器上端挖掘兩條深溝，以手持式熱線探針伸入測量。測量方式以垂直風向的位置為一截面，實際測量方式如圖 4 所示，離壁 1 cm 為第一點開始測量，每點相聚 2.5 cm，每一截面共測量 25 點，每點測量五秒鐘，每點紀錄風速跳動中間值，分別測量收集器入口端與整流器前端截面風速。未加裝整流器前各點風速跳動區間頗大，約在中間值 $\pm 1\sim 2.5\text{ m s}^{-1}$ 之間，加裝整流器後，風速較未安裝前略有下降趨勢，但各點風速跳動明顯趨緩約，約為中間值 $\pm 0.5\sim 1.5\text{ m s}^{-1}$ 之間(圖 5)。

製作儀器時則前述公式計算後決定規格，風速部分因考慮周邊風速測量點受到收集器壁影響，則以實測截面中間 16 點平均代表，發現前後測值中心風速差異甚小($<0.02\text{ m/s}$)。經實際測試結果發現可使氣流穩定，不致撞及收集器壁面，經計算後收集器設計規格如表 2，第一室的 size cut 為 $30\ \mu\text{m}$ ；第二室為 $7\ \mu\text{m}$ ，前後二室的在各直徑的雲霧顆粒收集效能如圖 6。估算雲霧中各粒徑雲霧實際被收集的比例，收集器第一室可有效的收集直徑 $30\ \mu\text{m}$ 以上的雲霧顆粒，第二室則能夠有效收集直徑 $7\sim 25\ \mu\text{m}$ 間的雲霧顆粒(圖 7)。

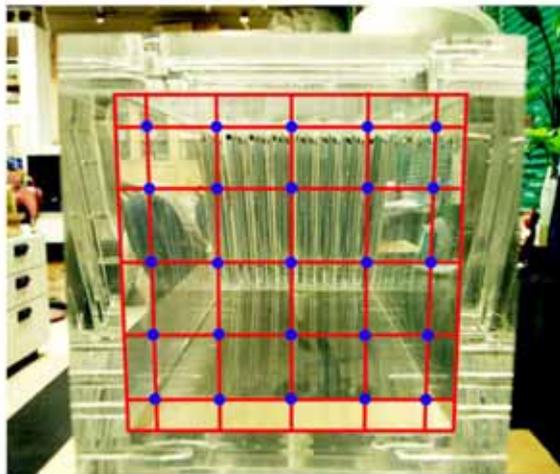
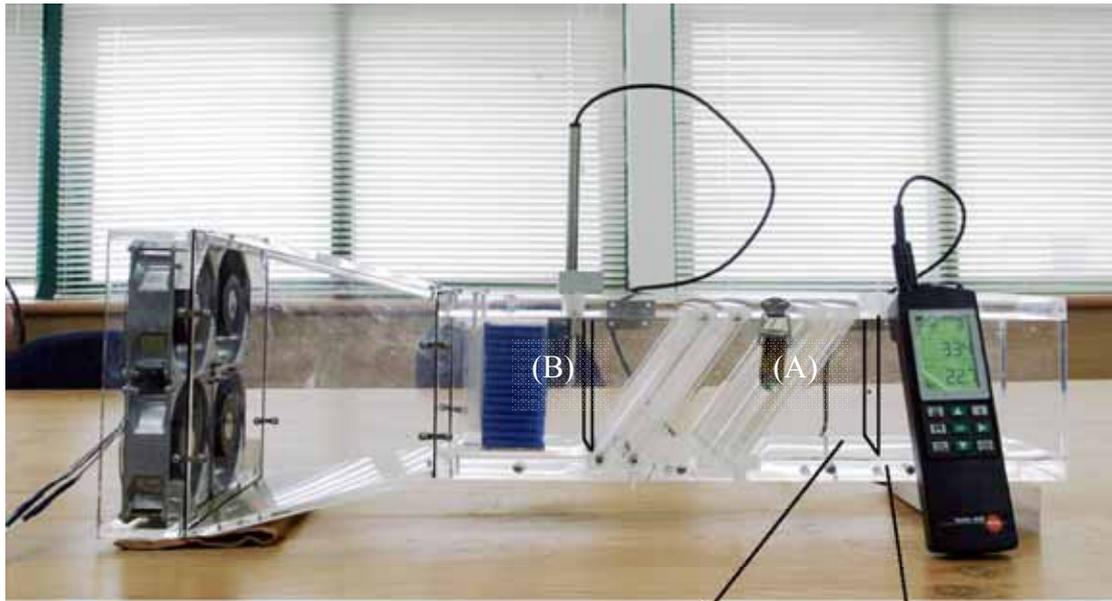


圖 4 上圖為收集器風速測量示意圖，將手持式風速計伸入收集器中，測量收集網前後的風剖面(上圖位置 A、B)各點風速狀況。下圖為風剖面測量示意圖，在 12*12cm 的截面上測量 25 個點的風速，各線交會圓點處即為測量點。

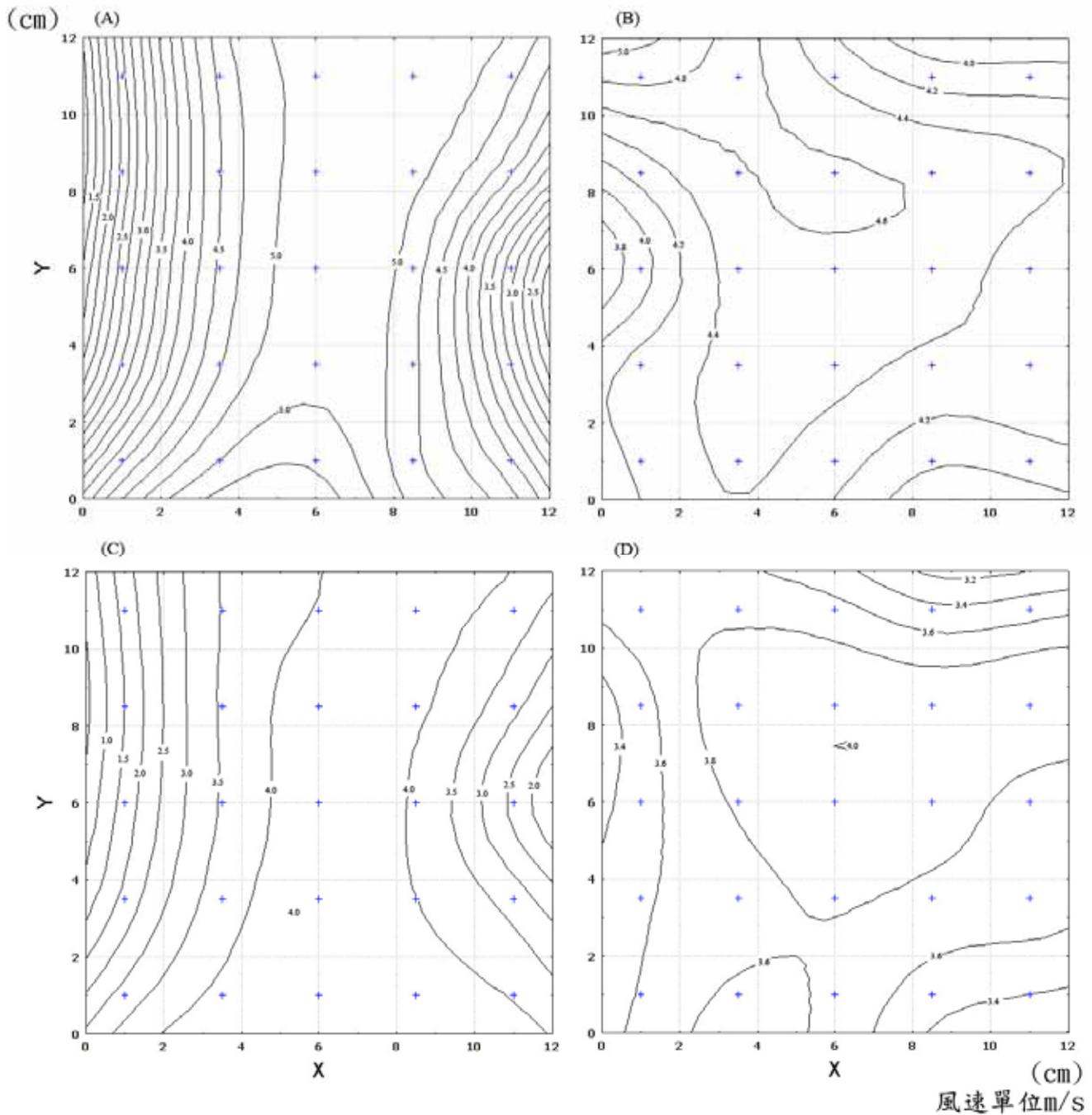


圖 5 收集器風速剖面圖。圖 A、B 依序為未裝設穩流器的收集器前端(圖 4 上圖編號 A 處)以及第二收集網後端(圖 4 上圖 B 處)風剖面，圖 C、D 依序為裝設穩流器後收集器的前端以及第二收集網後端風剖面。在裝設穩流器後收集網後端風速平穩許多，且前後兩端中心風速更穩定。

表 2 sf-CASCC 收集器各項基本規格表。

	第一室	第二室
柵欄絲直徑(mm)	10	0.5
柵欄層數	2	4
柵欄絲間隔(mm)	4.5	1
Size cut(μm)	30	7
風速(m s^{-1})*	3.78	3.78
空氣黏滯度($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)*	1.17×10^{-5}	1.17×10^{-5}

*風速由實際測量得知，空氣黏滯度則以樣區年平均溫 13°C 查表得知。

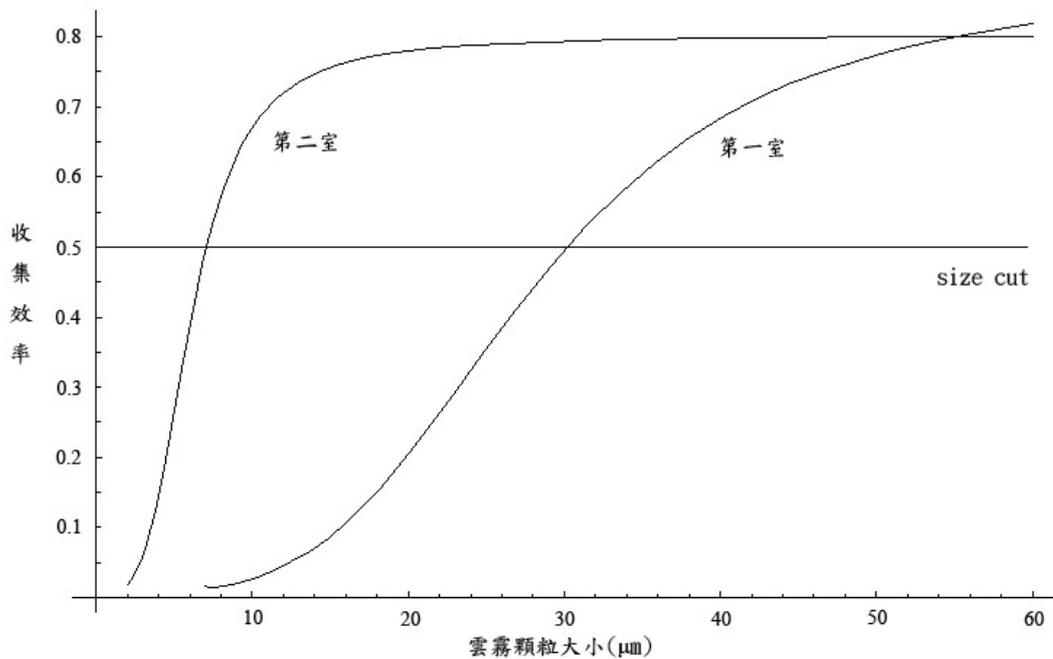


圖 6 分隔式雲霧收集器效能圖。圖中曲線代表在此大小雲霧顆粒中收集器收集的能力，中間實線為收集效能 50% 分隔線，與收集曲線相交處即為該收集曲線的 size cut。

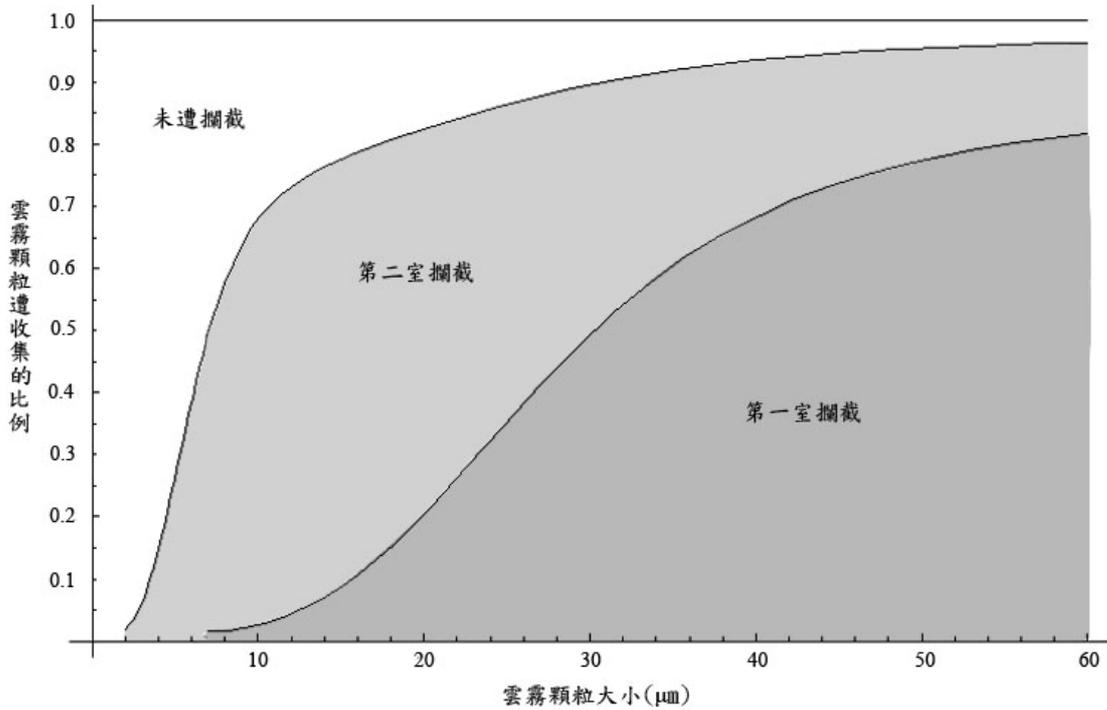


圖 7 各粒徑雲霧在收集器前後室遭到攔截的比例。直徑 $30\ \mu\text{m}$ 以上的雲霧顆粒有 50% 以上的比例在第一室即遭到攔截，直徑 $7\text{-}25\ \mu\text{m}$ 間的雲霧顆粒有 50% 在第二室被收集。

3.3 化學分析

架設完成的雲霧收集器收集方向皆朝向東南，且收集器前端稍向下傾斜，避免穿落水或雨水自前端流入收集器，且四組收集器皆與位於塔頂的能見度儀連結，偵測雲霧事件發生時(能見度低於 1000m)便啟動 sf-CASCC 收集雲霧水，收集器底部設置 PE 水樣收集瓶，所攔截的水樣留置於瓶中等待收集，PE 收集瓶外側以不透明錫箔遮陽片包覆，避免藻類滋生。

本研究雲霧事件定義為能見度低於 $1000\ \text{m}$ ，連續超過半小時以上的雲霧籠罩為事件，以能見度高於 $1000\ \text{m}$ 以上超過半小時為該次雲霧事件結束。每兩週收集一次雲霧水樣，每次現場收集之後即攜回工作站測量導電度(EC MWTW, Cond 340i, Germany)與 pH 值(EC MWTW, pH340i, Germany)，並以 $0.45\ \mu\text{m}$ 醋酸纖維濾膜過濾後裝於 PE 瓶中，置於 0°C 的冰桶後攜回實驗室以 -18°C 保存，等待分析。

所收集回實驗室中的雲霧水以離子色層分析儀(Ion Chromatography)(TOA-DKK ICA-5000, Japan)進行分析。陰離子 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 以流速 $1.0\ \text{m s}^{-1}$ 3.5M 的碳酸鈉

