

## 關刀溪森林集水區降水及溪水水化學

劉瓊霜<sup>1</sup> 許博行<sup>2</sup>

【摘要】本試驗於關刀溪水源地集水區量水堰上方長約 400 公尺的天然河床設置上、中及下游 3 處取樣點，取樣觀測溪水化學在上、中及下游的空間變異。1995 年 7 月到 1997 年 6 月收集及分析後的資料顯示，溪流水 3 處取樣點的所有可溶性離子濃度與林外雨比較，皆有相當程度的改變，溪水的 pH 和林外雨比較之下，由林外雨的 4.15 提高到上游 6.30、中游 6.40 及下游的 6.47；而溪水的總離子強度約為林外雨的 3.5 倍。離子當量濃度在林外雨以 H 為最高，但在溪流水中，則以 Ca、SO<sub>4</sub> 及 HCO<sub>3</sub> 較高。無機養分離子的輸入-輸出方面，顯示溪流水輸出大量的養分，尤其是 HCO<sub>3</sub>、SO<sub>4</sub>-S、Ca、Na 及 Mg。此森林生態系無機氮(含 NH<sub>4</sub>-N 及 NO<sub>3</sub>-N)年總輸入為 9.47 kg/ha/yr，總輸出為 6.23 kg/ha/yr，此差異顯示此森林生態系中保留了部分的無機氮。

【關鍵詞】降水、溪流水、水化學

### The water chemistry of precipitation and streamwater at Guandaushi forest watershed

Chiung-pin Liu<sup>1</sup> Bor-hung Sheu<sup>2</sup>

【Abstract】The water chemistry of precipitation and streamwater at Guandaushi forest watershed in central Taiwan have been studied. The streamwater samples were collected at 400 m intervals from the stream source to the watershed outlet during July 1995 to June 1997. All ions changed in solute concentrations along the stream. Samples collected in streamwater had a rapid increase in pH comparing to that of precipitation. The ionic strength in streamwater exceeds in precipitation by a factor of 3.5. The ionic composition was dominated by H in precipitation, however, in streamwater was dominated by Ca, SO<sub>4</sub>, and HCO<sub>3</sub>. The watershed budgets showed significant losses of HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>-S, Ca, Mg, and Na. The annual inputs of NH<sub>4</sub>-N and NO<sub>3</sub>-N were 9.47 kg/ha/yr in Guandaushi forest watershed, the annual outputs were 6.23 kg/ha/yr. Hence, nitrogen was conserved in this ecosystem.

【key words】Precipitation, Streamwater, Water chemistry

<sup>1</sup>臺灣省林業試驗所助理  
Assistant, Taiwan Forestry Research Institute.

<sup>2</sup>國立中興大學森林學系教授  
Professor, Dept. of Forestry, NCHU.

註：本篇報告列入「林業試驗所報告登記第 108 號」

## 一、前言

影響森林集水區內的生物地質化學循環 (biogeochemistry cycle) 的因子很多，諸如礦質化作用、土壤和水文特性、植群、氣候、生物過程、自然和人為的干擾等 (Likens and Bormann, 1995; Hornbeck *et al.*, 1997)。這些變動和干擾都會影響到集水區溪流水化學，因此溪流水化學可提供森林經營的指標。

在過去的數十年中，國際間皆相當努力限制硫的釋放以保護陸生和水生的環境 (Holdren *et al.*, 1993)。而我國地處亞洲大陸與太平洋邊緣，屬大陸性物質輸出的下風區，因此亞洲 (尤其是中國) 污染問題惡化，將對臺灣自然資源與森林生態系造成相當的衝擊。依據亞洲酸雨研究群 (RAINS-ASIA) 的估算，公元 2020 年時亞洲  $\text{SO}_2$  排放將為 1990 年的 3 倍，硫酸根沈降亦將為 1990 年的 3 倍。此種硫酸根沈降的迅速增加，將影響森林生態系的性質及流經森林生態系的水質。

