

## 目錄

目錄.....	1
圖目錄.....	2
表目錄.....	3
中文摘要.....	4
英文摘要.....	5
一、前言.....	6
二、材料與方法.....	8
三、結果與討論.....	17
(一) 林外雨和不同平地造林樹種穿落水 pH 值.....	17
(二) 不同平地造林樹種冠層離子淨輸入量.....	19
(三) 葉面積指數.....	24
(四) 冠層淨輸入量複迴歸分析.....	26
(五) N、S 元素分析.....	33
四、結論與建議.....	35
五、參考文獻.....	38
100 年度委託研究計畫期中報告委員審查意見辦理情形表.....	40
100 年度委託研究計畫期末報告委員審查意見辦理情形表.....	43

## 圖目錄

圖 1. 林外雨雨水收集裝置示意圖.....	10
圖 2. 收集桶密封示意圖.....	10
圖 3. 收集雨水定量測水量.....	10
圖 4. 穿落水收集裝置示意圖.....	11
圖 5. 雨水收集裝置漏斗攔截枯落物情形以及漏斗規格示意圖.....	12
圖 6. pH 值量測情形.....	13
圖 7. 電導度值及 TDS 量測情形.....	13
圖 8. 以抽氣幫浦及 0.45 $\mu$ m 濾膜過濾水樣.....	13
圖 9. 離子層析儀 (Dionex 120, USA).....	13
圖 10. 利用葉面積指數儀所拍攝葉面積及葉面積判釋.....	14
圖 11. 採集各樹種葉片情形.....	15
圖 12. 摘取葉片並洗淨.....	15
圖 13. 99-100 年外埔造林地所收集 17 場林外雨 pH 值變化.....	18
圖 14. 酸性污染物百分比及穿落水 pH 值上升百分比關係圖.....	22

## 表目錄

表 1. 台糖公司台中區處外埔與后里農場 99-100 年所收集林外雨和各平地造林 不同樹種穿落水雨量加權平均 pH 值.....	17
表 2 (a). 台糖公司台中區處外埔與后里農場不同平地造林樹種 99-100 年所收集 17 場雨冠層離子淨輸入量.....	20
表 2 (b). 台糖公司台中區處外埔與后里農場不同平地造林樹種年平均冠層離子 淨輸入量.....	20
表 3. 台糖公司台中區處外埔與后里農場不同平地造林樹種 99-100 年所收集 17 場雨穿落水中乾沉降及淋溶量之推估.....	23
表 4. 台糖公司台中區處外埔農場不同平地造林樹種葉面積指數(LAI) .....	24
表 5. 不同平地造林樹種各離子的淨輸入量與葉面積指數相關性.....	25
表 6. 冠層離子淨輸入量與參數複迴歸式決定係數 ( $R^2$ ) 和參數係數值.....	29
表 7. 烏心石冠層離子淨輸入量與參數複迴歸式決定係數 ( $R^2$ ) 和參數係數值..	29
表 8. 白千層冠層離子淨輸入量與參數複迴歸式決定係數 ( $R^2$ ) 和參數係數值..	30
表 9. 相思樹冠層離子淨輸入量與參數複迴歸式決定係數 ( $R^2$ ) 和參數係數值..	30
表 10. 樟樹冠層離子淨輸入量與參數複迴歸式決定係數 ( $R^2$ ) 和參數係數值....	31
表 11. 茄苳冠層離子淨輸入量與參數複迴歸式決定係數 ( $R^2$ ) 和參數係數值....	31
表 12. 台灣欒冠層離子淨輸入量與參數複迴歸式決定係數 ( $R^2$ ) 和參數係數 值.....	32
表 13. 無患子冠層離子淨輸入量與參數複迴歸式決定係數 ( $R^2$ ) 和參數係數 值.....	32
表 14. 台糖公司台中區處外埔農場各平地造林樹種葉片 N 和 S 元素百分比....	33
表 15. 葉片中 N 和 S 含量及穿落水 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 及 $\text{SO}_4^{2-}$ 淨輸入量與相關性.....	34

**【摘要】**本試驗利用收集濕沉降，並分析林外雨經過林木冠層交互作用後，穿落水陰陽離子的改變，藉以推估不同種類的平地造林樹種對空氣污染物的截留能力。在台中台糖外埔及后里平地造林區選取白千層 (*Melaleuca leucadendra*)、水黃皮 (*Pongamia pinnata*)、烏心石 (*Michelia compressa*)、茄苳 (*Bischofia jabanica*)、臺灣欒 (*Zelkova serrata*)、相思樹 (*Acacia confusa*)、無患子 (*Sapindus mukorossi*)及樟樹 (*Cinnamomum camphora*)等8種平地造林樹種為標本木，在其林冠下及區外的空曠地分別架設穿落水及林外雨取樣裝置。本試驗從2010年5月開始，以場雨為單位收集水樣，採樣後進行pH、電導度、懸浮值 ( $>0.45 \mu\text{m}$ )、無機陽離子 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ )及無機陰離子 ( $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )等分析。試驗期間分析結果顯示，林外雨pH為4.23，林內8種樹木之穿落水pH值皆超過5，其中相思樹pH值上升最多5.85。無患子與烏心石冠層離子淨輸入量較少 ( $12.49$ 、 $36.68 \text{ kg ha}^{-1}$ )，白千層及相思樹較多 ( $218.33$ 、 $279.30 \text{ kg ha}^{-1}$ )，顯示白千層與相思樹可承接大氣沉降物之面積較多。與間隔日數具顯著相關的有  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ ，此顯示以上離子與乾沉降呈顯著相關。葉片S含量與穿落水中  $\text{SO}_4^{2-}$  輸入量呈顯著正相關 ( $R^2 = 0.63$ ,  $p < 0.005$ )，顯示隨著樹種截留乾沉降  $\text{SO}_4^{2-}$  愈多，該樹種葉片中有較高之S含量，如白千層。

**【關鍵字】**空氣污染、酸雨、林外雨、穿落水、吸收、截留

**【Abstract】** Water chemistry of precipitation and throughfall was studied to assess the capacity of canopy to clean air pollutants from different tree species in plains afforestation. *Melaleuca leucadendra*, *Pongamia pinnata*, *Michelia compressa*, *Bischofia jabanica*, *Zelkova serrata*, *Acacia confusa*, *Sapindus mukorossi* and *Cinnamomum camphora* were selected for sampling trees. Bulk precipitation and throughfall were collected for every rainfall event from May 2010. Samples were analyzed for pH, conductivity, total suspended solid (TSS > 0.45  $\mu\text{m}$ ), cations ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ), and anions ( $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ). Results indicated that pH of bulk precipitation was 4.23, and throughfall in *Acacia confusa* (5.85) much higher than the others. *Sapindus mukorossi* and *Michelia compressa* had lower net canopy exchange, but higher in *Melaleuca leucadendra* and *Acacia confusa*. It indicated *Melaleuca leucadendra* and *Acacia confusa* had higher scavenging efficiency for air pollutants. Duration of dry periods (dry deposition) was significant regression analysis in  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ . The correlation of S in leaves with  $\text{SO}_4^{2-}$  inputs in throughfall was significant positive ( $R^2 = 0.63$ ,  $p < 0.005$ ), indicated that S in leaves was increasing with higher  $\text{SO}_4^{2-}$  inputs in throughfall, e.g. *Melaleuca leucadendra*.

**【Keywords】** Air pollution, Acid rain, Throughfall, Rainfall, Interception, Absorption

## 一、前言

在近年來工商業、城市的快速發展，及為了提升生活的便利，無論是工廠興建，或交通工具的普遍，都增加了環境的汙染源，其中又以空氣汙染影響人體健康最為直接。台灣地區常見空氣汙染物主要來源為工廠及交通運輸工具所排放之廢氣及微粒，如： $\text{SO}_2$ 、氟化物、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{Cl}_2$  等有毒氣體及水泥灰塵、燻煙等固態汙染物。而台灣又屬海島位於季風帶區，亦容易於冬季接收來自東北地區及夏季西南方地區之沙塵及汙染物 (Tsai and Chen, 2006)。

大氣沉降中包含懸浮微粒、海鹽飛沫及部分空氣汙染物等，其中  $\text{SO}_4^{2-}$  及  $\text{NO}_3^-$  濃度變化會影響大氣中的 N 及 S 循環 (Parungo *et al.*, 1996; Iwasaka *et al.*, 2003; Chung *et al.*, 2003)， $\text{SO}_4^{2-}$  及  $\text{NO}_3^-$  主要是當地或長程輸送帶來的  $\text{SO}_2$  及  $\text{NO}_x$  氣狀汙染物和懸浮微粒顆粒表面接觸凝結後發生化學反應，屬於二次轉換物質，是主要造成酸雨的離子之一，它不僅會造成建物雕塑品的腐蝕，更會加速土壤中養分流失，其中以鹽基陽離子  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  等最為明顯 (白創文, 2005)。對於植物生長所必需之鹽基陽離子的流失，可能造成其生長受限，甚至面臨衰退情形，最後可能須依賴人為施肥，亦會增加成本消耗。另外，經由運輸之懸浮微粒及汙染物除了影響環境外，對於人體可能會經由呼吸作用吸入粒徑  $10\mu\text{m}$  以下之吸入性粉塵，容易於呼吸系統內沉積。其中細小之呼吸性粉塵 (粒徑小於  $2\mu\text{m}$ ) 更可以深入肺部，於肺泡中沉積，進而傷害呼吸系統，導致慢性疾病發生，提高眼睛及呼吸道相關疾病的發病率，影響人類健康。

林木主要透過葉片吸收  $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$  及  $\text{SO}_2$  等汙染氣體與林冠攔截大氣中粒狀汙染物等 2 種方式來改善空氣品質 (Nowak *et al.*, 2000)。潘素美和劉英謙 (1997) 評估常見行道樹種淨化  $\text{NO}_2$  的能力，結果顯示楓香 (*Liquidambar formosana*) 淨化能力最高，其可減少大氣中 27.5 % 的  $\text{NO}_2$ ，而淨化能力最差的樟樹 (*Cinnamomum camphora*) 也能降低空氣中 8 % 的  $\text{NO}_2$  濃度; Klumpp 等 (2002) 針對空氣汙染地區及未汙染地區林木葉片元素分析發現，在汙染較嚴重之試驗地，

其葉片內部有較高的 N 和 S 含量，顯示林木葉片在淨化空氣品質功效上確實有吸收空氣污染物質之能力。林木擁有較大葉面積、葉表面的細微結構（如溝狀組織、纖毛等）及葉的分泌組織，能有效吸附、黏附懸浮微粒（柴一新等，2002）；范基南和李奇倉（1997）探討不同鄉土樹種對懸浮微粒的截留量，結果顯示烏心石 (*Michelia compressa*)、大葉山欖 (*Palaquium formosanum*)及流蘇 (*Chionanthus retusus*)，分別能截留空氣中 50 %、20 % 及 14 % 的懸浮微粒。而且隨著植物的生物生長，擴大葉面積，可持續更新新葉，在淨化空氣能力相當有意義。

當空氣汙染物隨著大氣乾濕沉降後，林木冠層對於大氣環境的改變是首當其衝，除了上述吸收空氣汙染物及攔截懸浮微粒等 2 種功能外，酸雨的產生、降雨量的增加等，更會加速冠層葉片的養分淋溶釋出。當雨水經過冠層後形成穿落水，它包含了葉片攔截懸浮微粒及氣體沉降物的淋洗，及林木體本身離子交換的淋溶作用，可區分為外部循環的輸入及內部早期根部吸收之養分 (André *et al.*, 2008)。故可以藉由穿落水的收集，了解林木冠層內外部循環對於環境耐受力程度，及其對於緩衝外界環境改變之能力。

面對台灣山坡地及平地之綠資源分布不均，及 WTO 後的國際競爭，部分停產釋出之農地，政府加強輔導改以平地造林，若能結合造林及環境綠美化，可以增加民眾休閒空間，提升都會區生活環境品質，改善都市城鎮生態景觀。而在平地都市地區由於人類活動頻繁，空氣汙染情形亦是較為嚴重，若能選擇適合樹種，以增加存活率，除了可以降低成本支出，更可以有效達到綠美化，及淨化環境之功能。以台灣的地形地貌，經營森林應該以保育國土及水資源為第一要務，應以環境投資為著眼，而非以木材收穫為經營目標。故本研究以林務局平地造林地為試驗地點，藉由收集林外雨及不同樹種之穿落水，比較其葉片淨化吸收空氣汙染物及攔截懸浮微粒之功能，及林木葉部受到葉面積指數、降雨間隔日數、降雨量、 $H^+$ 濃度等因素影響養分淋溶釋出之情形來加以探討不同平地造林樹種對環境的耐受能力。

