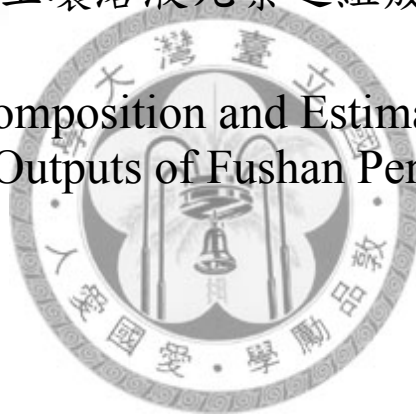


國立臺灣大學生物資源暨農學院農業化學系
碩士論文

Department of Agricultural Chemistry
College of Bioresources and Agriculture
National Taiwan University
Master Thesis

福山永久樣區土壤溶液元素之組成與收支量估算

Soil Solution Composition and Estimation of Element
Inputs and Outputs of Fushan Permanent Site



陳品潔
Pin-Chieh Chen

指導教授：陳尊賢 博士
Advisor: Dr. Zueng-Sang Chen

中華民國 98 年 6 月
June, 2009

誌謝

兩年的研究所時光在實驗室大大小小的採樣中飛也似的度過了。我首要感謝恩師 陳尊賢教授，不僅在授業解惑，最讓學生敬佩的是您給予實驗室學生們的身教，數年如一日投注於研究的熱情、嚴謹的態度，以及對待學生的親切與大方。老師努力營造出了一個獨特的環境，也訓練出一位位經驗豐富且不吝於分享的學長姊們。在實驗室中，學生們能夠運用很多的資源並在研究上非常自由不受限制的去嘗試與犯錯。在生活上，老師也不吝於分享生活經驗與處事態度，尤其在我們面臨困難時，老師總是默默的提供協助，保護著實驗室的每位成員。能夠在土調實驗室中學習並完成碩士論文，是我非常大的福氣。

在論文完成之後，承蒙朝陽科技大學環境工程與管理系 王敏昭教授、中興大學森林學系 劉瓊霏副教授與宜蘭大學森林暨自然資源學系 蔡呈奇副教授對本論文的細心審閱與斧正，並提供寶貴的意見，讓我能夠學習到更多書本上沒有提到的知識，謹此至上最深的謝意，也特別要謝謝呈奇學長在樣品分析上的協助。

還記得我的土調生活是從小燕學姊的採樣所開啟的，藉著難得的機會，讓我能跟著大夥兒南征北討的挖剖面，用最貼近它的方式來欣賞土壤。在充滿陽光、汗水與大家的笑聲的採樣過程中，也不知不覺拉近了彼此的距離。細心、有耐心再加上有著一口漂亮發音的阿至學姊，我由衷的感謝您對我的關心與指導，從最基礎的專討大綱格式、使用 word 與 excel 的小技巧、seminar 預講完後那滿滿兩張紙的建議與即便忙碌，也依然帶著學弟妹們走進山林、攀上陡坡的採樣，在這裡謝謝您，我也要祝寶寶健康平安。博士班的家興、正介與紹偉學長，帶著我挖過無數個剖面，學長們說不盡的笑話和變不完的魔術使採樣的辛勞轉換成為有趣的過程。博班學長姊們總是充滿熱情、和顏悅色、不厭其煩為我解答試驗上遇到的各種疑難雜症，並提點需我要注意的地方，我期許自己不只要在知識與思維上努力充實，更重要的是要不斷的幫助他人。實驗室中愛笑的小燕、家綺、現代俠女佳佳、率直的怡君和永遠會離題的顯嚴，填滿我研究所時光的健利、甄蓮、育君、興光幫的夥伴們，還有所有一起分享羽球快樂的農化系熱血老師和同學，謝謝兩年當中有大家陪伴我一起度過所有平凡而重要的時刻。特別要感謝的是摯友致甫、阿砍、B 夢、百蛋、沈母親、小佩、小滑和文菁，不論好與不好，都對我一樣的包容，為我加油不曾離開，有你們真好。至懿與至懿的家人、師父們，在我靜不下心與不開心的時候無私的支持、教導著我，我對如此親密和睦的家庭覺得非常感動和嚮往，謝謝大家對我的好。

親愛的奶奶、老爸、老媽、姊姊怡蓁和俐璇，在我走過的 24 年歲月中，能和你們做為家人，我覺得很幸福，已經滿足了，我愛你們。

感謝這兩年來所有的喜怒哀樂，與我生活中的每一個人事物。

謝謝每位在學術及教學上一絲不苟、默默奉獻的農化系老師及職員們。

感謝臺大農化系。

福山永久樣區土壤溶液元素之組成與收支量估算

陳品潔

摘要

水是森林生態系中的重要溶劑，為元素提供了移動的途徑。對複雜的森林生態系統而言，土壤溶液的化學組成提供了植物有效養分隨時間與空間分佈的資訊，故前人藉此描述森林土壤的養分狀態，以增進對研究地區基礎生態特性的了解。工業革命後，土壤溶液的研究更被應用於評估森林土壤面對人為酸沉降逆境的反應。本研究目的為建立福山永久樣區穿落水、地表逕流與土壤溶液之化學組成資料庫，並推估土壤養分元素的輸入與輸出量。本研究始於 2007 年 12 月選定永久樣區弱育土與極育土分佈之兩研究區，各設置三重覆樣區。於現地土壤剖面中 A 層底部與 B 化育層底部埋設滲漏水收集裝置以收取土壤溶液，並在剖面旁同時進行穿落水與地表逕流水的收集。研究期間每月收取水樣一次，攜回實驗室後分析其溶液組成。化學分析的項目包含溶液 pH、電導度、可溶性有機碳、土壤溶液中鉀、鈉、鈣、鎂、鐵、鋁、錳、矽、氯、硫酸鹽、硝酸鹽及磷酸鹽的濃度。研究結果顯示，福山永久樣區降下之穿落水 pH 值平均為 4.7，此溶液 pH 值已屬於酸雨的範圍。穿落水入滲進入土壤中後，土壤溶液的 pH 值平均為 6.4，顯示福山天然闊葉林土壤具有緩衝酸雨的能力。溶液化學組成的監測結果顯示，鈣離子是土壤溶液中主要的鹽基陽離子，其年平均濃度達 341 $\mu\text{eq/L}$ ，大幅高於穿落水的 20.9 $\mu\text{eq/L}$ 及地表逕流水的 42.4 $\mu\text{eq/L}$ ，鈣離子濃度在土壤溶液中大幅高於穿落水與地表逕流，可能是研究區土壤緩衝外來酸性物質沉降的機制。在森林生態系統中土壤元素收支量的估計結果顯示，矽酸、鈣、鐵與硝酸根離子，呈現淨釋放狀態；鋁與錳的輸入與輸出量接近平衡；鉀、鈉、鎂、氯與硫酸根離子可能多經吸持或吸收作用，留存於此土壤生態系統中。本研究將 B 化育層底端所收集之土壤溶液視為自土壤流失的養分，有可能造成元素輸出量的高估。

關鍵詞：福山永久樣區、大氣沈降、土壤溶液化學、氮、硫



Soil Solution Composition and Estimation of Element Inputs and Outputs of Fushan Permanent Site

Pin-Chieh Chen

Abstract

Water is a crucial solvent for forest ecosystem, which serves as a carrier of element input and output fluxes. Soil solution chemistry provides insight of available nutrients for plant production with various temporal and spatial distributions of complex ecosystems. Studies of soil solution composition have been used as instrumental means of improving knowledge of basic ecological characteristics of a study area. Chemical analysis of soil solution is, moreover, used to assess the reaction of forest soil in the face of anthropogenic acid deposition after industrial revolution. The objective of this study is to found water chemistry database of throughfall, surface runoff, and soil solution of Fushan forest ecosystem permanent site and also to estimate the elemental inputs and outputs of Fushan site. Throughfall, surface runoff, and soil solution were collected monthly both in Inceptisols and Ultisols area. Each research area was divided into 3 replication study plots and collected soil solution from December, 2007. Percolation solution collectors were installed in the bottom of A and B diagnostic horizon at the 3 different study plots. Throughfall and soil surface runoff collectors were set up just nearby soil profiles. The items of soil solution analysis include pH, electric conductivity, dissolved organic carbon, major cations (K, Na, Ca, and Mg), minor cations (Fe, Al, Mn, and Si), and major anions (Cl, NO₃, PO₄, and SO₄). The mean pH of throughfall is 4.7, and is changed to 6.4 after it infiltrated into the soil pedon. The raise of soil solution pH value suggested that the Fushan forest soil can neutralize the added acids from the atmosphere by its buffering capacity. The mean Ca concentration is the dominant cation collected from the soil solution is 341 µeq/L, which was higher than 20.9 µeq/L of throughfall and 42.4 µeq/L of surface runoff. The increased Ca concentration in the soil solution could be one of the mechanisms that Fushan soil buffered against the proton input. Despite of the uncertainties in the estimation of nutrient budget, the results indicate that Si, Ca, Fe, and NO₃ ions has larger output values than those of input values, the loss of Al and Mn of Fushan site is limited, and K, Na, Mg, Cl, and SO₄ ions are

retained in this forest soils. Element output values can be overestimated based on the soil solution collected from the lower boundary of B horizon which was defined as output water in this study.

Key words: Fushan forest ecosystem permanent site, atmospheric deposition, soil solution chemistry, nitrogen, sulfur



目錄

	頁次
中文摘要.....	I
英文摘要.....	III
目錄.....	V
表目錄.....	VII
圖目錄.....	VIII

第一章 前言.....	1
-------------	---

第二章 前人研究

2.1 土壤溶液化學組成所提供的資訊.....	3
2.2 土壤溶液的採集.....	5
2.3 元素收支的模式.....	6
2.4 福山永久樣區之相關研究.....	7

第三章 材料與方法

3.1 研究地區環境概述.....	9
3.1.1 地理位置.....	9
3.1.2 氣候.....	13
3.1.3 樣區植物組成.....	13
3.1.4 不同地形之土壤剖面特性及土壤基本性質.....	16
3.2 穿落水、逕流水與土壤溶液之化學組成試驗.....	19
3.2.1 樣區設置.....	19
3.2.2 穿落水、地表逕流水與土壤溶液之採樣方法.....	19
3.2.3 溶液化學組成分析之前處理.....	28
3.2.4 測定溶液化學組成.....	28
3.2.5 元素收支模式.....	29
3.2.6 溶液化學組成之元素量的計算.....	31

第四章 結果與討論

4.1 溶液化學組成.....	35
4.1.1. 穿落水 (throughfall)	35
4.1.2. 地表逕流水 (surface runoff)	42
4.1.3. 土壤溶液 (soil solution)	51
4.2 溶液之陰陽離子平衡.....	70
4.3 元素輸入與輸出量的估計.....	72
4.3.1. 元素輸入 (element input)	73
4.3.2 元素之輸出 (element output)	76
4.3.3 估算元素收支之誤差與不確定因素.....	79

第五章 結論.....	80
-------------	----

參考文獻.....	82
-----------	----

附錄.....	87
---------	----



表目錄

	頁次
表 1、調查樣區的優勢種.....	15
表 2、福山 25 公頃永久樣區之表土土壤基本性質.....	18
表 3、研究期間弱育土與極育土樣區溶液量紀錄.....	22
表 4、試驗期間弱育土與極育土樣區之元素輸入量與輸出量估計值.....	74
表 5、福山與其它森林元素輸入量的比較.....	75
表 6、試驗期間弱育土與極育土樣區之元素收支估計值.....	77
表 7、福山與其它森林元素輸出量的比較.....	78



圖目錄

	頁次
圖 1、福山永久樣區地理位置.....	10
圖 2、福山 25 公頃樣區等高線地形圖.....	11
圖 3、福山 25 公頃樣區網格地形圖.....	12
圖 4、福山 1993-2004 年之生態氣候圖.....	14
圖 5、福山永久樣區土壤剖面採樣位置圖.....	17
圖 6、福山樣區設置圖.....	20
圖 7、福山 2008 年及 2004-2008 年之平均 (a) 氣溫 與 (b) 雨量.....	21
圖 8、穿落水收集裝置.....	24
圖 9、地表逕流水收集裝置.....	25
圖 10、土壤滲漏溶液收取裝置.....	26
圖 11、用於土壤溶液收集之土壤滲漏溶液收集器.....	27
圖 12、試驗中所採集的水樣.....	30
圖 13、兩研究區穿落水之 (a) pH 與 (b) 電導度.....	36
圖 14、兩研究區穿落水陽離子組成 (a) 鉀、(b) 鈉、(c) 鈣、(d) 鎂、(e) 鐵、 (f) 鋁、(g) 錳與 (h) 矽濃度隨時間的變化.....	38
圖 14、(續).....	39
圖 14、(續).....	40
圖 14、(續).....	41
圖 15、兩研究區穿落水 (a) 氯、(b) 硝酸根、(c) 硫酸根與 (d) DOC 濃度隨時間 的變化.....	43
圖 15、(續).....	44
圖 16、兩研究區地表逕流水之 (a) pH 與 (b) 電導度.....	45
圖 17、兩研究區地表逕流水陽離子組成 (a) 鉀、(b) 鈉、(c) 鈣、(d) 鎂、(e) 鐵、 (f) 鋁、(g) 錳與 (h) 矽濃度隨時間的變化.....	47
圖 17、(續).....	48
圖 17、(續).....	49
圖 17、(續).....	50
圖 18、兩研究區地表逕流水 (a) 氯、(b) 硝酸根、(c) 硫酸根與 (d) DOC 濃度 隨時間的變化.....	52
圖 18、(續).....	53
圖 19、兩研究區 A 層土壤溶液之 (a) pH 與 (b) 電導度.....	54
圖 20、兩研究區 B 層底端土壤溶液之 (a) pH 與 (b) 電導度.....	55
圖 21、兩研究區 A 層土壤溶液陽離子組成 (a) 鉀、(b) 鈉、(c) 鈣、(d) 鎂、 (e) 鐵、(f) 鋁、(g) 錳與 (h) 矽濃度隨時間的變化.....	57

圖 21、(續)	58
圖 21、(續)	59
圖 21、(續)	60
圖 22、兩研究區 B 層底端土壤溶液陽離子組成 (a) 鉀、(b) 鈉、(c) 鈣、(d) 鎂、 (e) 鐵、(f) 鋁、(g) 錳與 (h) 矽濃度隨時間的變化.....	61
圖 22、(續)	62
圖 22、(續)	63
圖 22、(續)	64
圖 23、兩研究區 A 層土壤溶液 (a) 氯、(b) 硝酸根、(c) 硫酸根與 (d) DOC 濃度 隨時間的變化.....	66
圖 23、(續)	67
圖 24、兩研究區 B 層底端土壤溶液 (a) 氯、(b) 硝酸根、(c) 硫酸根與 (d) DOC 濃度隨時間的變化.....	68
圖 24、(續)	69
圖 25、(a) 弱育土與 (b) 極育土樣區中穿落水、地表逕流與 A、B 層土壤溶液 陰陽離子的體積加權當量濃度.....	71



第一章 前言

森林土壤的生態是一個複雜的系統。在此系統中，養分動態與植物營養受到生物、大氣、水與土壤等四相交互作用的影響。以植物對養分需求的角度而言，土壤溶液 (soil solution) 具有下述兩項特性：(1) 土壤中的營養元素須溶於水，才能以離子型態為植物所吸收利用，與 (2) 水分可提高土壤中元素的移動性，增加植物根吸收養分的機會，因此水分是影響生態系養分流動的關鍵因子。

土壤溶液的化學組成提供了植物有效養分隨著時間與空間分佈的資訊，在前人研究中常以其組成為量度，用來描述研究地區的養分狀態，藉此增加對研究背景生態特性的了解。如以生產木材為經濟目標的森林而言，土壤溶液的相關知識即有助於林地做適當的養分管理，避免過量施肥造成鄰近表面水體（溪流、湖泊等）的污染 (Huber et al., 2006a & b; Weis et al., 2006)。