在過去 20 年間，科學家們發現森林集水區內因湖泊及溪流有逐漸酸化的趨勢，而造成水生生態系的改變，遂開始重視大氣酸沉降對於森林集水區內溪流水化學的影響。大部分早期的研究是針對酸沉降有高度敏感性的湖泊 (Almer *et al.*, 1974)，至於酸沉降對於森林集水區內溪流的影响，近年來也逐漸受到重視 (Mc Knight and Bencala, 1990; Hornbeck, 1992; Likens and Bormann, 1995; Hornbeck *et al.*, 1997)。關刀溪森林生態系從過去監測的林外雨研究資料發現 (劉和許, 1996; Liu and Sheu, 1997)，此地區的林外雨 pH 介於 3.6 到 5.4 之間，平均為 4.5，可說明此森林生態系已受酸雨威脅。本報告的主要目的，是比較二年來監測所得的林外雨及溪水的水化學資料，以探討此集水區的生物地質化學對水化學之影響，並以此為例，討論此森林生態系對於酸雨的緩衝能力如何？

## 二、試區、取樣及化學分析

### (一) 試區概況

關刀溪水源地集水區位於惠蓀林場第三林班，海拔高 700~1675m，面積約 47 公頃，植群包括天然闊葉林、次生林及杉木造林地。以第三林班氣象觀測站所得資料，本區年均溫  $21.0^\circ\text{C}$ ，年雨量 2685 mm，平均相對溼度 83%。降雨的分佈大量集中在春夏季 4~7 月，枯水期約在冬季 10~12 月；當地氣溫以 11~2 月較低，5~10 月較高 (許, 1996)。據柳 (1968) 對植物群落分類之研究，本區屬暖溫帶雨林群系；主要組成爲樟科與殼斗科 (呂和歐, 1996)。

試驗地地質，屬於第三紀層砂岩、頁岩與板岩交互而成，岩盤多屬粘板岩系所構成，主要岩石爲頁岩與砂岩；土壤構成主要爲砂岩與頁岩發育而成之弱育土，土壤質地以壤土爲主，石礫土次之 (黃, 1997)，土壤化學性質則隨地上部之林分組成不同而有差異，以土層 15-20 公分處爲例，pH 值約由 3.8 至 4.2，陽離子交換能力以地上部爲天然林者爲最高，達 460 meq/kg，次生林及杉木林則分別爲 283 meq/kg 及 278 meq/kg (郭, 1998)，比一般壤土略高 (胡, 1988)。

### (二) 取樣及化學分析

在此水源地集水區量水堰上方長約 400 公尺的天然河床設置上、中、下游 3 取樣點 (圖 1)，上游和中游之溪水分別以黑色 PE 水管引至下游以方便取樣，本試驗於 1995 年 7 月開始觀測及汲取水樣至 1997 年 6 月止，每月二次同時在此 3 處以瓢掬法 (scooping) 取水樣 500 mL，同時在量水堰附近設置高 24 公尺的鐵塔收集林外雨。收集的水樣儘速送到台中中興大學森林系實驗室，經  $0.45 \mu\text{m}$  濾膜過濾後，置於恆溫箱 ( $4^\circ\text{C}$ ) 以備測定。所攔回的水樣，依次進行化學分析，其流程與方法參照金和楊 (1984) 及劉和金 (1996) 之報告，分析項目包括 pH 值、電導度、懸浮質 ( $>0.45 \mu\text{m}$ )、陽離子 (Na、K、Ca、Mg、 $\text{NH}_4$ ) 及陰離子 (F、Cl、 $\text{NO}_3$ 、 $\text{SO}_4$ 、 $\text{HCO}_3$ ) 等。

## 三、結果與討論

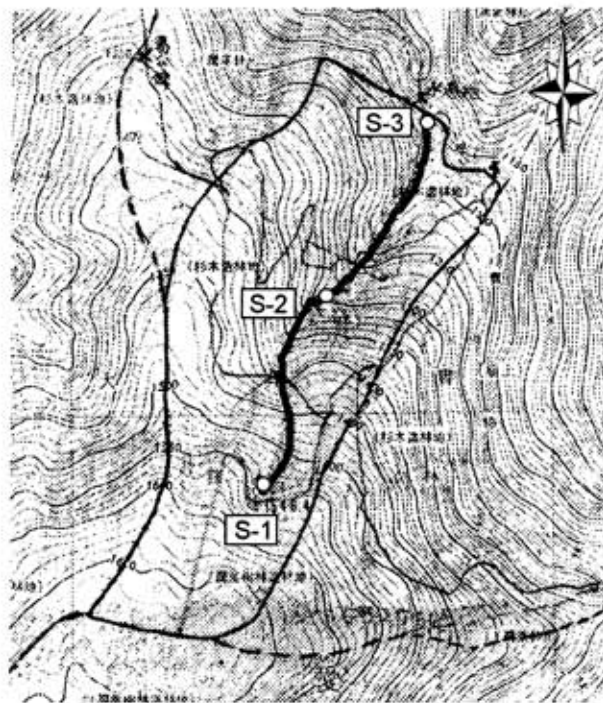


圖 1. 關刀溪試驗林集水區溪流路徑圖  
註: S-1, S-2, S-3 分別為上中下游取樣點

Fig. 1. Sample sites of the streamwater in Guandaoshi forest watershed, S-1, S-2, and S-3 are the sampling sites of upstream, midstream, and downstream, respectively.