## 二、 材料與方法

### (一) 樣木選擇

本研究針對平地造林樹種為主，故選定台糖公司台中區處外埔農場第 56 區，並從中選定白千層 (*Melaleuca leucadendra*)、水黃皮 (*Pongamia pinnata*)、烏心石 (*Michelia compressa*)、茄苳 (*Bischofia jabanica*)、臺灣檫 (*Zelkova serrata*)、相思樹 (*Acacia confusa*)、無患子 (*Sapindus mukorossi*) 及樟樹 (*Cinnamomum camphora*) 等 8 種政府獎勵平地造林的樹種，此 8 種除了為平地造林獎勵樹種，亦是台糖外埔農場主要造林樹種，故選定其為試驗目標。現地林木除了烏心石是於 2005 年栽植外，其餘樹種皆於 2002 年 6 月栽植，林齡約為 10 年。主要以相同樹種呈塊狀或代狀栽植，栽植密度為 1,500 (株/公頃)，林木高度除了臺灣檫本身生長速度較慢外，其餘樹種皆可達 3 m 以上。但於后里農場栽植之水黃皮其冠層於秋冬季時，葉片皆已大量掉落，故為了避免影響數據準確性，於 100 年將其刪除，白千層經比較後發現與外埔農場結果相似，故於 2011 年收集以外埔農場造林樹種為主。相同樹種則在樣區內隨機選取 3 株外型相似且冠層茂密者為本試驗樣木，同時在樣區外的空曠地分別設立 3 組林外雨的收集裝置。

### (二) 水樣種類與收集方法

本研究從 2010 年 5 月開始，以場雨為單位，收集林外雨和不同平地造林樹種穿落水，並以場雨的分析結果作為評估平地造林樹種對於空氣污染物截留能力的依據，林外雨和穿落水的收集方式分別如下所述：

#### 1. 林外雨

在選定的樣區中，隨機挑選 3 處空曠且沒有受到周邊林木遮蔽或者干擾的開闊地各設置一組雨水收集裝置，並且以收集裝置為中心點與地面夾 45° 角的虛擬線畫一個倒圓錐，圓錐不與周邊樹木林冠或者枝幹相切，以求不受到周邊樹木的遮蔽干擾為主 (圖 1)。



每 1 組雨水收集裝置分別由 3 個直徑為 20 cm 的漏斗組成，並在漏斗開口處以金屬網加以隔離，避免昆蟲或者是其他異物進入或者阻塞水管，同時避免異物進入汙染水化學組成，並以黑色塑膠水管將雨水導入 20 公升的黑色集水桶，其中水管以及塑膠桶以黑色構成，其主要目的是為了減少水樣受到日光直接照射，以減少水中藻類的滋生。

同組取樣裝置的 3 個漏斗以矽膠塞導入雨水收集桶，並且以矽膠塞緊塞雨水收集桶的桶口，以求減少蚊蟲飛入的機會，同時可以避免收集桶中的水樣蒸發，導致日後實驗測值的失真。

收集所得的雨水是無降雨期間進入漏斗及水桶內的乾沉降以及降雨時所帶來的濕沉降，同時一併將沉降於漏斗表面的乾沉降汙染物一併淋洗進入收集桶中，因此，林外雨雨水收集桶中所得的水樣則視為混沉降。

為求水樣的代表性，因此水樣收集以場雨為單位。同時為求水樣的準確性，以及減少水樣受到汙染的機會，於降雨後隔日清晨立即測量水量並迅速收集帶回實驗室分析。

其中水樣收集時，會先以 5 公升的量杯進行水量大約的估算，若總水量超過 5 公升，則會將水樣以多次累加的方式估量。而雨水收集時，會以 600 毫升或者 300 毫升的密封收集罐封裝，裝罐前會先以水樣潤洗收集罐後再行封裝水樣，減少空氣接觸，以防運送過程中的汙染（圖 2）。



圖 1. 林外雨雨水收集裝置示意圖。



圖 2. 收集桶密封示意圖。



圖 3. 收集雨水定量測水量。

## 2. 穿落水

8種樹種各選定 3 株樣木，於每株樣木下方林冠覆蓋處設置雨水收集裝置，同時要求與周邊林木基部至少 60 公分以上的距離設置，設置 1 組雨水收集裝置，為求實驗的一致性，收集裝置與林外雨相同，其中同一樹種的 3 個取樣點以隨機分散的方式設置；為求水樣的代表性，因此水樣收集以場雨為單位。同時為求水樣的準確性，以及減少水樣受到污染的機會，於降雨後隔日清晨立即測量水量並迅速收集攜回實驗室分析（圖 3）。

其中穿落水的收集要領與林外雨相同，唯獨因為收集裝置設置於林下，漏斗中常常累積為數量頗多的枯落物，因此收集水樣時一併將漏斗中的枯落物清除，避免枯落物干擾下次降雨的水樣（圖 4、圖 5）。



圖 4. 穿落水收集裝置示意圖。



圖 5. 雨水收集裝置漏斗攔截枯落物情形以及漏斗示意圖。

### (三) 水樣分析

水樣送回實驗室之後，盡速分析 pH 值 (Metrohm 691, Switzerland)，總溶解固體 (Total Dissolved Solid, TDS) (WTW COND 720, Germany)，無機陽離子 ( $\text{Na}^+$ ,

$K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $NH_4^+$ ), 無機陰離子 ( $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ), 以上分析流程以及方法皆按照 APHA (American Public Health Association) (1995) 所訂定的標準流程, 並參考劉瓊霖和金恆鑣 (1996) 之報告。無機陰陽離子濃度的分析流程是將攜回實驗室的水樣以  $0.45\mu m$  濾膜 (Gelman-science GN-6 grid  $0.45\mu m$  sterilized filter paper) 以去除水樣中微生物, 過濾後水樣再以離子層析儀 (Dionex 120, USA) 分析測定 (圖 6、圖 7、圖 8、圖 9)。



圖 6. pH 值量測情形。



圖 7. 電導度值及 TDS 量測情形。



圖 8. 以抽氣幫浦及  $0.45\mu m$  濾膜過濾水樣。



圖 9. 離子層析儀 (Dionex 120, USA)。

#### (四) 葉面積指數測定

於每個穿落水收集裝置以葉面積指數測定儀 (CI-110) 各量測 3 個點, 其高

度與穿落水裝置同高。將拍攝葉面積照片，以軟體進行葉面積指數判釋（圖 10）。此測定容易受到光亮影響，故選定清晨太陽未升起時進行，並避開樹幹枝條，避免影響葉面積指數判釋。

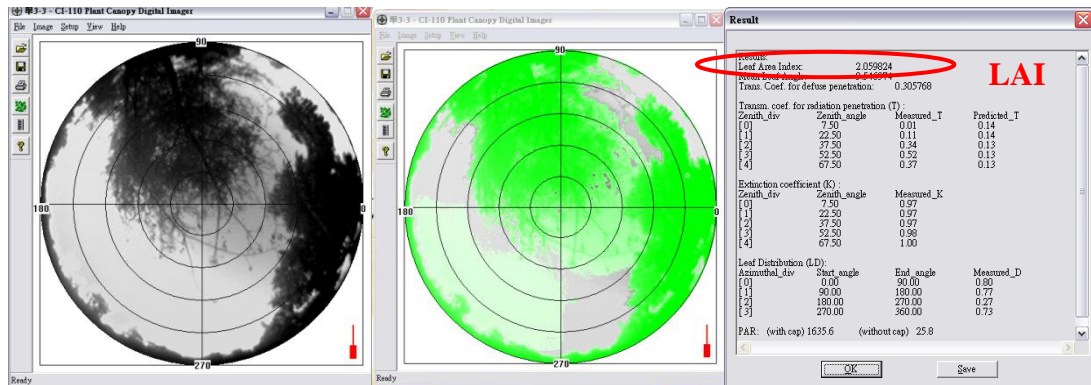


圖 10. 利用葉面積指數儀所拍攝葉面積及葉面積判釋。

#### (五) 葉片元素分析

於外埔農場造林地穿落水所選定樣木，7種樹種各3重覆中，因為受限於林木高大，而採集所用高枝剪僅3m高，故多採集約3m高之冠層底部枝梢葉片，除台灣欖因為生長緩慢，其餘樹種以3m高度，即冠層底部為主要採集位置。而採集方位則以東西南北四方位於冠層底部各剪取一枝條，帶回實驗室採取各枝條葉片混合，並以自來水直接沖洗葉片上方之塵土微粒，最後以去離子水將葉片洗淨。葉片再以65°C，烘乾三天，磨粉過篩，每個重覆量取5-6毫克，以錫盒包裝進行元素分析（圖 11、圖 12）。



圖 11. 採集各樹種葉片情形。



圖 12. 摘取葉片並洗淨。

## (六) 資料分析

### 1. 各測值濃度以水量體積加權平均表示

每場雨所得的降雨量有相當大的差異，因此以加權平均的方式，依照每場雨的單次累積雨量的不同，以此為權重依據，以得各測值合理的平均值。

單一樹種水樣測定所得之電導度、TDS、由 pH 值換算的氫離子濃度、陰陽離子濃度皆以水量體積加權平均 (Volume-Weight Mean, VWM) 表示：

$$VWM = \frac{\sum(C_i V_i)}{\sum V_i} \dots \dots \dots \text{(eq 1)}$$

$C_i$ ：示水樣在第  $i$  場降雨所測得的各項測值

$V_i$ ：表示在第  $i$  場降雨進入收集桶內的水量

$\sum V_i$ ：則表示試驗期間 17 場降雨所得的全部水量的體積加總 (8 場為 2010 年所收集，9 場為 2011 年收集)。

## 2. 冠層離子淨輸入量

將每場雨各樹種穿落水的離子總量 (穿落水離子濃度\*穿落水量)減去林外雨離子總量 (林外雨濃度\*林外雨量)，即為雨水通過冠層的淋溶淋洗量。而單位面積輸入量，將每場雨各樹種所得 3 重複之淨輸入量累加再換算漏斗面積，即可以推估單位造林面積試驗期間的淨輸入量。換算公式如下：

$$\text{冠層離子淨輸入量} = [(\text{穿落水濃度}(\text{mg L}^{-1}) \times \text{穿落水量 L}) - (\text{林外雨濃度}(\text{mg L}^{-1}) \times \text{林外雨量 L})] / 10^6 / (10 \times 10 \times \pi \times 3) \times 10^8 (\text{kg ha}^{-1})$$

其中  $10 \times 10 \times \pi$  為單一漏斗之取樣面積，每組取樣裝置有三組漏斗，每樹種有三重覆取樣裝置，因此單一漏斗面積換算成取樣面積時必須乘以 3。除以  $10^6$  為將 mg 換為 kg，乘以  $10^8$  為將  $\text{cm}^2$  換為 ha。

### 三、結果與討論

#### (一) 林外雨和不同平地造林樹種穿落水 pH 值

自 2010 年 5 月開始，實際量測的林外雨與各平地造林樹種穿落水 pH 值顯示，林外雨加權平均之 pH 值為 4.23，是屬於偏酸之降雨。一般環境降雨因為受到部分空氣中 CO<sub>2</sub> 影響，雨水 pH 值約為 5.56 (高清，1996)，若低於此值，推估可能受到其它酸性物質影響，如 SO<sub>2</sub> 或 NO<sub>x</sub> 等空氣污染物，故在此地區應是受到酸性物質輸入影響甚劇之區域。而各平地造林樹種冠層穿落水 pH 值則是皆有明顯提升約 1-1.6 個 pH 值的單位，其中以樟樹、相思樹、水黃皮及茄苳更是高於一般未受到污染之降雨的 5.6 以上 (表 1)，主要是因為冠層葉片有吸收攔截大氣沉降物之功能。葉片氣孔會吸收部分 SO<sub>2</sub> 及 NO<sub>2</sub> 等氣體，及受到大量酸雨 H 的輸入會將大量的鹽基陽離子自樹冠交換淋溶出來 (金恆鏞等，2003)，而冠層葉片所攔截之風化塵土 Ca<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup> 及 Si<sup>4+</sup> 等離子受到雨水淋洗沖刷，與酸性物質形成之弱酸鹽類亦可能提升穿落水 pH 值，由此可驗證林木樹冠層有緩衝外界酸性物質輸入的功能。