在工業革命之後，土壤溶液的研究也逐漸隨著環境的轉變而被賦予了新的功能：用來評估酸沉降對森林生態造成的影響。近三十年來，跨國境的空氣污染對環境造成危害的現象屢見不鮮。土壤酸化及湖泊優養化的情形不僅只在污染源附近出現，污染物在大氣中的長距離傳送更使污染源以外的地區同樣遭受威脅。尤其是 1970 至 1980 年代的北美與歐洲等工業化國家，空氣中硫及氮氧化物的排放量達到歷來的高峰 (Boxman et al., 2008)。酸性物質伴隨雨水沉降的結果，使上述地區的森林出現了樹冠劣化的情形，學者普遍認為這個現象是空氣污染形成酸沉降對森林的傷害。儘管酸沉降的危害雖然是個緩慢的過程，但其不管是對個人健康、雕像、建築物的侵蝕、甚至對整個農業生產環境及森林生態都具有潛在的危害，影響層面極大，在經濟上造成的損失難以估計，引起了相關學者的注意。前人研究中藉由觀察特定元素在森林土壤中的收支情形，以了解酸沉降量的多寡，並試圖進一步為森林土壤緩衝外來酸性物質的機制及森林土壤有效養分的改變提供解答 (Vandijk et al., 1992; Boxman et al., 1994; Bini and Bresolin, 1998)。

以土壤水分滲漏計收取土壤溶液，監測其組成並計算元素收支的方法在北歐及美國已行之有年。更有學者將歐洲各國的研究數據整合，提出歐洲整體酸沉降的評估模式 (de Vries et al., 2007)。但綜觀上述研究，其目標多為溫帶地區的森林 (de Vries et al., 2003; Laclau et al., 2003a & b; Hafner et al., 2005; Dezzio and Chacon, 2006; Meiresonne et al., 2007)，以亞熱帶森林為研究背景的溶液組成文獻較為難得 (陳尊賢，2004; Chang et al., 2007; Liu et al., 2008)。再者，即便前人針對溫帶地區森林土壤溶液化學組成的監測已建立有為數龐大的資料庫，仍難以用來預估個別森林生態系面對人為酸沉降環境所可能導致的未知結果。在生物、植被與地形的交互作用下，使土壤養分的動態具有地域的獨特性及不斷變動的可能。

臺灣位於熱帶與亞熱帶交界，其林地面積占全島總面積之 58.53%。海拔高度差異產生不同的氣候帶，因而孕育了相當豐富的森林樹種，也使臺灣擁有獨特的研究資源。前人於國內森林進行研究所產出的珍貴文獻為後續研究者立下良好的基礎，然而，目前亞熱帶森林的土壤養分動態資料庫仍亟待充實並不斷更新。本研究期望能適時填補此空缺，故以亞熱帶首座大型天然森林動態學 25 公頃永久樣區，即位於臺灣東北部的福山闊葉林為試驗地點，目的為：(1) 建立福山研究區穿落水、地表逕流與土壤溶液之化學組成資料庫，與 (2) 推估土壤養分元素的輸入與輸出量，作為森林生態體系經營管理的主要依據。

第二章 前人研究

2.1 土壤溶液化學組成所提供的資訊

森林生態系的各項組成、結構與功能是過去學者在生態學研究所著重的知識 (Bormann and Likens, 1979; Newell et al., 1981; Lubchenco et al., 1991)。土壤對森林生態系而言，所扮演的不僅是森林養分的供應者與生長介質，還具有緩衝環境變動的能力，達到支持植物、土壤微生物的生長及提供土壤動物做為住所的功用。簡言之，是個複雜、精巧而具有生命力的系統。在森林生態系當中，由於水分的參與，許多物理、化學及生物性的交互作用才得以進行，生態系中養分的循環轉換與平衡也才能夠維繫不間斷。因此，學者藉由土壤水分的組成來一窺森林土壤養分的動態情形、養分的生物有效性及元素在土壤中的轉變。它可做為一項描述森林生態系養分特性的基礎知識，使研究者有機會更進一步了解森林生態系的兩大作用 (1) 能量流轉與 (2) 養分循環 (洪富文，1996)。

森林生態系常受到自然與人為作用的擾動，包含颱風、伐木、機械活動等，對土壤的衝擊尤其劇烈，有些改變甚至會造成無法復原的傷害 (Ranger et al., 2007)。在人為汙染日益嚴重的現代社會，對自然生態的維護越來越受到關注。Chang et al. (2007) 在鴛鴦湖自然保留區監測樣區土壤溶液之養分狀態，觀察扁柏林 (*Chamaecyparis obtusa* var. *formosana*) 若受颱風干擾，大量鮮葉驟落對石質薄層土 (Lithic Leptosol) 中礦質元素、溶解性有機碳 (DOC) 與溶解性有機氮 (DON) 濃度的影響。研究結果顯示，若颱風的侵襲帶來大量扁柏綠葉，在當地溫暖多雨且土壤中交換性鉀含量低的環境下，落葉中鉀離子的快速分解釋出容易因淋洗作用在土壤中滲漏流失，長期下來可能會使林木的營養狀態受到影響。

現今人為活動使環境轉變的速度激增。以酸性物質沉降而言，對生態系所形

成的的逆境顯而易見的有森林林冠的劣化；而在土壤方面，其緩衝能力可能面臨 pH 值改變，影響養分的有效性、鋁離子的釋出對植物根及生物造成的毒害等，因此扮演著維持生態系運作的關鍵角色。此時，土壤溶液的組成資訊對於評估土壤及森林承受逆境的程度即具有重要的研究參考價值。舉例而言，元素收支的研究常被用來評估大氣沉降物質對森林生態所造成的危害。de Vries et al. (2007) 藉由比較大氣沉降及植物根圈底部土壤溶液之元素組成，以了解硫、氮、鋁及鹽基陽離子在土壤中的宿命（累積或釋出）。文獻整合了歐洲各國共 121 個監測點所提供的大氣沉降、氣象及土壤溶液化學等資料，來評估整個歐洲森林土壤在面臨酸性物質沉降逆境下的元素收支狀態。研究中將穿落水 (throughfall) 與幹流水 (stemflow) 的化學組成設定為輸入 (input) 森林土壤的元素；由植物根圈底部收集到的土壤溶液，其組成則定義為自土壤輸出 (output) 的部分。硫酸根、硝酸根及銨離子之收支狀態被作者用來解釋空氣污染對土壤酸化的影響。另外，鋁及鹽基陽離子的收支情形則反映了土壤對酸沉降的緩衝機制。研究結果指出，儘管自然環境因子對元素收支量多寡的影響尚未完全確定，由於土壤中硫酸鹽的淋洗量高於硝酸鹽，作者認為土壤中高量的硫酸鹽是引起歐洲地區土壤酸化的主要酸性物質。

長期持續對土壤溶液組成做監測的資料不僅能增加對森林生態健康狀態的了解，也對預估土壤在逆境下的反應有所助益。Boxman et al. (2008) 在荷蘭所進行的研究同樣藉由土壤溶液的收取來觀察酸沉降對其境內 De Rouwkuilen 自然保留區的林地元素收支的影響。長達二十年的溶液組成監測結果顯示，該國採取立法措施對畜牧產業及厩肥施用的管理具有減緩空氣污染物質沉降的成效。研究過程中，穿落水中的年總無機態氮沉降量由監測初期的 $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 持續下降到 2006 年的 $40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，降幅達 35%，大氣中硫的沉降量較初期少了 65%，是隨著歐洲整體的趨勢而降低。氮與硫化物自大氣中沉降量的減少，也反映在研究中的土壤溶液組成上，作者預期此現象對植物的生長具有正面的影響。

2.2 土壤溶液的採集

土壤溶液可定義為含有溶質與溶解性氣體之土壤孔隙水分 (陳慧美, 2004)。
為了滿足研究人員不同的目的與需要, 目前採集土壤溶液的方法主要有下列幾種:
(1) 以零壓力式水分滲漏計 (zero-tension lysimeter) (Shilova, 1955) 收取土壤溶液,
(2) 使用壓力式水分滲漏計 (tension lysimeter) (Beier and Gundersen, 1989), (3) 土壤離心法 (centrifugation of soil samples / centrifuge drainage), (4) 多孔素磁杯水分滲漏計 (porous ceramic cups) (Barbee and Brown, 1986; Hendershot and Courchesne, 1991), 及 (5) 飽和抽取法 (saturation extraction) (Derome, 1991)。

土壤溶液的採集裝置可分為破壞性 (destructive) 與非破壞性 (non-destructive) 二種方法。破壞性法指於樣區現地挖取土樣後攜回實驗室進行土壤溶液的萃取, 非破壞性法則是於樣區埋設土壤水分取樣裝置現地進行土壤溶液的採集。研究指出, 每一種採樣方法都具有其優點與局限, 不同的採樣方式所得到的土壤溶液組成也會因而不同。因此, 如何選擇採集土壤溶液的方式進行後續的組成分析, 須視其研究目的審慎評估, 再選取適當的裝置。

在上述五種土壤水分採樣裝置中, 零壓力式水分滲漏計法所收取的溶液是五法中較能被清楚定義的部分。由該裝置所得之土壤溶液為受到重力作用, 通過土壤孔隙沿土壤體向下移動的自由流動水分 (free-flowing water)。回顧前人的文獻中, 以零壓力式水分滲漏計收集土壤溶液是被建議採用的方法, 適合應用在計算元素組成之通量, 評估生態系的養分輸入與輸出的收支研究 (Raulund-Rasmussen, 1989; Zabowski and Ugolini, 1990; de Vries et al., 1995; Giesler et al., 1996a & b; Hostin and Titus, 1996; Lawrence and David, 1996; Ludwig et al., 1999; Nissinen et al., 1999), 本研究以自製的土壤滲漏水裝置收集土壤溶液。

2.3 元素收支的模式

元素的輸入量與輸出量收支平衡可作為農地及森林土壤永續性的指標 (Dechert et al., 2005)。而模式的界定則因所探討生態系的種類與目的而異，雖然元素的輸入與輸出皆以土壤為主體來考量輸入 (input) 與輸出 (output)，然而，在不同目的的及生態系的前提下，對所考量生態系統之邊界 (boundaries) 及輸入與輸出來源 (input and output sources) 的定義將會不同。以 Dechert et al. (2005) 的研究為例，研究的目的是比較農地生態系與森林生態系土壤的元素收支狀態。對森林生態系而言，元素的輸入源為穿落水 (通過森林樹冠層，自葉面滴落地表的雨水)，地表逕流與土壤溶液在深層土壤的滲漏則定義為元素的輸出部分。在農地生態系方面，雨水為輸入農田土壤的水分，而元素於該農地生態系的輸出則包含有作物植體的採收 (export of harvest from the site) 及土壤溶液的滲漏流失兩個部分。農地多位於平坦地，故土壤沖蝕 (erosion) 與地表逕流 (surface runoff) 並未包含在元素輸出的定義中。在森林生態系裡，提供森林生長的養分約有 70% 至 90% 是來自有機殘體分解回歸至土壤的養分，其中包含了凋落物 (litterfall) 及動物的殘骸等 (Vogt et al., 1986)，是森林生態系的重要養分來源。雖然有機殘體的分解及穿落水皆為輸入森林土壤的養分，但以區域生態系的角度來看，由有機殘體所分解釋出的養分會再度為植物吸收循環利用，可視為生態系內部的養分循環 (De Schrijver et al., 2004)。De Schrijver et al. (2004) 於研究中指出，雨水 (precipitation) 與穿落水 (throughfall) 的化學組成因下列原因而有所差異：(1) 穿落水通過森林樹冠層時將葉面的大氣乾沉降 (dry deposition) 物質溶於其中，(2) 葉面的淋洗使植物組織釋出養分離子，與 (3) 林冠交換作用 (canopy uptake / leaching) (Parker, 1983)。

本研究中的收支模式僅考慮進入 (enter) 與離開 (leave) 研究區土壤的元素，其它元素轉換與傳輸的途徑並未在本研究的計算之內。但由於土壤生態系中的各項物理、化學、與生物作用如風化 (weathering)、礦化 (mineralization)、植物吸收

(plant uptake) 及微生物活動 (如生物固氮、硝化與脫氮作用等) 十分旺盛而複雜，在解釋土壤中元素收支的淨釋放 (net release) 與吸持 (sorption) 結果時須格外謹慎，並非全然為土壤粒子與元素間交互作用的結果。

2.4 福山永久樣區之相關研究

廖偉志 (2006) 於福山的研究目的是進行土壤基本性質資料庫的建立。其研究結果指出，福山永久樣區土壤中的有效氮、磷、鉀養分與交換性鹽基 (鈣、鎂、鉀、鈉) 明顯聚積於表土 5 公分的土壤中，且這些性質在不同深度的分布情形與土壤有機質含量在土壤剖面中的分布趨勢是一致的。樣區之土壤 pH 值、可交換性鹽基、有效性養分等性質皆與永久樣區之地形因子有顯著相關 ($p < 0.05$)。坡面的形狀會影響物質的累積，造成坡面形狀呈凸面時，土壤 pH 值有較低的現象。在低窪的河流及山谷區域，土壤的 pH 值與交換性鈣、鎂、鉀、鈉顯著高於其它地形區 ($p < 0.05$)。

張至懿 (2008) 以凋落物分解袋法之試驗，探討福山樣區山頂及全區主要優勢樹種分布區之凋落葉分解速率、有效養分釋出元素的速率及土壤氮礦化的速率與季節性變動。其研究結果顯示山頂和全區優勢樹種初始凋落物養分濃度僅鉀、鈣、鎂、錳有顯著差異 ($p < 0.05$)，碳、氮、磷、鈉、鐵、銅、鋅則無顯著差異。全區凋落物分解速率高於山頂優勢樹種凋落物分解速率。另外，土壤的氮礦化的速率會受季節性的變動而有所影響。土壤溫度越高，對微生物進行氮礦化作用越有利，其礦化速率越快。林國銓 (1997) 探討枯落葉及枝葉層的養分動態變化。在所有枯落物當中，落葉的比例最高達 78.7%，枯落物量之多寡受颱風的影響最為劇烈。在枯落物的養分含量方面，氮為最高，而磷為最低。

Lin et al. (1996) 於 1994 至 1996 年期間在福山試驗林收集雨水與穿落水並分析其溶液化學組成。研究報告指出，酸沉降的重要成分硝酸鹽及硫酸鹽，以穿落

水的型態輸入研究區之年通量高達 28 及 83 mmol/m²，該值與溫帶污染最嚴重地區之森林相近 (Lovett and Kinsman, 1990)。金恆鑣等人 (2003) 也針對福山天然闊葉林，分析樣區內雨水、穿落水、幹流水、土壤水及溪水的化學性質。監測結果表示福山地區之濕沉降 pH 中值為 4.6，已屬酸雨的範圍。酸性的沉降溶液流經樹冠層，入滲進入土壤，最後匯流於溪水中時，pH 值平均提升至約為 7.5，表示森林具有中和酸沉降的能力。其五年之監測成果對福山養分流動情形的描述如下：鈣、鎂、鈉、氯與硫酸根離子在土壤中呈現大量流失的狀態；鉀與銨離子少量的保留於土壤生態系中，而硝酸根離子的輸入與輸出量則接近平衡。Liu et al. (2008) 在 2001 至 2004 年間於福山樣區內不同地形位置之高、中、低三個坡面中監測土壤溶液的組成。該研究指出，試驗期間由三個坡面所測得之土壤溶液 pH 有隨時間逐漸變酸的趨勢。鋁與錳離子在土壤溶液中的濃度有顯著的增加情形，可能是森林土壤緩衝外來酸性物質沉降的機制。硝酸根離子的濃度在三個坡面的不同深度剖面中皆呈現降低的趨勢。