表 1 為試驗期間，關刀溪水源地集水區的林外雨及試驗溪流上、中、下游溪流離子組成及 pH 的空間變異。可得知林外雨的鹽基陽離子群中，H 的濃度最高，為  $75.67 \mu\text{eq/L}$ ，其次為 Ca 和  $\text{NH}_4$ ，其中 Ca 之濃度在林外雨水樣離子平衡的貢獻量達  $19.28 \mu\text{eq/L}$ ，與福山試驗林的  $24.20 \mu\text{eq/L}$  相近(王等，1997)，但與美國哈柏試驗林(Hubbard Brook Experimental Forest)10 年的平均濃度  $7.98 \mu\text{eq/L}$  (Likens and Bormann, 1995) 相較之下，高出甚多，因其來源主要為塵埃，根據我國環保署環境白皮書(1997)的空氣污染統計資料顯示，懸浮微粒為主要之空氣污染物，此現象或可說明為何本試驗地與福山試驗區之 Ca 濃度會遠高於哈柏試驗林。 $\text{NH}_4$  的主要來源為人為耕作施肥所產生(Warneck, 1988)，其和陰離子的  $\text{NO}_3$  是大氣輸入森林生態系中無機氮的

主要型態，本試驗所偵測林外雨之  $\text{NH}_4$  濃度為  $12.08 \mu\text{eq/L}$ (表 1)，比福山試驗林的  $19.80 \mu\text{eq/L}$  略低，但相較於美國污染低的華盛頓奧林匹克國家公園的林外雨之  $0.4 \mu\text{eq/L}$  (Edmonds *et al.*, 1996)，則高出甚多，而與污染較高的哈柏試驗林之  $12.02 \mu\text{eq/L}$  則又相近，此不同之差異，主要是因為氮的流動隨地理環境及森林生態系的不同，變動甚大，例如 Mitchell 等(1997)研究日本幾處試驗地之結果，顯示大氣中  $\text{NH}_4$  之年平均濃度由郊區高海拔 Ryuoh 集水區的  $1.9 \mu\text{mol/L}$  至靠近都會區  $24.0 \mu\text{mol/L}$  之差異；且因其含量的多寡，在森林生產力的影響上扮演非常重要的角色，因此氮在臺灣森林集水區的地質化學循環上，實有待收集更多資料以分析之。

陰離子方面，由表 1 可得知，林外雨中的陰離子以  $\text{SO}_4$  濃度最高，為  $30.83 \mu\text{eq/L}$ ，若以輸

表 1. 關刀溪試驗集水區林外雨及溪流水水化學加權平均當量濃度的空間變化  
(1995年7月到1997年6月)。

Tab 1. Weighted mean concentration of major solutes in bulk precipitation and streamwater at Guandaoshi forest watershed from July 1995 through June 1997.

	H	Na	K	Ca	Mg	NH <sub>4</sub>	F	Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	cations	anions	$\mu$ eq/L cations anions
林外雨	75.67	7.58	1.96	19.28	3.43	12.08	7.73	14.28	13.93	30.83	5.08	120.00	71.85	1.67
標準差	(48.87)	(11.06)	(9.83)	(20.81)	(9.54)	(11.75)	(6.30)	(16.45)	(8.88)	(37.77)	(15.38)	(111.86)	(84.77)	
上游	0.75	85.84	4.83	110.00	84.18	1.31	3.09	14.75	26.65	68.68	126.94	286.90	240.11	1.19
標準差	(0.58)	(39.08)	(2.68)	(53.91)	(40.09)	(3.89)	(13.07)	(10.68)	(12.58)	(19.68)	(33.66)	(140.83)	(89.66)	
中游	0.49	77.82	7.51	124.96	84.22	3.73	7.01	18.03	33.34	101.90	147.40	298.73	309.38	0.97
標準差	(0.65)	(22.37)	(19.56)	(38.71)	(23.22)	(11.41)	(7.79)	(13.45)	(15.43)	(36.08)	(33.51)	(115.92)	(106.26)	
下游	0.42	79.00	9.94	141.07	88.51	9.85	2.86	38.63	35.03	111.08	150.07	328.79	335.98	0.98
標準差	(0.22)	(20.71)	(12.02)	(69.06)	(35.94)	(21.03)	(7.94)	(53.46)	(18.08)	(64.25)	(31.87)	(159.00)	(175.60)	