(Na_2CO_3) 與 1.0M 的碳酸氫鈉(NaHCO_3) 混合液流經管柱(DKK-TOA, PCI-230, Japan) 分離測量得之。陽離子 Na^+ 、 K^+ 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 則以流速 1.0m s^{-1} 6.0M 的甲烷磺酸($\text{CH}_3\text{SO}_3\text{S}$) 流經管柱(DKK-TOA, PCI-321, Japan) 分離測量得之，兩者管柱溫度為 37°C ， H^+ 濃度則以 pH 值換算得之，並將陰陽離子進行平衡測試。研究期間雨水的收集時間，以及化學分析方式與雲霧水相同。

3.4 雲霧沉降估算

葉青峰(2004)將本樣區樹冠以樣區平均枝下高與平均圓錐底面高將樹冠區分成三層區，依序為 L1、L2 與 L3 層。L1 層為平均圓錐底面高以上的樹冠部分，為樹冠的最上層；平均圓錐底面高度以下至平均枝下高以上空間，平均區分成兩層，上半部為樹冠的中層 L2，下半部為樹冠的最下部分為 L3 層(圖 8)。

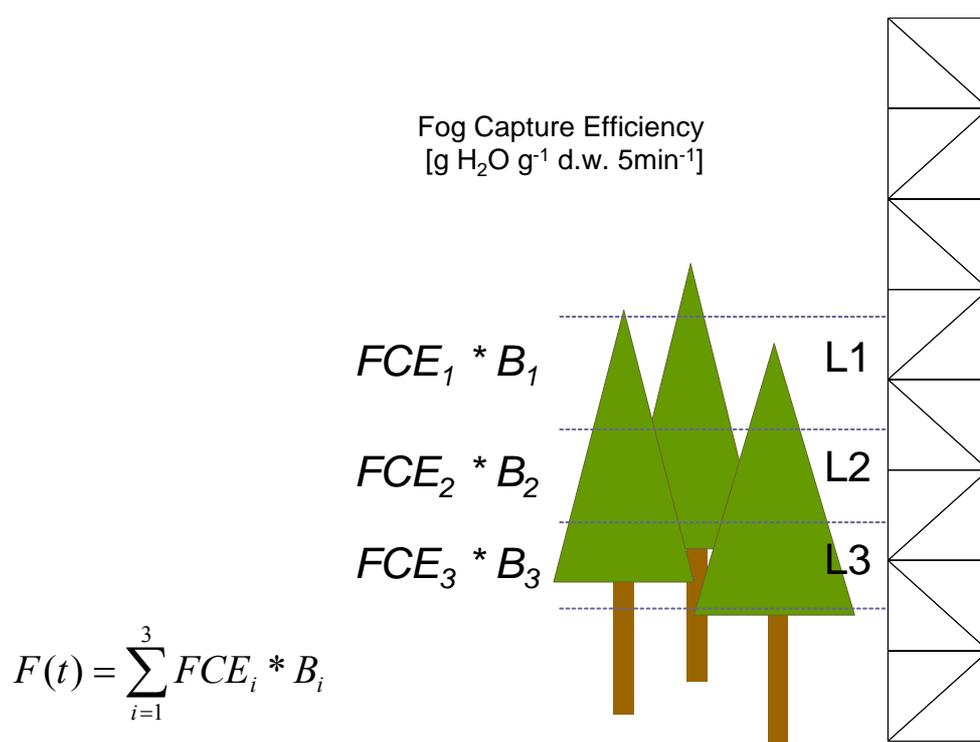


圖 8 台灣扁柏葉攔截量實驗設置圖。將冠層區分成三個部份，在雲霧事件發生時以新鮮台灣扁柏葉懸吊於氣象塔冠上，可求得 L1(冠層平均圓錐面以上高度)、L2 和 L3(冠層圓錐面下部平均區分成兩層)、位置的單位葉生物量雲霧攔截效率。配合該層葉生物量即可求得實際的沉降水量。(Chang *et al.*, 2006)

在雲霧產生時以新鮮台灣扁柏葉懸吊於 L1~L3 位置的鐵架上，每十分鐘紀錄一次台灣扁柏葉增加的重量，將所使用台灣扁柏枝葉以 60°C 烘至恆重之後，將增加的重量除以烘乾後的台灣扁柏葉乾重，為單位葉乾重所攔截的水量 FCE (gH₂O g⁻¹ d w. 5min)。以此資料代入公式四即可得到林份的攔截效率 F(t)。

$$F(t) = \sum_{i=1}^3 FCE_i * B_i \quad (\text{公式四})$$

F(t)：攔截效率，單位時間內每公頃植物體所攔截的水量(gH₂O ha⁻¹ 5min⁻¹)。

FCE_i：單位時間內單位葉乾重所攔截的水量。

B_i：台灣扁柏葉在 i 層的生物量乾重(g ha⁻¹)。

沉降量的估算上，由實測的 F(t)數值(表 3)在固定風速不同能見度下，選擇出最適當的經驗數學模式以表示模擬的沉降散佈點(公式五)，F(t)為沉降速率，a、b、c 為回歸分析所得之常數，x 為能見度值。將全年收集的能見度資料結果代入此回歸分析公式，以計算全年沉降的霧水量，可得到不同能見度下台灣扁柏葉對雲霧的沉降速率， $F(t) = 2.6 * e^{[1587.3/x+361.6]}$ (圖 9)。

$$F(t) = a * \exp\left(\frac{b}{(x+c)}\right) \quad (\text{公式五})$$

本研究利用 Chang *et al.* (2006)所測量的沉降資料(表 3)，以冠層平均圓錐底面高將冠層區隔成上部(L1)以及下部(L2+L3)重新以能見度估算，獲得不同能見度下，台灣扁柏冠層上半部沉降速率 $F_{\text{top}(t)} = 1.1515 * e^{[2083.34/(x+449.6)]}$ 、冠層下部沉降率 $F_{\text{mid}(t)} = 9.5249 * e^{[48.31/(x-1.1214)]}$ (圖 10)。

表 3 不同能見度下林分各層台灣扁柏葉沉降速率實測值(整理自 Chang *et al.*, 2006)

Visibility (m)	沉降量(kg ha ⁻¹ 5min ⁻¹)		
	L1	L2+L3	Total
21	126.5	111.5	238
32	70	34	104
35	129.8	16.3	146.1
40	50.5	44.3	94.8
49	15.3	23.1	38.4
56	87.6	43.3	130.9
65	38.9	20.4	59.3
74	17.2	5.4	22.6
93	110.8	33.8	144.7
110	160.9	75	235.9
115	34.8	2.2	37
140	67.2	53.7	120.9
184	13	23.5	36.5
200	6	12.9	18.9
208	0	21.4	21.4
294	10.7	10.1	20.8
315	0	4.5	4.5
318	51.5	8	59.5
350	5.6	0	5.6
562	0	0	0
564	2.8	5.8	8.6
729	8.8	6.4	15.2
791	0	0	0
1055	0	3.2	3.2
1086	3.7	3.7	7.4
1120	0	5.5	5.5
1380	0.5	5.6	6.1
1786	0	0	0
1836	0	0	0
2647	0	0	0
2742	0	0	0
2993	0	0	0

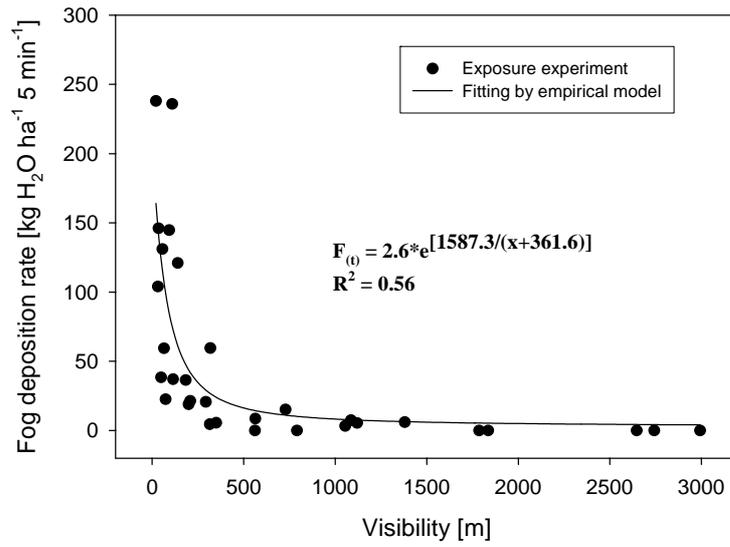


圖 9 不同能見度下，以冠層為一攔截體雲霧沉降實際值與統計回歸式(Chang *et al.*, 2006)。

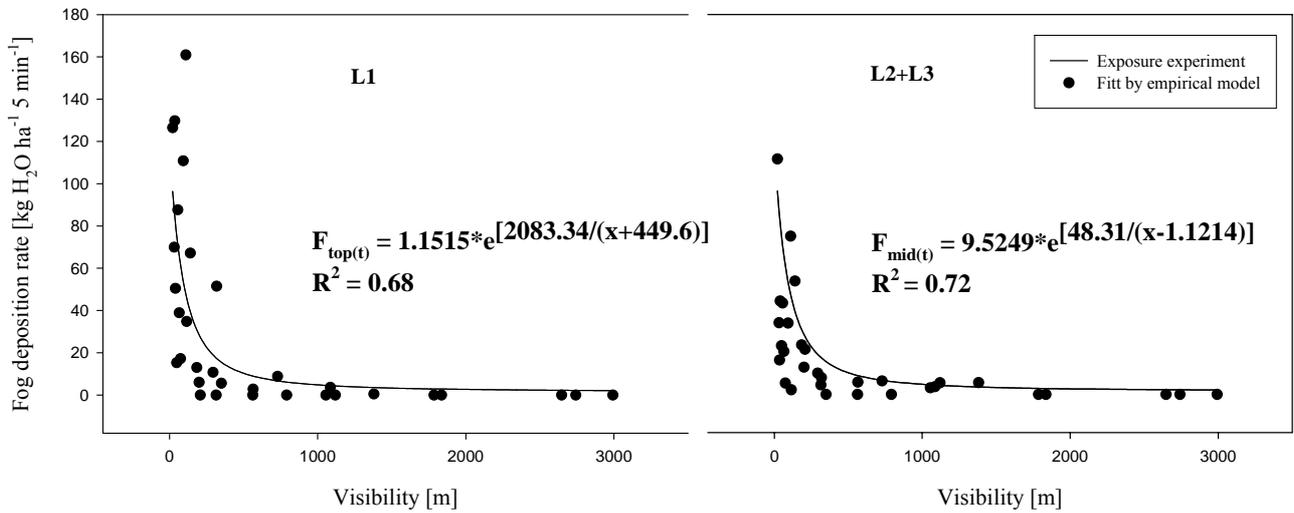


圖 10 不同能見度下，以冠層上部(左圖)冠層下部(右圖) 雲霧沉降實際值與統計回歸式。

在估算離子沉降量時，將大小顆粒收集的雲霧水樣本混合，以 $C(x)$ 代表該收集器所收集 x 離子的濃度，可以公式六表示。將該層冠層降水量 $F(t)$ 乘以該層雲霧水樣本的離子濃度 $C(x)$ 即可得到此一層區該層該離子沉降量，合併上下冠層資料即可求得本樣區實際各離子沉降量。

$$C(x) = \frac{V_L * C_L(x) + V_S * C_S(x)}{V_1 + V_2} \quad (\text{公式六})$$

$C(x)$ ：該收集器所收集到 x 離子的平均濃度(mg/L)

V_L ：收集器第一室所收集樣本體積(L)

V_S ：收集器第二室所收集樣本體積(L)

$C_L(x)$ ：大顆粒雲霧中 x 離子的濃度，即第一室樣本中 x 離子濃度(mg/L)

$C_S(x)$ ：小顆粒雲霧中 x 離子的濃度，即第二室樣本中 x 離子濃度(mg/L)

4. 結果

本研究氣象資料處理自 2003 年 6 月至 2006 年 6 月為止，為期三年。雲霧水樣本則自 2005 年 12 月 8 日開始收集至 2006 年 6 月 8 日為止，共 12 次水樣樣本，依序為樣本 A~L，詳細資料如表 4 以及表 5。因樣本 A、B、L 有部分收集水量超過收集瓶容量造成滿溢，此部分水樣恐無法完整代表該時段完整的霧水狀況，因此以樣本 C~K 為有效樣本。

氣象資料方面則收集樣區自 2003 年 6 月至 2006 年 6 月所紀錄之數值。如遇儀器故障缺漏的數值，在氣溫與能見度部份，視闕漏時間長短，以闕漏時間前後資料推算，或以該日前後兩日同時段平均作為補遺，雨量資料則以實際雨量收集桶資料補齊闕漏。

表 4 2005 年 12 月 8 日至 2006 年 6 月 8 日雲霧樣本基本資料。其中樣本 A、B、L 因冠層頂端收集瓶滿溢，故以樣本 C-K 為本研究有效樣本。

水樣編號	收集時間	總雲霧時數(h)	雲霧事件次數	盛行風向	雲霧期間平均風速(m/s)
A	05/12/08-05/12/22	198.8	18	SE	0.7
B	05/12/22-06/01/05	123.5	17	SE	0.3
C	06/01/05-06/02/06	394.3	47	SE	0.6
D	06/02/06-06/02/15	88.2	7	SE	0.5
E	06/02/15-06/03/02	204.7	26	SE	0.5
F	06/03/02-06/03/13	98.8	18	SE	0.4
G	06/03/18-06/03/28	114.8	22	SE	0.8
H	06/04/02-06/04/12	47.3	11	SE	0.4
I	06/04/12-06/04/27	109.7	29	SE	0.3
J	06/04/27-06/05/11	65.3	28	SE	0.6
K	06/05/11-06/05/25	122.7	19	SE	0.7
L	06/05/25-06/06/08	68.7	15	SE	0.6

表 5 自 2006 年 1 月 5 日至 5 月 25 日樣本水量及各離子濃度表。

	FG1-1			FG1-2			FG2-1			FG2-2		
	mean	min	max	mean	min	max	mean	min	max	mean	min	max
重量(ml)	1878	993	4395	211	90	349	1211	494	2057	112	22	294
H ⁺ (µeq L ⁻¹)	49.3	6.8	100.0	61.2	4.4	223.9	46.0	10.0	89.1	33.8	3.0	190.5
Na ⁺ (µeq L ⁻¹)	20.8	12.7	47.3	25.7	6.2	43.1	13.4	4.4	21.5	86.5	26.5	289.2
NH ₄ ⁺ (µeq L ⁻¹)	72.9	35.9	105.7	328.6	75.4	601.3	72.0	33.7	122.6	279.0	56.9	669.8
K ⁺ (µeq L ⁻¹)	6.0	3.9	8.5	22.0	6.5	31.0	7.9	4.0	12.5	38.5	22.2	83.3
Mg ²⁺ (µeq L ⁻¹)	8.7	4.8	17.6	14.3	5.0	24.6	6.7	1.9	12.7	39.7	7.2	101.6
Ca ²⁺ (µeq L ⁻¹)	19.8	4.3	46.6	41.0	6.4	66.9	18.4	2.9	37.4	103.9	22.2	267.2
Cl ⁻ (µeq L ⁻¹)	21.0	13.1	32.8	64.3	32.6	92.7	26.1	14.3	62.7	86.8	38.4	166.7
NO ₃ ⁻ (µeq L ⁻¹)	60.4	46.3	99.7	143.5	56.7	259.6	48.1	31.6	71.7	111.2	36.6	294.6
SO ₄ ²⁻ (µeq L ⁻¹)	94.7	55.9	144.8	322.7	122.9	523.9	99.2	41.5	170.8	375.9	160.1	845.9