第三章 材料與方法

3.1 研究地區環境概述

3.1.1 地理位置

福山永久樣區位於臺北縣烏來鄉與宜蘭縣員山鄉交界處 (北緯 $24^{\circ}34'$ ，東經 $121^{\circ}34'$)，西北方距離臺北市約 30 公里，東側鄰宜蘭市約 16 公里，為一低海拔之天然闊葉林樣區。該永久樣區為行政院農委會林業試驗所所屬之試驗森林集水區，亦是目前臺灣長期生態研究網 (Taiwan Long Term Ecological Research, LTER) 的研究據點之一。樣區全區為雪山山脈北段主支稜，海拔範圍由 400 公尺至 1400 公尺；北起阿玉山 (1419 公尺)，南至紅柴山 (1138 公尺)，西臨志良久山 (755 公尺)，面積約 1098 公頃 (黃仁欽，1997；何學哲，1998) (圖 1)。

設置於志良久山北側上位河階地的福山永久樣區，劃定面積是 25 公頃。樣區長與寬各為 500 公尺，呈正方形，並於測量後進一步細分出 625 個 $20 \times 20 \text{ m}^2$ 的小樣方 (Su et al., 2006)。樣區的劃定首先以經緯儀劃定一條長 500 公尺、南北向之基準線。於此基準線上，每 20 公尺作為一個基點，插上長 100 公分、內徑 1.5 公分的細鋁桿作標記，相同規格的鋁桿也用於基點與基點中間之 10 公尺樣點。接著，由各個基點向東或西標定，每隔 10 與 20 公尺，皆以鋁桿為記。如此即可將 25 公頃之樣區 (plot) 切分為 625 個 $20 \times 20 \text{ m}^2$ 之樣方，並以平面座標系統給予每個基點編號，以利採樣人員定位。標定過程中同時記錄了相鄰基點與 10 公尺樣點間之傾斜角度及相對高差，以求得樣區內每一基點相對高度的資訊，這項資料被用來繪製等高線地形圖 (圖 2、圖 3)。

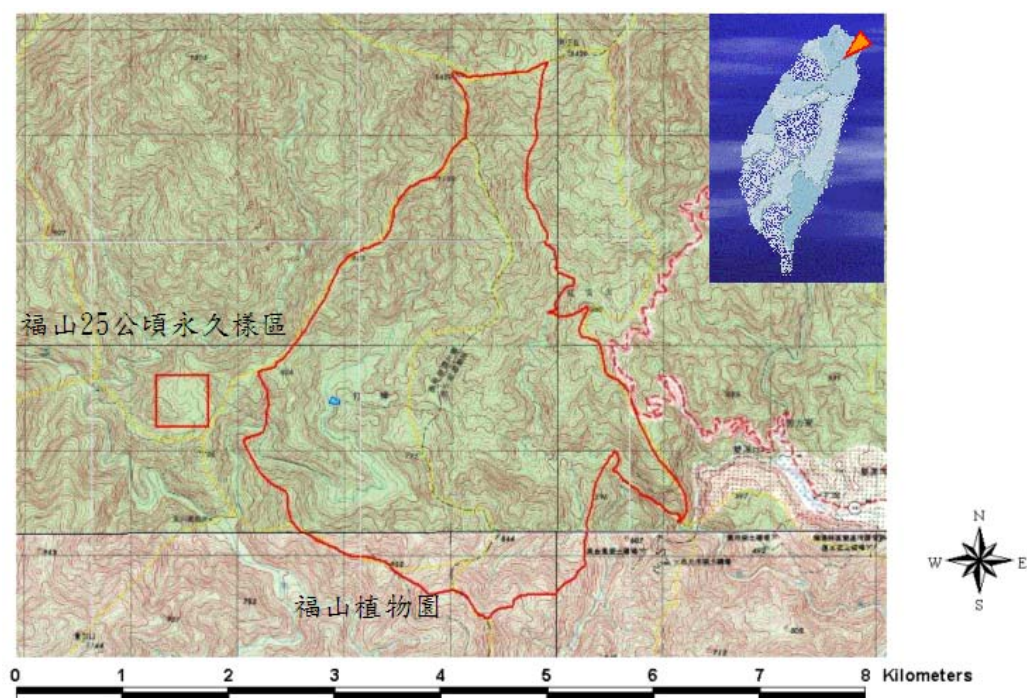


圖 1、福山永久樣區地理位置 (Su et al., 2006)

Fig. 1. Location of the Fushan permanent site (Su et al., 2006)

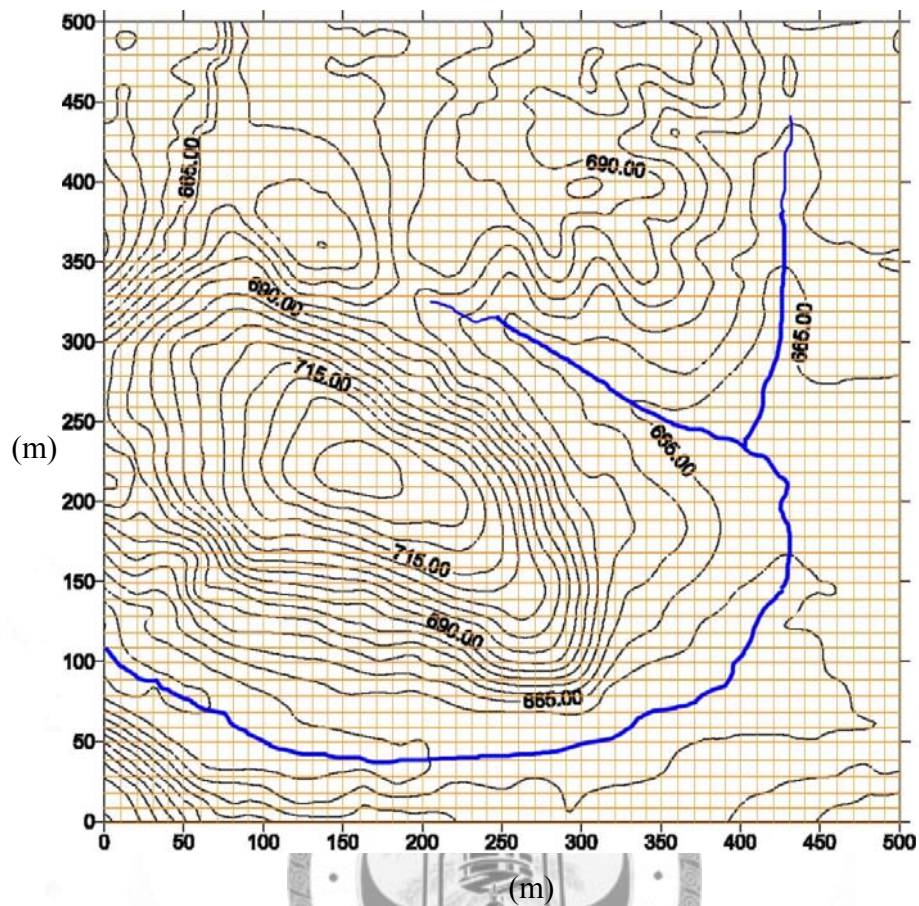


圖 2、福山 25 公頃樣區等高線地形圖，每條等高線間距為五公尺
(謝長富與陳尊賢，2004)

Fig. 2. Contour map of the Fushan permanent site drawn with 5-m intervals in elevation

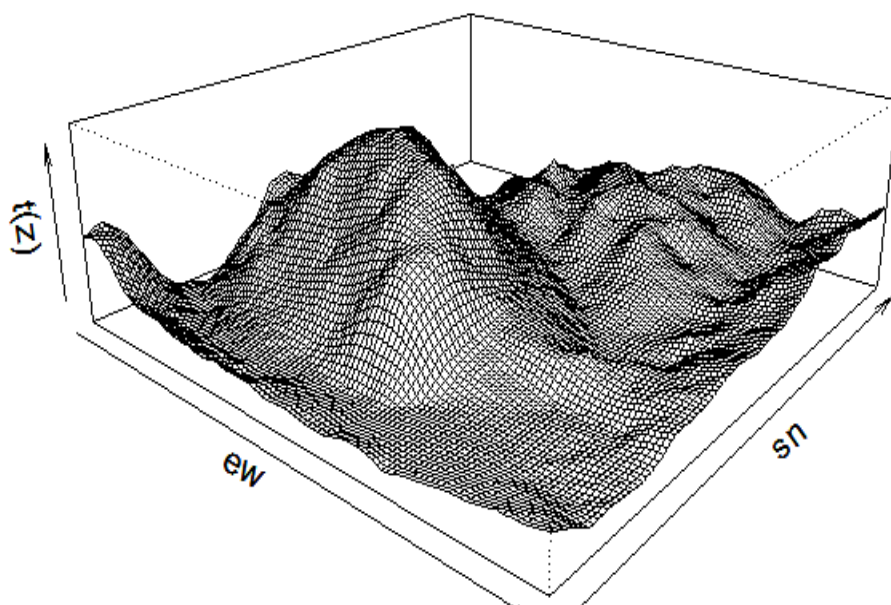
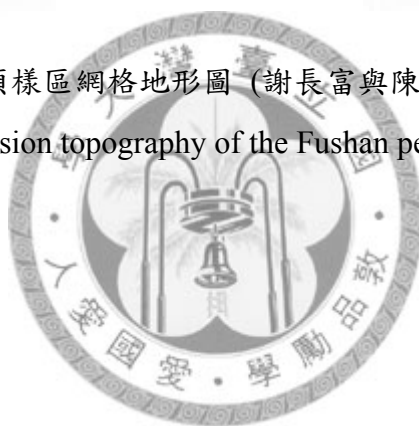


圖 3、福山 25 公頃樣區網格地形圖 (謝長富與陳尊賢，2004)

Fig. 3. Three dimension topography of the Fushan permanent site



3.1.2 氣候

福山地處臺灣東北部，屬於亞熱帶氣候。除夏天常受颱風襲擊外，冬季也有東北季風帶來豐沛的雨水。因此，該地全年之中並無明顯的乾季。福山研究中心苗圃氣象站之資料顯示，福山之降雨量平均為 4271 mm，降雨日達 225 天，平均相對溼度 95%；年均溫為 18.2℃，最冷月均溫 11.8℃，最暖月均溫 24.0℃，福山 12 年 (1993-2004) 平均氣象資料如圖 4 所示 (Su et al., 2007)。

3.1.3 樣區植物組成

全區之植被屬於亞熱帶雨林的楠櫚林型，目前總共在樣區內記錄到 91 科、202 屬、315 種維管束植物，其中 88 種為喬木、46 種為灌木、35 種為藤本、146 種為草本，而有 47 種為台灣特有種植物 (Su et al., 2006)。

分析其中十五公頃調查樣區資料，共發現 113 種木本植物，分屬於 40 科。主要組成科為殼斗科 (*Fagaceae*)、樟科 (*Lauraceae*)、山龍眼科 (*Proteaceae*)、茶科 (*Theaceae*)、野牡丹科 (*Melastomataceae*)、清風藤科 (*Sabiaceae*)、胡桃科 (*Juglandaceae*)、灰木科 (*Symplocaceae*)等。十五公頃樣區平均每公頃植株密度達 4763 株，底面積則為 37.14 平方公尺。其組成優勢樹種喬木類為烏來柯 (*Limlia uraiana*)、山龍眼 (*Helicia formosana*)、柏拉木 (*Blastus cochinchinensis*)、長尾栲 (*Castanopsis carlesii*)、烏皮茶 (*Pyrenaria shinkoensis*)、綠樟 (*Meliosma squamulata*)、黃杞 (*Engelhardtia roxburghiana*)、長葉木薑子 (*Litsea acuminata*)、紅楠 (*Machilus thunbergii*)及霧社槲楠 (*Machilus zuihoensis* var. *mushaensis*) 等；林下灌木優勢度較高的有柏拉木 (*Blastus cochinchinensis*) 及鬼杪櫨 (*Alsophila podophylla*) (表 1) (Su et al., 2006)。

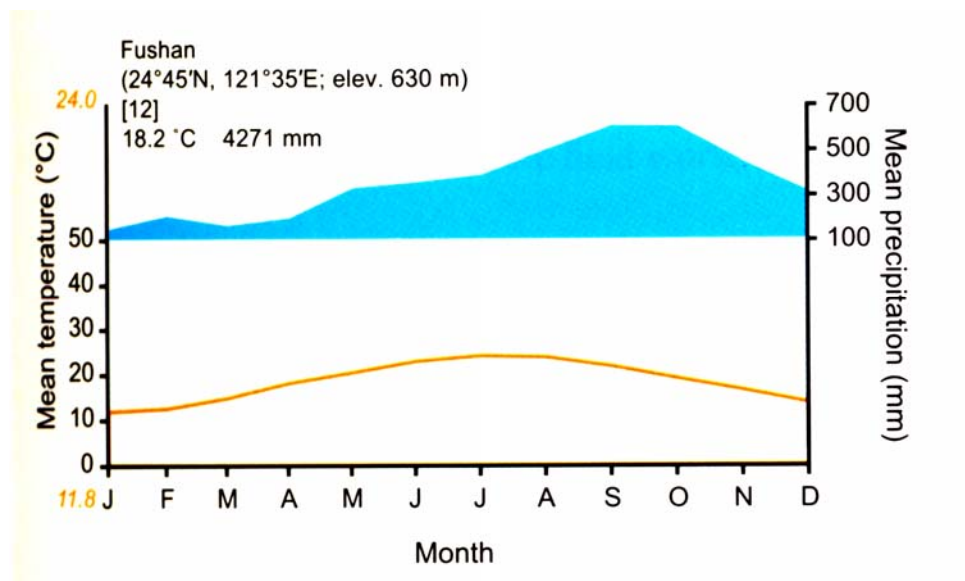


圖 4、福山 1993-2004 年之生態氣候圖 (Su et al., 2007)

Fig. 4. Climate diagram for the Fushan permanent site during 1993-2004
(Su et al., 2007)

24.0 與 11.8 分別為最暖與最冷月均溫



表 1、調查樣區的優勢種

Table 1. Dominant vegetations in the Fushan permanent site

中文名	學名	底面積 (BA) (m ² /ha)	密度 (stem/ha)	優勢度
烏來柯	<i>Limlia uraiana</i> (Hayata) Masamune & Tomiya	9.81	86	14.12
山龍眼	<i>Helicia formosana</i> Hemsl.	1.36	888	11.15
柏拉木	<i>Blastus cochinchinensis</i> Lour.	0.11	740	7.92
長尾栲	<i>Castanopsis carlesii</i> (Hemsl.) Hayata	3.40	196	6.64
烏皮茶	<i>Pyrenaria shinkoensis</i> (Hayata) Keng	2.53	216	5.68
綠樟	<i>Meliosma squamulata</i> Hance	2.70	151	5.22
黃杞	<i>Engelhardtia roxburghiana</i> Wall.	0.89	356	4.94
長葉木薑子	<i>Litsea cuminata</i> (Blume) Kurata	1.85	177	4.35
紅楠	<i>Machilus thunbergii</i> Sieb. & Zucc.	2.21	118	4.23
霧社槲楠	<i>Machilus zuihoensis</i> Hayata var. <i>mushaensis</i>	1.89	103	3.64
鬼杪欏	<i>Alsophila podophylla</i> Hook.	1.33	75	2.58
山红柿	<i>Diospyros morrisiana</i> Hance	0.78	104	2.15
大明橘	<i>Myrsine sequinii</i>	0.49	114	1.85
裏白饅頭果	<i>Glochidion acuminatum</i> Muell.-Arg.	0.58	100	1.83
山豬肝	<i>Symplocos theophrastaefolia</i> Sieb. & Zucc.	0.31	126	1.74
其他		6.90	1207	21.96
總計		37.15	4763	100.00

(Su et al., 2006)