入量計之，則 SO<sub>4</sub>-S 的輸入量可達 13.24 kg/ha/yr(表 2)，與 Likens 及 Bormann(1995)所收集並整理世界溫帶森林生態系的 SO<sub>4</sub>-S 輸入量介於 1.4~15.6 kg/ha/yr 間，相較之下，此試驗地應屬偏高，因 SO<sub>4</sub> 主要來自大氣，因此此種偏高的輸入量應可反映出空氣污染的程度。另一重要人為污染源之 NH<sub>4</sub> (來自過量的施肥) 及 NO<sub>3</sub> (來自交通工具)，總輸入量為 9.47 kg/ha/yr，與上述 Likens 及 Bormann(1995)所收集並整理者(介於 1.1~14.5 kg/ha/yr) 比較，亦屬偏高，因此二種污染物皆呈氣體溶膠(aerosols)的懸浮狀態(Johnson and Lindberg, 1992)，故人類活動所產生的空氣污染，並不限定在靠近污染源的地方，而能長程輸送，雖然此試驗地遠離城市，但仍似乎可反映出人為空氣污染的影響。

相較於林外雨，溪流水的離子總當量濃度(陰陽離子之總和)明顯提高很多，尤其是下游，濃度提高約 3.5 倍(表 1)，其原因除森林中植群水分蒸發所產生的濃縮效應外，更可推測此生態系林分內部代謝過程及土壤中的生物活動及化學風化作用極強，因此經由溪流水中流失大量的養分，

尤其是 Ca、Na 及 Mg 等的年輸出量遠高於輸入量(表 2)。也由於離子的交換作用，將林外雨 pH 由原來的 4.15 提高到近中性的上游 6.30、中游 6.40 及下游的 6.47，此結果是否因酸沉降的輸入此生態系，而加速鹽基陽離子的交換量，使養分加速由此生態系中經溪流水大量流失，而對此森林生態系生產力產生負面的影響？相反地，如長期在酸雨的威脅下，土粒中之鹽基陽離子被酸性沉降之 H 離子大量交換出的結果，導致土壤酸化，降低土壤粒子結合鹽基陽離子的能力，而減少土壤中可交換性之陽離子濃度，使藉由離子交換供給溪流水的離子釋放速率是否會因而降低(Lee *et al.*, 1995)？此種相反的推論，依目前資料尚不足以解釋，仍待往後的長期觀察，以累積更多數據以分析之。

由表 1 又可得知，溪流水中的離子濃度除 NH<sub>4</sub> 較林外雨低外，其餘皆較林外雨高出許多。其中同為單價陽離子之 Na 及 K，在溪流水的濃度即有顯著的差異，Na 明顯高於林外雨，而 K 只有小幅增加，此應證了因 K 對土壤膠體粒子的鍵結能力較強，較不易由土層中析出(Lee *et al.*,

表 2. 關刀溪試驗集水區無機養分在林外雨的平均年輸入及溪流水的平均年輸出  
(1995年7月到1997年6月)。

Tab 2. Average annual precipitation inputs and stream outputs of inorganic nutrients in the period from July 1995 through June 1997 in Guandaushi forest watershed.

	H	Na	K	Ca	Mg	NH <sub>4</sub> -N	Cl	NO <sub>3</sub> -N	SO <sub>4</sub> -S	HCO <sub>3</sub>	inorganic N
Rainfall	1.97	4.54	2.02	10.14	1.08	4.40	13.14	5.06	13.24	8.18	9.47
Stream water	0.00	18.78	4.07	29.43	11.03	1.42	14.10	4.81	18.92	95.87	6.23