表 1. 台糖公司台中區處外埔與后里農場 2010 - 2011 年所收集林外雨和各平地造林不同樹種穿落水雨量加權平均 pH 值

	林外雨	烏心石	白千層	相思樹	樟樹	茄苳	臺灣檫	無患子	水黃皮
pH 值	4.23	5.36	5.33	5.85	5.74	5.73	5.54	5.28	5.73

比較每場雨林外雨之 pH 值發現 (圖 13)，多數降雨約在 pH 值為 5，但在 2010 年 8 月 1 日所收集林外雨卻有 pH 值為 3.47 的較低情形，此推測應是受到 2010 年 7 月 25 日位於雲林麥寮六輕工業區大火所致。由於試驗地外埔地區附近無空氣品質監測站及氣象站，故選取試驗地南邊最近之豐原空氣品質監測站所統計資料進行分析。根據空氣品質監測網 2010 年豐原站所測得風向資料，於六輕大火後至收集雨水 (2010 年 8 月 1 日) 期間風向約為 165.89°- 211.58°，即為東



南-西南方向之間，雲林六輕工業區約於試驗地西南偏南方，故六輕大火產物可能隨風飄散至試驗地區。豐原空氣品質監測站亦監測到可能致酸物質  $\text{SO}_2$  濃度由 1.99 (ppb) 上升到 4.70 (ppb)，且根據中興大學教授莊秉潔監測及模擬結果，在六輕大火後懸浮微粒  $\text{PM}_{2.5}$  超過美國的日均值標準約 7 倍之多，且影響範圍廣達南投縣埔里鎮，北達桃竹苗，故對於無論是可能造成 pH 降低之致酸物質 ( $\text{SO}_2$ )、影響呼吸道健康的懸浮微粒  $\text{PM}_{2.5}$  結果都有上升趨勢，且配合大火後風向資料，六輕大火產物可能隨風飄散至試驗地區，影響台中地區空氣品質造成雨水 pH 值降低。而在 2011 年 6 月 29 日、7 月 13 日及 7 月 20 日 3 場林外雨收集其 pH 值皆有偏低之現象 (4.68 - 4.84)，而此段期間有米雷颱風 (6 月 15 日) 及馬鞍颱風 (7 月 16 日) 過境，推測應該是與颱風所過境之地區國家夾帶大量的汙染物質，或原本已飄散大氣中之酸性汙染物，經過颱風較強大的風雨，造成大量的酸性物質輸入，造成 pH 有偏低之現象。在台灣西南部研究發現，颱風期間降雨中有較高濃度的  $\text{SO}_4^{2-}$  及重金屬汙染物，故颱風雖有較大雨勢，可能對於收集水樣造成稀釋作用，但研究仍指出颱風期間的確會造成較多酸性物質的輸入 (Cheng and You, 2010)。

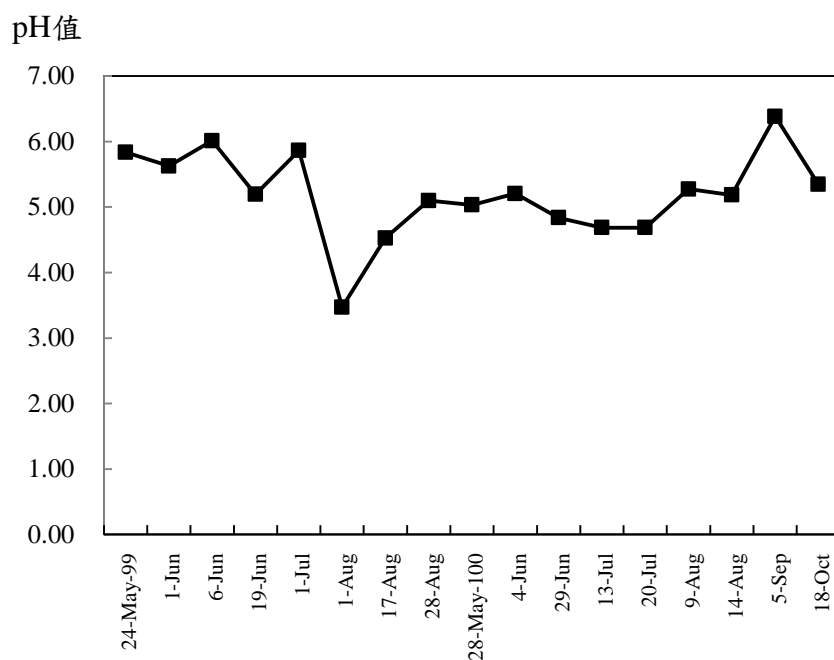


圖 13. 2010-2011 年外埔造林地所收集 17 場林外雨 pH 值變化。

## (二) 不同平地造林樹種冠層離子淨輸入量

林外雨經過冠層後，與冠層發生交互作用，而使得穿落水濃度有所改變。而此交互作用包括 (1) 乾沉降於葉片枝條上之懸浮微粒及塵土等，經過雨水沖刷葉表面之物質的淋洗作用。(2) 雨水攜入離子與葉片中原本即存在之根部吸收離子進行交換釋出的淋溶作用 (André et al., 2008)。分別將林外雨和穿落水濃度乘以收集水量換算淨輸入量後相減 (穿落水離子量－林外雨離子量)，並換算單位面積，得試驗期間單位面積冠層離子淨輸入量 (表 2a)，年平均輸入可由表 2 (b) 得之，若冠層離子淨輸入量  $> 0$  即表示冠層有淋洗淋溶作用大於葉片吸收作用，離子以釋出為主；若冠層離子淨輸入量  $< 0$  則葉片主要仍以吸收離子為主。

在試驗期間可以發現各樹種其冠層離子淨輸入量多數皆為正值，即穿落水離子總量會大於林外雨離子總量，而其中無患子與烏心石冠層離子淨輸入量 (12.49、36.68 kg ha<sup>-1</sup>)，白千層及相思樹冠層離子淨輸入量較多 (218.33、279.30 kg ha<sup>-1</sup>)，可以推估白千層及相思樹的冠層淋洗及淋溶作用較為旺盛。考慮其葉片結構及葉片大小，可以發現無患子與烏心石屬於葉表面較為光滑，且無患子葉片為紙質較為柔軟，而大氣沉降物容易隨風再飄散，故可能影響雨水淋洗量減少；而白千層與相思樹雖然葉片較小，但整體可承接大氣沉降物之葉面積較多，且白千層枝條有細毛亦可能增加其承載沉降物量。而在試驗期間適逢白千層開花期間，其為穗狀花序密生老枝上，故雨水可能淋洗其上方沉降物，亦可能淋溶出不同葉片之離子，增加穿落水離子量。Gupta 等 (2004) 進行菩提 (*Ficus religiosa*) 和番石榴 (*Psidium guyava*) 葉片乾沉降情形，發現由於樹種葉片特性及排列方式的不同，以菩提葉片光滑及柔軟亦飄散之特性，其乾沉降量較少；張育森 (1997) 發現樹種間葉片相對滯塵量大致以葉面粗糙、具茸毛和凹凸不平的樹皮、葉片硬挺或具黏性物質、葉片小而粗糙者，具有較高的滯塵量，故樹種不同其葉片枝條特性可能影響其承載沉降量大小。

表 2 (a). 台糖公司台中區處外埔與后里農場不同平地造林樹種 2010-2011 年所收集 17 場雨冠層離子淨輸入量

	烏心石	白千層	相思樹	樟樹	茄苳	臺灣檫	無患子	后里 <sup>a</sup> 白千層	后里 <sup>a</sup> 水黃皮
	kg ha <sup>-1</sup>								
Na <sup>+</sup>	0.24	18.39	13.31	5.84	1.01	1.33	-0.70	13.73	0.40
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-2.40	12.06	38.93	5.09	0.06	0.18	-2.64	5.38	-1.00
K <sup>+</sup>	20.27	43.51	85.07	36.40	38.99	24.59	11.17	32.84	15.68
Mg <sup>2+</sup>	1.31	5.05	3.00	2.69	5.83	1.57	0.83	5.26	1.23
Ca <sup>2+</sup>	3.36	4.22	1.47	3.65	4.30	3.89	0.19	3.90	2.20
F <sup>-</sup>	0.04	0.39	0.46	0.23	0.08	0.17	0.03	0.58	0.19
Cl <sup>-</sup>	2.68	65.42	92.76	21.77	23.14	6.77	0.06	62.93	6.87
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-3.32	-2.29	-0.30	2.19	-2.75	-3.31	-3.12	0.23	2.86
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10.59	11.84	16.87	29.20	19.67	10.83	5.09	5.20	2.98
PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0.15	0.70	0.64	1.26	2.41	-0.09	0.84	2.44	0.61
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4.05	59.05	27.11	14.95	6.53	11.09	0.75	39.69	7.26
Total	36.68	218.33	279.30	123.27	99.28	57.02	12.49	172.19	39.28

註：a 為 99 年后里造林地白千層與水黃皮之穿落水，共計 8 場雨所收集離子總量，其餘外埔造林地收集樹種之穿落水為 2010-2011 年 17 場雨總量。

表 2 (b). 台糖公司台中區處外埔與后里農場不同平地造林樹種年平均冠層離子淨輸入量

	烏心石	白千層	相思樹	樟樹	茄苳	臺灣檫	無患子	后里 白千層	后里 水黃皮
	kg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>								
Na <sup>+</sup>	0.12	9.20	6.66	2.92	0.51	0.67	-0.35	6.86	0.20
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-1.20	6.03	16.47	2.55	0.03	0.09	-1.32	2.69	-0.50
K <sup>+</sup>	10.14	21.75	42.54	18.20	19.50	12.30	6.09	16.42	7.84
Mg <sup>2+</sup>	0.66	2.53	1.50	1.35	2.92	0.79	0.42	2.63	0.62
Ca <sup>2+</sup>	1.68	2.11	0.74	1.83	2.15	1.95	0.09	1.95	1.10
F <sup>-</sup>	0.02	0.19	0.23	0.12	0.04	0.09	0.01	0.29	0.09
Cl <sup>-</sup>	1.34	32.71	46.38	10.88	11.57	3.38	0.03	31.46	3.43
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-1.16	-1.15	-0.15	1.09	-1.38	-1.66	-1.56	0.12	1.43
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5.30	5.92	8.44	14.60	9.84	5.42	2.55	2.60	1.49
PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0.08	0.35	0.32	0.63	1.21	-0.05	0.42	1.22	0.30
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2.03	29.53	13.56	7.48	3.26	5.55	0.38	19.85	3.63
Total	18.34	109.17	139.65	61.64	49.64	28.51	6.25	86.09	19.64

在分析離子種類中發現，非植物生長所需之離子  $\text{Na}^+$ 、植物生長所需微量離子  $\text{Cl}^-$ 、及  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  附著細胞壁或葉綠素等不易受冠層淋溶釋出之低移動性離子 (André *et al.*, 2008)，在多數平地造林樹種中其冠層離子淨輸入量並無明顯增加或減少情形，尤其以無患子和烏心石最不明顯 (表 2)，這亦可以解釋無患子及烏心石冠層除了對於這些原本即不易淋溶之離子交換情形不明顯外，另外可能增加穿落水離子量的乾沉降淋洗作用亦是因為其葉片特性，而使得無患子和烏心石在整體冠層交互作用仍屬於輸入約等於釋出狀態；而白千層和相思樹在  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  及  $\text{Mg}^{2+}$  等不易受冠層淋溶影響之離子，其冠層離子淨輸入量為所有樹種中最高，故可以解釋其樹冠交互作用以淋洗葉表面乾沉降為主。