3.1.4 不同地形之土壤剖面特性及土壤基本性質

謝長富與陳尊賢 (2004) 依地形規劃二條截線路徑，分別為：(A) 西北-東南方向，為研究區內坡度相對較陡的路線（土壤剖面實體 P6、P4 與 P2）；及 (B) 東北-西南方向，包括研究區內坡度相對較緩的地形（土壤剖面實體 P5、P3 與 P1）(圖 5)。

樣區地形之概觀主要為一座山丘與環繞山丘的小溪所組成。初步調查的結果顯示，本研究地區之土壤大致可分為兩類：低鹽基濕潤弱育土 (Dystrudepts) (Pedon 1~4、Pedon 6) 與簡育濕潤極育土 (Hapludults) (Pedon 5)。前者主要分佈於地形陡峭或是溪流路線附近，後者則位於低窪平坦地區，此現象顯示研究地區之土壤形態種類深受地形因子所影響。表 2 為福山 25 公頃永久樣區之表土 0-5，5-15 公分之土壤基本性質 (謝長富與陳尊賢，2004)。廖偉志 (2006) 的研究結果指出，土壤的性質在不同地形位置上的變異主要是由於水的流動所造成，水分流動帶動物質的移動，透過此一關係會造成樣區內土壤性質的空間分布變化。研究中地表 5 cm 的土壤有機碳含量與其他土壤性質具有顯著相關($p < 0.05$)，表示福山森林表層土壤性質深受土壤有機質含量之影響。試驗中也發現，有機碳有累積於地勢較低窪的地區的趨勢。由於物質的移動與累積作用，土壤的 pH 值與交換性鈣、鎂、鉀離子在低窪的河流區或山谷區顯著高於其他地形區($p < 0.05$)；有機碳與有效性養分的分布有顯著相關，其含量分布除了受地形因子影響外，可能也受到不同植被類型凋落物性質的影響，而造成山區表土 5 公分的土壤深度之含量有所不同。

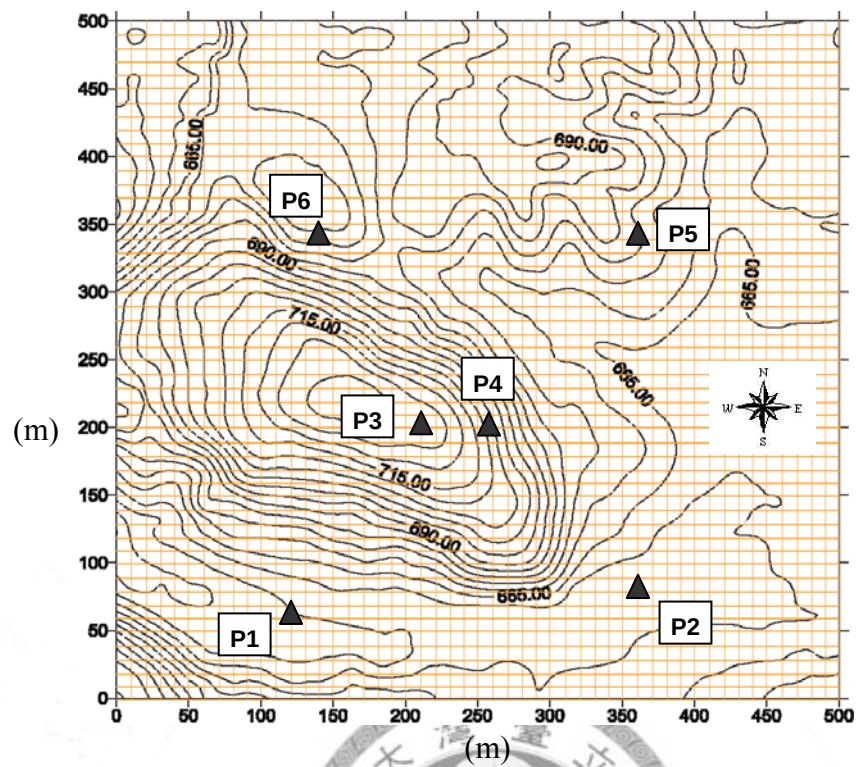


圖 5、福山永久樣區土壤剖面採樣位置圖
(謝長富與陳尊賢，2004)

Fig. 5. The sampling locations in the Fushan permanent site

表 2、福山 25 公頃永久樣區之表土土壤基本性質

Table 2. Surface soil properties of the Fushan permanent site

Sampling Site	Sample no.	pH	OC g kg ⁻¹	Available			Exchangeable	
				N	P	K	K	Na
				----- mg kg ⁻¹ -----				
0-5cm soil								
Pedon 1	6	3.4	9.8	179	12.2	166	249	16
Pedon 2	6	3.4	8.7	168	16.2	146	218	13
Pedon 3	6	3.4	6.4	101	2.4	73	101	16
Pedon 4	2	3.4	6.9	116	3.4	93	94	13
Pedon 5	6	3.3	6.3	133	5.3	170	216	14
Pedon 6	3	3.5	8.0	157	11.4	201	276	12
5-15cm soil								
Pedon 1	6	3.4	4.3	139	2.2	58	72	6.9
Pedon 2	6	3.3	3.5	119	3.3	63	71	7.2
Pedon 3	6	3.3	4.6	89	2.3	52	64	12
Pedon 4	2	3.4	4.6	110	3.1	50	57	7.7
Pedon 5	6	3.3	2.7	92	2.6	76	91	14
Pedon 6	3	3.7	3.7	119	3.8	72	73	5.4

Sampling Site	Exchangeable		DTPA extractable			
	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
	----- mg kg ⁻¹ -----		----- mg kg ⁻¹ -----			
0-5 cm soil						
Pedon 1	66	74	313	28	1.9	4.7
Pedon 2	78	57	227	8.7	1.6	4.9
Pedon 3	7.5	32	304	1.2	0.7	2.0
Pedon 4	22	36	320	3.9	0.9	2.0
Pedon 5	141	67	419	19	1.3	3.2
Pedon 6	46	66	307	19	2.2	3.0
5-15cm soil						
Pedon 1	7.3	23	128	4.9	1.1	0.9
Pedon 2	14	23	138	1.5	0.8	1.3
Pedon 3	9.2	23	218	1.0	0.6	1.6
Pedon 4	4.8	19	289	0.6	0.6	1.4
Pedon 5	23	36	194	2.0	0.6	0.6
Pedon 6	13	25	142	7.4	1.6	0.6

(謝長富與陳尊賢，2004)

3.2 穿落水、逕流水與土壤溶液之化學組成試驗

3.2.1 樣區設置

採樣點的設計是在 25 公頃永久樣區內選定地形與土壤性質差異較大的弱育土 (Inceptisols) 與極育土 (Ultisols) 做為比較。在地形方面，位於山坡的弱育土樣區地勢高於坡度較平緩的極育土樣區，陡坡上強烈的逕流與沖蝕作用使其土層無法穩定的增厚；土壤性質方面，地勢較低的極育土樣區在穩定的洗入與鐵鋁氧化作用下，使土體呈現紅黃色 (5YR 5~6/8)，土壤剖面的顏色與弱育土有明顯的差異。弱育土與極育土兩樣區皆設置三個重複剖面 (圖 6)。於兩樣區共計六個剖面中埋設溶液收集器材，現地進行穿落水、地表逕流水與土壤溶液的收集試驗。

3.2.2 穿落水、地表逕流水與土壤溶液之採樣方法

比較年試驗進行期間 (2008 年) 與試驗進行最近五年 (2004 至 2008 年) 之氣象資料 (圖 7)，發現研究期間福山地區各月均溫的變化與近五年的平均月均溫一致。在雨量方面，2008 年 8 月的平均月雨量較同月近五年平均值低約 600 毫米。2008 年 9 月受到強烈颱風辛樂克與薔蜜的影響，月雨量較近五年的 9 月平均雨量高出約 500 毫米，其餘月份差異則不大。試驗期間現地溶液的收集為每個月採集一次，由 2008 年 1 月持續到 2009 年 2 月，研究進行期間採樣共 14 次。於試驗地六個剖面進行樣品採集的同時，逐一紀錄各收集器所累積之溶液量 (表 4)，溶液樣品以 100 毫升 PE 塑膠瓶分裝後加蓋密封，下山後即置入冰桶保存，以低溫 4°C 運送回實驗室進行組成分析。

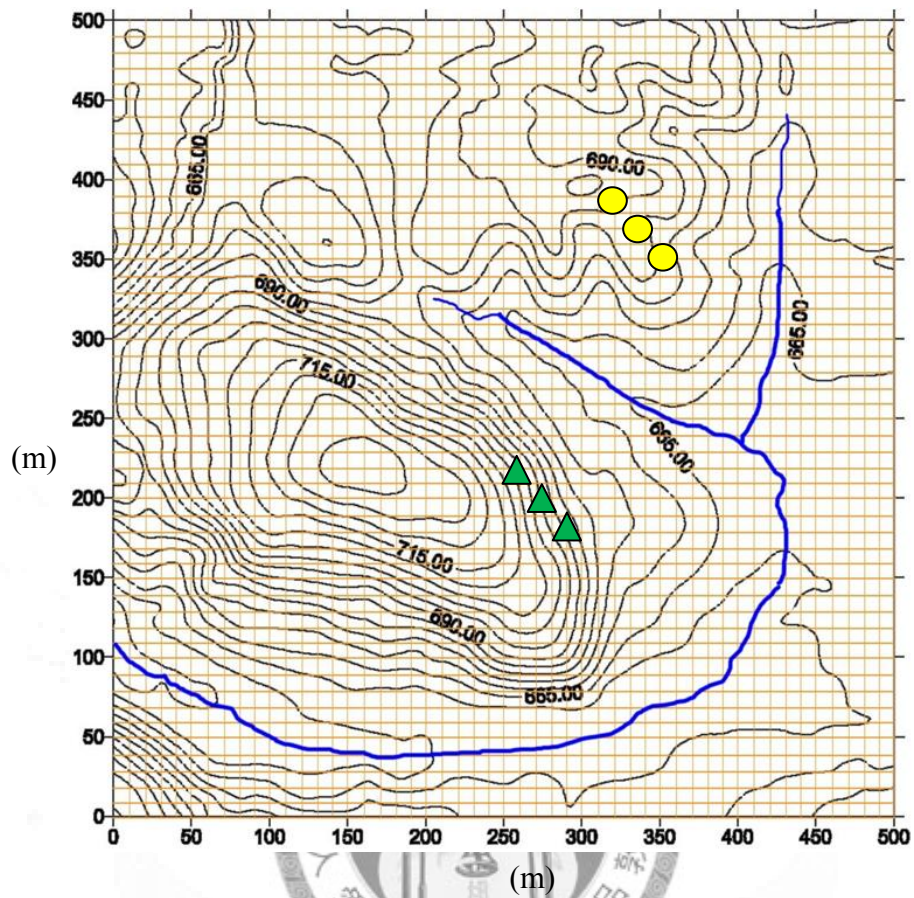


圖 6、福山樣區設置圖 (謝長富與陳尊賢，2004)

Fig. 6. Sampling location in the Fushan permanent site

Triangles: profiles of Inceptisols (I1, I2, and I3)

Circles: profiles of Ultisols (U1, U2, and U3)

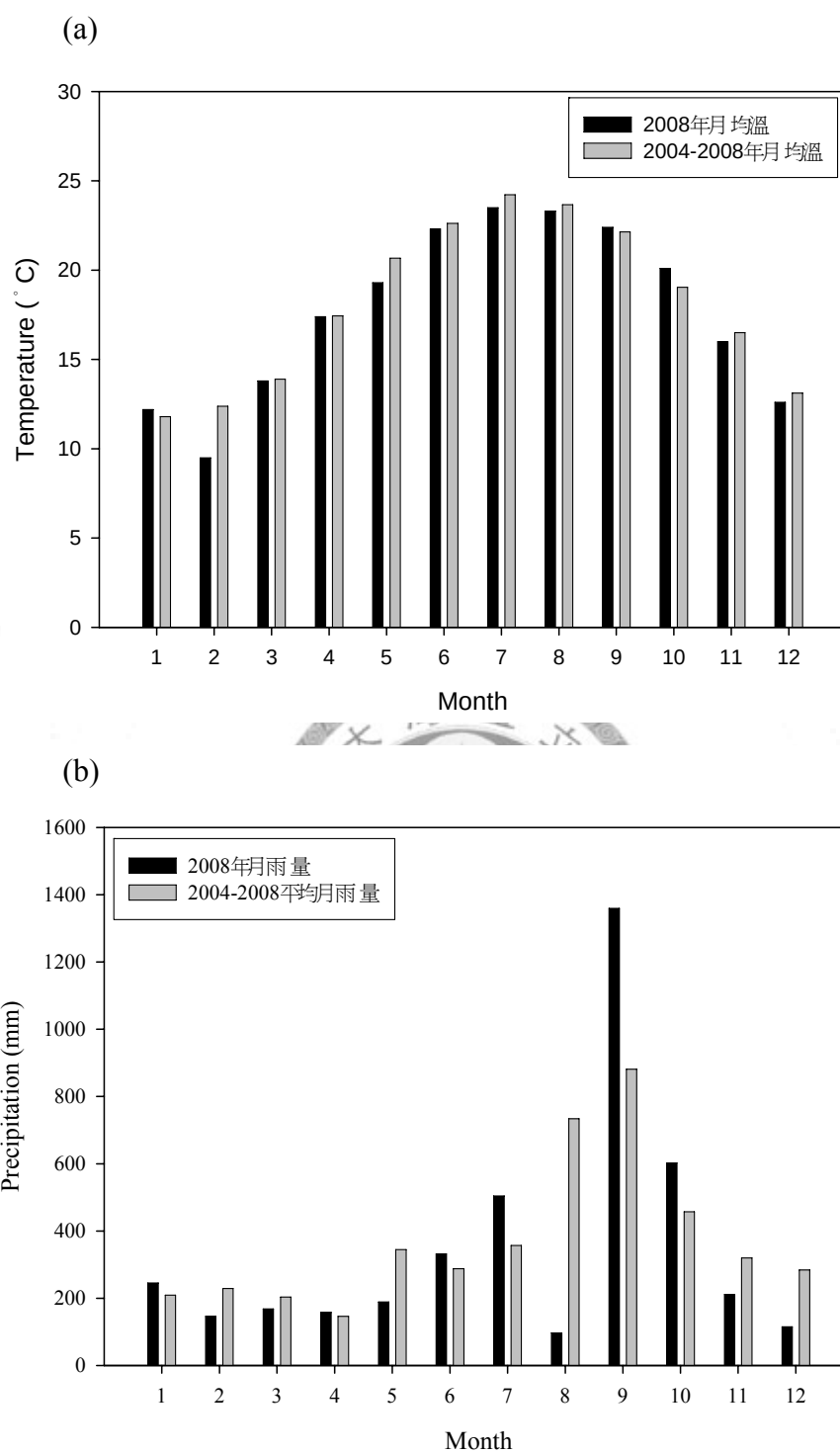


圖 7、福山 2008 年及 2004-2008 年之平均 (a) 氣溫 與 (b) 雨量
(福山研究中心)

Fig. 7. (a) Mean temperature and (b) mean precipitation of Fushan area
(Fushan research center)