1995)。而由表 2 養分的輸出入量可發現，NH<sub>4</sub>-N 在溪流水中較林外雨減少 2.98 kg/ha/yr，此養分的減少大部分是因植物吸收的結果，也有可能被具負電荷之土壤顆粒與腐植質所吸附(Brady and Weil, 1996)。如以總無機氮(NH<sub>4</sub>-N 及 NO<sub>3</sub>-N)的輸出入量視之(表 2)，此森林生態系無機氮的年總輸入為 9.47 kg/ha/yr，總輸出為 6.23 kg/ha/yr，此差異顯示此森林生態系中保留了部分的無機氮，如依歐美學者所提出之報告(Grennfelt and Hultberg, 1986; Wright *et al.*, 1995)認為，當氮由大氣的年輸入大於 10 kg/ha/yr 時，易使生態系處於氮飽和(N saturation)狀態，即大氣中輸入氮超過該生態系的需求量，在此情形下會提高溪流水中 NO<sub>3</sub> 的濃度(van Breemen and Verstraten, 1990; Aber *et al.*, 1991)。本試區氮的輸入量雖已接近此極限值，但此生態系仍保有無機氮，此現象不同於上述歐美學者所提出者，是否因林分組成不同或環境的差異？實有待更長期的觀察；惟此初步結果可顯示歐美學者的推論應用在臺灣的森林生態系尚待商榷。

過去的研究報告(Hornbeck *et al.*, 1997)指出，在大部分溪流水之陰離子群中，SO<sub>4</sub> 是當量濃度最高者，其來源除林外雨的輸入外，另一重要來源可能是含硫化鐵岩石風化作用所產生，或如 Houle 和 Carignan(1995)所提出，SO<sub>4</sub>-S 是來自土壤有機硫貯積(soil organic S reservoirs)的釋出。而 SO<sub>4</sub> 的輸出被認為是伴隨土壤風化作用所產生之 Ca 一同輸出(Hornbeck *et al.*, 1997)，而

使得 Ca 和 SO<sub>4</sub> 在溪流水中當量濃度有明顯正相關。在哈柏試驗林 31 年的長期試驗中發現溪流水中 Ca 和 SO<sub>4</sub> 濃度相關係數高達 0.95。雖然本試驗 Ca 和 SO<sub>4</sub> 濃度在溪流水中有相近的變化趨勢(圖 2)，然二者之相關係數僅為 0.43，此現象與上述哈柏試驗林不同，是因為本試區溪流水中 Mg 的濃度亦甚高，而使得 SO<sub>4</sub> 的輸出不只是和 Ca 結合，也有可能和 Mg 結合輸出(Mg 與 SO<sub>4</sub> 濃度之相關係數為 0.46，圖 2)。另外造成 Ca 與 Mg 的輸出與 SO<sub>4</sub> 的相關係數較低的可能原因是此些陽離子的輸出除和 SO<sub>4</sub> 結合外，因 HCO<sub>3</sub> 及 NO<sub>3</sub> 的濃度在溪水中甚高，故亦可能伴隨 HCO<sub>3</sub> 或 NO<sub>3</sub> 輸出，此現象更可由溪流水中的此些離子濃度愈往下游濃度愈高得到證明(表 1)。故在台灣較為特殊的地理環境及較高歧異度的森林生態系，實有必要建立更多的資料以解釋養分的動態及其循環。

溪水中無機陰離子之濃度及輸出量皆以 HCO<sub>3</sub> 最高，此些現象除反映出本試區土壤微生物活動旺盛，呼吸作用所排放之 CO<sub>2</sub> 影響外，或因此試區的礦物含量豐富，在高溫高溼的亞熱帶氣候(如本試區)，風化作用極強，易因而分解產生 HCO<sub>3</sub>(Baron, 1991)。惟目前尚無此試區的礦物資料提供證明，有待往後的研究以進一步說明。而此試區所收集之上、中及下游水樣之溪流流經的集水區範圍內，土壤的物性和水文各項因子及大氣沉降等環境因子是相似的，且此溪流流域森林冠層的覆蓋良好，因此大氣沉降應對此溪