酸性污染物中由工業燃料排放  $\text{SO}_4^{2-}$ ，及汽機車排放  $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  為主，當酸性物質含量愈多，亦會影響 pH 值的下降 (圖 14)。在冠層交互作用後發現，酸性物質改變均是有增加的趨勢，除了  $\text{SO}_4^{2-}$  於樹種間有差異外， $\text{NO}_2^-$  及  $\text{NO}_3^-$  差異不大且增加幅度不似  $\text{SO}_4^{2-}$  明顯。 $\text{SO}_4^{2-}$  淨輸入量以白千層和相思樹最大，而無患子和烏心石較小，且與上述植體內較不具移動性之離子 ( $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  及  $\text{Mg}^{2+}$ ) 有相似的趨勢，故推估  $\text{SO}_4^{2-}$  的增加應該與其本身攔截乾沉降量較大有關，受葉片淋溶量影響較小。Gupta 等 (2004) 進行葉片乾沉降量收集亦發現本身葉片特性較為光滑，不易承載乾沉降物之菩提 ( $0.5 \pm 0.2 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) 較番石榴 ( $1.5 \pm 0.9 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) 所收集的  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降速率小，可由此得之  $\text{SO}_4^{2-}$  截留能力與截留乾沉降量者有相似趨勢。而且由工業燃料排放之  $\text{SO}_4^{2-}$  多以懸浮微粒為主，若樹種本身特性有助於攔截較多之懸浮微粒，亦可以降低空氣中懸浮微粒含量，避免環境能見度降低、人體呼吸系統健康等問題產生。

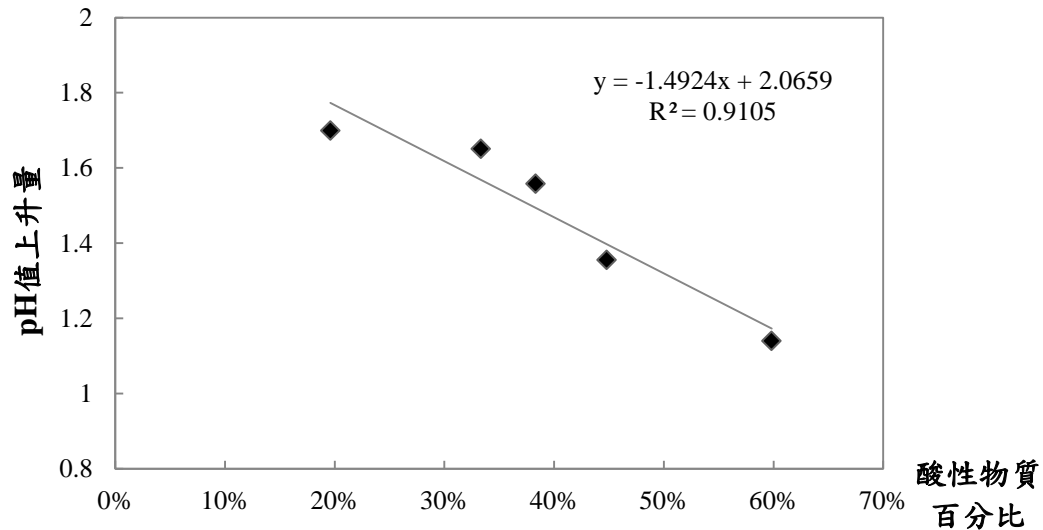


圖 14. 酸性污染物百分比及穿落水 pH 值上升百分比關係圖。

穿落水鹽基陽離子 ( $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ )，淨輸入量主要來源有 2 種，除了冠層攔截乾沉降經由淋洗作用輸入外，另外即是降雨經過冠層與葉片進行離子交換之淋溶作用，將葉片內鹽基陽離子攜出。Sverdrup 等 (1990) 提出可以透過這些離子其於穿落水與降雨中離子量比值，加以推估其來自乾沉降淋洗及葉片淋溶作用比例。此利用  $Na^+$  非林木生長所需之養分，假設其在經過冠層，沒有葉片淋溶作用、吸收作用及離子交換的影響，穿落水中所  $Na^+$  增加含量皆來自乾沉降，故乾沉降  $Na^+$  比例係數 (FNa) 可以幫助我們進行乾沉降比例推算，如以下公式：

$$FNa = TfNa / BPNa$$

TfNa：穿落水  $Na^+$  輸入量

BPNa：降雨  $Na^+$  輸入量

$$Kd = FNa * BPK$$

$$Mgd = FNa * BPMg$$

$$Cad = FNa * BPCa$$

Kd、Mgd、Cad：穿落水  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  乾沉降輸入量

由以上公式推算乾沉降輸入量，並將總量加以扣除，亦可以得到經由冠層淋溶之鹽基陽離子輸入量 (表 3)。在 99-100 年共收集 17 場雨中，經過乾沉降比例推算發現，各樹種穿落水中來自乾沉降比例， $K^+$  為 32.89-64.11 %， $Mg^{2+}$  為 22.83-66.29 %， $Ca^{2+}$  為 34.95-96.02 %，顯示  $Ca^{2+}$  多為乾沉降輸入居多，冠層葉片淋溶作用、吸收作用及離子交換的影響較小， $Ca^{2+}$  也是植物葉片細胞壁上的重要物質，具有固定形狀之功能，緊密鑲嵌細胞壁上，故不易有移動現象 (André *et al.*, 2008)。鹽基陽離子  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ ，除了  $Ca^{2+}$  較無明顯之淋溶現象，多數研究指出，鹽基陽離子皆容易隨降雨增加、 $H^+$  輸入而有離子交換釋出之情形 (劉瓊霏, 2000)，但在本試驗推估結果發現，鹽基陽離子在試驗地區來自乾沉降之輸入量有明顯較多之現象，顯示在本試驗地養分輸入途徑中，乾沉降亦為主要來源之一，其中  $K^+$  乾沉降輸入量以白千層、樟樹及無患子有高於 50 % 情形， $Mg^{2+}$  乾沉降輸入則是白千層、相思樹、台灣欒及無患子較多， $Ca^{2+}$  除了茄苳較低外，其餘皆可達 50 % 以上，其中樟樹最高，乾沉降輸入達 96.02 %。

表 3. 台糖公司台中區處外埔與后里農場不同平地造林樹種 2010-2011 年所收集 17 場雨穿落水中乾沉降及淋溶量之推估

	K				Mg				Ca			
	Dd	Tf	Dd	L	Dd	Tf	Dd	L	Dd	Tf	Dd	L
	%	$kg\ ha^{-1}$			%	$kg\ ha^{-1}$			%	$kg\ ha^{-1}$		
烏心石	32.89	25.59	8.42	17.17	42.54	1.79	0.76	1.03	54.79	4.57	2.50	2.06
白千層	64.11	48.83	31.31	17.53	56.47	5.53	3.12	2.41	83.81	5.43	4.55	0.88
相思樹	46.86	90.39	42.36	48.03	66.29	3.48	2.30	1.17	89.67	2.67	2.39	0.28
樟樹	51.46	41.72	21.47	20.25	45.73	3.17	1.45	1.72	96.02	4.85	4.66	0.19
茄苳	42.35	44.31	18.76	25.54	22.83	6.31	1.44	4.87	34.95	5.51	1.92	3.58
台灣欒	32.91	29.91	9.84	20.07	51.31	2.04	1.05	1.00	54.78	5.09	2.79	2.30
無患子	52.27	16.49	8.62	7.87	52.21	1.30	0.68	0.62	68.57	1.39	0.96	0.44

註：Dd：乾沉降；Tf：穿落水輸入量；L：淋溶輸入量。

### (三) 葉面積指數

林外降雨通過林木冠層時，由於冠層的交互作用可能改變不同樹種的淨交換量，故冠層葉面積對於其交換作用尤其重要。葉面積指數即是利用魚眼鏡頭拍攝樹冠，得到在單位面積內由林冠下俯拍葉片層數的多寡，如台灣欒拍攝判釋所得葉面積指數為 1.8239，則表示台灣欒冠層在單位面積內有 1.8239 層之葉片，而此值愈大即顯示該樹種擁有較多的葉片數。當樹種葉面積指數愈大，無論是對於乾沉降懸浮微粒的攔截，或當降雨時對於酸沉降的緩衝淋溶作用，都具有加強之情形。而本次試驗於外埔農場進行不同造林樹種葉面積指數測定，發現其葉面積指數以烏心石最大 (1.8617)，依序為台灣欒 > 白千層 > 無患子 > 樟樹 > 相思樹 > 茄苳，其中烏心石、白千層、台灣欒的葉面積指數相較其他樹種有顯著差異 (表 4)。

表 4. 台糖公司台中區處外埔農場不同平地造林樹種葉面積指數(LAI)

	烏心石	白千層	相思樹	樟樹	茄苳	臺灣欒	無患子
LAI	1.8617 <sup>a</sup>	1.7458 <sup>a</sup>	1.3125 <sup>bc</sup>	1.6406 <sup>abc</sup>	1.2624 <sup>c</sup>	1.8239 <sup>a</sup>	1.6759 <sup>ab</sup>

註：LAI 值後之字母 (a, b, c) 若不同，表示 Tukey's Studentized Range (HSD) 檢定結果呈顯著差異 ( $p < 0.05$ )。

比較不同樹種冠層各離子淨輸入量與各葉面積指數，其相關性顯示，葉面積指數與  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$  及  $\text{PO}_4^{2-}$  具有顯著的負相關，其餘離子則無顯著相關性 (表 5)。隨著樹種葉面積指數愈大， $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$  及  $\text{PO}_4^{2-}$  在經過冠層的淨輸入量有下降趨勢。 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Cl}^-$  及  $\text{PO}_4^{2-}$  屬於外界輸入較多， $\text{NH}_4^+$  除了來自交通廢氣污染物外，周圍農地農藥施灑亦是來源之一； $\text{Cl}^-$  主要來源為海鹽飛沫或岩石風化產物，亦是重要長程運輸之沙塵物質； $\text{PO}_4^{2-}$  離子多是因為生物因子造成，生物排遺物或生物殘體都可能增加其含量，在冠層穿落水部分有較林外雨增加情形，主要與降雨經過冠層的葉片枝條上端棲息之生物有關，故  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Cl}^-$  及  $\text{PO}_4^{2-}$  是於乾沉降受到葉片攔截之懸浮微粒以及冠層生物因子所造成。 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$

其本身為林木葉片內部物質，伴隨酸沉降  $H^+$  的輸入於冠層進行離子交換作用，將  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$  等電負度較低者淋溶釋出，故以上離子應該會隨著葉片數增加而有增加之現象。

但於外埔地區研究期間發現，各離子的淨輸入量與葉面積指數多呈負相關，隨著樹種葉面積指數愈大，造成  $NH_4^+$ 、 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Cl^-$  及  $PO_4^{2-}$  離子經過冠層作用淨輸入量有減少之情形。冠層對於空氣污染物有 2 種途徑可進行淨化，而淨輸入量隨枝葉多而減少亦是冠層進行吸收作用淨化空氣污染之結果，且具顯著相關離子多為植物生長所必須，其餘仍無顯著相關性，推測該地區屬於初期造林地，許多樹種仍未成林，現地亦多為雜草禾本科植物占據生長，降雨少且人為經營撫育亦不頻繁，故在養分的獲取，或養分回歸情形亦不足，所以多數樹種而言仍多屬養分缺乏情形。在降雨穿過冠層理應淋洗淋溶出之離子，可能於上層葉片釋出，但經過中層下層葉片時可能在被吸收回冠層葉片中，經過葉片數愈多，則吸收情形愈明顯，故可能為造成  $NH_4^+$ 、 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Cl^-$  及  $PO_4^{2-}$  隨著葉面積指數增加而淨輸入量減少之原因。其餘相關性較不顯著之離子，除了與本次研究期間降雨次數造成樣本數少，而使得結果無顯著差異外，可能亦與影響冠層交互作用因子甚多，如氣候條件、林外雨原輸入量多寡等皆可能影響其淨輸入量。

表 5. 不同平地造林樹種各離子的淨輸入量與葉面積指數相關性

	$H^+$	$Na^+$	$NH_4^+$	$K^+$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	$F^-$	$Cl^-$	$NO_2^-$	$NO_3^-$	$PO_4^{2-}$	$SO_4^{2-}$
LAI	0.00	-0.09	-0.19	-0.26	-0.22	0.03	-0.12	-0.31	-0.03	-0.12	-0.22	-0.02
	ns	ns	*	***	*	ns	ns	***	ns	ns	*	ns