表 4、研究期間弱育土與極育土樣區溶液量紀錄

Table 4. Solution volume records of two sampling sites during this study

Inceptisols Date	Throughfall (mL)	Runoff (mL)	A Horizon (mL)	B Horizon (mL)
2008/2/27	4007±1762	2100±1320	2060±1715	2100±1473
2008/3/26	797±45	1237±1328	1515±559	1203±903
2008/4/19	2483±284	2100±794	3125±106	2683±1285
2008/5/28	3150±477	1717±804	3200±141	2867±666
2008/7/2	4900±500	5300±2910	10200±2404	9067±2857
2008/7/23	2193±162	1607±1434	2683±2331	3073±1743
2008/8/26	6300±954	7167±3355	11733±252	11367±651
2008/9/20	10433±208	7550±6401	11233±1332	12950±778
2008/10/5	7100±1539	5850±3889	12233±404	11867±751
2008/10/18	4067±1266	2000±854	9267±1436	8167±1172
2008/11/8	3133±351	1533±611	4700±1778	5933±2831
2008/12/5	2733±551	667±153	3267±1286	3150±636
2009/1/11	2867±115	1367±737	3800±917	2367±907
2008/2/10	1367±58	567±551	1333±924	800±819
Ultisols				
2008/2/27	3273±839	1508±705	2950±495	1507±1164
2008/3/26	863±161	240±256	890±537	520±141
2008/4/19	3133±513	438±443	2149±1820	3033±58
2008/5/28	3317±917	1233±967	1971±1668	2983±257
2008/7/2	5367±1069	2333±1756	5417±4901	8500±3005
2008/7/23	2510±376	743±698	2593±2481	3103±597
2008/8/26	7900±2088	2950±3774	7013±5701	7200±2951
2008/9/20	10873±329	3867±6199	8303±3989	11623±682
2008/10/5	8780±2065	1733±2659	8513±4758	11640±557
2008/10/18	6233±1850	3950±212	6133±5033	11567±839
2008/11/8	2800±529	1250±495	4200±3995	9300±5333
2008/12/5	2933±1193	1000±990	2800±2982	4200±1253
2009/1/11	2833±586	850±636	1833±1320	7833±5579
2008/2/10	2000±1652	493±467	533±153	800±173

(1) 穿落水 (throughfall) 的收集

穿落水為穿透樹冠層，自葉面滴落地表的雨水。闊葉林的樹冠層枝葉茂密，故穿落水是降雨進入林地內的主要型態。本試驗在每個土壤剖面附近放置一個收集器以採集穿落水。穿落水收集器是一個與直徑 11.5 公分漏斗相連的 25 公升 PE 塑膠桶，漏斗之開口處並覆上塑膠濾網以防止落葉或昆蟲掉入 (圖 8)，在現地固定整個裝置，以便定期收集穿落水。

(2) 地表逕流水 (surface runoff) 的收集

在土壤剖面附近，尋找可能發生逕流之坡面或已經成形的小沖蝕溝。順著坡面，於每個剖面設置一個地表逕流水收集器。架設於坡面上的 PE 塑膠盤底端鑿有小孔，並透過細塑膠管將所收集之逕流水溶液連接至 25 公升 PE 收集桶 (圖 9)。

(3) 於土壤剖面 A 層底層收集之土壤溶液 (soil solution at the bottom of A horizon)

A 層之土壤溶液代表植物根圈範圍內能供給植物與土壤微生物吸收利用的養分及水分。本研究中以自製的滲漏水收集裝置收取土壤溶液。相對於對樣區具有破壞性的離心法 (centrifugation of soil samples)，滲漏計法對現地自然狀態的改變較小，故以此方式在福山永久樣區內進行土壤溶液的採集。在試驗過程中希望將對環境的干擾減至最低，因此裝置架設的進行是在樣區中選取坡面設置水樣收取裝置而非自平地開挖剖面。接著，把長 27 公分、寬 18.5 公分，呈長方形且底端鑽有排水小孔的集水盤以適當的傾斜角度橫插入剖面中，以便土壤溶液經由與塑膠細管連接的排水孔流入溶液收集桶中 (圖 10)。

(4) 於土壤剖面 B 層底端收集之土壤溶液 (soil solution at the bottom of B horizon)

樣區的剖面土層厚度並不深，土壤剖面 B 層之下即為含石量極高的母質層 (parent materials)。土壤溶液的收集採用與剖面 A 層相同的裝置，將土壤溶液收集盤埋設於剖面 B 層底端，該部分之土壤溶液於本研究中被假設為植物根無法吸收利用的水分 (圖 11)。



圖 8、穿落水收集裝置

Fig. 8. A throughfall collector





圖 9、地表逕流水收集裝置
Fig. 9. A surface runoff collector

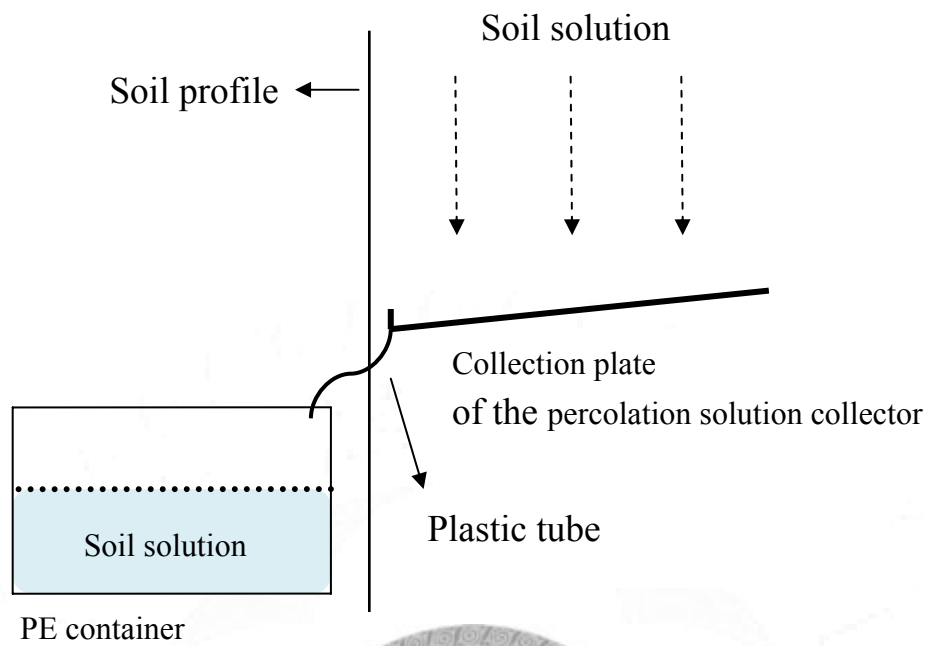


圖 10、土壤滲漏溶液收取裝置

Fig. 10. A diagram of the percolation solution collector



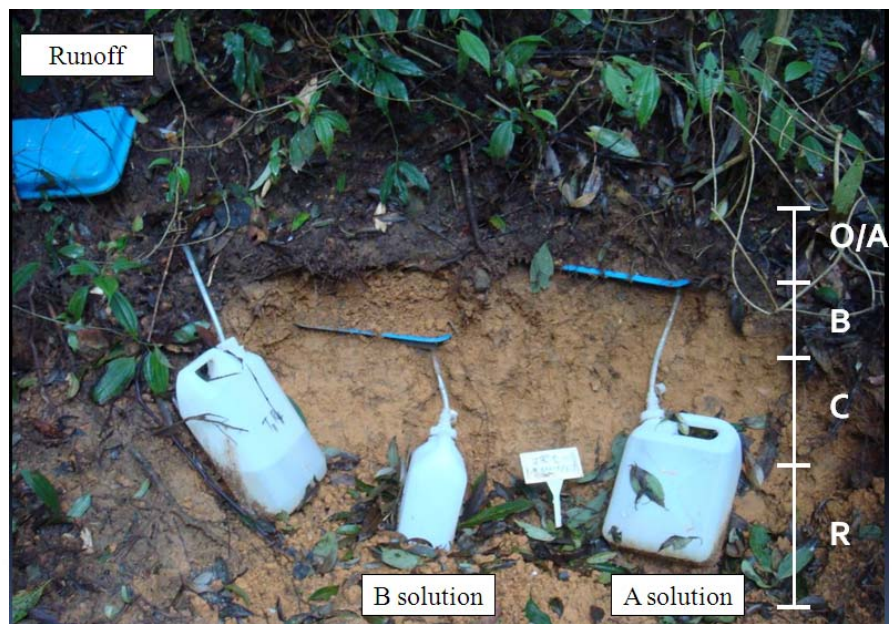


圖 11、用於土壤溶液收集之土壤滲漏溶液收集器

Fig. 11. Percolation solution collectors used for soil solution collection



3.2.3 溶液化學組成分析之前處理

溶液之 pH 值與電導度兩項數據在採樣後取少量樣品以最快速度進行分析。由於 pH 電極在平衡過程中鉀離子會釋放進入溶液樣品之中，溶液電導度的測定須先於 pH 值。除 pH 值與溶液電導度等兩項測定之外，穿落水、地表逕流水與土壤溶液樣品在進行下述組成分析實驗前，均以 Whatman 之 42 號濾紙濾除溶液中之大顆粒固體物質。接著，須經感應耦合電漿-原子發射光譜儀 (ICP-AES) 與離子層析儀 (IC) 分析之溶液，樣品即分別以具有 0.45 μm 與 0.22 μm 孔徑之 millipore 過濾。此步驟可降低溶液受微生物作用的影響，增加樣品的穩定性，及延長測定儀器之使用壽命。完成過濾之待測樣品皆續存於 4°C 冰箱中。

3.2.4 測定溶液化學組成

(1) 溶液電導度 (electrical conductivity) :

取 20 mL 溶液置於玻璃試管，以電導度計 (Basic DCM-3) 測量各溶液樣品之電導度值。

(2) pH 值：

把電導度測定完成之水樣，接續以 pH-meter (PHB 9901) 測定其溶液 pH 值。

(3) 可溶性有機碳 (DOC)：

將經過 0.22 μm 孔徑濾膜過濾之水樣，取 30 mL 置入塑膠樣品瓶中，以總有機碳分析儀 (Total Organic Carbon Analyzer, Aurora Model 1030W) 測定。

(4) Ca、Mg、K、Na、Fe、Al、Mn、Si：

將經過 0.45 μm 濾膜過濾之水樣，取 25 mL 置入塑膠樣品瓶中，以感應耦合電漿-原子發射光譜儀 (ICP-AES, Perkin-Elmer 2000 DV) 測定各樣品之溶液濃度。

(5) NO_3 、 PO_4 、 SO_4 、 Cl ：

將經過 $0.22\ \mu\text{m}$ 濾膜過濾之水樣，取 30 mL 置入塑膠樣品瓶中，以離子層析儀 (Metrohm, 792 Basic IC) 測定各樣品之溶液濃度。

3.2.5 元素收支模式

凋落物、有機殘體及穿落水皆為輸入土壤的養分，但以土壤生態系的角度來看，凋落物及有機殘體需視為生態系內部的養分循環 (De Schrijver et al., 2004)。為了評估研究區內土壤養分隨著水分的流動情形，本試驗皆以土壤為主體，將穿落水定義為元素之輸入 (input) 源，地表逕流及由 B 層底端收集之土壤溶液則視為輸出 (output) 土壤生態系的溶液 (圖 12)。將分析得到的水樣元素濃度乘以水樣體積，可得到溶液中元素的含量，並進一步計算土壤養分的收支。元素收支計算公式如式 (1) (Menéndez et al. 2007)：

$$\text{Net mass} = \sum_{i=1}^{14} \text{Element input}_i - \sum_{i=1}^{14} \text{Element output}_i \quad (1)$$

其中， i 表示採樣別，本試驗共採集水樣 14 次。

元素的淨收支等於輸入土壤之元素總量與輸出土壤元素總量的差，單位採 $\text{kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 表示。由於本試驗之元素輸入源為穿落水，輸出源為地表逕流與 B 層之土壤溶液，式 (1) 可替換為式 (2)：

$$\text{Net mass} = \sum_{i=1}^{14} \text{Throughfall}_i - (\sum_{i=1}^{14} \text{Runoff}_i + \sum_{i=1}^{14} \text{Soil solution at B horizon}_i) \quad (2)$$

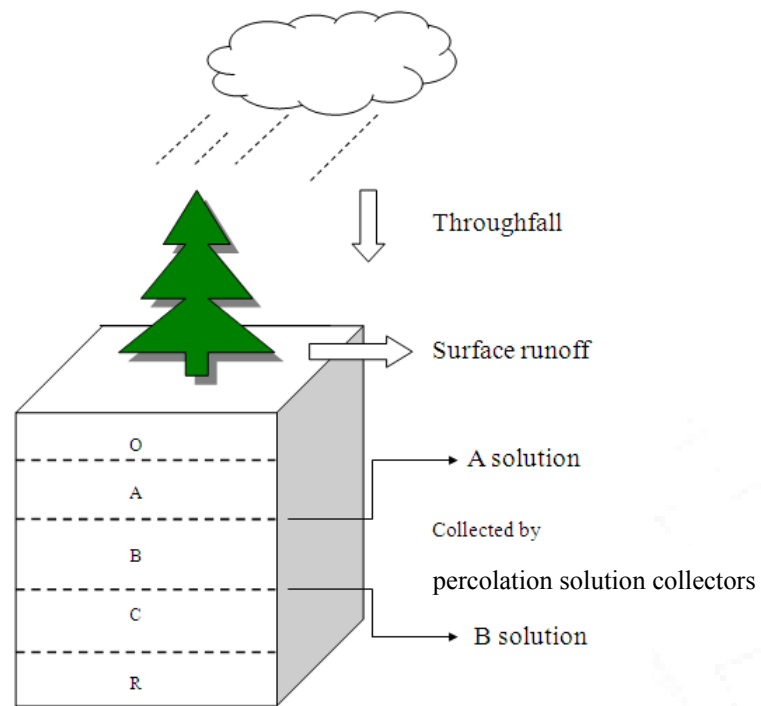


圖 12、試驗中所採集的水樣

Fig. 12. Water samples collected in this study

當收支數據為正值，即該元素輸入福山試驗區土壤的估計值大於元素輸出量，表示土壤生態系中該元素的含量正在增加；反之，若收支數據為負值，則表示該元素在試驗區土壤的估計輸出量高於元素輸入量，表該元素在當地土壤環境中的含量正處於減少的狀態。

3.2.6 溶液化學組成之元素量的計算

計算元素量的目的是為了得到研究區中特定元素在研究期間內通過單位面積之總量資訊。基於輸出 (input) 與輸入 (output) 量比較上的考量，數值的單位一致採 kg ha^{-1} 表示。在了解土壤生態系中元素的輸入與輸出總量之後，就能藉由比較兩數值的差異，評估該元素在土壤環境中是處於累積或流失的狀態。

(1) 輸入土壤之元素量

進入土壤生態系之元素輸入源 (input source) 為穿落水。本項數據之計算方式是將穿落水中元素濃度 (mg/L) 乘以穿落水收集量 (L)，可得到元素之輸入量，計算方式如式 (3)：

$$\text{Element input} = \text{Element conc.} \times \text{Water volume} \quad (3)$$

試驗期間共採水樣 14 次，依式 (3) 計算得每次採得水樣之元素輸入量。收集穿落水之漏斗集水面積已知為 104 平方公分 (漏斗直徑 11.5 公分，三重複)。將全年元素輸入總量的單位轉換為 kg ha^{-1} 即可求得研究期間該元素之單位面積輸入量。

(2) 輸出土壤之元素量

本試驗中定義離開土壤生態系的水分為地表逕流水及自 B 層底部收得之土壤溶液兩個部分。

首先介紹 B 層土壤溶液輸出量的計算。由於試驗中無法自 C 層收取土壤溶液，故將通過剖面 B 層底部之溶液設為輸出土壤生態系的水分 (output water)。埋設於土壤 B 層底部的滲漏水收集裝置可收集垂直通過該收集器的溶液，但無法考量到側向流動及被植物根吸收的水分，難以評估實際輸出土壤的溶液量。因此，輸出土壤生態系範圍的水量是以 De Schrijver et al. (2004) 文獻中的 Chloride Mass Balance Method 進行估計，公式如式 (4)：

$$\text{Volume}_i \times \text{Chloride concentration}_i = \text{Volume}_o \times \text{Chloride concentration}_o \quad (4)$$

其中，i 為輸入 (input)，而 o 表示輸出 (output)。Volume_i 是穿落水量，Chloride concentration_i 為穿落水中氯離子的體積加權濃度 (volume-weighted mean of concentration, VWM)。Chloride concentration_o 是 B 層土壤溶液中氯離子的體積加權濃度 (VWM, mg/L)，Volume_o 為輸出水量的估計值 (estimated output water volume, L)。