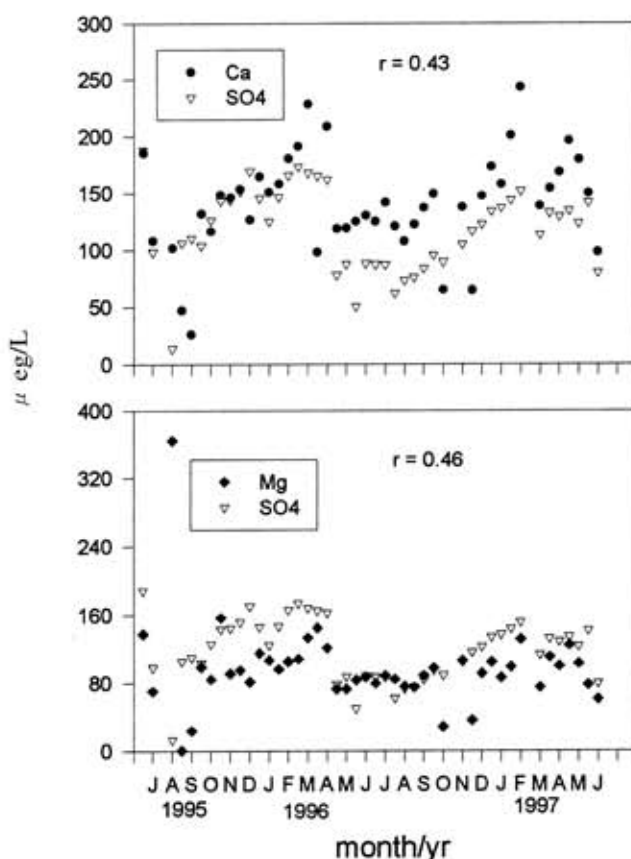


圖 2. 溪水之 Ca, Mg 及 SO4 濃度的變化及其相關性

Fig. 2. Concentration of Ca, Mg, and SO4 in streamwater and their relations.

水水化學的直接影響不大，而造成此溪流上、中、下游溪水濃度差異的原因，可能如Bailey等(1995)所提出，認為溪流中有岩石存在時，當溪水流過此些岩石時，易使其礦化腐蝕，容易溶解而釋出離子，因此愈往下游，經此作用累積的離子濃度則愈高。又如NH<sub>4</sub>的濃度亦隨著溪流的往下流動而增加，此因溪水的流經過程中微生物活動增加，且因溪床邊土壤有機氮的礦質化作用會因好氣性的氧化作用增加而增加，因此會增加氮在溪水的輸入(Lamersdorf and Meyer, 1993; Cirno and McDonnell, 1997)，且因硝化菌的活動，而加速硝化作用，此結果也使得養分中另一型態氮，NO<sub>3</sub>-N，在溪水中的濃度越往下游越高。因此，隨著溪水的流動，溪水濱岸帶的養分不斷輸入，是使溪水所含無機養分隨著流域的

上、中及下游濃度逐漸增高的原因。

【謝誌】本研究承蒙國科會經費補助(NSC 87-2621-B-005-002-A07)，謹致謝意。

#### 四、引用文獻

- 王立志、金恆鑣、夏禹九、Robert B. Harrison、林登秋、黃正良、劉瓊霏(1997) 福山試驗林水文過程中水化學變化之研究。中華林學季刊 30(2): 203~226。
- 金恆鑣、楊炳炎(1984) 畢祿溪試驗集水區的降水及溪水化學。林試所試驗報告第427號。
- 呂金誠、歐辰雄(1996) 關刀溪長期生態研究區森林植群之初期研究。中興大學實驗林研究彙刊 18(1): 77~108。
- 胡弘道(1988) 森林土壤學 p.194。國立編譯館