註：顯著性為 ns， $p > 0.05$ ；\*， $p < 0.05$ ；\*\*， $p < 0.01$ ；\*\*\*， $p < 0.005$ 。



#### (四) 冠層淨輸入量複迴歸分析

林外雨在經過冠層交互作用後，形成的穿落水會受到冠層及周遭環境影響而有所變化。當降雨經過冠層葉片時，降雨量的多寡，可能會造成原先已沉降葉片枝條之乾沉降物受到沖刷程度有所差異；降雨量增加亦可能增加葉片的淋溶作用 (André et al., 2008)。不同離子因為其移動性、電負度及與部份官能基鍵結，故有不同的鍵結能力，在 André 等 (2008) 研究中進行展葉及葉片較少時期的穿落水收集，發現穿落水中 K 主要由冠層交換而來，其餘  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NH}_4^+$  為降雨時輸入較多， $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  則是降雨及乾沉降輸入皆有。

影響冠層淨輸入量因子甚多，為了能了解其中主要影響養分流動的主要因子，利用 Lovertt 等人於 1996 年提出複迴歸方程式 (eq 2)，2 年試驗期間所收集 17 場雨，以穿落水淨輸入量當作應變數，雨量、乾沉降、降雨  $\text{H}^+$  濃度及降雨成分離子濃度當作自變數，以每場雨資料推倒複迴歸方程式，方程式如下：

$$\text{NTFx} = a + b_1A + b_2P + b_3C_H + b_4C_X \dots\dots\dots(\text{eq } 2)$$

NTFx：不同成分離子 (x) 的淨穿落量 ( $\text{g ha}^{-1}$ )

A：降雨間隔日數 (days)，用以代替乾沉降量

P：降雨量 (mm)

$C_H$ ：降雨  $\text{H}^+$  濃度 ( $\text{mg L}^{-1}$ )

$C_X$ ：降雨該成分離子 (x) 之濃度 ( $\text{mg L}^{-1}$ )

在綜合所有樹種所收集穿落水資料進行複迴歸分析發現 (表 6)，除了  $\text{PO}_4^{2-}$  其餘離子與 Lovertt 等人所提出之複迴歸方程式 (eq 2) 均有顯著的決定係數 ( $R^2$ )，表示多數離子會受到雨量、乾沉降、降雨  $\text{H}^+$  濃度及降雨成分離子濃度而改變其穿落水離子量。與間隔日數具顯著相關的有  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ ，此顯示以上離子與乾沉降呈顯著相關，亦是主要來源，並會隨著

間隔日數增加，而增加其離子量； $H^+$ 、 $Na^+$ 、 $F^-$ 則與降雨量呈顯著相關，即當降雨量增加， $Na^+$ 、 $F^-$ 穿落量亦會增加， $H^+$ 則因為呈負相關而有減少趨勢； $H^+$ 、 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $NO_2^-$ 、 $NO_3^-$ 與降雨中 $H^+$ 濃度呈顯著負相關； $K^+$ 及 $NO_2^-$ 則與降雨中收集該離子濃度呈顯著相關。

$Na^+$ 及 $Cl^-$ 主要來自海鹽飛沫及風化塵土影響，故其多以乾沉降途徑進入生態系中，並且會受到林木冠層葉片的攔截，遇降雨時一併淋洗沖刷輸入生態系中，故與間隔日數及降雨量有顯著正相關。 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 則主要有兩種途徑，一為冠層對於乾沉降之淋洗，另為 $H^+$ 輸入於冠層進行的離子交換淋溶作用，故由上述複迴歸分析結果發現， $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 與乾沉降呈顯著正相關，但卻與 $H^+$ 濃度呈負相關，這與一般認為 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 應與 $H^+$ 濃度增加呈正相關有所不同，推估可能受到試驗地環境影響，如現地對於 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 等鹽基養分可能已極為缺乏，故當 $H^+$ 濃度增加，冠層葉片中也已無多餘 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 可以被淋溶置換釋出，或又由下層葉片再吸收回植株本體，故在本試驗地發現穿落水中 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 受到 $H^+$ 淋溶作用較不顯著，多為葉片攔截乾沉降經淋洗作用置換所得，這也與我們進行穿落水中 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 主要來源推估，發現 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 在本試驗地多為乾沉降輸入結果相符（表 3）。 $NO_2^-$ 、 $NO_3^-$ 則為交通污染的產物，為汽機車廢氣產生之 $NO_x$ 經過大氣作用產生之二次產物，其主要由粒徑較小之懸浮微粒型式飄散大氣之中，再經由冠層葉片攔截，故其主要與間隔日數具相關性。

將不同樹種分別進行複迴歸分析，因為受限於樣本數仍有不足，其相關性不如全部樹種整體分析（表 7、表 8、表 9、表 10、表 11、表 12、表 13），但仍能就顯著性討論。烏心石穿落水中 $K^+$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ 及 $PO_4^{2-}$ 與間隔日數具顯著正相關，顯示對於截留 $K^+$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ 及 $PO_4^{2-}$ 乾沉降物具顯著作用，這亦與其葉面積指數較高，有較大之截留面積有關（表 4）；白千層 $K^+$ 和 $Cl^-$ 在間隔日數上呈正相關，而 $F^-$ 和 $NO_3^-$ 則與降雨量較為相關，故降雨量增加可能增加 $F^-$ 和 $NO_3^-$ 的淋洗淋溶作用；相思樹則除了 $NH_4^+$ 和 $F^-$ 外，多數離子皆與間隔日數呈顯著正相關，即相

思樹應有較佳截留乾沉降物質之能力；樟樹、茄苳與相思樹相似，多數離子與間隔日數呈顯著正相關，亦都有截留多數乾沉降物之能力；台灣欒  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Cl^-$  及  $SO_4^{2-}$  與間隔日數相關，無患子則是  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $NO_2^-$ 、 $NO_3^-$  有顯著相關，此顯示其對於  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_2^-$ 、 $NO_3^-$  及  $SO_4^{2-}$  分別具有截留之能力。由各別樹種分析後結果發現，其多數皆具有截留乾沉降之能力，其中樟樹、茄苳與相思樹對於多數離子皆具有顯著相關，此顯示其對於截留作用較佳。在近年空氣汙染及極端氣候沙塵風暴產生頻繁的情況下，粒徑較小之懸浮微粒的確已造成空氣品質威脅之一，甚至影響人類呼吸系統健康，故在部分懸浮微粒影響較大之地區可以考慮將其列為造林樹種，已達淨化空氣之功效。

表 6. 冠層離子淨輸入量與各參數複迴歸式之決定係數 ( $R^2$ ) 和各參數之係數值

	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Total												
R <sup>2</sup>	0.99 ***	0.15 ***	0.07 *	0.34 ***	0.21 ***	0.17 ***	0.19 ***	0.12 ***	0.92 ***	0.32 ***	0.06 ns	0.08 *
a	20.09 ***	-147.1 ns	-237.2 ns	-1167 *	-30.57 ns	-29.20 ns	4.09 ns	270.6 ns	-116.1 *	-54.28 ns	75.93 *	750.4 ns
A	-0.01 ns	26.40 ***	44.08 ns	261.7 ***	16.35 ***	14.55 ***	-0.43 ns	134.1 ***	19.63 ***	87.73 ***	0.79 ns	35.77 ns
P	-0.19 ***	5.07 *	8.38 ns	14.32 ns	1.03 ns	1.85 ns	0.35 ***	6.72 ns	0.69 ns	-5.00 ns	-0.71 ns	5.23 ns
C <sub>H</sub>	-2026 ***	-1313 ns	-5050 ns	-13868 ***	-1245 ***	-1657 ***	-36.79 ns	-4273 ns	-1094 **	-4661 ***	548.5 *	-333.1 ns
C <sub>X</sub>		-77.45 ns	-209 ns	-475.6 ***	-120.3 ns	-35.54 ns	70.96 ns	-287.2 ns	-163.4 ***	-2.61 ns	-94.95 ns	-88.17 ns

註：複迴歸方程式參照方程式 (2)。a 為截距，A 為降雨間隔日數，P 為場雨降雨量，C<sub>H</sub> 為林外降雨 H 濃度，C<sub>X</sub> 林外降雨該離子濃度。複迴歸式及各參數顯著性為 ns,  $p > 0.05$ ; \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.005$ 。

表 7. 烏心石冠層離子淨輸入量與各參數複迴歸式之決定係數 ( $R^2$ ) 和各參數之係數值

	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
烏心石												
R <sup>2</sup>	0.99 ***	0.31 ns	0.57 *	0.62 *	0.29 ns	0.24 ns	0.34 ns	0.34 ns	1.00 ***	0.61 *	0.58 *	0.28 ns
a	19.60 *	-44.77 ns	130.5 ns	-1015 ns	-66.48 ns	-215.9 ns	-3.64 ns	-184.6 ns	53.85 ns	-627.9 ns	-22.45 ns	-33.37 ns
A	-0.07 ns	11.15 ns	-8.00 ns	186.2 ***	9.04 ns	22.04 ns	0.00 ns	23.07 *	-1.22 ns	106.4 ***	3.17 *	14.78 ns
P	-0.18 ns	-1.49 ns	-1.85 ns	7.57 ns	1.15 ns	4.11 ns	0.13 *	1.66 ns	0.00 ns	-5.65 ns	-0.23 ns	1.62 ns
C <sub>H</sub>	-1977 ***	-367.5 ns	934.2 ns	-15190 *	-977.5 ns	-2621 ns	-23.45 ns	-1346 ns	-62.48 ns	-6833 ns	-133.5 ns	-177.2 ns
C <sub>X</sub>		-45.13 ns	-77.33 ns	-329.4 *	-85.16 ns	-47.01 ns	17.15 ns	-56.60 ns	-136.8 ***	65.64 ns	-282.6 ***	-5.51 ns

註：複迴歸方程式參照方程式 (2)。a 為截距，A 為降雨間隔日數，P 為場雨降雨量，C<sub>H</sub> 為林外降雨 H 濃度，C<sub>X</sub> 林外降雨該離子濃度。複迴歸式及各參數顯著性為 ns,  $p > 0.05$ ; \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.005$ 。

表 8. 白千層冠層離子淨輸入量與各參數複迴歸式之決定係數 ( $R^2$ ) 和各參數之係數值

	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
白千層												
R <sup>2</sup>	0.99 ***	0.51 ns	0.45 ns	0.70 ***	0.40 ns	0.41 ns	0.42 ns	0.72 ***	0.98 ***	0.42 ns	0.33 ns	0.28 ns
a	20.06 *	-370.6 ns	-350.9 ns	-896.4 ns	-57.65 ns	-16.53 ns	3.05 ns	616.4 ns	-27.50 ns	-546.2 ns	67.30 ns	2414 ns
A	-0.09 ns	59.46 *	38.44 ns	234.9 ***	17.85 ns	14.98 ns	-0.60 ns	202.8 ***	12.09 ns	20.78 ns	4.85 ns	89.80 ns
P	-0.17 ns	17.33 ns	16.97 ns	18.95 ns	3.89 ns	2.81 ns	0.57 *	23.18 ns	-1.02 ns	23.17 *	-1.39 ns	15.76 ns
C <sub>H</sub>	-1994 ***	-5856 ns	-6952 ns	-14983 *	-2359 ns	-2017 ns	-83.40 ns	-15679 *	553.6 ns	-4621 ns	-133.2 ns	-9167 ns
C <sub>X</sub>		-109.6 ns	-80.31 ns	-331.6 ns	-122.3 ns	-48.95 ns	130.8 ns	-332.9 ns	-151.6 ***	-3.65 ns	-456.1 *	-250 ns

註：複迴歸方程式參照方程式 (2)。a 為截距，A 為降雨間隔日數，P 為場雨降雨量，C<sub>H</sub> 為林外降雨 H 濃度，C<sub>X</sub> 林外降雨該離子濃度。複迴歸式及各參數顯著性為 ns,  $p > 0.05$ ; \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.005$ 。