根據 Eriksson and Khunakasem (1969)；De Schrijver et al. (2004) 的 Chloride Mass Balance Method，植物根不會主動吸收或排出氯離子，意即植物吸收水分及養分並不會改變土壤溶液中氯離子的多寡。除此之外，氯離子在土壤溶液中的濃度也不受到礦化作用的影響 (Thomas and Büttner, 1998)。故 De Schrijver et al. (2004) 認為大氣中藉由穿落水的形式輸入 (input) 土壤生態系中的氯離子量與輸出 (output) 該土壤生態系的量將不受植物及土壤影響。在此前提之下，輸出土壤生態系範圍的估計水量可由上述式 (4) 求得。

在求得輸出水量之後，將其與 B 層土壤溶液之元素濃度 (Element concentration_b, mg/L) 相乘即得 B 層土壤溶液輸出量估計值 (Element output_b, kg ha⁻¹)，公式如式 (5)：

$$\text{Element output}_b = \text{Element concentration}_b \times \text{Water volume}_b \quad (5)$$

試驗期間共採水樣 14 次，依式 (5) 計算可得每次收取水樣之元素輸出量。收集土壤溶液之滲漏裝置集水盤面積已知為 500 平方公分 (長 27 公分、寬 18.5 公分，三重複)。將元素輸出總量的單位轉換為 kg ha⁻¹ 即可求得該元素自 B 層滲漏流失之單位面積輸出量。

本試驗中，元素輸出的第二個輸出源為地表逕流水。以地表逕流形式流失的元素量計算方式如式 (6)：

$$\text{Element output}_r = \text{Element concentration}_r \times \text{Water volume}_r \quad (6)$$

將地表逕流中的元素濃度 (Element concentration_r, mg/L) 乘以試驗所收得之逕流量 (Water volume_r, L)，可得元素之輸出量。試驗期間共採水樣 14 次，依式 (6) 計算可得每次收取水樣之元素輸出量。收集地表逕流之集水盤面積已知為 1498.5 平方公分 (長 27 公分、寬 18.5 公分，三重複)。將全年元素輸出總量的單位轉換為 kg ha⁻¹ 即可求得該元素自逕流水流失之單位面積輸出量。

最後，輸出土壤之總元素量計算公式如式 (7)

$$\text{Element output} = \sum_{i=1}^{14} \text{Element output}_{b,i} + \sum_{i=1}^{14} \text{Element output}_{r,i} \quad (7)$$

其中，Element output_b為 B 層土壤溶液輸出元素量，Element output_r為地表逕流輸出元素量，兩者單位皆為 kg ha⁻¹。i 表示採樣別，本試驗共採集水樣 14 次。



第四章 結果與討論

4.1 溶液化學組成

4.1.1. 穿落水 (throughfall)

在大氣中懸浮的物質與雨水結合，穿過枝葉茂密的森林樹冠層，以穿落水的形式進入到森林生態系中，開始與植生、土壤、微生物進行一連串複雜的交互作用。

(1) pH 與電導度值

在自然的大氣條件下，雨水即呈弱酸性，這是因為空氣中含有大量的二氧化碳，二氧化碳在常溫時溶解於雨水中並達到氣液相平衡後，雨水之酸鹼值約為 5.6。但自然中其它致酸物質（如火山噴發出的硫化氫、閃電形成氮氧化物）皆會使雨水進一步酸化，其酸鹼值會降至 5.0 左右。目前在我國環保署的研究報告中，已統一將酸鹼值低於 5.0 的雨水正式定義為酸雨。

本研究自 2008 年一月起至 2009 年二月，於福山永久樣區進行溶液的收取與分析共計 14 次。研究期間弱育土 (Inceptisols) 與極育土 (Ultisols) 兩樣區中穿落水的 pH 值隨時間的變化如圖 13 (a) 所示。從圖 13 (a) 看來，研究期間弱育土和極育土樣區穿落水的 pH 值範圍落在 3 到 5.5 之間。弱育土樣區 pH 值最高約為 5.4，最低測值為 3；極育土樣區 pH 值最高約在 5.6，最低測值約為 4.3。整體看來，輸入到極育土樣區的穿落水 pH 值相對略高於弱育土樣區，但皆呈酸性。於兩研究區內降下之穿落水 pH 值平均為 4.7，已屬於酸雨的範圍。

在電導度方面，其值隨時間的變化在極育土與弱育土樣區則呈現出類似的趨勢（圖 13 b）。研究期間穿落水電導度值約在 0.01 到 0.06 dS m⁻¹ 間。

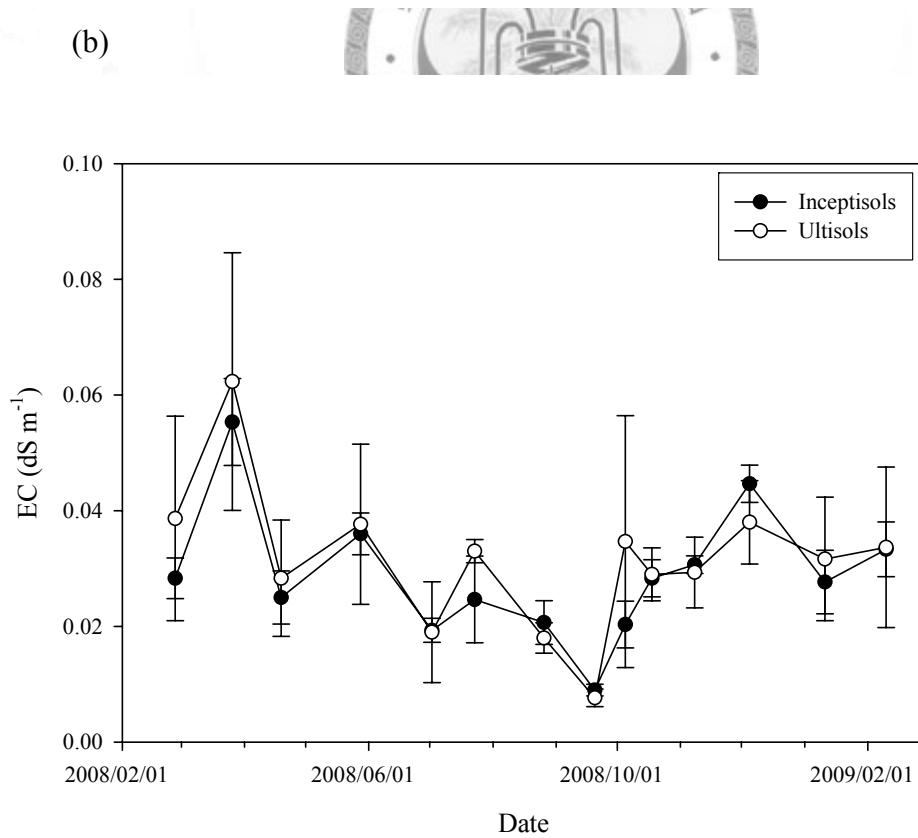
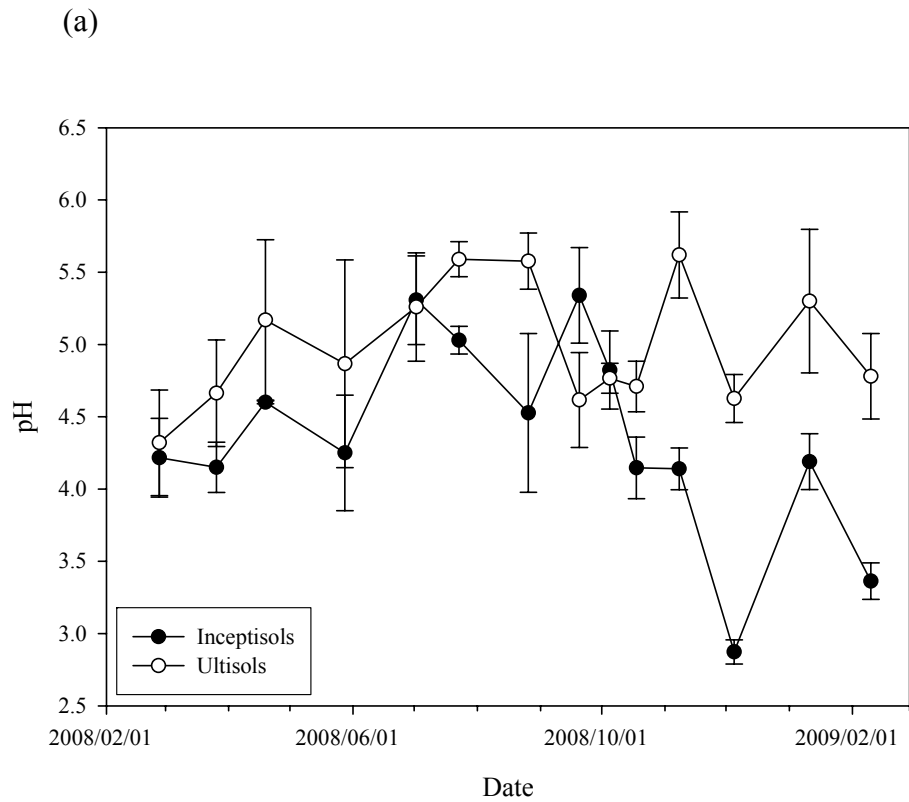


圖 13、兩研究區穿落水之 (a) pH 與 (b) 電導度

Fig. 13. Dynamics of (a) pH and (b) EC of throughfall in two study site

(2) 陽離子

研究中對溶液中進行探討的陽離子包含鉀、鈉、鈣、鎂、鐵、鋁、錳、矽等八個元素 (圖 14)。其中鉀、鈣與鎂離子一般稱為土壤中之鹽基陽離子，它們同時也是植物在生長過程當中必然不可或缺的巨量元素，其高度可溶解特性也使它們被稱為可溶性鹽類。在研究期間弱育土和極育土所降下的穿落水組成隨著時間的改變方面，整體看來兩樣區並沒有太大的差異。以鹽基陽離子在穿落水中的濃度 ($\mu\text{eq/L}$) 來看，鈉與鉀離子是穿落水中的優勢陽離子，濃度範圍在 10 至 120 $\mu\text{eq/L}$ 之間，穿落水中鈉離子濃度隨時間有較大的波動。由於福山位於臺灣東北沿海，冬季又有東北季風的吹拂，降水對鈉及氯等海水中含量豐富的離子之沉降貢獻量高達 20%。鈣與鎂離子在研究期間濃度的變化則呈現較為穩定的趨勢。除了鈣離子濃度在 2008 年三月出現偏高的 80 $\mu\text{eq/L}$ ，但其變異也較大，研究期間鈣濃度約在 10 至 40 $\mu\text{eq/L}$ 之間。

鐵、鋁、錳與矽是普遍存在於土壤中之微量元素，分析穿落水中的微量陽離子是為了觀察穿落水降至地表與入滲土壤之後組成的改變。弱育土與極育土樣區中，微量陽離子的組成在穿落水中隨著研究進行同樣沒有太大的差別。矽的來源為土壤，研究所測得穿落水中矽的來源可能為空氣中的灰塵及季節性沙塵暴的影響。大陸沙塵暴為東亞地區春季最主要的懸浮微粒自然源，臺灣位處於亞洲大陸東南隅之外，冬、春季的氣象條件有利於將大陸沙塵暴輸送到台灣地區的上空。沙塵的主要成分有 CaO 、 SiO_2 與 Al_2O_3 (Goudie et al., 2001)，穿落水中鈣、鋁、矽等離子的濃度在 2008 年 3 月高於其它月分的情形推測是福山地區受到大陸沙塵暴影響的結果。

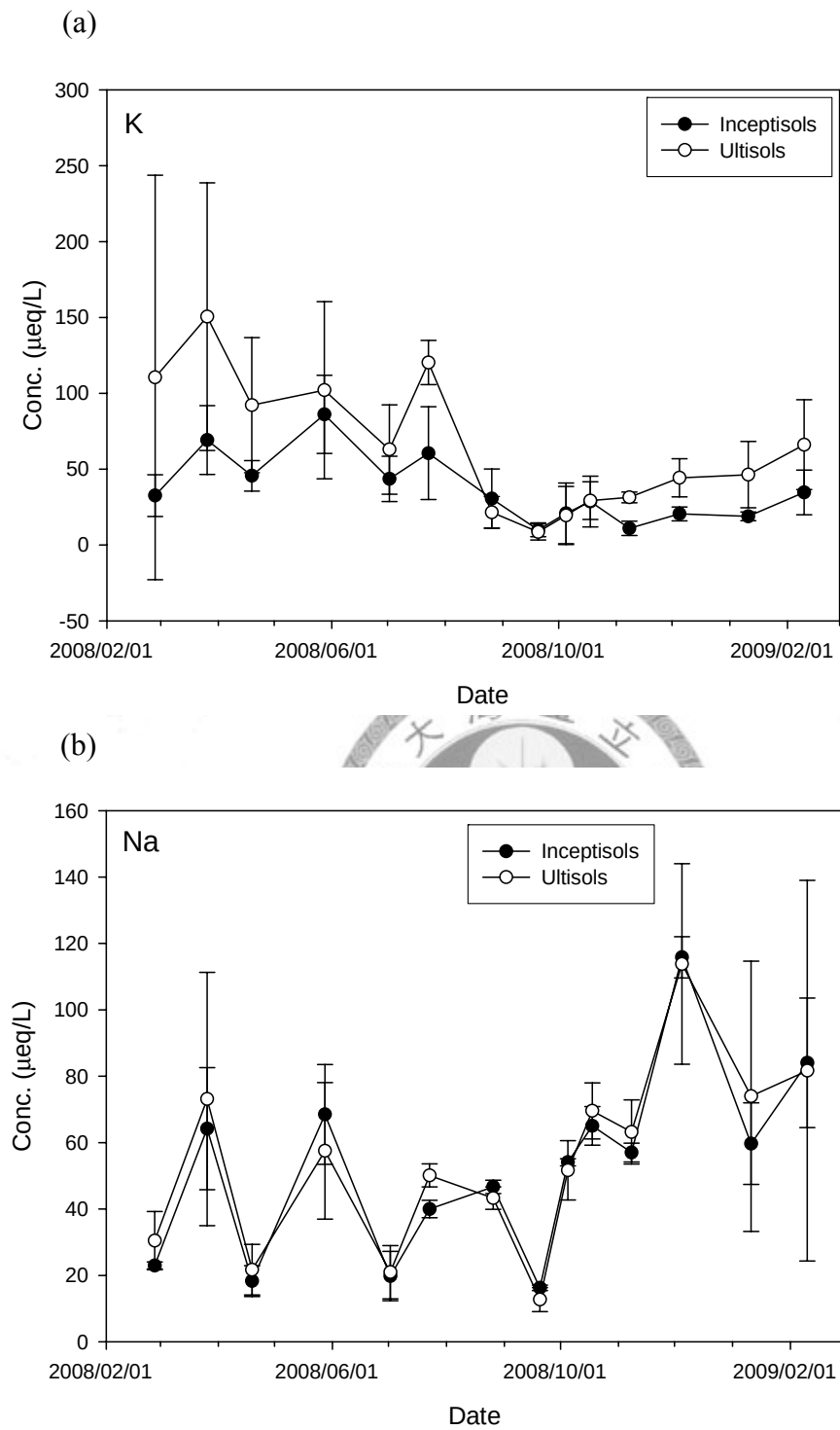
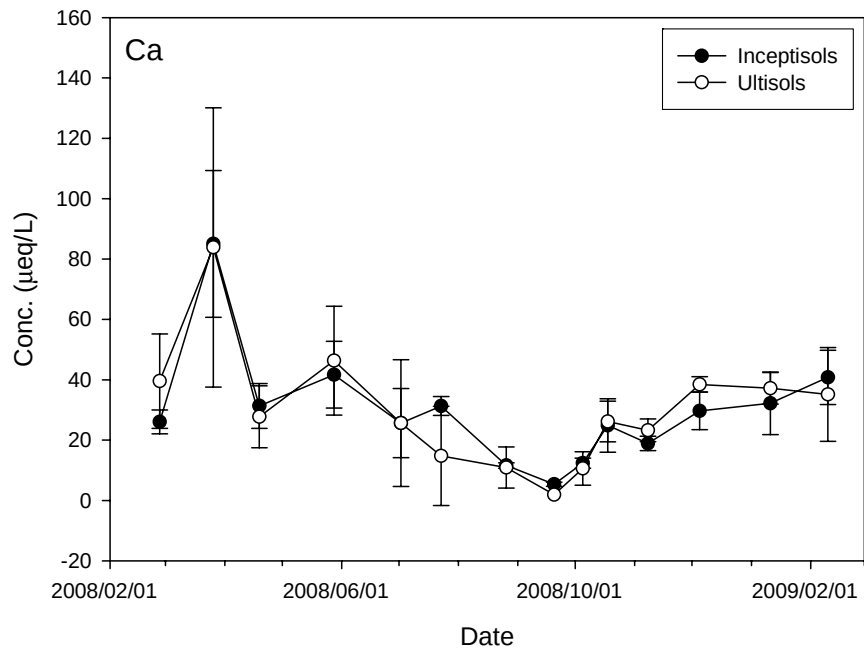