主編 茂昌公司發行。

- 柳楷、葛錦昭、楊柄炎 (1961) 台灣主要林型生態之調查。台灣省林業試驗所報告第 72 號。
- 郭孟斯 (1998) 關刀溪森林生態系三種林分之土壤理化性質及土壤水化學組成分。國立中興大學森林研究所碩士論文
- 許文泉 (1996) 關刀溪森林集水區逕流特性之研究。國立中興大學水土保持學研究所碩士論文。
- 環保署 (1997) 環境白皮書。行政院環境保護署編印。
- 黃世傑 (1997) 關刀溪森林土壤之硝化作用與生物固氮作用。國立中興大學土壤環境科學系碩士論文。
- 劉瓊霏、金恆鏞 (1996) 離子層析儀應用在水質分析的技術探討。林業試驗所林業叢刊第 68 號。
- 劉瓊霏、許博行 (1996) 三種相鄰不同林分穿落水化學性質的初期研究。國立中興大學實驗林研究彙刊 18(1): 57-64。
- Aber, J.D., Melillo, J.M., Nadelhoffer, K.J., Pastor, J., and Boone, R.D. (1991) Factors controlling nitrogen cycling and nitrogen saturation in northern temperate forest ecosystem. *Ecol. Appl.* 1: 303-315.
- Almer, B., Dickson, W., Ekstrom, C., Hornstrom, E., and Miller, V. (1974) Effects of acidification on Swedish Lakes. *Ambio* 3: 30-36.
- Bailey, S.W., Driscoll, C.T., and Hornbeck, J.W. (1995) Acid-base chemistry and aluminum transport in an acidic watershed and pond in New Hampshire. *Biogeochemistry* 28: 61-91.
- Baron, J. (1991) *Biogeochemistry of a subalpine ecosystem*. Springer-Verlag, 247pp.
- Brady, N.C. and Weil, R.R. (1996) *The Nature and Properties of Soils*. Prentice Hall, 740pp.
- Cirmo, C.P. and McDonnell J.J. (1997) Linking hydrologic and biogeochemical controls of nitrogen transport in near-stream zones of temperate-forested catchments: a review. *J. Hydro.* 199: 88-120.
- Edmonds, R.L., Thomas, T.B., and Blew, R.D. (1996) Biogeochemistry of an old-growth forested watershed, Olympic National Park, Washington. *Water Resources Bull.* 31: 409-419.
- Grennfelt, P. and Hultberg, H. (1986) Effects of nitrogen deposition on the acidification of terrestrial and aquatic ecosystem. *Water Air Soil Pollut.* 30: 945-963.
- Holdren, G.R., Jr., Strickland, T.C., Cosby, B.J., Mamorek, D., Bernard, D., Santore, R., Driscoll, C.T., Pardo, L., Hunsaker, C., Turner, R.S., and Aber, J. (1993) A national critical loads framework for atmospheric deposition effects assessment: IV. Model selection, application, and critical loads mapping. *Environ. Manage.* 17: 355-363.
- Hornbeck, J.W., Bailey, S.W., Buso, D.C., and Shanley, J.B. (1997) Streamwater chemistry and nutrient budgets for forested watershed in New England: variability and management implications. *For. Ecol. Manage.* 93: 73-89.
- Hornbeck, J.W. (1992) Comparative impacts of forest harvest and acid precipitation on soil and streamwater acidity. *Environ. Pollut.* 77: 151-155.
- Houle, D. and Carignan, R. (1995) Role of SO<sub>4</sub> adsorption and desorption in the long-term S budget of a coniferous catchment on the Canadian Shield. *Biogeochemistry* 28: 161-182.
- Johnson, D.W. and Lindberg, S.E. (1992) *Atmosphere Deposition and Forest Nutrient Cycling*.

- 
- Springer-Verlag, New York, 707 pp.
- Lee, Y.H., Hultberg, H., Sverdrup, H., and Borg, G.Ch. (1995) Are ion exchange processes important in controlling the cation chemistry of soil and runoff waters? *Water Air Soil Pollut.* 85: 1819-1824.
- Likens, G.E. and Bormann, F.H. (1995) *Biogeochemistry of a forested Ecosystem*. Springer-Verlag, New York, 159pp.
- Liu, C.P. and Sheu, B. H. (1997) The chemistry of precipitation and throughfall of three forest stands in central Taiwan. *Taiwan J. For. Sci.* 12(4):379-386.
- McKnight, D.M and Bencala, K.E. (1990) The chemistry of iron, aluminum, and dissolved organic material in three acidic, metal-enriched, mountain streams, as controlled by watershed and in-stream processes. *Water Resour. Res.* 26: 3087-3100.
- Mitchell, M.J., Iwatsubo, G. Ohri, K. and Nakagawa, Y. (1997) Nitrogen saturation in Japanese forests: an evaluation. *For. Ecol. Manage.* 97: 39-51.
- van Breemen, N. and Verstraten, J.M. (1990) Soil acidification and nitrogen cycling: summary of research in Dutch priority programme on acidification. Report No. 200-07, National Institute of Public Health and Environmental Protection, Bilthoven.
- Warneck, P. (1988) *Chemistry of the Natural Atmosphere*. Academic Press, New York.
- Wright, R.F., Roelofs, J.G.M., Bredemeier, M., Blanck, K., Boxman, A.W., Emmett, B.A., Gundersen, P., Hultberg, H., Kjonass, O.J., Moldan, F., Tietema, A., van Breemen, N., and van Dijk, H.F.G. (1995) NITREX: responses of coniferous forest ecosystems to experimentally changed deposition of nitrogen. *For. Ecol. Manage.* 71: 163-169.