	FG3-1			FG3-2			FG4-1			FG4-2		
	mean	min	max	mean	min	max	mean	min	max	mean	min	max
	241	34	460	149	22	270	1623	717	3979	310	70	931
	54.0	5.5	97.7	18.9	0.3	43.7	32.9	5.5	75.9	7.1	0.7	12.3
	26.7	2.4	93.8	76.9	15.9	423.7	12.0	1.9	29.2	51.5	9.4	105.9
	107.0	58.9	207.3	245.5	100.9	441.3	65.3	28.5	106.3	119.7	21.3	206.3
	10.7	6.0	27.7	30.1	16.0	58.0	10.4	6.8	15.6	34.5	12.9	72.3
	12.9	1.9	41.4	33.6	8.2	153.5	8.9	3.8	19.1	18.9	9.2	41.1
	44.6	14.1	104.1	91.8	18.8	405.2	20.8	7.5	58.0	35.6	14.3	73.4
	28.2	17.1	54.6	73.0	32.7	216.0	20.7	12.8	30.2	34.4	15.6	54.8
	88.8	27.8	222.1	110.3	39.3	307.1	43.6	25.3	78.0	36.9	15.0	50.8
	141.7	60.3	284.3	301.8	91.9	632.0	83.7	46.2	137.1	104.6	43.0	144.3

4.1 雲霧氣象資料

本樣區自 2003 年 6 月至 2006 年 6 月之間，年均溫 13.4°C，年平均雨量 4235 公厘，雨量主要集中在夏季，且明顯受到颱風影響，2004 年與 2005 年夏季雨量皆因颱風而有明顯的增加。雲霧年平均籠罩時間為 3118 小時，季節雲霧籠罩變化差異甚大，單月最高籠罩時間可達 425 小時，最低僅有 75 小時。大致而言雲霧主要集中在冬春兩季，與降雨趨勢相反，冬春季雲霧以濃霧為主，以冬季為例能見度低於 100 m 的濃霧佔冬季總雲霧時數的 45%，而夏季僅佔 23%(圖 11)。

本區雲霧受風向影響明顯，統計雲霧籠罩時間盛行風向發現雲霧事件時，吹拂風向以為東南風為主，北風次之(圖 12)。進一步檢視雲霧事件與風向發現，雲霧事件通常伴隨風向的改變而出現或消散，平日早晨及夜間盛行北風，早晨過後風向變換為東南風，隨之開始出現雲霧事件，雲霧期間大多為東南風，北風則是出現在雲霧事件前後。以 2006 年 3 月 10 日單日氣象資料為例(圖 13)，當日至清晨皆為北風，上午 9 點後風向改變為東南風後，不久即出現雲霧事件，而在當日下午 6 點風向再度改變為北風後，雲霧隨即散去。另外以安裝在森林冠層中的能見度儀與冠層外比較，發現冠層內外雲霧事件的出現並不同步，兩者有時間差的情況產生，且林內雲霧的濃度也較林外要來的低。

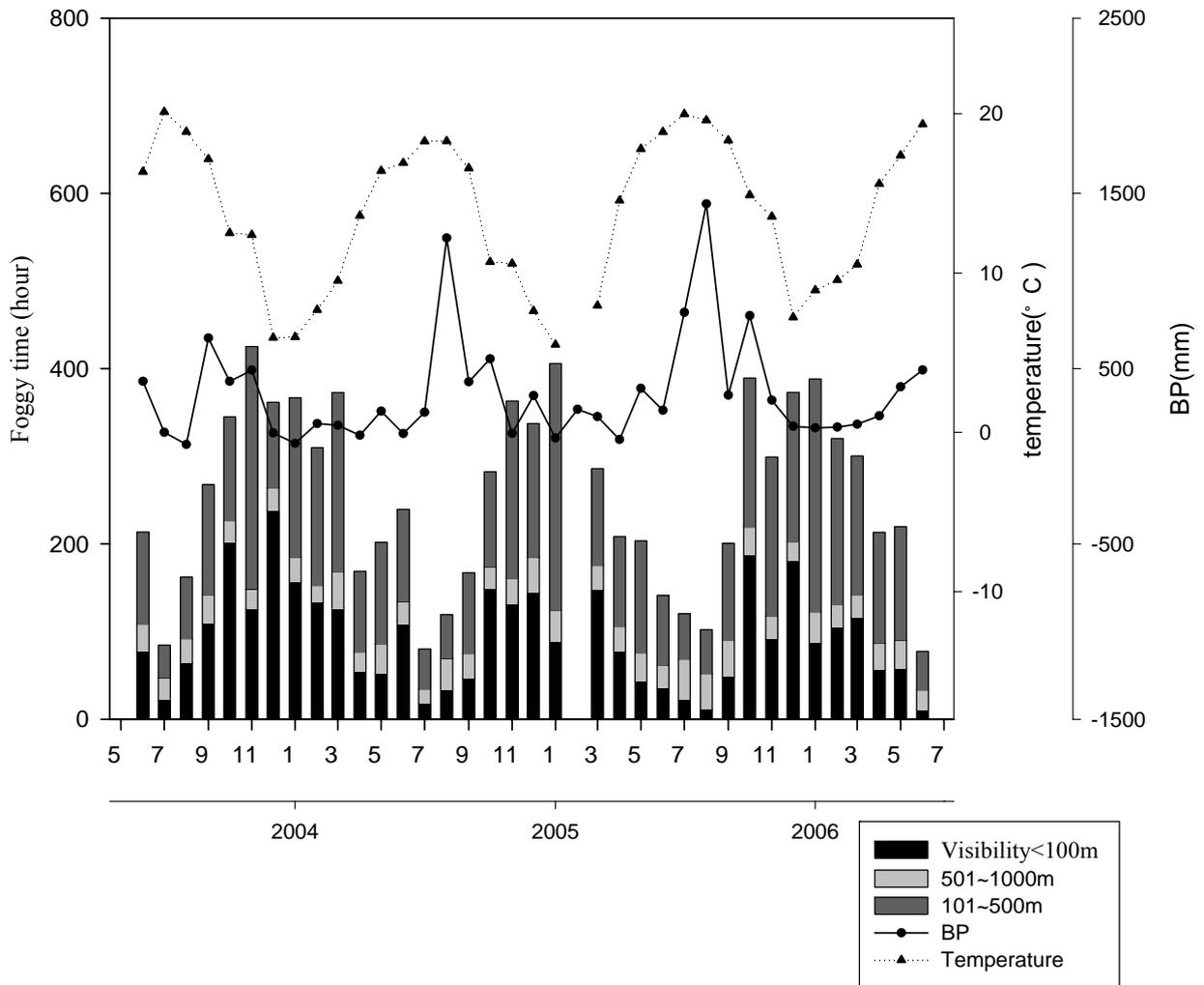


圖 11 2003 年 6 月至 2006 年 6 月每月雲霧籠罩時數圖。BP 代表雨水，三個能見度等級代表不同程度的雲霧濃度。雨量主要集中在夏季，且明顯受到颱風影響而波動。雲霧年平均籠罩時間為 3118 小時，季節雲霧籠罩變化差異甚大，單月最高籠罩時間可達 425 小時，最低僅有 75 小時。雲霧主要集中在冬春兩季，與降雨趨勢相反，冬春季雲霧以濃霧為主，以冬季為例能見度低於 100 m 的濃霧佔冬季總雲霧時數的 45%，而夏季僅佔 23%。

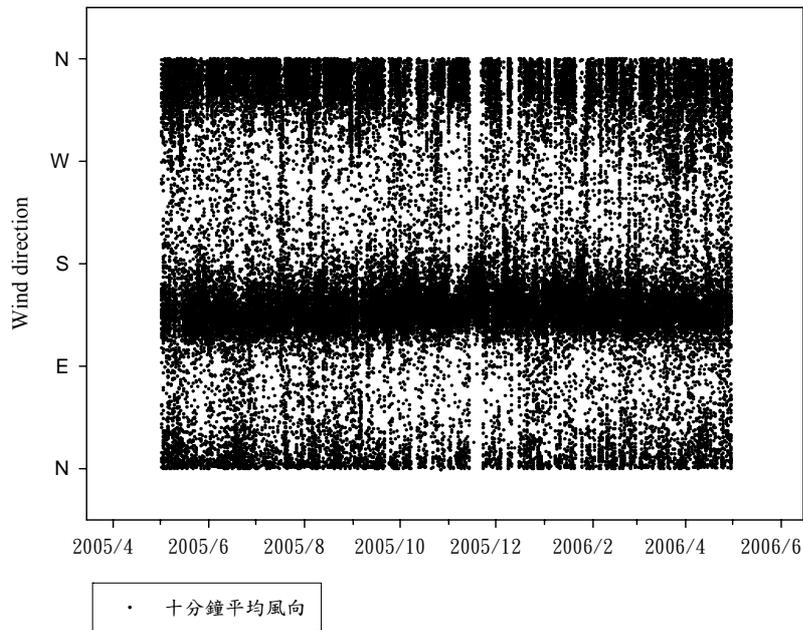


圖 12 2005 年 5 月至 2006 年 5 月間雲霧籠罩時的平均風向。黑點為雲霧事件發生時，當時所吹撫的風向，雲霧期間主要風向為東南風以及北風。

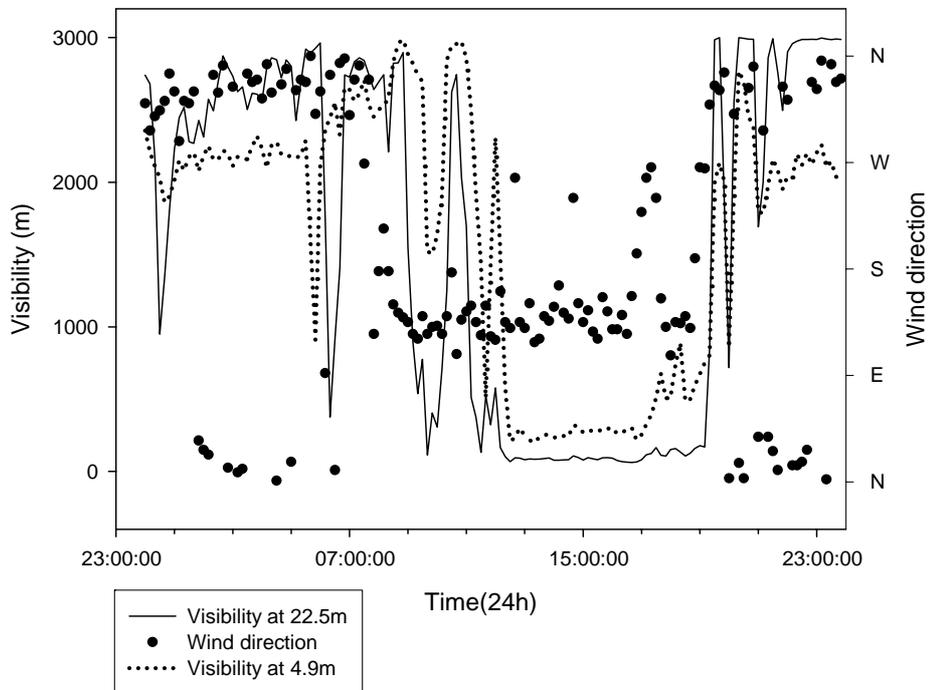


圖 13 2006 年 3 月 10 日單日能見度與風向示意圖。本區雲霧事件的變化，通常伴隨風向的改變，風向改變為東南風時開始出現雲霧，當東南風轉變為北風時雲霧隨即消散。且冠層內外雲霧事件並不同步，會有時間上差異。

4.2 基礎雲霧化學

本研究以未受冠層影響的雲霧，對本樣區的基礎雲霧化學特性進行探討，所使用的資料為冠層頂端雲霧樣本 C~K。2006 年 1 月 5 日至 2006 年 5 月 25 日的資料顯示，大小顆粒雲霧皆以 SO_4^{2-} 與 NH_4^+ 濃度為優勢的陰陽離子，雨水優勢的陰陽離子則為 SO_4^{2-} 與 Ca^+ 。雲霧與雨水離子濃度差異甚大，雲霧離子濃度較雨水高 2~27 倍。大小粒徑雲霧水彼此間離子濃度也有所差異，小顆粒雲霧具有較高的離子，以 NH_4^+ 濃度差異最大，兩者相差約 4.5 倍，其他離子部份小顆粒雲霧約為大顆粒雲霧的 1~3 倍間(圖 14)。

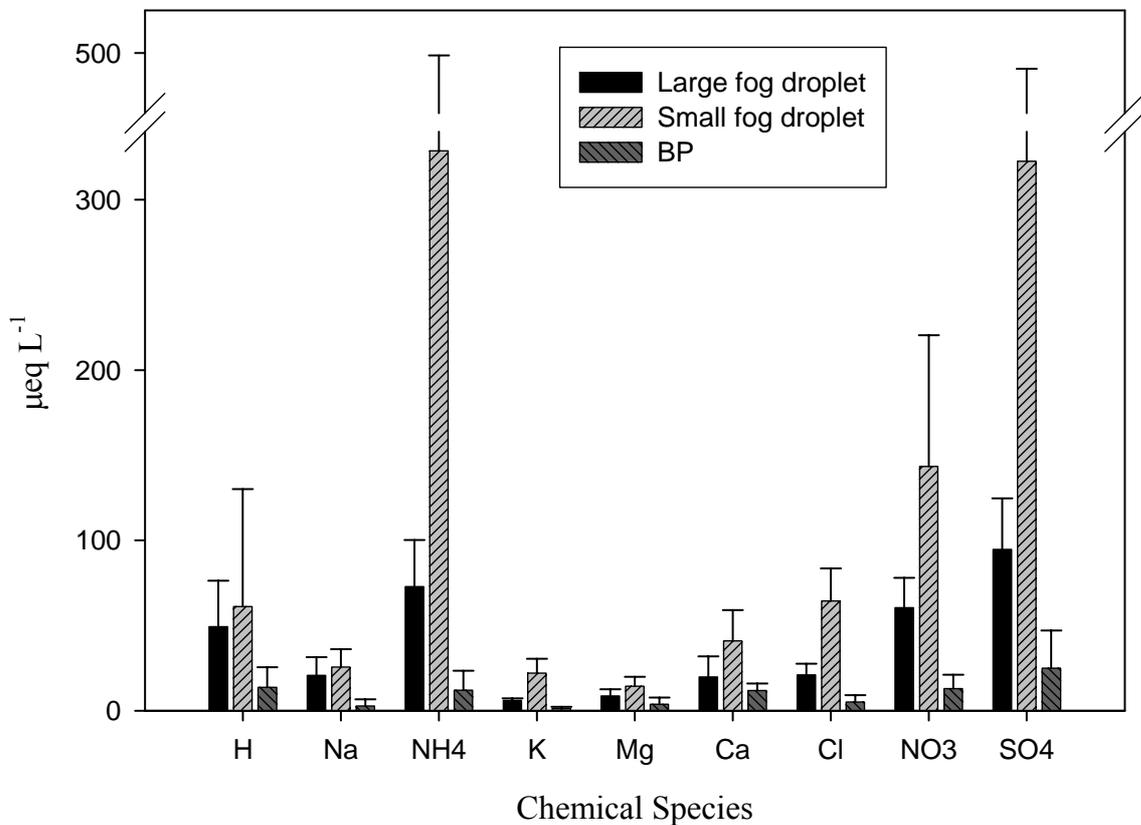


圖 14 2006 年 1 月 5 日至 2006 年 5 月 25 日雲霧樣本與雨水離子濃度平均值。BP 代表雨水，三種樣本彼此濃度差異甚大，各離子濃度以小顆粒雲霧濃度最高，大顆粒次之，雨水最低。

以組成比例來看，在兩個徑級雲霧顆粒樣本中， NH_4^+ 為最優勢的陽離子，分別佔大顆粒與小顆粒雲霧陽離子組成的 27%與 32%；雨水則以 Ca^{2+} 為優勢陽離子，佔總組成 17%，高於 NH_4^+ 的 12%。在雲霧與雨水樣本間陰離子組成相當的類似，皆以 SO_4^{2-} 為優勢組成， NO_3^- 次之， Cl^- 最低，且三者所佔比例也十分接近， Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 所佔比例分別為 6~7%、16~17%、27~31%之間。小顆粒雲霧中 H^+ 所佔比例遠小於雨水及大顆粒雲霧， NH_4^+ 則相反，相較於雨水及大顆粒雲霧， NH_4^+ 在小顆粒雲霧組成佔有較高的比例(圖 15)。