表 9. 相思樹冠層離子淨輸入量與各參數複迴歸式之決定係數 ( $R^2$ ) 和各參數之係數值

	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
相思樹												
R <sup>2</sup>	0.99 ***	0.63 *	0.39 ns	0.59 *	0.81 ***	0.63 *	0.34 ns	0.60 *	0.95 ***	0.49 ns	0.45 ns	0.63 *
a	20.34 *	-479.6 ns	-2201 ns	-3902 ns	-33.02 ns	-3.95 ns	8.87 ns	-1493 ns	-264.4 ns	-87.26 ns	9.09 ns	-61.62 ns
A	-0.05 ns	72.77 ***	295.8 ns	617.4 **	21.47 ***	12.13 **	-0.65 ns	444.4 ***	30.32 *	106.3 *	8.61 *	83.91 **
P	-0.19 ns	8.40 ns	48.36 ns	55.29 ns	-1.72 ns	-1.74 ns	0.58 *	29.76 ns	3.66 ns	-8.38 ns	-0.98 ns	15.57 ns
C <sub>H</sub>	-2069 ***	-5355 ns	-34177 ns	-41934 ns	-951 ns	-428 ns	-129.5 ns	-12136 ns	-2999 *	-6405 ns	-409.4 ns	-4681 ns
C <sub>X</sub>		-86.80 ns	-947.4 ns	-1124 ns	-7.94 ns	5.94 ns	130.6 ns	-545.9 ns	-171.1 ***	38.34 ns	-637.6 **	-58.12 ns

註：複迴歸方程式參照方程式 (2)。a 為截距，A 為降雨間隔日數，P 為場雨降雨量，C<sub>H</sub> 為林外降雨 H 濃度，C<sub>X</sub> 林外降雨該離子濃度。複迴歸式及各參數顯著性為 ns,  $p > 0.05$ ; \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.005$ 。

表 10. 樟樹冠層離子淨輸入量與各參數複迴歸式之決定係數 ( $R^2$ ) 和各參數之係數值

	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
樟樹												
R <sup>2</sup>	0.99 ***	0.54 *	0.67 **	0.76 ***	0.76 ***	0.74 ***	0.54 *	0.67 **	0.91 ***	0.77 ***	0.88 ***	0.68 ***
a	20.24 *	-185.2 ns	-192.4 ns	-1161 ns	-68.53 ns	-68.52 ns	2.28 ns	-318.2 ns	-480.7 ns	-266 ns	30.92 ns	24.27 ns
A	-0.01 ns	26.61 *	-3.97 ns	231.1 ***	19.88 ***	22.53 ***	-0.42 ns	104.3 ***	61.99 ***	178.4 ***	0.96 ns	51.31 ***
P	-0.18 ns	4.33 ns	13.89 ***	19.80 ns	0.13 ns	0.26 ns	0.40 **	8.25 ns	3.80 ns	-6.30 ns	-0.57 ns	5.84 ns
C <sub>H</sub>	-2077 ***	-1062 ns	-3218 *	-12321 *	-1203 *	-1712 **	-153.9 *	-5149 ns	-4196 *	-10692 *	2133 ***	-3274 ns
C <sub>X</sub>		-60.11 ns	-1.74 ns	-481.4 **	-70.72 ns	-22.82 ns	88.54 ns	-150.3 ns	-217.3 ***	-29.11 ns	-66.71 ns	-27.37 ns

註：複迴歸方程式參照方程式 (eq 2)。a 為截距，A 為降雨間隔日數，P 為場雨降雨量，C<sub>H</sub> 為林外降雨 H 濃度，C<sub>X</sub> 林外降雨該離子濃度。複迴歸式及各參數顯著性為 ns,  $p > 0.05$ ；\*,  $p < 0.05$ ；\*\*,  $p < 0.01$ ；\*\*\*,  $p < 0.005$ 。

表 11. 茄苳冠層離子淨輸入量與各參數複迴歸式之決定係數 ( $R^2$ ) 和各參數之係數值

	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
茄苳												
R <sup>2</sup>	0.99 ***	0.22 ns	0.43 ns	0.77 ***	0.90 ***	0.70 ***	0.47 ns	0.64 **	0.99 ***	0.71 ***	0.13 ns	0.49 ns
a	20.27 *	66.35 ns	201.3 ns	-369.2 ns	31.24 ns	77.17 ns	0.01 ns	543.7 ns	-42.57 ns	-32.64 ns	252.9 ns	385.1 ns
A	-0.08 ns	8.90 ns	-12.63 ns	388.9 ***	41.29 ***	28.04 ***	-0.12 ns	188.4 ***	17.10 **	142.7 ***	-1.02 ns	25.41 *
P	-0.18 ns	-2.42 ns	1.57 ns	-35.19 *	-4.08 ns	-2.92 ns	0.12 *	-25.44 ns	-1.60 ns	-17.07 ns	-2.72 ns	-5.15 ns
C <sub>H</sub>	-2052 ***	714.9 ns	-69.84 ns	-12777 ns	-1791 ns	-1623 *	21.06 ns	-3854 ns	-854.3 ns	-7317 ns	491.7 ns	879.6 ns
C <sub>X</sub>		-79.54 ns	-67.24 ns	-771.6 ***	-469.4 *	-95.51 *	3.74 ns	-570.2 *	-163.4 ***	38.81 ns	250.3 ns	-54.77 ns

註：複迴歸方程式參照方程式 (eq 2)。a 為截距，A 為降雨間隔日數，P 為場雨降雨量，C<sub>H</sub> 為林外降雨 H 濃度，C<sub>X</sub> 林外降雨該離子濃度。複迴歸式及各參數顯著性為 ns,  $p > 0.05$ ；\*,  $p < 0.05$ ；\*\*,  $p < 0.01$ ；\*\*\*,  $p < 0.005$ 。

表 12. 台灣櫟冠層離子淨輸入量與各參數複迴歸式之決定係數 ( $R^2$ ) 和各參數之係數值

	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
台灣櫟												
R <sup>2</sup>	0.99 ***	0.18 ns	0.59 *	0.82 ***	0.41 ns	0.07 ns	0.32 ns	0.84 ***	0.99 ***	0.12 ns	0.64 **	0.41 ns
a	19.91 *	66.08 ns	221.3 ns	-265.6 ns	-35.61 ns	119.9 ns	1.12 ns	-4.35 ns	4.67 ns	498 ns	-9.88 ns	513.8 ns
A	-0.07 ns	9.11 ns	-20.07 ns	141.3 ***	15.44 *	10.32 ns	-0.17 ns	32.06 ***	5.00 ns	19.59 ns	3.22 *	29.34 *
P	-0.17 ns	-1.68 ns	2.76 ns	3.13 ns	-0.36 ns	1.00 ns	0.17 ns	0.12 ns	-0.42 ns	6.96 ns	-0.47 ns	-1.24 ns
C <sub>H</sub>	-2010 ***	167.4 ns	165.4 ns	-6385 *	-1058 ns	-1335 ns	-28.82 ns	49.28 ns	-275.1 ns	2821 ns	10.25 ns	-1184 ns
C <sub>X</sub>		-84.83 ns	-38.33 ns	-240 ***	-74.11 ns	-86.24 ns	129.5 ns	-65.53 *	-147.1 ***	91.63 ns	-325.3 ***	-68.91 ns

註：複迴歸方程式參照方程式 (eq 2)。a 為截距，A 為降雨間隔日數，P 為場雨降雨量，C<sub>H</sub> 為林外降雨 H 濃度，C<sub>X</sub> 林外降雨該離子濃度。複迴歸式及各參數顯著性為 ns,  $p > 0.05$ ；\* ,  $p < 0.05$ ；\*\* ,  $p < 0.01$ ；\*\*\* ,  $p < 0.005$ 。

表 13. 無患子冠層離子淨輸入量與各參數複迴歸式之決定係數 ( $R^2$ ) 和各參數之係數值

	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
無患子												
R <sup>2</sup>	0.99 ***	0.17 ns	0.64 *	0.71 ***	0.58 **	0.17 ns	0.37 ns	0.32 ns	0.99 ***	0.59 *	0.41 ns	0.49 ns
a	18.97 *	-20.85 ns	139.5 ns	-350.3 ns	-52.18 ns	25.07 ns	-3.77 ns	70.73 ns	-68.97 ns	-159.6 ns	68.51 ns	449.6 *
A	-0.05 ns	4.48 ns	-6.87 ns	102.5 ***	15.07 **	-0.46 ns	-0.01 ns	8.23 ns	13.07 ***	55.20 **	-2.68 ns	2.98 ns
P	-0.17 ns	-1.65 ns	-2.55 ns	-2.15 ns	-1.19 ns	0.05 ns	0.14 ns	-3.00 ns	-0.48 ns	-7.40 ns	-0.35 ns	-8.53 **
C <sub>H</sub>	-1950 ***	582.8 ns	1069 ns	-2410 ns	-820.7 ns	-63.68 ns	-71.48 *	935.7 ns	-801.4 *	-3081 ns	987.92 *	2756 *
C <sub>X</sub>		-45.7 ns	-86.51 *	-239.4 ***	-15.50 ns	-12.46 ns	43.87 ns	-64.10 ns	-156.8 ***	36.18 ns	134.83 ns	-44.72 ns

註：複迴歸方程式參照方程式 (eq 2)。a 為截距，A 為降雨間隔日數，P 為場雨降雨量，C<sub>H</sub> 為林外降雨 H 濃度，C<sub>X</sub> 林外降雨該離子濃度。複迴歸式及各參數顯著性為 ns,  $p > 0.05$ ；\* ,  $p < 0.05$ ；\*\* ,  $p < 0.01$ ；\*\*\* ,  $p < 0.005$ 。

### (五) N、S 元素分析

N 和 S 是空氣污染的主要物質，N 主要以交通運輸汽機車排放之  $\text{NO}_x$ ，及飄散大氣中形成之二次產物  $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  等型態為主；S 則為化石燃料燃燒產生，無論是初期排出之氣體  $\text{SO}_2$ ，或含 S 之懸浮微粒，及大氣二次產物  $\text{SO}_4^{2-}$ ，都是造成空氣污染中 S 的來源。然而，在相同造林地，我們假設其土壤養分狀況一致，進行植體組成元素分析 (element analysis, EA)，比較各樹種內部 N 和 S 含量，可藉此了解植物與污染物吸收的關係，避免僅收集穿落水可能同時計算外界淋洗及內部淋溶作用，而影響林木截留污染物之評估。葉片元素分析後發現，N 和 S 含量在葉片中階屬於偏少之情形，N 約為 1.28 - 3.91 %，以相思樹最高，依序為相思樹 > 無患子 > 茄苳 > 台灣欒 > 樟樹 > 烏心石 > 白千層；S 約為 0.04 - 1.01 %，以白千層最高，依序為白千層 > 無患子 > 相思樹 > 樟樹 > 烏心石 > 茄苳 > 台灣欒 (表 14)。

表 14. 台糖公司台中區處外埔農場不同平地造林樹種葉片 N 和 S 元素百分比

	烏心石	白千層	相思樹	樟樹	茄苳	台灣欒	無患子
N (%)	1.32 <sup>c</sup>	1.28 <sup>c</sup>	3.91 <sup>a</sup>	1.50 <sup>bc</sup>	1.58 <sup>bc</sup>	1.54 <sup>bc</sup>	2.40 <sup>b</sup>
S (%)	0.06 <sup>y</sup>	1.01 <sup>x</sup>	0.18 <sup>y</sup>	0.07 <sup>y</sup>	0.05 <sup>y</sup>	0.04 <sup>y</sup>	0.24 <sup>y</sup>

註：N、S 元素百分比後之字母 (a, b, c; x, y, z) 若不同，表示 Tukey's Studentized Range (HSD) 檢定結果呈顯著差異 ( $p < 0.05$ )。