圖 14、兩研究區穿落水陽離子組成 (a) 鉀、(b) 鈉、(c) 鈣、(d) 鎂、(e) 鐵、
(f) 鋁、(g) 錳與 (h) 矽濃度隨時間的變化

Fig. 14. Dynamics of cation concentrations (a) potassium, (b) sodium, (c) calcium, (d) magnesium, (e) iron, (f) aluminum, (g) manganese, and (h) silicon of throughfall in two study sites

(c)



(d)

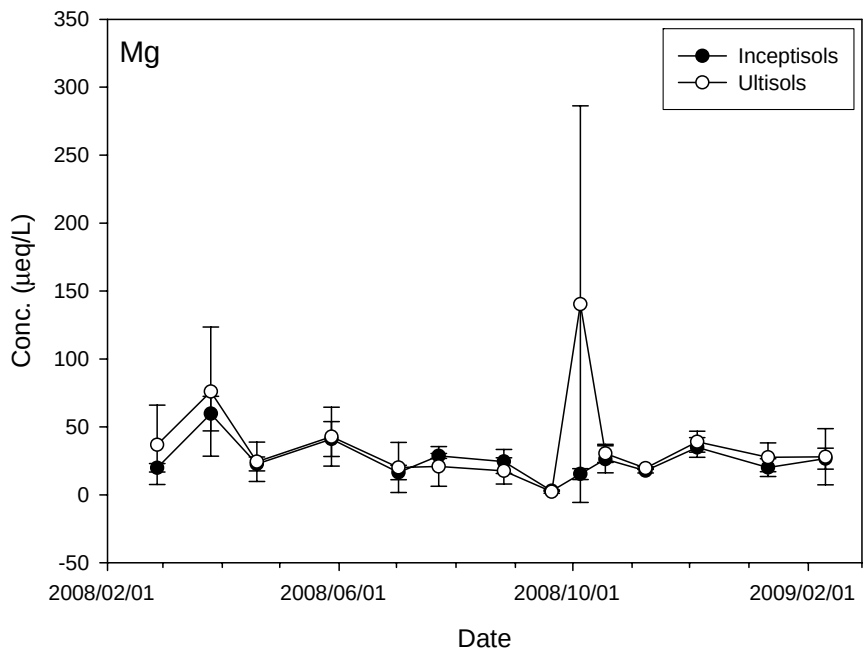


圖 14、(續)

Fig. 14. (continued)

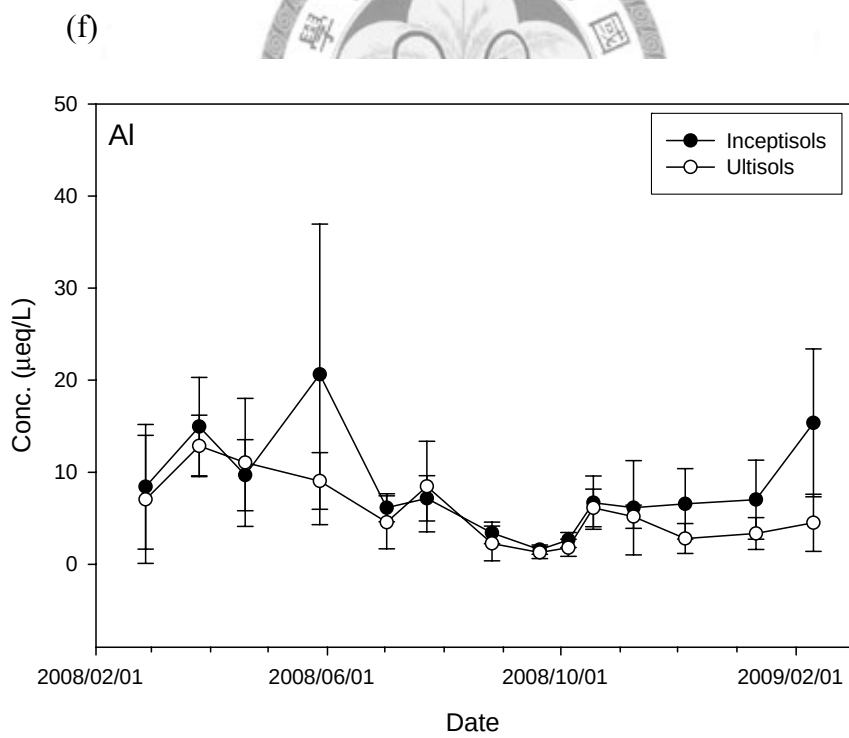
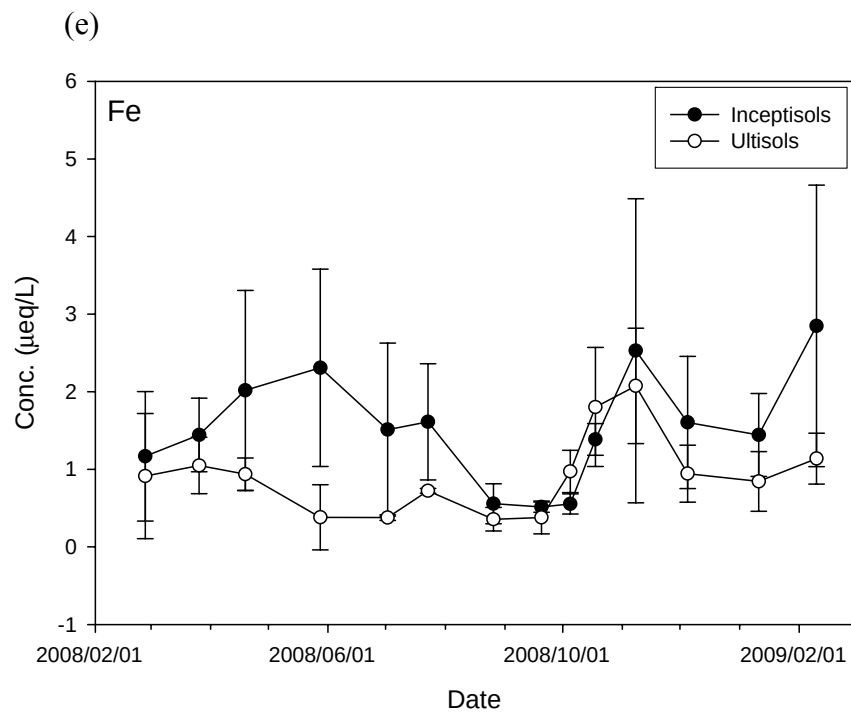


圖 14、(續)

Fig. 14. (continued)

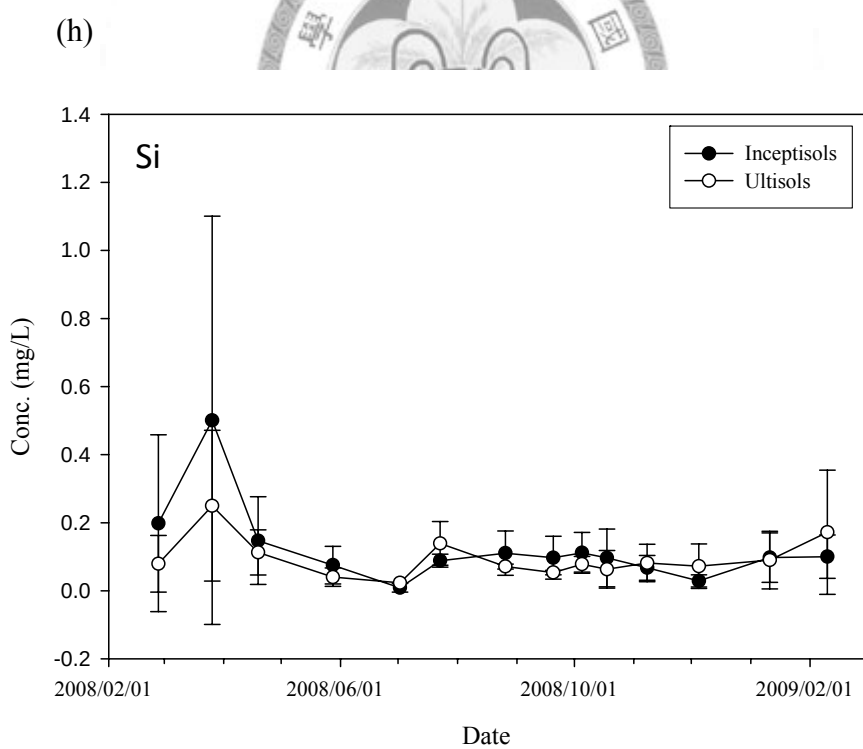
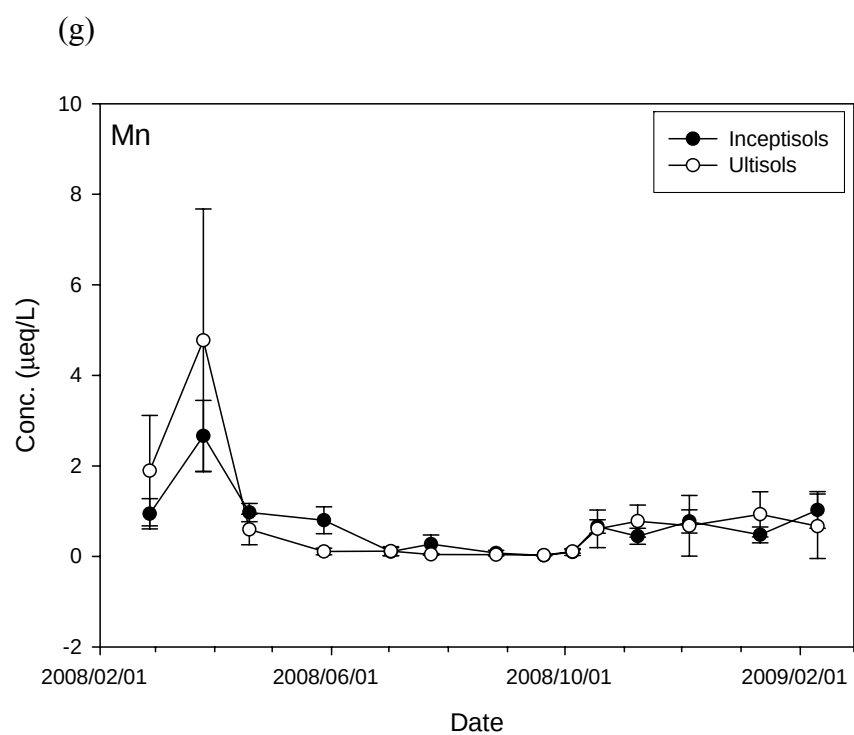


圖 14、(續)

Fig. 14. (continued)

(3) 陰離子與可溶性有機碳

本研究測定的陰離子項目有硝酸鹽、磷酸鹽、硫酸鹽及氯離子。磷酸鹽濃度在研究中皆低於儀器偵測極限，故不列入討論。

氯離子與硫酸鹽為穿落水中主要的陰離子 (圖 15 b 與 c)。氯離子濃度在研究中呈現與鈉離子相似的波動，主要由於研究地區鄰近海域的緣故，使得雨水中含有較高量的氯。

硝酸鹽與硫酸鹽被認為是人為排放酸性物質造成酸雨的主因。研究中穿落水中之硫酸鹽整體濃度略高於硝酸鹽。兩者在 2008 年三月皆有較高的濃度表現，硫酸鹽濃度達 180 $\mu\text{eq/L}$ ，硝酸鹽則為 60 $\mu\text{eq/L}$ 。

4.1.2. 地表逕流水 (surface runoff)

地表逕流水是收集自坡面流下的水分，該部分溶液主要來自穿落水，由於地形及降雨強度的關係，來不及入滲進土壤而使其中之養分未能進入土壤生態系中。

(1) pH 與電導度值

研究期間弱育土與極育土樣區穿落水的 pH 值隨時間的變化如圖 16 (a) 所示。從圖 16 (a) 看來，研究期間弱育土和極育土樣區穿落水的 pH 值範圍落在 3.5 到 6.0 之間。弱育土樣區 pH 值最高約為 6.0，最低測值為 3.5；極育土樣區 pH 值最高約在 5.2，最低測值為 3.6。由於已與地表接觸，其溶液 pH 值已與來源之穿落水略有差異。此部分溶液的 pH 值整體看來較穿落水略為提升，但溶液 pH 值大抵仍低於 5.0，顯示地表逕流水 pH 值主要仍受到穿落水的影響。