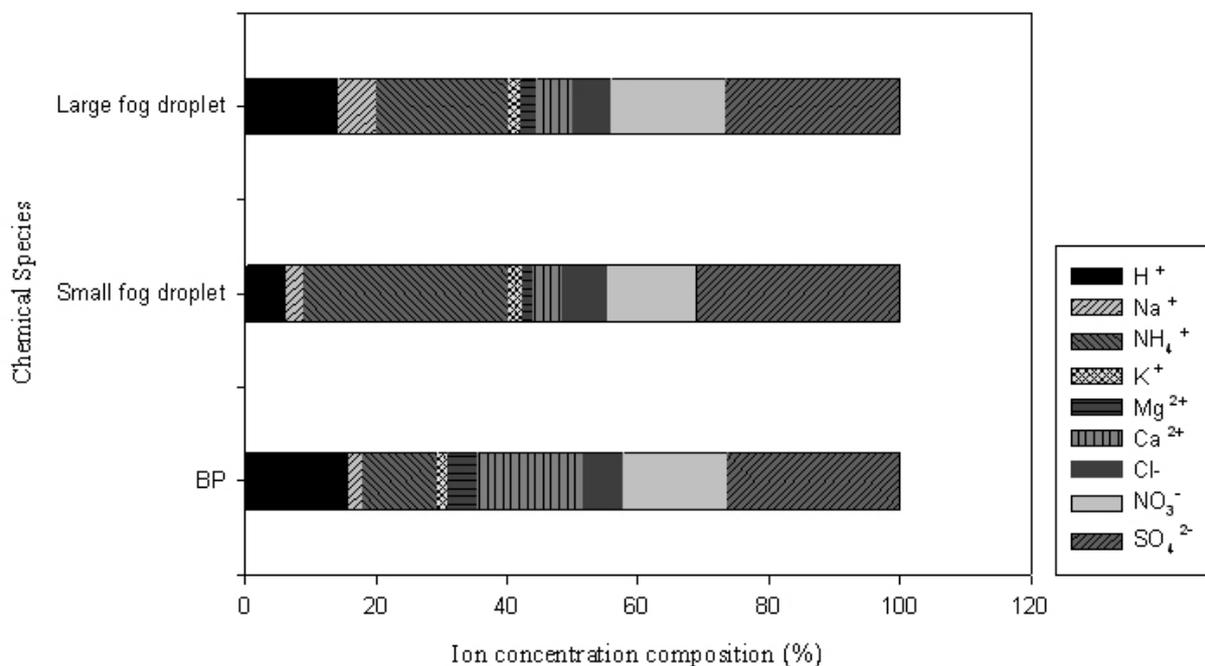


圖 15 2006 年 1 月 5 日至 2006 年 5 月 25 日雲霧樣本與雨水離子濃度百分比組成。BP 代表雨水。大小顆粒雲霧皆以 SO_4^{2-} 與 NH_4^+ 濃度為優勢的陰陽離子，雨水優勢的陰陽離子則為 SO_4^{2-} 與 Ca^{2+} 。雲霧與雨水離子濃度差異甚大，雲霧離子濃度較雨水高 2~27 倍。大小粒徑雲霧水彼此間離子濃度也有所差異，小顆粒雲霧具有較高的離子，以 NH_4^+ 濃度差異最大，兩者相差約 4.5 倍，其他離子部份小顆粒雲霧約為大顆粒雲霧的 1~3 倍間。

自 2006 年 2 月至 2006 年 5 月間， NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 各次水樣變化趨勢相近，大顆粒雲霧濃度各次樣本間並無明顯的變化。但小顆粒雲霧濃度要遠高於大顆粒雲霧，各次樣本間各有起伏，且三者變化相似。 K^+ 則在大小顆粒雲霧濃度皆無太大的變化，整個期間皆呈現較低值的狀態(圖 16)。同樣的期間 Na^+ 、 Cl^- 和 Mg^{2+} 三者大小雲霧顆粒濃度差異並不若 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 如此大，且彼此間雲霧濃度的變化趨勢相似(圖 17)。

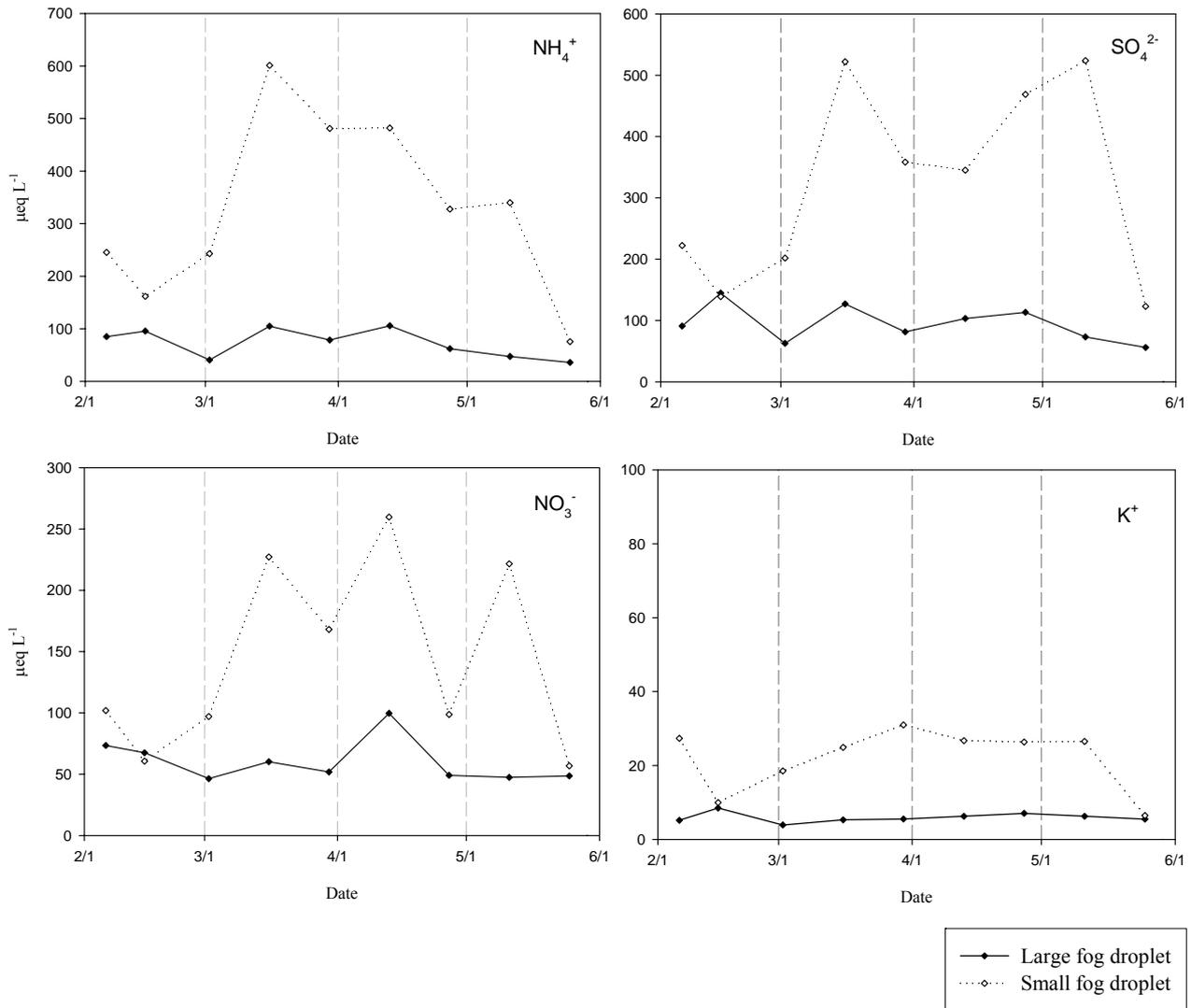


圖 16 自 2006 年 2 月至 2006 年 5 月間雲霧 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 K^+ 濃度的變化趨勢圖。
 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 在研究期間，各次水樣變化趨勢相近，大顆粒雲霧濃度各次樣本間並無明顯的變化。但小顆粒雲霧濃度要遠高於大顆粒雲霧，各次樣本間各有起伏，且三者變化相似。 K^+ 則在大小顆粒雲霧濃度皆無太大的變化，整個期間皆呈現較低值的狀態。

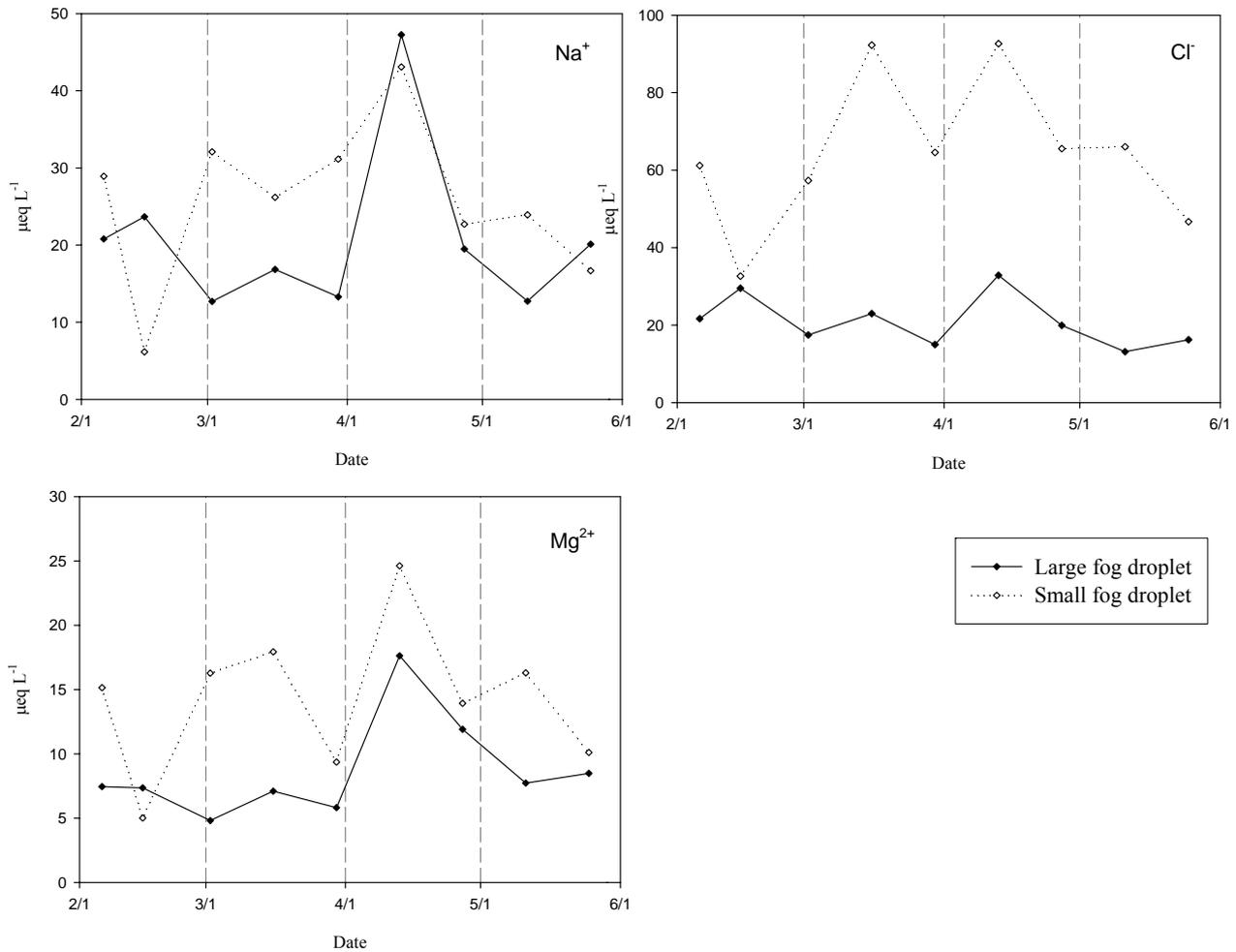


圖 17 自 2006 年 2 月至 2006 年 5 月間雲霧 Na^+ 、 Cl^- 和 Mg^{2+} 濃度的變化趨勢圖。在研究期間 Na^+ 、 Cl^- 和 Mg^{2+} 三者大小雲霧顆粒濃度差異並不若 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 如此巨大，且大小顆粒彼此間的變化趨勢相似。

4.3 冠層雲霧變化

雲霧進入冠層後在水量以及化學性質上都受到冠層的影響，雲霧水量在冠層中有減少的情形，而大小顆粒離子濃度在進入冠層後的情形也不盡相同。

以研究期間冠層頂端的收集器的水量為 100%，檢視各層水量變化，發現大顆粒雲霧進入冠層後水量有減少的趨勢(圖 18)，冠層底部所收集到的水量最少，僅為冠層頂端的 14%，明顯受到冠層攔截影響。小顆粒雲霧進入冠層後亦受攔截而減少，為頂端雲霧的 58%，但在冠層下緣並未若大顆粒雲霧般繼續減少，而在地面的部份幾乎未受到攔截。

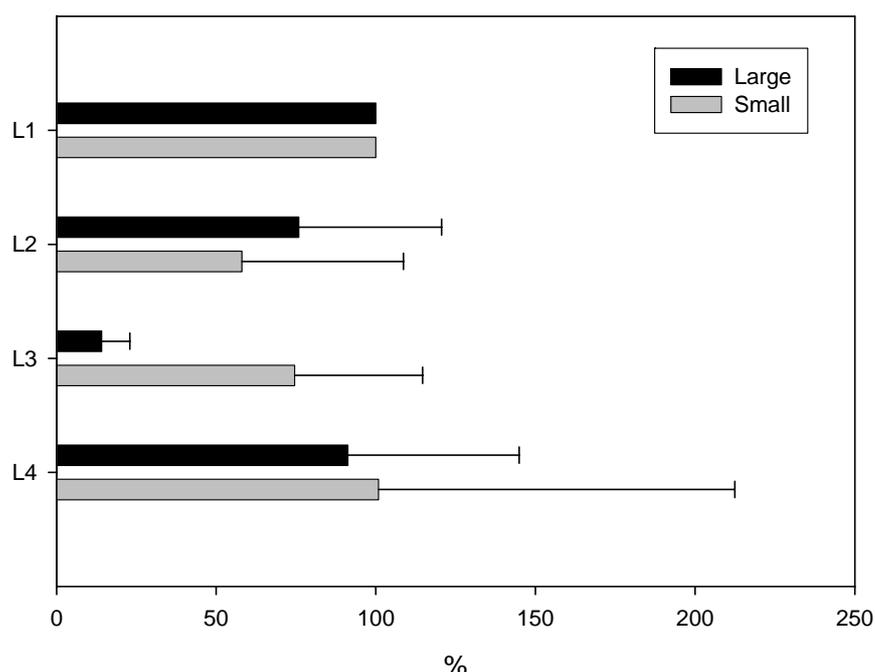


圖 18 2006 年 1 月 5 日至 2006 年 5 月 25 日的雲霧樣本以各次冠層頂端 L1 水量為 100%，各層間的水量變化。大顆粒雲霧進入冠層後水量有依序減少的趨勢，L3 所收集到的水量最少，僅為 L1 的 14%，明顯受到冠層攔截影響。小顆粒雲霧進入 L2 後亦受攔截而減少，為 L1 的 58%，但在 L3 並未若大顆粒雲霧般繼續減少，而在 L4 的部份幾乎未受到攔截。

經整理研究期間各次的樣本在冠層中濃度的變化，以小顆粒雲霧的變化較有一致性的趨勢。小顆粒雲霧的 NH_4^+ 與大顆粒雲霧的 Mg^{2+} 在進入冠層後皆有濃度下降的趨勢，而小顆粒雲霧中的 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 進入冠層後濃度都明顯出現上升的趨勢(圖 19)。

若檢視冠層各位置的雲霧離子濃度的平均值，發現大顆粒雲霧在進入冠層時離子濃度改變並不大，但在冠層底部時各離子濃度都有升高的趨勢，尤其以 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 最為明顯，但在地面部份大顆粒雲霧濃度又恢復較低濃度的狀態。小顆粒雲霧較無一致的變化，在進入冠層後 H^+ 、 NH_4^+ 有逐步下降的趨勢，而 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 在進入冠層中間部分後，濃度皆有升高，但在接近地面的部份，小顆粒雲霧濃度則大幅下降。就整體而言，大顆粒雲霧離子在冠層底部具有較高的濃度，其餘部分濃度相當類似，小顆粒雲霧各離子在冠層中變動不一致，且在地面位置濃度變化最大(圖 20)。