Klumpp 等人在 2002 年針對空氣污染地區林木葉片元素分析發現，在污染較嚴重之試驗地，其葉片內部有較高的 N 和 S 含量，顯示林木葉片在淨化空氣品質功效上確實有吸收空氣污染物質之能力，故推測當樹種具截留  $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  及  $\text{SO}_4^{2-}$  能力較佳者，其內部 N 和 S 含量應為較高。本試驗將各樹種所收集穿落水中  $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  及  $\text{SO}_4^{2-}$ ，和葉片中 N 和 S 含量進行相關性比較發現，葉片中 N 含量與穿落水中  $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  相關性不顯著；而 S 含量則與  $\text{SO}_4^{2-}$  呈顯著正相關 ( $R^2 = 0.63, p < 0.005$ ) (表 15)。此顯示隨著樹種截留乾沉降  $\text{SO}_4^{2-}$  愈多，降雨淋洗量增加，則該樹種有較多  $\text{SO}_4^{2-}$  被吸收，則葉片中亦有較高之 S 含量，如白千層即有



類似之情形；葉片 N 與  $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  相關性不顯著原因推測應該是與其養分是否缺乏而有所影響， $\text{NO}_3^-$  原本即為林木生長所需之 N 型態，可能與當地土壤 N 型態非為林木生長所需，或 N 養分缺乏等因素，而使得在降雨經過冠層時，葉片持續吸收  $\text{NO}_3^-$  補充所缺乏之養分，而使得穿落水中所收集淨輸入量減少，而造成其與葉片 N 含量相關性不顯著。N 和 S 亦是林木生長所需元素之一，故來自大氣沉降中的 N 和 S 具有施肥之效應，可以幫助植物生長所需，但是假若其含量過高，或伴隨其他空氣汙染物質，則仍有可能造成危害，如重金屬，及懸浮微粒型態之汙染物，可能造成氣孔阻塞，光合作用面積減少受阻。

表 15. 葉片中 N 和 S 含量及穿落水中  $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  及  $\text{SO}_4^{2-}$  淨輸入量與相關性

	$\text{NO}_2^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$
N	0.03	-0.01	—
	ns	ns	
S	—	—	0.63
			***

註：顯著性為 ns， $p > 0.05$ ；\*， $p < 0.05$ ；

\*\*， $p < 0.01$ ；\*\*\*， $p < 0.005$ 。

#### 四、結論與建議

##### (一) 林外雨和不同平地造林樹種穿落水 pH 值

在試驗中所收集林外雨水樣有偏酸之情形 (pH = 4.23)，在經過不同造林樹種冠層所收集到之穿落水皆有上升情形，約 1-1.6 個 pH 值，主要受到冠層淋洗及淋溶作用影響，以相思樹、樟樹及水黃皮 (5.85、5.74、5.73) 上升最多。試驗期間 99-100 年發現試驗地下雨情形較少，多集中在颱風及梅雨季節，故所收集雨水受到颱風影響甚大，且於颱風過境所收集到雨水 pH 值皆有偏低之現象 (4.68 - 4.84)。99 年 8 月 1 日所收集到雨水 pH 值為 3.74 為試驗期間最低，應與 99 年 7 月 25 日雲林麥寮六輕工業區大火有關，顯示極端環境事件亦會經過長程輸送影響其他地區。

##### (二) 不同平地造林樹種冠層離子淨輸入量

在試驗期間冠層離子淨輸入量以無患子與烏心石交換量較少 (12.49、36.68 kg ha<sup>-1</sup>)，白千層及相思樹交換量較多 (218.33、279.30 kg ha<sup>-1</sup>)，推估白千層及相思樹的冠層淋洗及淋溶作用較為旺盛，白千層與相思樹可承接大氣沉降物之葉面積較多，且白千層枝條有細毛亦可能增加其承載沉降物量。乾沉降推估發現來自乾沉降比例 K<sup>+</sup> 為 32.89-64.11 %，Mg<sup>2+</sup> 為 22.83-66.29 %，Ca<sup>2+</sup> 為 34.95-96.02 %，顯示乾沉降在本試驗地為主要養分輸入途徑之一。K<sup>+</sup> 乾沉降輸入量以白千層、樟樹及無患子有高於 50 % 情形，Mg<sup>2+</sup> 乾沉降輸入則是白千層、相思樹、台灣欒及無患子較多，Ca<sup>2+</sup> 除了茄苳較低外，其餘皆可達 50 % 以上，其中樟樹最高，乾沉降輸入達 96.02 %。

### (三) 葉面積指數

本次試驗於外埔農場進行不同造林樹種葉面積指數測定，發現其葉面積指數以烏心石最大 (1.8617)，依序為烏心石 > 台灣檫 > 白千層 > 無患子 > 樟樹 > 相思樹 > 茄苳，比較不同樹種冠層各離子淨輸入量與各葉面積指數，其相關性顯示，葉面積指數與  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$  及  $\text{PO}_4^{2-}$  具有顯著的負相關，其餘離子則無顯著相關性。推測該地區仍未成林，且雜草禾本科植物占據生長，降雨少且人為經營撫育亦不頻繁，故在養分的獲取及回歸情形不足，故在降雨穿過冠層理應淋洗淋溶出之離子，可能於上層葉片釋出，但經過下層葉片時可能在被吸收回冠層葉片中，經過葉片數愈多，則吸收情形愈明顯，故在空氣汙染嚴重或養分貧瘠地可以以葉面積指數較高之樹種作為造林樹種，不僅可以透過大量葉片吸收汙染物以達淨化空氣之目標，亦可以幫助養分貧瘠地吸收大氣沉降之養分。

### (四) 冠層淨輸入量複迴歸分析

以穿落水淨輸入量當作應變數，雨量、乾沉降、降雨  $\text{H}^+$  濃度及降雨成分離子濃度當作自變數，以每場雨資料推導複迴歸方程式。結果顯示除了  $\text{PO}_4^{2-}$  其餘離子均有顯著的決定係數 ( $R^2$ )，表示多數離子受到雨量、乾沉降、降雨  $\text{H}^+$  濃度及降雨成分離子濃度而影響其穿落水離子量。與間隔日數具顯著相關的有  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ ，此顯示以上離子與乾沉降呈顯著相關； $\text{H}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{F}^-$  則與降雨量具顯著相關； $\text{H}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  與降雨中  $\text{H}^+$  濃度呈顯著負相關； $\text{K}^+$  及  $\text{NO}_2^-$  則與降雨中所收集該離子濃度呈顯著相關。烏心石穿落水中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  及  $\text{PO}_4^{2-}$  與間隔日數具顯著正相關，亦與其葉面積指數較高，有較大之截留面積有關；樟樹、茄苳與相思樹多數離子與間隔日數具顯著正相關，此顯示其對於多數離子截留能力較佳。

#### (五) N、S 元素分析

葉片元素分析後發現，N 和 S 含量在葉片中階屬於偏少之情形，N 約為 1.28 - 3.91 %，以相思樹最高，烏心石及白千層最低；S 約為 0.04 - 1.01 %，以白千層最高。S 含量與穿落水中  $\text{SO}_4^{2-}$  輸入量呈顯著正相關 ( $R^2 = 0.63, p < 0.005$ )，顯示隨著樹種截留乾沉降  $\text{SO}_4^{2-}$  愈多，該樹種葉片中有較高之 S 含量，如白千層；葉片 N 與穿落水  $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  相關性不顯著原因推測應該是與其養分是否缺乏而有所影響，使得在降雨經過冠層時，葉片持續吸收  $\text{NO}_3^-$  補充所缺乏之養分，而使得穿落水中所收集淨輸入量減少，而造成其與葉片 N 含量相關性不顯著。

## 五、參考文獻

- 白創文、邱志郁、王明光 (2005) 酸化森林土壤中的鋁及其植物毒性。台灣林業 31(6): 22-28。
- 金恆鏞、劉瓊霏、夏禹九、黃正良 (2003) 福山天然闊葉林生態系對降水水化學的交互作用。台灣林業科學 18(4): 367-373。
- 范基南、李奇倉 (1997) 鄉土樹種之落塵截留量及抗性之比較。行政院環保署編印。pp. 17.
- 高清 (1996) 酸雨破壞森林原因之探討。農政及農情 49: 45-47。
- 柴一新、祝宁、韓煥金 (2002) 城市綠化樹種的滯塵效應-以哈爾濱市為例。應用生態學報 13(9): 1121-1126。
- 張育森 (1997) 綠化樹種篩選之研究-綠化植物對都市落塵與懸於微粒滯留及抗性之比較研究。行政院環保署編印。
- 潘素美、陳英謙 (1997) 綠化樹種篩選研究系列-簡易監測法評估植物淨化污染之能力。行政院環保署編印。
- 劉瓊霏、金恆鏞 (1996) 離子層析儀應用在水質分析的技術探討。林試所林業叢刊 68 號。林業試驗所印行。
- 劉瓊霏 (2000) 雨水留經關刀溪三種林分水化學的變化。國立中興大學森林學研究所博士學位論文。共 131 頁。
- André, F., M. Jonard and Q. Ponette (2008) Spatial and temporal patterns of throughfall chemistry within a temperate mixed oak-beech stand. *Science of the Total Environment* 397: 215-228.
- Chung, Y., H. Kim, J. Dulam and J. Harris (2003) On heavy dustfall observed with explosive sandstorms in Chongwon-Chongju, Korea in 2002. *Atmospheric Environment* 37: 3425-3433.
- Cheng, M. C. and C. F. You (2010) Sources of major ions and heavy metals in

- rainwater associated with typhoon events in southwestern Taiwan. *Journal of Geochemical Exploration* 105: 106-116.
- Gupta, A., R. Kumar, K. M. Kumari and S. S. Srivastava (2004) Atmospheric dry deposition to leaf surfaces at a rural site of India. *Chemosphere* 55: 1097-1107.
- Iwasaka, Y., G. Shi, Z. Shen, Y. Kim, D. Trochkin, A. Matsuki, D. Zhang, T. Shibata, M. Nagatani and H. Nakata (2003) Nature of atmospheric aerosols over the desert areas in the Asian continent: chemical state and number concentration of particles measured at Dunhuang, China. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* 3: 129–145.
- Klumpp, A., M. Domingos and G. Klumpp (2002) Foliar nutrient contents in tree species of the atlantic rain forest as influenced by air pollution from the industrial complex of Cubatão, SE-Brazil. *Water, Air, and Soil Pollution* 133: 315-333.
- Lovett, G. M., S. S. Nolan, C. T. Driscoll and T. J. Fahey (1996) Factors regulating throughfall flux in a New Hampshire forested landscape. *Canadian Journal of Forest Research* 26 (12): 2134-2144.
- Nowak, D. J., L. C. Kevin, S. T. Rao, G. C. Sistia, J. Luley and D. E. Crane (2000) A modeling study of the impact of urban trees on ozone. *Atmospheric Environment* 34: 1601–1603.
- Parungo, F., Y. Kim, C. Zhu, J. Harris, R. Schnell, X. Li, D. Yang, X. Fang, P. Yan, X. Yu, M. Zhou, Z. Chen, F. Qian and K. Park (1996) Asian dust storms and their effects on radiation and climate. Part II. STC Technical Report 2959 pp. 34.
- Sverdrup, H., W. Vries, W. de and A. Henriksen (1990) Mapping Critical Loads. Report 1990: 14, Nordis Council of Ministers, Copenhagen, Denmark.
- Tsai, Y. I. and C. L. Chen (2006) Characterization of Asian dust storm and non-Asian

dust storm PM<sub>2.5</sub> aerosol in southern Taiwan. *Atmospheric Environment* 40: 4734-4750.

Wang, Y., G. Zhuang, Y. Sun and Z. An (2005) Water-soluble part of the aerosol in the dust storm season— evidence of the mixing between mineral and pollution aerosols. *Atmospheric Environment* 39: 7020-7029.