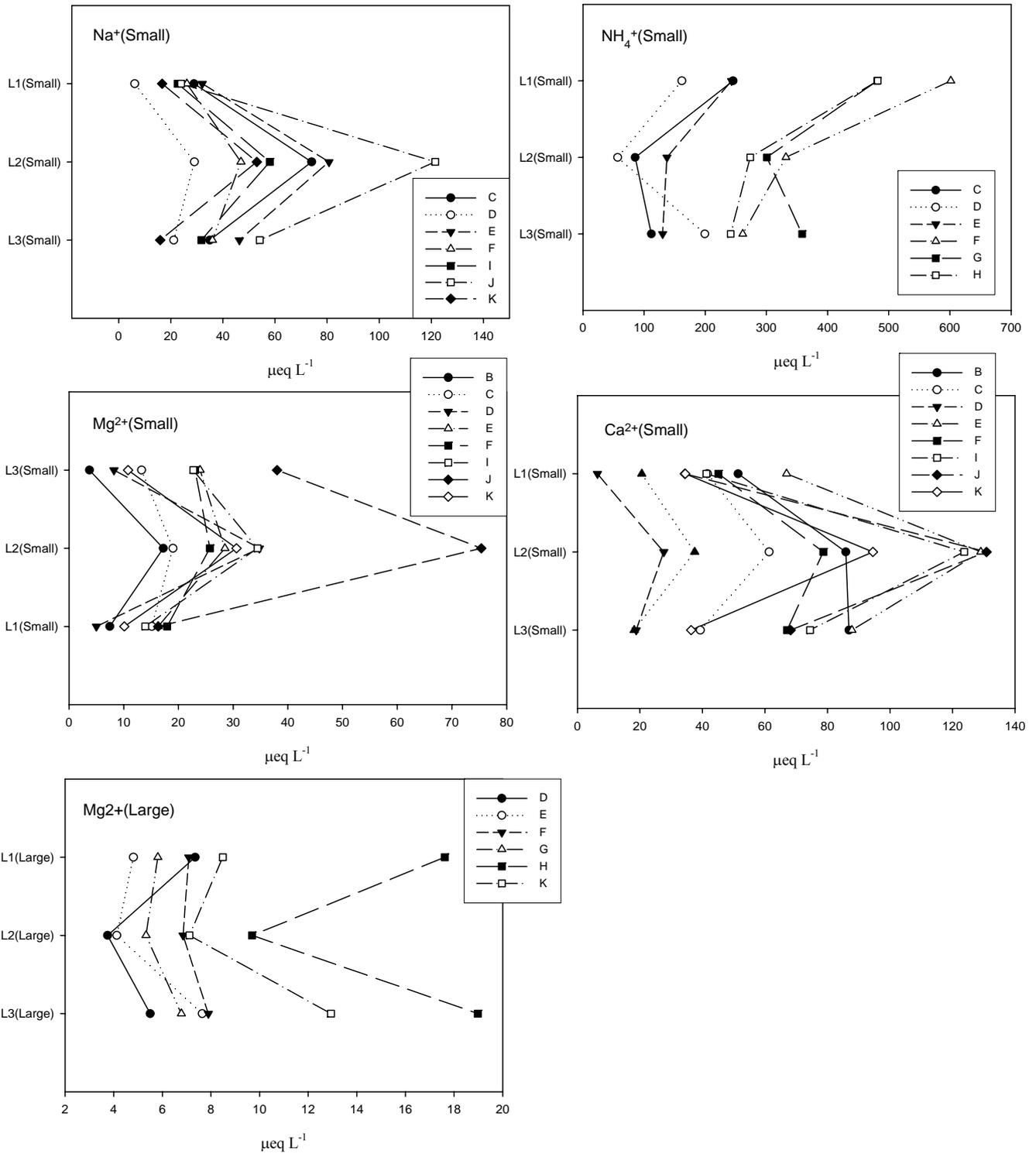


圖 19 雲霧離子濃度在冠層間變化趨勢較一致的離子。以小顆粒雲霧的變化較有一致性的趨勢，大顆粒雲霧僅 Mg^{2+} 有比較類似的趨勢。

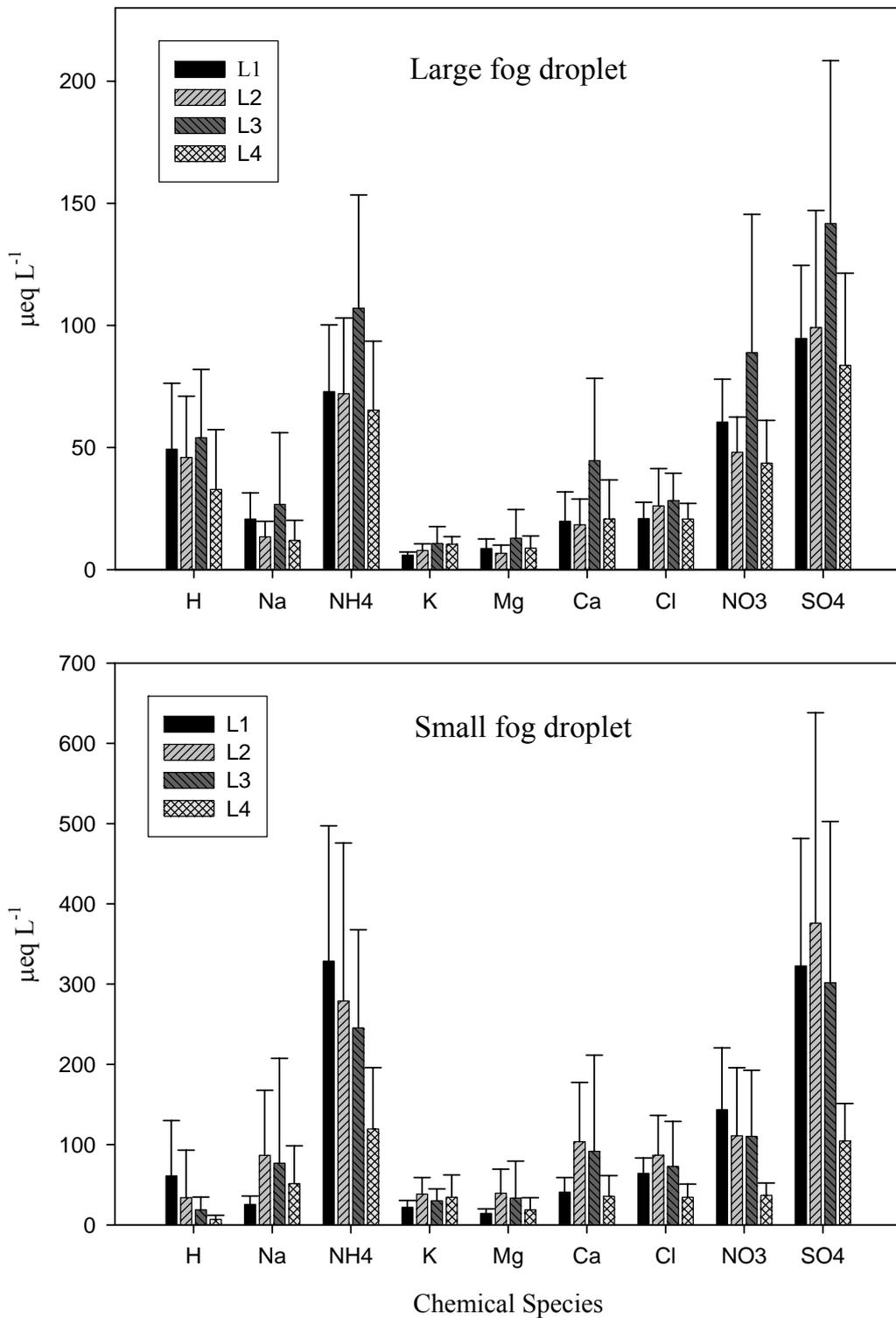


圖 20 2006 年 1 月 5 日至 2006 年 5 月 25 日冠層內雲霧離子濃度變化圖。大顆粒雲霧僅在冠層底部 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 離子濃度有升高。小顆粒雲霧在進入冠層後 H^+ 、 NH_4^+ 有逐步下降的趨勢，而 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 在進入冠層中間部分後，濃度皆有升高，但在接近地面的部份濃度則大幅下降。

L1 雲霧在進入 L2 之後，大顆粒雲霧在進入冠層後各離子濃度雖有變化，但在組成方面改變並不明顯，僅 Ca^{2+} 與 H^+ 比例在 L3 的位置增加約 4%。小顆粒雲霧在冠層內外組成變化較大，進入冠層後 H 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 所佔比例明顯減少， Na^+ 、 Ca^{2+} 比例則有所增加，而 K^+ 、 Mg^{2+} 組成比例則是在地面的部份有大幅度的增加以及減少。(圖 21 與圖 22)。

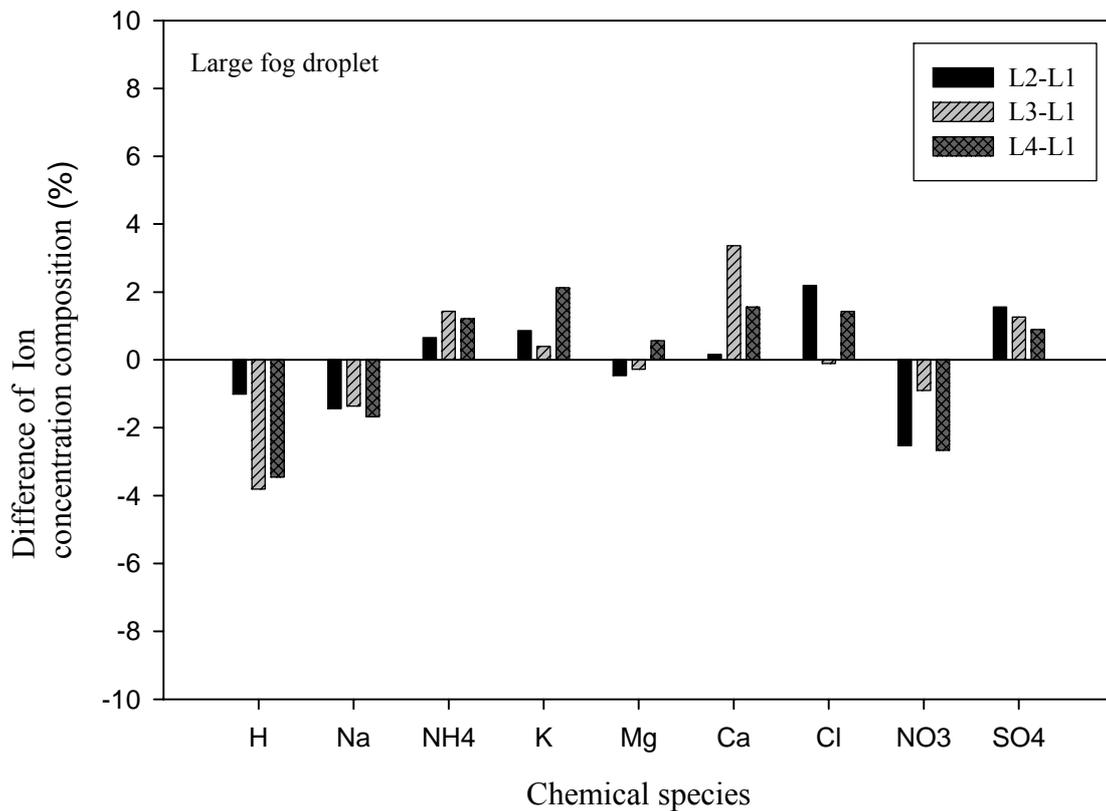


圖 21 2006 年 1 月 5 日至 2006 年 5 月 25 日期間，大顆粒雲霧離子在冠層內外組成比例的差異，本表所顯示的值为 L2-L3 養分組成百分比與 L1 的差值。L1 雲霧在進入 L2 之後，大顆粒雲霧在進入冠層後各離子濃度雖有變化，但在組成方面改變並不明顯，僅 Ca^{2+} 與 H^+ 比例在 L3 的位置有 4% 的增加。

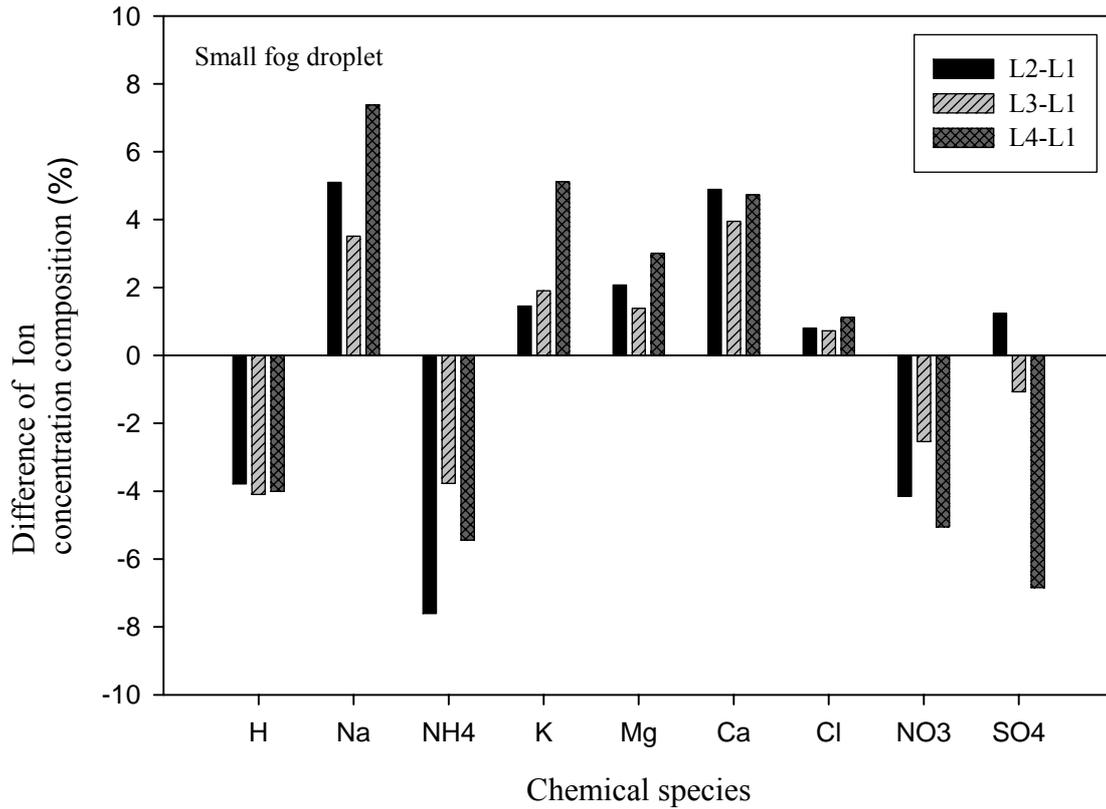


圖 22 2006 年 1 月 5 日至 2006 年 5 月 25 日小顆粒雲霧離子在冠層內外組成比例的差異，本表所顯示的值為 L2-L3 養分組成百分比與 L1 的差值。小顆粒雲霧在冠層內外組成變化較大，進入冠層後 H^+ 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 所佔比例明顯減少， Na^+ 、 Ca^{2+} 比例則有所增加，而 K^+ 、 Mg^{2+} 組成比例則是在地面的部份有大幅度的增加以及減少。

4.4 雲霧沉降估算

以 2005 年 5 月至 2006 年 4 月的能見度資料帶入雲霧沉降經驗模式求得雲霧年沉降量為 204 mm，約佔全年濕沉降的 4%，主要沉降集中於冬春季(11-4 月)佔總雲霧沉降的 65%，最高沉降 10 月的 31.5 mm，最低為 8 月的 4 mm，單月沉降可佔 5~15%。

將 2006 年 1 月 5 日至 3 月 13 日期間的雲霧離子濃度配合沉降水量進行估算，發現冠層上下部分別沉降 13.2 與 32.3 mm 的水量，幹層下部攔截了 71%的雲霧沉降量，冠層上下總離子沉降量分別為 1700 與 3250 g/ha，也是以冠層下部為主要輸入源。(表 6)