100 年度委託研究計畫期中報告委員審查意見辦理情形表

計畫編號：100-00-5-08

計畫名稱：平地造林不同樹種對淨化空氣污染物之研究 (2/2)

期中簡報審查意見回覆表

審查委員意見	辦理情形
<p>森林淨化空氣污染物之能力，國內相關資料尚少，應予加強建立，尤其平地林鄰近污染源，值得研究建立各樹種之淨化能力。</p>	<p>由於污染源影響因素甚多，故期末報告中會再加強所收集到離子來源探討，以提供可能污染來源之依據。</p>
<p>表列資料是 1 次或多次樣本所得，建議予以註明。</p>	<p>期中報告中表列資料為 2010 年 5 月至 2010 年 10 月所收集 8 場雨水樣本之平均值。後續期末報告表列資料會予以補上說明。</p>
<p>表列資料若為單位面積 (ha，如表 2)，則請敘明自樣本資料轉換之模式。</p>	<p>冠層淨離子交換量 = [(穿落水濃度 (mg L<sup>-1</sup>) × 穿落水量 L) - (林外雨濃度 (mg L<sup>-1</sup>) × 林外雨量 L)] / 10<sup>6</sup> / (10 × 10 × π × 3) × 10<sup>8</sup> (kg ha<sup>-1</sup>)，其中 10 × 10 × π 為單一漏斗之取樣面積，每組取樣裝置有 3 組漏斗，換算取樣面積時必須乘以 3。除以 10<sup>6</sup> 為將 mg 換為 kg，乘以 10<sup>8</sup> 為將 cm<sup>2</sup> 換為 ha。</p>
<p>LAI 如何獲得？與淨化能力之關係請予敘明。</p>	<p>於林冠下利用魚眼鏡頭拍攝林冠，並進行葉面積判釋 (CI-110)，可以推知單位面積內冠層葉片層數。當葉面量愈多，</p>



	<p>其截留面積愈大，有助於攔截粒徑較小之懸浮微粒，減少人體直接吸收危害呼吸系統。再者，葉片數愈多，也可以幫助植物對於空氣汙染物質吸收，透過葉片數愈多，愈有機會將有害物質吸收存於植株內，已達淨化及減緩對於環境的直接威脅。</p>
<p>陰陽離子建議寫上各離子之價數（第 4、5、6、12、17 頁）。</p>	<p>感謝委員建議，此部分會於後續報告補上。</p>
<p>林外降雨受六輕大火影響（99 年 7 月 25 日），有無風向資料？</p>	<p>根據空氣品質監測網 99 年距離試驗地最近之豐原站所測得風向資料，於六輕大火後至收集雨水(99 年 8 月 1 日) 期間風向約為 165.89°- 211.58°，即為東南-西南方向之間，雲林六輕工業區約於試驗地西南偏南方，故六輕大火產物可能隨風飄散至試驗地區。</p>
<p>第 19-20 頁，線性推估鄉慣性不高，改用曲線式是否會不一樣？尤其白千層 <math>\text{NO}_3^-</math> 公式會有負值出現？</p>	<p>期中報告降雨量與離子淨輸入量關係表格中，已嘗試利用線性及曲線式進行分析，並擇其最高相關性者列於表中，但多數係數仍不高，推測應該是期中報告時僅收集 8 場雨水資料，數據仍不足。由於討論中是取冠層淨輸入量，負值為冠層有吸收之情形，由於 <math>\text{NO}_3^-</math> 為植物生長所需，故可能因為試驗地有 <math>\text{NO}_3^-</math> 缺乏之現象，故在降雨量較少時</p>

	<p>有，冠層淋洗作用上不明顯，少量雨水沖刷，反而促使葉表面截留的 <math>\text{NO}_3^-</math> 增加其移動性，<math>\text{NO}_3^-</math> 則多為加速沖刷形成淨輸入部分。但負值部分可能也是數據不足的關係，期末會再加入其餘場雨及氣象資料之分析。</p>
<p>第 6 頁前言部分引用范基南、李奇昌 (1996) 之文獻來源為何？請補充。</p>	<p>感謝委員指正，文獻部分已修正。 范基南、李奇倉 (1997) 鄉土樹種之落塵截留量及抗性之比較。行政院環保署編印。pp. 17.</p>
<p>「淨冠層離子交換量」建議改名為「冠層淨離子交換量」。</p>	<p>感謝委員建議，此部分會於後續報告修正。</p>
<p>摘要部分倒數第 3 及第 2 句敘述請再討論修正。淋容量、淨交換量等名詞請予以定義清楚。</p>	<p>感謝委員建議，已將摘要部分重新討論修正。淋容量是探討降雨在經過葉片後，其葉片內部可能因為離子交換作用而是出之增加量；淨交換量是指降雨經過冠層後，離子的增加變化量，其中包括葉片離子交換淋溶釋出量及雨水沖刷葉表沉降物的淋洗量。此部分會於後續報告定義補充。</p>

100 年度委託研究計畫期末報告委員審查意見辦理情形表

計畫編號：100-00-5-08

計畫名稱：平地造林不同樹種對淨化空氣汙染物之研究 (2/2)

期末簡報審查意見回覆表

審查委員意見	辦理情形
<p>第 8 至 9 頁請敘明為何選擇這 8 種樹種做為研究對象？亦請補述其林況及林齡。</p>	<p>此 8 種除了為平地造林獎勵樹種，亦是台糖外埔農場主要造林樹種，故選定其為試驗標本木。現地林木地除了烏心石是於 2005 年栽植外，其餘樹種皆於 2002 年 6 月栽植，林齡約為 10 年。主要以相同樹種呈塊狀或代狀栽植，栽植密度為 1,500 (株/公頃)，林木高度除了台灣欖本身生長速度較慢外，其餘樹種皆可達 3 m 以上。</p>
<p>請敘明各樹種樣木之篩選標準？</p>	<p>以台糖外埔農場現有平地造林樹種冠層茂密者為本試驗樣木。</p>
<p>第 14 頁之葉片樣本是取自樹冠哪一冠層？方位為何？</p>	<p>因為受限於林木高大，而採集所用高枝剪僅 3 公尺高，故多採集約 3 m 高之冠層底部枝梢葉片，除台灣欖因為生長緩慢，多數為達 3 m 高度，但仍以冠層底部為主。而採集方位則以東南西北四方位於冠層底部各剪取一枝條，帶回實驗室採取各枝條葉片混合，並進行之後洗淨、烘乾、分析之步驟。</p>

<p>文中對離子之敘述，如第 16 頁 Ca, Al 離子請用離子態，第 7 頁 SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> 及第 20 頁 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>請一致。</p>	<p>感謝委員建議，此部分已於報告中訂正補上。</p>
<p>第 19 頁 Cl 為植物之必要元素；Na 雖非為必要元素，但可能在植物體內大量積聚；Ca, Mg 為細胞膜的重要成分而非細胞壁，以上部分請修正。</p>	<p>感謝委員建議，此部分已於報告中訂正補上，但 Ca, Mg 是細胞壁的重要成分。</p>
<p>第 23 頁 Cl 可能以鹽沫到達本試驗地，但未敘明 Na<sup>+</sup>也可到達，是否遺漏？或有其他原因而不予以論述？</p>	<p>此部分因為描述葉面積指數與各離子相關性，發現 Cl<sup>-</sup>與葉面積指數顯著正相關故予以討論其可能來源為海鹽飛沫或岩石風化產物，亦是重要長程運輸之沙塵物質，主要的乾沉降物質。Na<sup>+</sup>則因為來源較為單純，多來自海鹽飛沫影響，且當其經過冠層淋洗淋溶作用後淨輸入量較小於 Cl<sup>-</sup>，故於此處討論希望討論 Cl<sup>-</sup>大幅增加之原因，及除了海鹽飛沫外，長程輸送的重要性。</p>
<p>第 33 頁在結論與建議（三）最後所提建議是否意指枝葉多反而不利於空氣污染物之淨化？</p>	<p>此部分是討論葉面積指數愈高，造成 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>及 PO<sub>4</sub><sup>2-</sup>離子經過冠層作用淨輸入有減少情形。冠層對於空氣污染物有 2 種途徑可進行淨化，而淨輸入量隨枝葉多而減少亦是冠層進行吸收作用淨化空氣污染之結果，且具顯著相關離子多為植物生長所必須，故在此推測可能因為人工林在生長階</p>

	<p>段，所以提高冠層進行吸收途徑加劇，而有淨輸入量降低之情形。</p>
<p>有關六輕大火可能使雨水 pH 值下降，是否有氣象局測站或其他研究資料可參酌？</p>	<p>由於外埔地區無氣象局測站，無直接的雨水 pH 值可供參考，而附近僅有豐原空氣品質監測站，故以其在六輕大火發生(2010 年 7 月 25 日)至我們所收集雨水時間 (2010 年 8 月 1 日)，監測到可能致酸物質 SO<sub>2</sub> 濃度由 1.99 (ppb) 上升到 4.70 (ppb)，另根據中興大學莊秉潔教授監測及模擬結果，在六輕大火後懸浮微粒 PM<sub>2.5</sub> 超過美國的日均值標準約七倍之多，且影響範圍廣達南投縣埔里鎮，北達桃竹苗，故對於無論是可能造成 pH 降低之致酸物質 (SO<sub>2</sub>)、影響呼吸道健康的懸浮微粒 PM<sub>2.5</sub> 結果都有上升趨勢，且配合大火後風向資料，風向約為 165.89°-211.58°，即為東南-西南方向之間，雲林六輕工業區約於試驗地西南偏南方，故六輕大火產物可能隨風飄散至試驗地區，影響台中地區空氣品質。</p>
<p>第 2 頁目錄部分圖 9 的文字部分排版位移。</p>	<p>感謝委員建議，此部分已於報告中訂正補上。</p>
<p>第 26 至 30 頁表 6 至 13 標題，以及第 3 頁表目錄部分標題能否精簡？另外第</p>	<p>感謝委員建議，此部分已於報告中訂正補上。</p>

23 頁說明部分能否分段說明?	
第 35 頁參考文獻簡體字請修正為繁體字。	感謝委員建議，此部分已於報告中訂正補上。
摘要部分第九行請修正為「試驗期間分析結果顯示，林外雨 pH 為 4.23，林內 8 種樹木之穿落水 pH 值皆超過 5，其中相思樹 pH 值上升最多 5.85。」，「試驗期間」亦可刪除。接著「無患子與烏心石淨輸入量較少（12.49、36.68 kg ha <sup>-1</sup> ）」，是否意指冠層離子淨輸入量較少？kg ha <sup>-1</sup> 代表一年或二年淨輸入量，還是 17 場雨的輸入量？建議換算為每年每公頃(kg ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )。接著「與間隔日數具顯著相關的有...，此顯示以上離子與乾沉降呈顯著相關」，請就此部分再予以具體說明。	感謝委員建議，此部分已於報告中訂正補上。「無患子與烏心石淨輸入量較少...」此部分是指雨水經過冠層交互作用後的離子淨輸入量，已於摘要進行訂正補上；初版表 2 為試驗期間 17 場雨總量，因為考慮 2 年雨量有些許差異，及降雨期間亦有不同，若僅用收集期間 2 年數據進行平均，可能有失代表性，需要長期監測，增加數據及參考價值。但為了避免造成說明誤解，感謝委員建議，此部分已於期末報告中另以表 2 (b)表示單位面積年平均冠層離子淨輸入量；「與間隔日數具顯著相關的有...，此顯示以上離子與乾沉降呈顯著相關」此部分間隔日數是指距離上次降雨與此次降雨間隔期間，因為未降雨時，大氣沉降以乾沉降為主，故若離子與間隔日數相關性愈高，即表示其可能隨間隔日數增加，此離子沉降愈多，亦表示以乾沉降途徑為主。
表 1-5 之表題皆有列出后里農場，指本計畫樣本來自二處，但材料與方法中樣	后里農場於 2010 年有進行水黃皮及白千層穿落水收集，但在收集期間水黃皮

<p>木選定只有列出台中區處外埔農場 1 處，請補充說明。</p>	<p>其冠層於秋冬季時，葉片皆已大量掉落，故為了避免冠層葉片量影響數據準確性，於 2011 年將其刪除。白千層經比較後發現與外埔農場結果相似，故於 2011 年收集以外埔農場造林樹種為主。</p>
<p>請說明如何求得離子淨輸入量與葉面積指數之相關性。</p>	<p>此部分以各樹種收集穿落水各離子淨輸入量與其葉面積指數進行相關性比較。</p>
<p>表 7-13 決定係數 <math>R^2</math> 代表之意義為何？請在結論與建議具體說明。</p>	<p>決定係數 (<math>R^2</math>) 是表示所進行複迴歸分析之參數影響數據的程度，即當決定係數愈高，表示所選定可能影響數據之因子，影響幅度愈大。表 7-13 其決定係數皆高，可以確定此地區影響冠層離子淨輸入量之因子主要為我們所選定之參數 (雨量、乾沉降、降雨 <math>H^+</math> 濃度及降雨成分離子濃度)。</p>