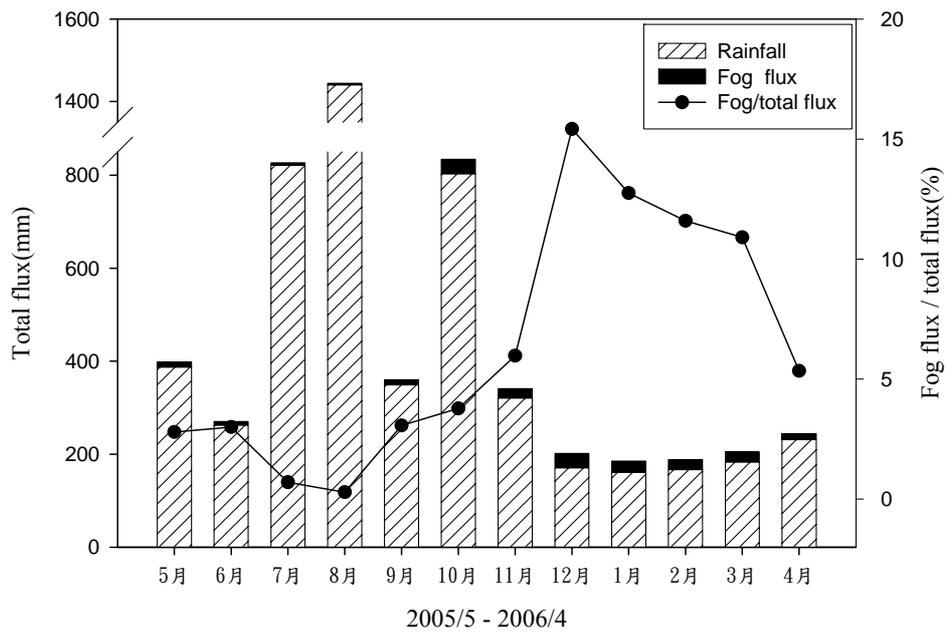


圖 23 2005 年 5 月至 2006 年 4 月雲霧沉降水比例。雲霧沉降主要集中在冬春季，沉降水比例可達總濕沉降 5~15%。

表 6 2006 年 1 月 5 日至同年 3 月 13 日冠層上下部各雲霧各離子沉降量。冠層上下部分別沉降 13.2 與 32.3mm 的水量，幹層下部攔截了 71% 的雲霧沉降量，冠層上下總離子沉降量分別為 1700 與 3250 g/ha，也是以冠層下部為主要輸入源。

	沈降水量 (mm)	各離子沉降量(g/ha)								
		H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
冠層上部攔截	13.2	5.8	56.4	223.1	35.1	11.3	23.6	116.9	541.5	685.6
冠層下部攔截	32.3	11.5	133.9	389.1	124.5	19.8	72.3	310.8	806.0	1385.8

5. 討論

5.1 雲霧物理

本樣區(1400-1800 m a.s.l.)雲霧多產生在東南風盛行時，雲霧的產生受到風向影響，風向的改變常伴隨雲霧的產生與消散，雲霧產生時以東南風及北風為主，年平均雲霧籠罩時間為 3118 小時，雲霧多產生在冬春季。中國雲南 Xishuangbanna 溪谷的森林(750m a.s.l.)中，雲霧的產生大多在西南風起的時候，且雲霧集中在冬春季有較高的出現頻率，冬春季雲霧籠罩時間佔了全雲霧時數 1949 小時的 83%(Liu *et al.*, 2005)。德國

Erzgebirge(850-880m a.s.l.)山區的雲霧約有 80%產生在西北風及南風時，平均全年雲霧籠罩時間 1896 小時，同樣的在冬春季有較高的雲霧出現頻率(Lange *et al.*, 2003)。三地雲霧籠罩皆集中於冬春季，雲霧同樣受風向影響，集中出現在特定風向時，不過本樣區雲霧籠罩時數要遠高於其他二地。可能因三地皆為山區地形，受平原方向氣團抬升而產生雲霧，雲霧生成與風向具密切關聯，而地勢較高的地區，氣團抬升較高，水氣更易凝結，因此可能是本樣區雲霧籠罩時數要較高的原因。

在各次雲霧事件中林內外所出現的時間差現象，可能的原因為氣團隨高度抬升時接近地面的部份受到森林阻礙而移動較為緩慢，或是由於雲霧由冠層上部進入冠層內時間延遲所造成。本研究並未設置測量雲霧粒徑分布的儀器，因此無法直接判斷本區雲霧顆粒的組成狀態與 LWC。但在研究期間能見度介於 500 至 1000 m 的薄霧僅佔各月份的 5~40%，且本研究期間冠層外 sf-CASCC 收集的水量，大顆粒水量佔總收集水量 74~96%，因此推測本區雲霧的組成以粒徑 30 μm 以上的大顆粒為主，LWC 可能較高，至於詳細的 LWC 與粒徑分布狀況仍需架設儀器加以觀察。

5.2 雲霧化學組成

Marinoni *et al.* (2004)在法國中部山區的研究因受到周邊的工業區域影響，因而具有三種不同程度的雲霧狀態，總離子濃度小於 18 mg/L 為未受任何影響的雲霧，離子濃度介於 18~50 mg/L 為受到普通環境影響的雲霧事件，大於 50 mg/L 則為受到嚴重污染的雲霧。本樣區周邊並未有工業區，且將研究期間大小顆粒雲霧水混合，發現僅 A、B 二週次水樣總離子濃度大於 100mg/L，其餘水樣除樣本 H 總離子濃度為 20mg/L 外，其餘樣本皆低於 18mg/L。另外根據 Elbert *et al.*(2000)的研究，雲霧中的離子濃度與 LWC 含量有密切的負相關，LWC 越高雲霧中離子濃度越低，而本樣區雲霧先前推測可能以大顆粒為主，具有高 LWC，因此本區的雲霧離子濃度較低可能是由於(1)雲霧離子來源，並未受到過多污染物影響；且(2)雲霧具有高 LWC 所導致。

另外雲霧水 pH 值若接近或低於 3 稱之為酸霧，此類雲霧常造成森林傷害。Nara *et al.*(2001)在日本 Tanzawa 山區所收集雲霧，發現在受到酸傷害森林的地區所測得的雲霧 pH 為 3.3，而未受酸傷害森林地區的雲霧 pH 值為 3.7。日本 Oyama 山區的雲霧資料也顯示此區造成森林酸傷害的雲霧 pH 介於 3.5 左右(Igawa *et al.*, 2002b; Igawa *et al.*, 1998)。本樣區自 2002 年 11 月雲霧監測以來僅一次樣本 pH 為 3.4，其餘樣本 pH 皆高於 3.5，較國外造成酸傷害的雲霧 pH 為高。

本研究中冠層頂端雲霧中 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 的離子濃度較同樣本其他離子高，且具有較大幅度的變化，可能是由於此類物質來源受到人為活動如農業、石化燃料燃燒等非自然因素影響，來源並不穩定因此而有所波動。在雨水與雲霧離子組成比例中，雨水的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 H^+ 所佔的比例要高於雲霧， NH_4^+ 則是在雲霧比例中佔優勢。由於 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的來源通常為大氣懸浮的微粒，此部分所提供的比例雲霧與雨水差異不大，但雲霧在形成過程中有較常的時間懸浮在大氣中，可供 NH_3 氣體溶於雲霧顆粒而造成高 NH_4^+ 濃度，造成雨水與及雲霧組成比例的差異。其中又以小顆粒能提供更大的表面積進行氣體溶解，因此推測此為小顆粒雲霧 NH_4^+ 離子濃度所佔組成比例最高的原因。另外由於 NH_4^+ 為 NH_3 中和酸性物質的產物(Aikawa *et al.*, 2005)，因此在高 NH_4^+ 濃度的小顆粒雲霧中， H^+ 所佔比例要較大顆粒雲霧以及雨水來得低(圖 15)。此部分研究結果與德國 Erzgebirge 的雲霧狀況類似，該地區雲霧 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 即佔總離子濃度的 81%，遠高於同地區雨水的 68%，但雨水 H^+ 佔了全離子濃度的 13%，較雲霧水的 7% 為高(Zimmermann & Zimmermann, 2002)。

在國外的研究中常發現離海較近的區域海鹽常為雲霧主要的離子來源之一，本樣區離海約 40km，可能會受到海洋氣團的影響。若各離子進行相關性分析， Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 同為海鹽來源彼此間應該具有高度的相關(Igawa *et al.*, 1998)。在本研究小顆粒雲霧中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 相互具有高相關($r = 0.82$ 、 0.77 、 0.86)，但在大顆粒部分 Mg^{2+} 與 Cl^- 之間相關性並不高($r = 0.61$)(表 7)。又海鹽組成比例 $[\text{Na}^+]/[\text{Cl}^-]$ 約為 0.86，因此可利用此特性來檢視雲霧鹽類的來源是否為海洋性來源。Ogawa *et al.* (1999) 在日本的 Mokokodake 山區的研究就發現此區收集的雲霧， $[\text{Na}^+]/[\text{Cl}^-]$ 濃度比例都約為 0.86。Aikawa *et al.* (2005) 在日本 Rokko 山區所收集到的雲霧 $[\text{Na}^+]/[\text{Cl}^-]$ 則為 1.07，因此判斷該區雲霧可能還受到其他離子輸入的影響。本研究期間僅有 C、K 兩次樣本(0.85、0.92)與海鹽比例較為接近，其他樣本比例分別為 0.63、0.71、0.68、0.77、1.17、0.76、0.72 皆與此數值有明顯的差距，因此推論本樣區雲霧鹽類來源並非完全受海洋氣團的影響。

相較於小顆粒雲霧，大顆粒雲霧中 NO_3^- 分別與 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 有較高的相關性，可能是由於構成此類化合物的顆粒要較大，所形成的雲霧以大顆粒為主，因而在大顆粒部分有較高的相關性。 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 三者相互具有高相關，且 Na^+ 、 Mg^{2+} 可能非由海鹽類提供，因此此類離子可能來自於地表的揚塵(Ali *et al.*, 2004)。

表 7 2006 年 1 月 5 日至 2006 年 5 月 25 日冠層頂端各離子間的相關性分析結果(n=9)。

表(A)為大顆粒雲霧，表(B)為小顆粒雲霧，*代表 $P < 0.05$ 。

(A)									
	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
H ⁺	1								
Na ⁺	-0.09	1							
NH ₄ ⁺	0.23	0.54	1						
K ⁺	0.38	0.31	0.35	1					
Mg ²⁺	-0.26	0.89*	0.36	0.34	1				
Ca ²⁺	-0.43	0.88*	0.46	0.35	0.93*	1			
Cl ⁻	0.31	0.83*	0.77*	0.47	0.61	0.6	1		
NO ₃ ⁻	-0.1	0.91*	0.76*	0.23	0.7*	0.79*	0.87*	1	
SO ₄ ²⁻	0.54	0.31	0.79*	0.69*	0.23	0.23	0.71*	0.41	1

(B)									
	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
H ⁺	1								
Na ⁺	-0.26	1							
NH ₄ ⁺	0.11	0.6	1						
K ⁺	0.1	0.68*	0.76*	1					
Mg ²⁺	0.08	0.82*	0.55	0.51	1				
Ca ²⁺	-0.23	0.86*	0.36	0.38	0.84*	1			
Cl ⁻	0.1	0.77*	0.87*	0.68*	0.86*	0.65	1		
NO ₃ ⁻	0.34	0.65	0.85*	0.66	0.73*	0.42	0.87*	1	
SO ₄ ²⁻	0.64	0.32	0.77*	0.72*	0.47	0.19	0.71*	0.73*	1

NH₄⁺分別與 NO₃⁻和 SO₄²⁻具有高相關(Aikawa *et al.*, 2001)，根據前人研究 NH₃ 具有高度的中和能力，能有效中和雲霧中主要的酸源 NO₃⁻與 SO₄²⁻(Aikawa *et al.*, 2005; Ali *et al.*, 2004; Marinoni *et al.*, 2004)，因此若[NH₄⁺]為主要的中和物質產物與[NO₃⁻+SO₄²⁻]應具有高度相關(Cini *et al.*, 2002)。在本研究中[NH₄⁺]與[NO₃⁻+SO₄²⁻]在大小顆粒相關分別為 0.93、0.96 與因此 NH₃ 可能為本地區主要的酸性中和物質。

依研究期間的離子資料，K⁺濃度並無明顯的變化，因 K⁺主要是由植物體燃燒所釋放，本樣區終年潮濕並未有森林火災事件發生，可能為 K⁺不論大小顆粒雲霧濃度皆

處於較低狀態的原因。 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 此三種離子有較一致的波動變化，且三同屬海鹽類離子，可能是由於海洋性氣團進入時，將海洋鹽類帶入樣區，而使三者間有較一致性的起伏變化(Aikawa *et al.*, 2005)。另外在 NH_4^+ 、 NO_3^- 與 SO_4^{2-} 中小顆粒雲霧濃度要遠高於大顆粒雲霧，且小顆粒雲霧濃度的波動也類似，可能是由於當地環境氣體的溶解所造成的小顆粒雲霧同樣的高濃度變化。

5.3 冠層雲霧變化

大顆粒雲霧進入冠層後水量明顯減少可能是因為大顆粒雲霧較易被葉面所攔截，故造成水量的減少，而地面層因缺乏如冠層般良好的攔截體因此地面水量與林外差異並不明顯。小顆粒雲霧因顆粒較為細小不易受葉片攔截故進入冠層後減少的比例便不若大顆粒雲霧明顯，且在冠層下端可能受到地面層雲霧顆粒的補充因此水量會較冠層中來的豐富，地面層同樣因缺乏攔截體使得小顆粒雲霧與冠層外水量幾乎相同。

本區雲霧受冠層影響後大顆粒雲霧離子組成比例變化不大，與 DeFelice (2002a) 未區分顆粒的雲霧冠層研究結果類似，雲霧進入冠層後冠層內外離子組成比例相似，推測可能的原因為：(1)大顆粒雲霧受到冠層均勻的攔截；(2) $30\ \mu\text{m}$ 以上的顆粒所攜帶離子濃度比例類似。而在 L3 位置大顆粒雲霧濃度所增加的離子，恰與小顆粒雲霧濃度較高的種類相同。且由收集水量得知，大顆粒雲霧在 L3 的位置水量遭到大幅的攔截，因此在收集器收集時可能混入較多比例的小顆粒雲霧，而造成大顆粒雲霧 L3 位置多項離子濃度突然的增加。

而進入冠層的小顆粒雲霧與冠層外有明顯的差異，顆粒雲霧在冠層內外組成變化較大。進入冠層後 H^+ 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 所佔比例明顯減少， Na^+ 、 Ca^{2+} 比例則有所增加，而 K^+ 、 Mg^{2+} 組成比例則是在地面的部份有大幅度的增加以及減少，可能的原因應為：(1)直徑 $7\sim 25\ \mu\text{m}$ 的顆粒離子濃度比例有差異，且(2)小顆粒雲霧受到冠層不均勻的攔截所致。

5.4 雲霧沉降

經估算後的雲霧沉降(表 6)，發現無論離子及水量冠層下部都占較大輸入量，但若以單位水量沉降離子來看，以冠層上部所提供的 Na^+ 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 離子有較高的沉降量，而 K^+ 、 Ca^{2+} 離子則是在冠層下部具有較高的沉降比例，兩者明顯受到冠層內外雲霧濃度差異的影響。

國外研究指出雲霧頻率與降水量隨海拔增加，離子濃度隨海拔升高而降低(Igawa *et al.*, 2001, 2002b; Zimmermann & Zimmermann, 2002)。瓜地馬拉山區雲霧森林(2550m a.s.l.)，雲霧沉降在乾季(11-4 月)平均每日沉降為 1 mm，雨季(5-10 月)則為 0.5 mm(Holder, 2004)。雲南山區的溫帶雨林(750m a.s.l.)乾季雲霧沉降佔了全雲霧沉降的 86% 共 56.2 mm，平均每日沉降 0.3 mm(Liu *et al.*, 2004)，而本區經估算 11-4 月每日雲霧沉降量為 0.7 mm、5-10 月平均每日沉降為 0.4 mm，介於兩者之中。

以一般方式估算(以冠層外雲霧離子濃度乘以全林份降水量)同時段離子以及水量的沉降，並與本研究估算結果比較。兩者水量估算差異不大，兩者約相差 10%，但在離子沉降方面有較明顯的差異，其中以傳統估算方式 NO_3^- 與 SO_4^{2-} 要較本研究高估約 54% 與 28%， K^+ 較本研究約低估了 17%。証實若不考慮冠層高度攔截能力的差異，以及雲霧在冠層間的變化對沉降進行離子沉降估算，兩者間的確會產生很大的差異(表 8)。

另將雲霧沉降量與雨水做比較，發現雨水降水量遠高於雲霧沉降，約為雲霧的 8 倍。但在離子沉降方面，雲霧中的 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 沉降量皆較雨水來的高，而 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 則是雨水輸入較高。綜合而言，雲霧輸入水量雖遠較雨水為較低，但雲霧的離子高濃度特性使得在森林離子輸入亦佔有關鍵的影響(表 8)。

雲霧的沉降估算因受到收集儀器效能(Kulshrestha *et al.*, 2005; Wieprecht *et al.*, 2005)，測量法，地形因素(Blas *et al.*, 2002)，氣象參數(e.g. LWC、雲霧頻率、風速)(Kobayashi *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2004)，植被類型(Kulshrestha *et al.*, 2005; Thalmann *et al.*, 2002)等因素影響。本研究不以收集器估算水量，且在乎緩均質的 1 公頃樣區進行估算，因此收集器效能，地形與植被差異的影響較小。且利用實際扁柏攔截率估算樣區雲霧降水量時，包含氣象參數的影響，並考慮到冠層間雲霧化學上的差異，因此在本樣區的估算方式可能較一般沉降估算的結果合理。

表 8 以一般估算方式計算 2006 年 1 月 5 日至同年 3 月 13 日的沉降結果，並與本研究的計算及同時段雨水沉降比較。兩種沉降水量估算差異不大，兩者約相差 10%。在離子沉降方面有較明顯的差異，以一般估算方式 NO_3^- 與 SO_4^{2-} 要較本研究高估約 54% 與 28%， K^+ 較本研究約低估了 17%。同期間雨水的沉降水量遠高於雲霧沉降，約為雲霧沉降的 8 倍。但在離子沉降方面，雲霧中的 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 沉降量皆較雨水來的高，雲霧對於離子的輸入佔有重要的比例。

	沈降水量 (mm)	各離子沉降量(g/ha)								
		H^+	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^+	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
一般估算方式	50.3	22	216	863	135	43	91	449	2076	2647
本研究	45.5	17	190	612	160	31	96	428	1348	2071
BP	351.5		113	340	122	140	614	687	1702	3351

6. 結論

本樣區雲霧情況受季節與風向影響，受到雲霧形成原因的影響，雲霧頻率與時間週期性強。本區雲霧受到人為干擾並不強烈，離子濃度要遠高於雨水，且小顆粒雲霧具有高濃度的離子。 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 為雲霧優勢離子各佔全離子的 20~30%，彼此具有高度相關，且 NO_3^- 與 SO_4^{2-} 為本區主要酸源且受 NH_3 中和。海洋性的氣流可能非本樣區鹽類離子主要輸入的來源，尚受到其他來源影響。

雲霧離子濃度受到冠層攔截而有所差異，小顆粒雲霧中 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 在進入冠層後濃度有升高趨勢，而大顆粒雲霧則在冠層內部並無明顯的變化。雲霧濃度雖受到冠層影響而變化，大顆粒雲霧組成比例卻無太大的改變，而小顆粒雲霧在冠層中的離子組成比例則有明顯的改變。綜合而言小顆粒雲霧可能受到冠層較不均勻的攔截，大顆粒雲霧則反之。

本區冬春季雲霧沉降量佔全雲霧沉降量 65%，以冠層下半部提供較高的水份以及離子量輸入。雲霧年沉降量僅佔全濕沉降 5%，但部分離子的輸入要較雨水為高。本研究進行的估算，對於雲霧沉降估算時影響的因子考慮較為一般估算方式多考慮了冠層間雲霧離子濃度的差異，估算值應是較一般估算方式為合理的。

7. 建議

本研究的儀器架設，在雲霧未產生時並未遮蓋收集器的開口，對於迎風面吹入的

懸浮顆粒可能會受到攔截網的攔截，而在隨後的雲霧產生時，一併被收集器收入。而且由雲霧遭收集比例曲線中發現，在 25-30 μm 間的雲霧顆粒，第一二室皆收集了約 40%，此部份的水樣，可能會使得所收集的水樣產生相互的影響，如本研究中 L3 位置大顆粒雲霧，在收集時可能受小顆粒雲霧進入即是一例。另外週期性的收集雲霧水，在估算沉降時的確較為以事件收集來的簡易，但也較難對於雲霧與環境間的關係更進一步的探討。因此，對於日後的研究有以下三點的建議。

- 收集器開口應避免水平朝向前方，開口宜朝下方，避免無雲霧時期，乾沉降物質受風力吹送的進入。
- 收集器的設計，可加以改進，將第一收集室或第二收集室的風速增加，增進收集效率，避免混合收集到同區間顆粒。若以本實驗室的設計為例，將第二室的通道收窄，使得第二室風速提升至 6 m s^{-1} ，第一室則維持 3.78 m s^{-1} 時，所收集的顆粒區間則為 5-29 μm ，以及 30 μm 以上兩個區間，有效的減少混合收集。
- 若單純的想要探討雲霧與環境間的關係，建議以雲霧事件為收集的對象，可能較易釐清彼此間的關係。

8. 引用文獻

吳敏如，2004，以微氣候模式估算雲霧森林中台灣扁柏的攔截沉降量。東華大學，碩士論文。

陳耀德，2003，鴛鴦湖森林生態系大氣離子輸入之探討。東華大學，碩士論文。

葉青峰，2004，台灣扁柏森林的生物量級雲霧沉降量估算。東華大學，碩士論文。

Aikawa, M., Hiraki, T., Shoga, M., & Tamaki, M. (2001). Fog and precipitation chemistry at mt. Rokko in Kobe, april 1997–march 1998. *Water Air Soil Pollut*, 130, 1517-1522.

Aikawa, M., Hiraki, T., Shoga, M., & Tamaki, M. (2005). Chemistry of fog water collected in the mt. Rokko area (Kobe city, Japan) between april 1997 and march 2001. *Water Air And Soil Pollution*, 160(1-4), 373-393.

Ali, K., Momin, G. A., Tiwari, S., Safai, P. D., Chate, D. M., & Rao, P. S. P. (2004). Fog and precipitation chemistry at Delhi, north India. *Atmospheric Environment*, 38(25), 4215-4222.

- Anlauf, K., Li, S. M., Leitch, R., Brook, J., Hayden, K., Toom-Sauntry, D., et al. (2006). Ionic composition and size characteristics of particles in the lower Fraser valley: Pacific 2001 field study. *Atmospheric Environment*, *40*(15), 2662-2675.
- Bator, A., & Collett, J. L. (1997). Cloud chemistry varies with drop size. *Journal Of Geophysical Research-Atmospheres*, *102*(D23), 28071-28078.
- Blas, M., Sobik, M., Quiel, F., & Netzel, P. (2002). Temporal and spatial variations of fog in the western Sudety mts., Poland. *Atmospheric Research*, *64*, 19-28.
- Bridges, K. S., Jickells, T. D., Davies, T. D., Zeman, Z., & Hunova, I. (2002). Aerosol, precipitation and cloud water chemistry observations on the Czech Krusne Hory plateau adjacent to a heavily industrialised valley. *Atmospheric Environment*, *36*, 353-360.
- Burkard, R., Eugster, W., Wrzesinsky, T., & Klemm, O. (2002). Vertical divergence of fogwater fluxes above a spruce forest. *Atmospheric Research*, *64*(1-4), 133-145.
- Chang, S. C., Lai, I. L., & Wu, J. T. (2002). Estimation of fog deposition on epiphytic bryophytes in a subtropical montane forest ecosystem in northeastern Taiwan. *Atmospheric Research*, *64*(1-4), 159-167.
- Chang, S. C., Yeh, C. F., Wu, M. J., Hsia, Y. J., & Wu, J. T. (2006). Quantifying fog water deposition by in situ exposure experiments in a mountainous coniferous forest in Taiwan. *Forest Ecology and Management*, *224*(1-2), 11-18.
- Cini, R., Prodi, F., Santachiara, G., Porcu, F., Bellandi, S., Stortini, A. M., et al. (2002). Chemical characterization of cloud episodes at a ridge site in Tuscan Apennines, Italy. *Atmospheric Research*, *61*(4), 311-334.
- Collett, J. L., Bator, A., Sherman, D. E., Moore, K. F., Hoag, K. J., Demoz, B. B., et al. (2002). The chemical composition of fogs and intercepted clouds in the United States. *Atmospheric Research*, *64*(1-4), 29-40.
- Collett, J. L., Sherman, D. E., Moore, K. F., Hannigan, M. P., & Lee, T. (2001). Aerosol particle processing and removal by fogs: Observations in chemically heterogeneous central California radiation fogs. *Water, Air, Soil Pollution*, *1*, 303-312.
- Dawson, T. E. (1998). Fog in the California redwood forest: Ecosystem inputs and use by plants. *Oecologia*, *117*(4), 476-485.

- DeFelice, T. P. (2002a). Chemical attributes of some clouds amid a forest ecosystem's trees. *Atmospheric Research*, 65(1-2), 35-50.
- DeFelice, T. P. (2002b). Physical attributes of some clouds amid a forest ecosystem's trees. *Atmospheric Research*, 65(1-2), 17-34.
- Demoz, B. B., Collett, J. L., & Daube, B. C. (1996). On the caltech active strand cloudwater collectors. *Atmospheric Research*, 41(1), 47-62.
- Elbert, W., Hoffmann, M. R., Kramer, M., Schmitt, G., & Andreae, M. O. (2000). Control of solute concentrations in cloud and fog water by liquid water content. *Atmospheric Environment*, 34(7), 1109-1122.
- Herckes, P., Wendling, R., Sauret, N., Mirabel, P., & Wortham, H. (2002). Cloudwater studies at a high elevation site in the vosges mountains (France). *Environmental Pollution*, 117(1), 169-177.
- Hoag, K. J., Collett, J. L., & Pandis, S. N. (1999). The influence of drop size-dependent fog chemistry on aerosol processing by san joaquin valley fogs. *Atmospheric Environment*, 33(29), 4817-4832.
- Holder, C. D. (2004). Rainfall interception and fog precipitation in a tropical montane cloud forest of Guatemala. *Forest Ecology and Management*, 190(2-3), 373-384.
- Igawa, M., Kase, T., Satake, K., & Okochi, H. (2002a). Severe leaching of calcium ions from fir needles caused by acid fog. *Environmental Pollution*, 119(3), 375-382.
- Igawa, M., Matsumura, K., & Okochi, H. (2001). Fog water chemistry at mt. Oyama and its dominant factors. *Water Air And Soil Pollution*, 130(1-4), 607-612.
- Igawa, M., Matsumura, K., & Okochi, H. (2002b). High frequency and large deposition of acid fog on high elevation forest. *Environmental Science & Technology*, 36(1), 1-6.
- Igawa, M., Tsutsumi, Y., Mori, T., & Okochi, H. (1998). Fogwater chemistry at a mountainside forest and the estimation of the air pollutant deposition via fog droplets based on the atmospheric quality at the mountain base. *Environmental Science & Technology*, 32(11), 1566-1572.

- Iyobe, T., Haraguchi, A., Nishijima, H., Tomizawa, H., & Nishio, F. (2003). Effect of fog on sea salt deposition on peat soil in boreal picea glehnii forests in Ochiishi, eastern hokkaido, Japan. *Ecological Research*, 18(5), 587-597.
- Jagels, R., Jiang, M., Marden, S., & Carlisle, J. (2002). Red spruce canopy response to acid fog exposure. *Atmospheric Research*, 64(1-4), 169-178.
- Khwaja, A., H., Brudnoy, Sara, Husain, & Liaquat. (1995). Chemical characterization of three summer cloud episodes at whiteface mountain. *Chemosphere*, 31(5), 3357-3381.
- Klemm, O., Wrzesinsky, T., & Scheer, C. (2005). Fog water flux at a canopy top: Direct measurement versus one-dimensional model. *Atmospheric Environment*, 39(29), 5375-5386.
- Kobayashi, T., Nakagawa, Y., Tamaki, M., Hiraki, T., & Aikawa, M. (2001). Cloud water deposition to forest canopies of cryptomeria japonica at mt. Rokko, Kobe, Japan. *Water Air and Soil Pollution*, 130(1-4), 601-606.
- Krupa, S. V. (2002). Sampling and physico-chemical analysis of precipitation: A review. *Environmental Pollution*, 120(3), 565-594.
- Kulshrestha, M. J., Sekar, R., Krishna, D., Hazarika, A. K., Dey, N. C., & Rao, P. G. (2005). Deposition fluxes of chemical components of fog water at a rural site in north-east India. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 57(5), 436-439.
- Lange, C. A., Matschullat, J., Zimmermann, F., Sterzik, G., & Wienhaus, O. (2003). Fog frequency and chemical composition of fog water - a relevant contribution to atmospheric deposition in the eastern Erzgebirge, Germany. *Atmospheric Environment*, 37(26), 3731-3739.
- Liu, W. J., Meng, F. R., Zhang, Y. P., Liu, Y. H., & Li, H. M. (2004). Water input from fog drip in the tropical seasonal rain forest of xishuangbanna, south-west China. *Journal of Tropical Ecology*, 20, 517-524.
- Liu, W. J., Zhang, Y. P., Li, H. L., Meng, F. R., Liu, Y. H., & Wang, C. M. (2005). Fog- and rainwater chemistry in the tropical seasonal rain forest of xishuangbanna, southwest china. *Water Air and Soil Pollution*, 167(1-4), 295-309.

- Lovett, G. M. (1984). Rates and mechanisms of cloud water deposition to a subalpine balsam fir forest. *Atmospheric Environment*, *18*, 361-371.
- Lovett, G. M. (1994). Atmospheric deposition of nutrients and pollutants in north america: An ecological perspective. *Atmospheric Environment*, *18*, 361-371.
- Marinoni, A., Laj, P., Sellegri, K., & Mailhot, G. (2004). Cloud chemistry at the puy de dome: Variability and relationships with environmental factors. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *4*, 715-728.
- Moore, K. F., Sherman, D. E., Reilly, J. E., & Collett, J. L. (2002). Development of a multi-stage cloud water collector part 1: Design and field performance evaluation. *Atmospheric Environment*, *36*(1), 31-44.
- Moore, K. F., Sherman, D. E., Reilly, J. E., Hannigan, M. P., Lee, T., & Collett, J. L. (2004). Drop size-dependent chemical composition of clouds and fogs. Part ii: Relevance to interpreting the aerosol/trace gas/fog system. *Atmospheric Environment*, *38*(10), 1403-1415.
- Nara, C., Dokiya, Y., Usui, N., Maruta, E., Liu, F. H., & Sagi, T. (2001). Acid fog damage of beech at hinokiboramaru-tanzawa, Japan. *Journal Of Environmental Science And Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, *36*(3), 355-366.
- Ogawa, N., Kikuchi, R., Okamura, T., Adzuhata, T., Kajikawa, M., & Ozeki, T. (1999). Cloud droplet size dependence of the concentrations of various ions in cloud water at a mountain ridge in northern Japan. *Atmospheric Research*, *51*(1), 77-80.
- Plessow, K., Acker, K., Heinrichs, D., & Moller, D. (2001). Time study of trace elements and major ions during two cloud events at the mt. Brocken. *Atmospheric Environment*, *35*, 367-378.
- Schell, D., Wobrock, W., Maser, R., Preiss, M., Jaeschke, W., Georgii, H. W., et al. (1997). The size-dependent chemical composition of cloud droplets. *Atmospheric Environment*, *31*(16), 2561-2576.
- Tenberken, B., & Bachmann, K. (1998). Sampling and analysis of single cloud and fog drops. *Atmospheric Environment*, *32*(10), 1757-1763.

- Thalmann, E., Burkard, R., Wrzesinsky, T., Eugster, W., & Klemm, O. (2002). Ion fluxes from fog and rain to an agricultural and a forest ecosystem in Europe. *Atmospheric Research*, 64(1-4), 147-158.
- Vermeulen, A. T., Wyers, G. P., Romer, F. G., VanLeeuwen, N. F. M., Draaijers, G. P. J., & Erisman, J. W. (1997). Fog deposition on a coniferous forest in the netherlands. *Atmospheric Environment*, 31(3), 375-386.
- Weathers, K. C. (1999). The importance of cloud and fog in the maintenance of ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 14(6), 214-215.
- Wieprecht, W., Acker, K., Mertes, S., Collett, J., Jaeschke, W., Bruggemann, E., et al. (2005). Cloud physics and cloud water sampler comparison during febuko. *Atmospheric Environment*, 39(23-24), 4267-4277.
- Wrzesinsky, T., & Klemm, O. (2000). Summertime fog chemistry at a mountainous site in central Europe. *Atmospheric Environment*, 34(9), 1487-1496.
- Zimmermann, L., & Zimmermann, F. (2002). Fog deposition to Norway spruce stands at high-elevation sites in the eastern erzgebirge (Germany). *Journal of Hydrology*, 256(3-4), 166-175.

附錄 1 研究期間雲霧離子濃度

收集日期	樣本 編號	編號	重量	pH	Con.	H ⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	Na ⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	NH ₄ ⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	K ⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	Mg ²⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	Ca ²⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	Cl ⁻ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	NO ₃ ⁻ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	SO ₄ ²⁻ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	離子平衡 (陽/陰)
2005.12.22	A	FG1-1	滿	4.58	10.4	26.3	259.9	356.6	46.7	44.0	73.5	253.5	485.4	928.6	0.48
2005.12.22	A	FG1-2	68	4.03	91.9	93.3	258.4	869.6	127.5	79.9	205.4	262.1	235.0	926.8	1.15
2005.12.22	A	FG2-1	608	4.36	42.4	43.7	430.5	471.0	66.7	105.0	143.4	443.8	413.3	697.9	0.81
2005.12.22	A	FG2-2	290	4.63	46.4	23.4	284.2	729.8	149.6	63.3	180.5	380.0	262.5	841.1	0.96
2005.12.22	A	FG3-1	364	4.22	68	60.3	261.6	741.5	128.7	70.3	174.1	358.9	256.0	888.9	0.96
2005.12.22	A	FG3-2	304	4.4	51.1	39.8	339.2	487.6	86.5	107.5	196.3	381.8	468.0	671.8	0.83
2005.12.22	A	FG4-1	滿	4.02	53	95.5	193.6	465.7	129.0	102.0	147.0	252.8	401.9	917.7	0.72
2005.12.22	A	FG4-2	38	3.6	194.3	251.2	299.7	603.9	107.9	105.6	151.5	431.7	325.0	796.9	0.98
2006.01.05	B	FG1-1	滿	4.08	46.7	83.2	122.6	524.7	38.1	0.0	92.9	198.3	558.1	889.6	0.52
2006.01.05	B	FG1-2	89	3.67	156.2	213.8	53.7	865.5	30.2	7.4	51.4	255.0	624.6	689.7	0.78
2006.01.05	B	FG2-1	滿	4.05	55.3	89.1	109.8	577.0	48.4	1.6	80.7	219.6	630.9	763.9	0.56
2006.01.05	B	FG2-2	94	4.22	85.6	60.3	103.4	926.0	65.4	17.2	85.9	311.8	458.8	770.5	0.82
2006.01.05	B	FG3-1	372	4.18	57.2	66.1	179.7	545.2	46.2	25.7	216.4	206.7	709.8	588.9	0.72
2006.01.05	B	FG3-2	192	4.36	51.9	43.7	106.3	892.9	70.9	3.7	86.9	327.4	513.2	698.5	0.78
2006.01.05	B	FG4-1	500	4.2	43.9	63.1	172.0	500.7	90.2	55.6	169.2	240.2	625.7	669.4	0.68
2006.01.05	B	FG4-2	128	4.62	28.9	24.0	96.4	1013.0	119.7	0.0	78.3	306.7	393.6	792.4	0.89
2006.02.06	C	FG1-1	2042	5.17	29.5	6.8	20.8	85.2	5.2	7.4	24.0	21.7	73.3	90.9	0.80
2006.02.06	C	FG1-2	222	5.36	61.7	4.4	28.9	245.4	27.4	15.1	41.6	61.2	101.9	222.2	0.94
2006.02.06	C	FG2-1	2057	5	13.8	10.0	21.5	44.7	11.5	1.9	15.7	29.8	31.6	41.5	1.02
2006.02.06	C	FG2-2	80	5.52	40.1	3.0	74.0	85.5	25.8	19.0	61.3	38.4	36.6	160.1	1.14
2006.02.06	C	FG3-1	389	5.26	14.2	5.5	2.4	58.9	8.3	1.9	14.1	17.1	27.8	60.3	0.87
2006.02.06	C	FG3-2	228	6.5	32.7	0.3	35.0	111.8	19.0	13.2	39.3	39.2	49.3	111.7	1.09
2006.02.06	C	FG4-1	1837	5.26	16.1	5.5	8.7	46.4	8.3	3.8	17.8	16.0	32.8	47.5	0.94
2006.02.06	C	FG4-2	70	6.16	68.1	0.7	105.9	114.3	72.3	41.1	73.4	54.8	50.8	144.3	1.63

收集日期	樣本 編號	編號	重量	pH	Con.	H ⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	Na ⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	NH ₄ ⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	K ⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	Mg ²⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	Ca ²⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	Cl ⁻ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	NO ₃ ⁻ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	SO ₄ ²⁻ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	離子平衡 (陽/陰)
2006.02.15	D	FG1-1	993	4	63.1	100.0	23.7	95.5	8.5	7.4	16.5	29.5	67.5	144.8	1.04
2006.02.15	D	FG1-2	349	4.35	42.3	44.7	6.2	161.7	10.0	5.0	6.4	32.6	60.6	138.9	1.01
2006.02.15	D	FG2-1	1731	4.05	51.4	89.1	7.3	78.8	6.4	3.8	2.9	19.8	38.3	130.0	1.00
2006.02.15	D	FG2-2	182	4.73	51.1	18.6	29.1	56.9	25.8	34.8	27.6	38.4	63.6	219.2	0.60
2006.02.15	D	FG3-1	306	4.26	40.8	55.0	7.9	79.6	6.0	5.5	25.0	19.1	42.4	112.8	1.03
2006.02.15	D	FG3-2	134	4.99	43.8	10.2	21.1	199.4	16.0	8.2	18.8	38.3	70.9	172.4	0.97
2006.02.15	D	FG4-1	897	4.27	52.4	53.7	8.0	90.1	6.8	4.3	10.3	21.5	45.3	134.6	0.86
2006.02.15	D	FG4-2	931	5.07	28.7	8.5	9.4	136.9	12.9	9.2	14.3	29.2	39.3	94.2	1.18
2006.03.02	E	FG1-1	1983	4.21	33.3	61.7	12.7	40.7	3.9	4.8	4.3	17.4	46.3	62.7	1.01
2006.03.02	E	FG1-2	90	4.75	57.6	17.8	32.1	243.1	18.6	16.3	66.9	57.3	97.0	201.9	1.11
2006.03.02	E	FG2-1	1008	4.49	27.9	32.4	8.0	33.7	5.1	4.1	8.6	16.5	36.0	59.0	0.82
2006.03.02	E	FG2-2	62	5.37	57.5	4.3	80.7	137.3	37.8	28.5	129.0	66.4	50.1	176.4	1.43
2006.03.02	E	FG3-1	342	4.23	46.5	58.9	15.8	61.8	6.5	7.6	104.1	24.2	60.5	99.1	1.39
2006.03.02	E	FG3-2	94	4.78	43.3	16.6	46.3	130.3	19.3	24.0	87.8	60.4	64.5	125.9	1.29
2006.03.02	E	FG4-1	1577	4.72	19.5	19.1	7.4	28.5	9.7	6.6	7.5	16.3	28.0	46.2	0.87
2006.03.02	E	FG4-2													
2006.03.16	F	FG1-1	4395	4.11	48.4	77.6	16.8	104.8	5.3	7.1	10.7	22.9	60.2	127.0	1.06
2006.03.16	F	FG1-2	164	4.02	143.9	95.5	26.2	601.3	24.9	17.9	45.1	92.3	227.2	522.1	0.96
2006.03.16	F	FG2-1	972	4.19	62.8	64.6	17.5	122.6	7.6	6.9	16.1	29.7	65.2	170.8	0.88
2006.03.16	F	FG2-2	194	4.8	73.7	15.8	46.9	331.9	22.2	25.8	78.7	73.5	95.9	272.8	1.18
2006.03.16	F	FG3-1	460	4.27	55.1	53.7	10.5	123.5	6.3	7.9	19.6	22.3	69.3	160.6	0.88
2006.03.16	F	FG3-2	214	4.64	76.9	22.9	36.0	261.2	16.5	23.0	67.1	61.7	102.1	276.3	0.97
2006.03.16	F	FG4-1	1307	4.29	49.6	51.3	13.5	106.3	7.9	9.1	12.2	23.0	56.9	137.1	0.92
2006.03.16	F	FG4-2													

收集日期	樣本 編號	編號	重量	pH	Con.	H ⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	Na ⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	NH ₄ ⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	K ⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	Mg ²⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	Ca ²⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	Cl ⁻ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	NO ₃ ⁻ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	SO ₄ ²⁻ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	離子平衡 (陽/陰)
2006.03.30	G	FG1-1	2041	4.39	33.1	40.7	13.3	78.7	5.5	5.8	16.9	15.0	51.8	81.3	1.09
2006.03.30	G	FG1-2	182	4.84	95.4	14.5	31.1	481.2	31.0	9.4	33.6	64.6	168.0	358.2	1.02
2006.03.30	G	FG2-1	1544	4.26	46.6	55.0	4.4	109.8	7.9	5.3	17.5	17.5	52.4	123.3	1.03
2006.03.30	G	FG2-2	294	4.89	58.8	12.9	26.5	300.9	22.3	7.2	22.2	40.2	88.6	212.5	1.15
2006.03.30	G	FG3-1	110	4.18	62.5	66.1	10.9	131.7	9.1	6.8	23.7	23.0	80.0	180.3	0.88
2006.03.30	G	FG3-2	168	4.73	71	18.6	28.3	358.5	24.7	8.6	29.1	54.3	109.2	290.0	1.03
2006.03.30	G	FG4-1	1803	4.59	37.9	25.7	1.9	93.2	9.5	6.6	16.8	16.6	47.8	109.5	0.88
2006.03.30	G	FG4-2	120	4.91	46.8	12.3	75.7	206.3	38.4	13.0	24.4	38.0	42.6	137.0	1.70
2006.04.13	H	FG1-1	1003	4.42	38.1	38.0	47.3	105.7	6.3	17.6	46.6	32.8	99.7	103.3	1.11
2006.04.13	H	FG1-2	138	4.85	103.4	14.1	43.1	482.0	26.7	24.6	65.1	92.7	259.6	345.0	0.94
2006.04.13	H	FG2-1	494	4.56	31.4	27.5	19.7	72.2	4.0	9.7	37.4	62.7	71.7	73.3	0.82
2006.04.13	H	FG2-2	30	5.1	129	7.9	289.2	273.5	40.4	101.6	267.2	166.7	294.6	403.4	1.13
2006.04.13	H	FG3-1	216	4.65	31	22.4	54.3	78.7	7.1	19.0	70.1	33.5	95.7	87.4	1.16
2006.04.13	H	FG3-2	22	5.43	163	3.7	423.7	241.6	45.1	153.5	405.2	216.0	307.1	514.9	1.23
2006.04.13	H	FG4-1	717	4.82	25.9	15.1	29.2	66.9	11.3	19.1	58.0	29.4	78.0	65.6	1.15
2006.04.13	H	FG4-2													
2006.04.27	I	FG1-1	1855	4.44	41.7	36.3	19.5	62.0	7.1	11.9	26.9	19.9	49.1	113.3	0.90
2006.04.27	I	FG1-2	306	4.08	115.2	83.2	22.7	327.7	26.4	13.9	41.3	65.6	98.6	468.8	0.81
2006.04.27	I	FG2-1	1212	4.2	50	63.1	19.9	87.6	12.5	12.7	31.0	30.0	46.3	156.9	0.97
2006.04.27	I	FG2-2	72	4.61	156.3	24.5	58.0	669.8	59.2	34.4	123.7	115.9	100.7	793.6	0.96
2006.04.27	I	FG3-1	166	4.01	69.4	97.7	22.9	124.1	13.9	12.7	31.3	31.2	115.3	168.4	0.96
2006.04.27	I	FG3-2	146	4.36	116.2	43.7	31.7	441.3	38.1	22.7	74.4	80.9	89.1	632.0	0.81
2006.04.27	I	FG4-1	3979	4.78	21.4	16.6	16.9	44.4	15.6	11.0	23.9	30.2	25.3	70.3	1.02
2006.04.27	I	FG4-2	120	5.16	10.5	6.9	15.1	21.3	14.1	12.2	30.3	15.6	15.0	43.0	1.36

收集日期	樣本 編號	編號	重量	pH	Con.	H ⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	Na ⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	NH ₄ ⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	K ⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	Mg ²⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	Ca ²⁺ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	Cl ⁻ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	NO ₃ ⁻ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	SO ₄ ²⁻ ($\mu\text{eq L}^{-1}$)	離子平衡 (陽/陰)
2006.05.11	J	FG1-1	1299	4.38	32.9	41.7	12.7	47.3	6.3	7.7	16.9	13.1	47.5	73.2	0.99
2006.05.11	J	FG1-2	182	3.65	195.7	223.9	23.9	339.9	26.5	16.3	34.4	66.1	221.6	523.9	0.82
2006.05.11	J	FG2-1	606	4.3	37.8	50.1	13.0	58.9	8.2	8.8	19.9	14.3	56.9	90.1	0.99
2006.05.11	J	FG2-2	22	3.72	234	190.5	121.5	473.6	83.3	75.4	130.9	157.1	206.6	845.9	0.89
2006.05.11	J	FG3-1	34	4.09	113.3	81.3	93.8	207.3	27.7	41.4	89.0	54.6	222.1	284.3	0.96
2006.05.11	J	FG3-2	66	4.36	59.4	43.7	54.1	364.3	34.4	38.0	68.2	73.2	161.5	501.1	0.82
2006.05.11	J	FG4-1	863	4.12	125.6	75.9	10.2	46.2	14.2	10.7	19.8	12.8	34.3	58.7	1.67
2006.05.11	J	FG4-2													
2006.05.25	K	FG1-1	1293	4.39	33.4	40.7	20.1	35.9	5.5	8.5	15.5	16.2	48.5	55.9	1.05
2006.05.25	K	FG1-2	262	4.28	61.9	52.5	16.7	75.4	6.5	10.1	34.4	46.7	56.7	122.9	0.86
2006.05.25	K	FG2-1	1272	4.66	21.8	21.9	9.8	39.8	7.8	7.1	16.7	14.7	34.3	47.7	1.07
2006.05.25	K	FG2-2	74	4.57	75	26.9	53.0	181.8	29.3	30.6	94.5	84.7	64.2	299.2	0.93
2006.05.25	K	FG3-1	148	4.34	57.5	45.7	22.0	97.6	11.5	12.9	24.7	29.1	86.4	122.1	0.90
2006.05.25	K	FG3-2	270	4.98	28	10.5	15.9	100.9	58.0	10.8	36.4	32.7	39.3	91.9	1.42
2006.05.25	K	FG4-1													
2006.05.25	K	FG4-2													
2006.06.08	L	FG1-1	147	4.33	27.8	46.8	0.0	16.3	0.0	7.2	3.6	0.0	6.6	34.0	1.82
2006.06.08	L	FG1-2	滿	4.61	17.9	24.5	5.0	6.2	0.0	9.8	20.6	20.1	11.8	40.3	0.92
2006.06.08	L	FG2-1	128	4.71	13.8	19.5	0.0	20.6	2.8	8.7	8.3	0.0	6.2	40.0	1.30
2006.06.08	L	FG2-2	782	4.68	17.4	20.9	4.1	17.0	1.5	9.7	37.5	7.3	13.3	26.9	1.91
2006.06.08	L	FG3-1													
2006.06.08	L	FG3-2	66	5.11	24.6	7.8	3.8	95.4	9.7	12.3	18.2	26.7	20.0	71.1	1.25
2006.06.08	L	FG4-1													
2006.06.08	L	FG4-2													