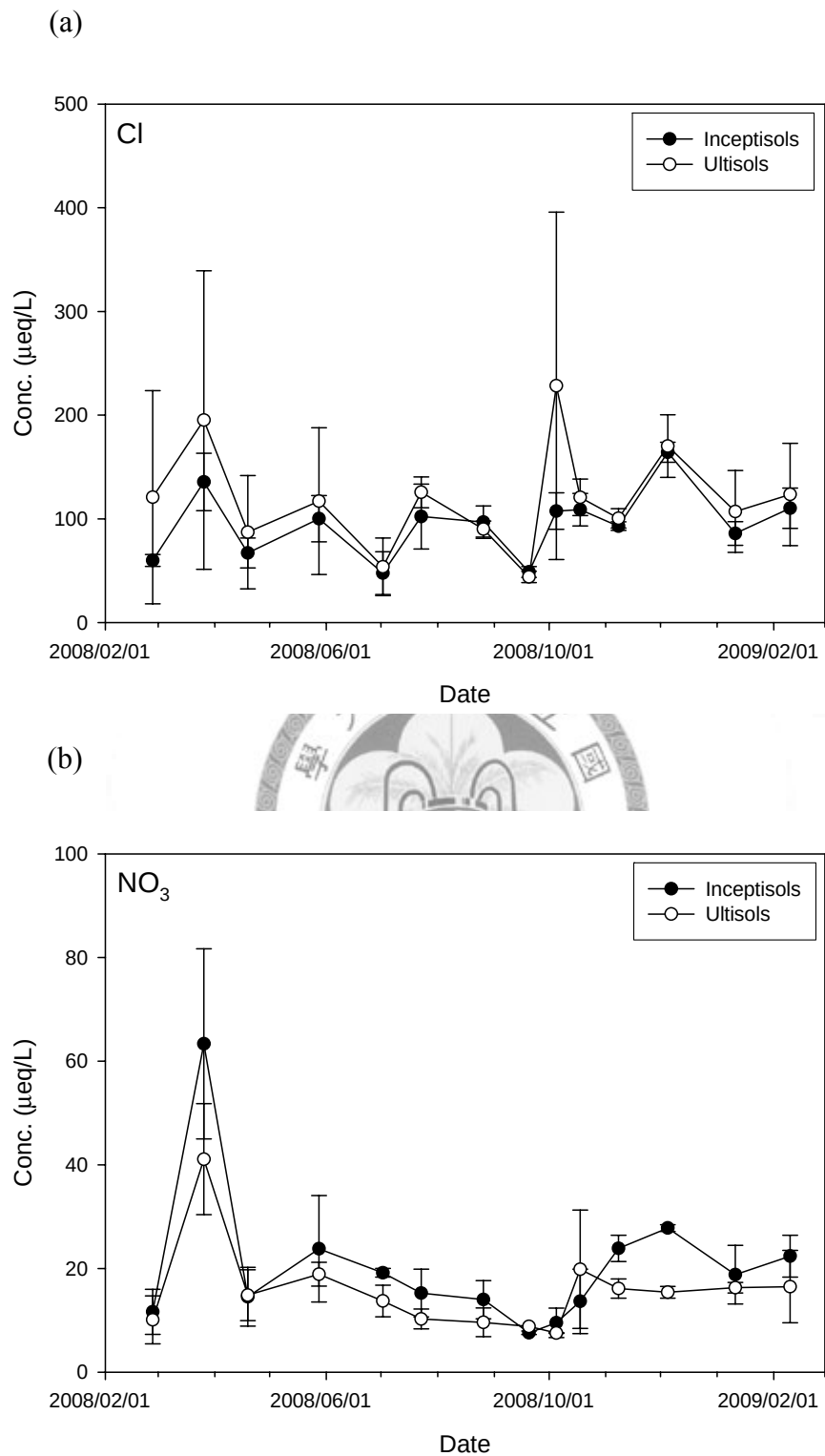
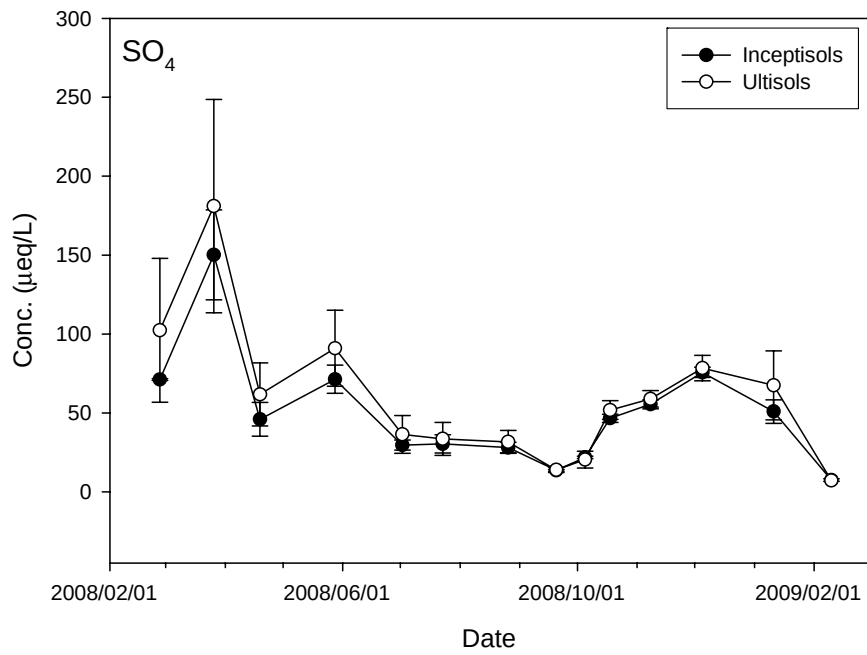


圖 15、兩研究區穿落水 (a) 氯、(b) 硝酸根、(c) 硫酸根與 (d) DOC 濃度隨時間的變化

Fig. 15. Dynamics of (a) chloride, (b) nitrate, (c) sulphate, and (d) DOC of throughfall in two study sites

(c)



(d)

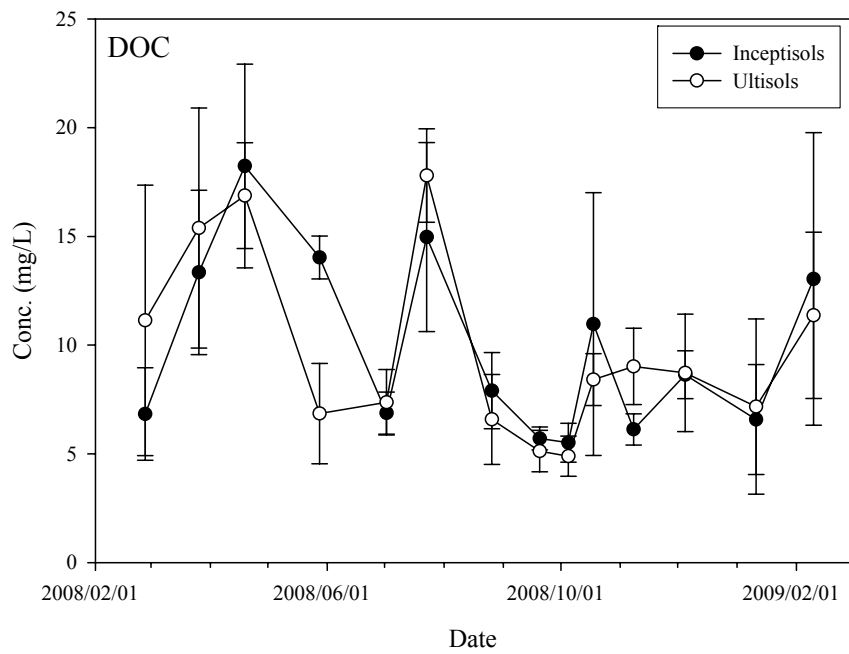
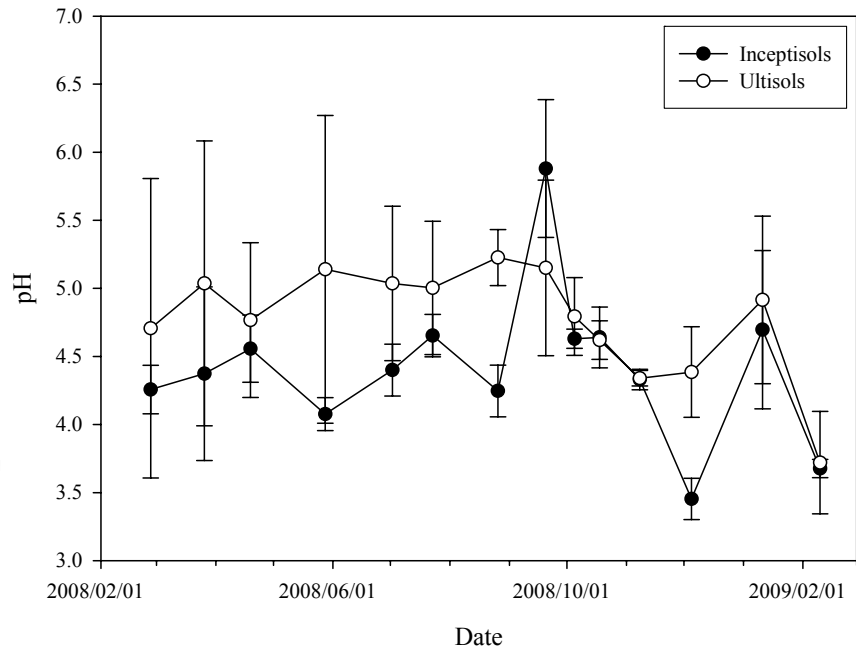


圖 15、(續)

Fig. 15. (continued)

(a)



(b)

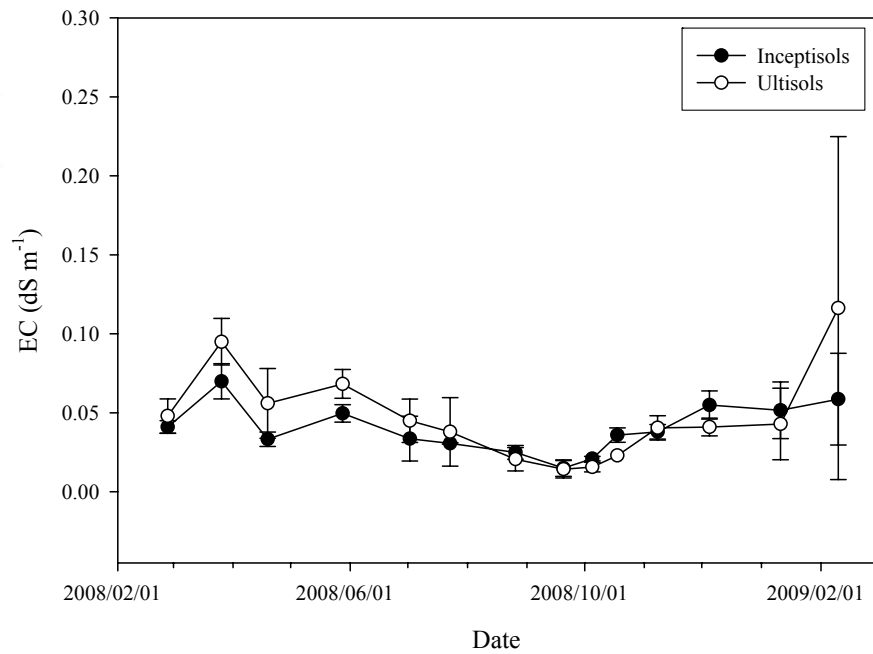


圖 16、兩研究區地表逕流水之 (a) pH 與 (b) 電導度

Fig. 16. Dynamics of (a) pH and (b) EC of surface runoff in two study sites

在電導度方面，其值隨時間的變化在極育土與弱育土樣區出現一致的趨勢。在穿落水與地表接觸之後，其濃度隨時間的變動幅度降低，且電導度值較穿落水為高，表示地表逕流水中可溶性鹽類含量多於穿落水，這也是造成溶液 pH 值高於穿落水的原因。研究期間穿落水電導度值約為 0.05 dS m^{-1} 。

(2) 陽離子

穿落水降至地面後，未進入土壤的部份形成了表面逕流。圖 17 顯示研究期間弱育土和極育土兩樣區地表逕流水的陽離子組成。鈉與鉀離子是地表逕流水中的優勢陽離子，鉀離子濃度略高於鈉離子。由研究結果整體看來，穿落水在與地表接觸之後，逕流水所含之元素濃度有高於穿落水的現象，可能是由於地表有機質層分解釋放出的養分溶於其中所致。有機物分解可提供森林土壤有機質及礦物質養分，經由植物吸收的養分會釋再度釋放至土壤環境中。鉀離子尤其明顯，比較鉀離子在穿落水與地表逕流水（圖 17 a）中之濃度顯示，鉀離子在地表逕流水中的濃度較穿落水為高。根據 Berg and Staaf (1987) 的研究指出，鉀是移動性最強的陽離子，在凋落物分解的初期，鉀就會快速被淋洗。凋落物分解的過程中，水分會加速釋出元素移動的速度。當雨水經由闊葉林樹冠層滴落地表，一部分入滲至土壤中，沒有進入土壤的水分屬於地表逕流水，這部份的水溶液流過地表枝葉層，使枯枝落葉及其它有機殘體經微生物分解作用所釋放出的養分溶於其中，這可能是造成地表逕流中鉀離子與其它元素離子濃度高於穿落水的原因。微量陽離子方面，不論是在穿落水或逕流水中，矽皆為微量元素中較佔優勢的元素，其來源可能是由土壤中豐富的含矽礦物風化所釋放。

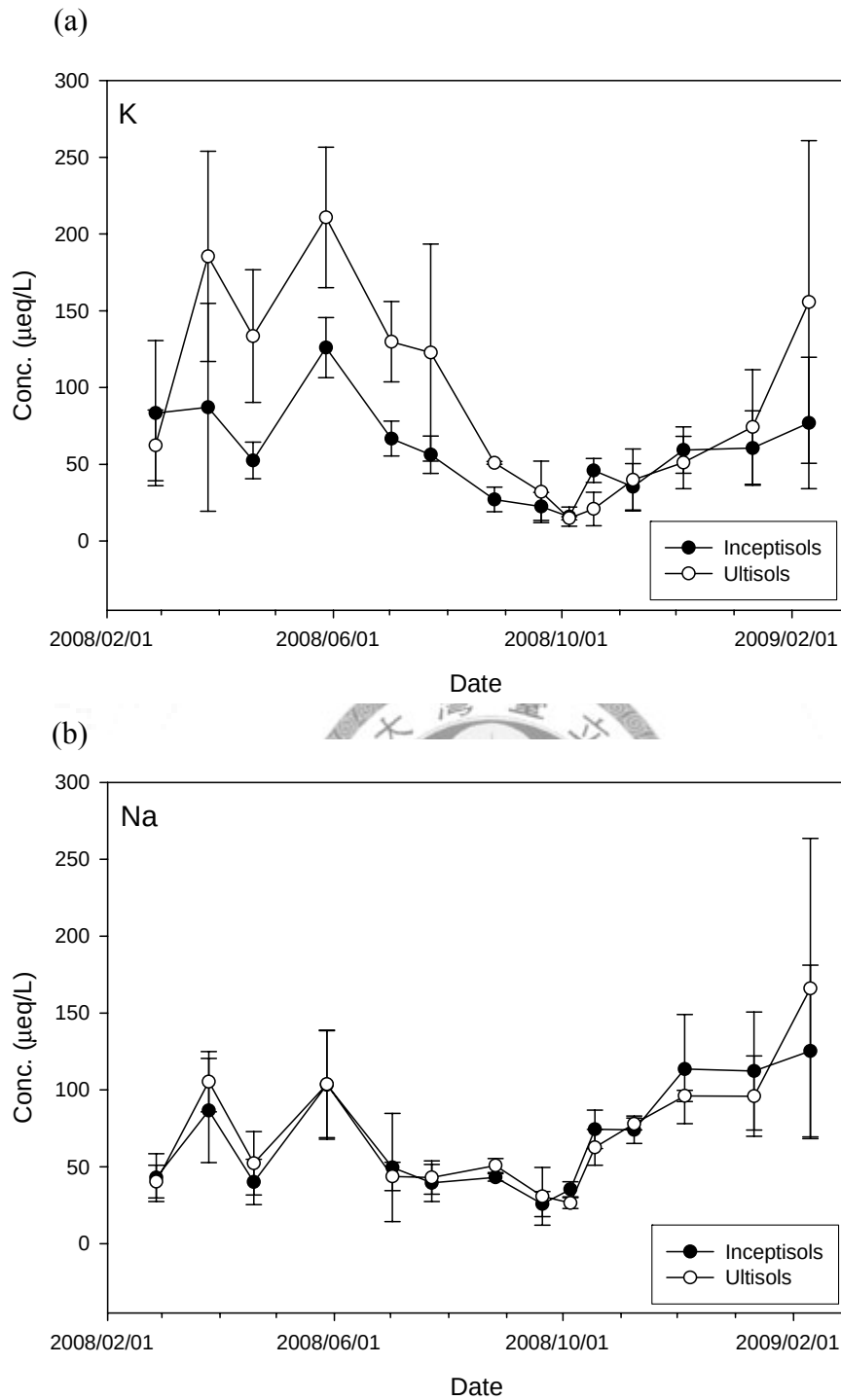


圖 17、兩研究區地表逕流水陽離子組成 (a) 鉀、(b) 鈉、(c) 鈣、(d) 鎂、
(e) 鐵、(f) 鋁、(g) 錳與 (h) 矽濃度隨時間的變化

Fig. 17. Dynamics of cation concentrations (a) potassium, (b) sodium,
(c) calcium, (d) magnesium, (e) iron, (f) aluminum, (g) manganese,
and (h) silicon of surface runoff in two study sites

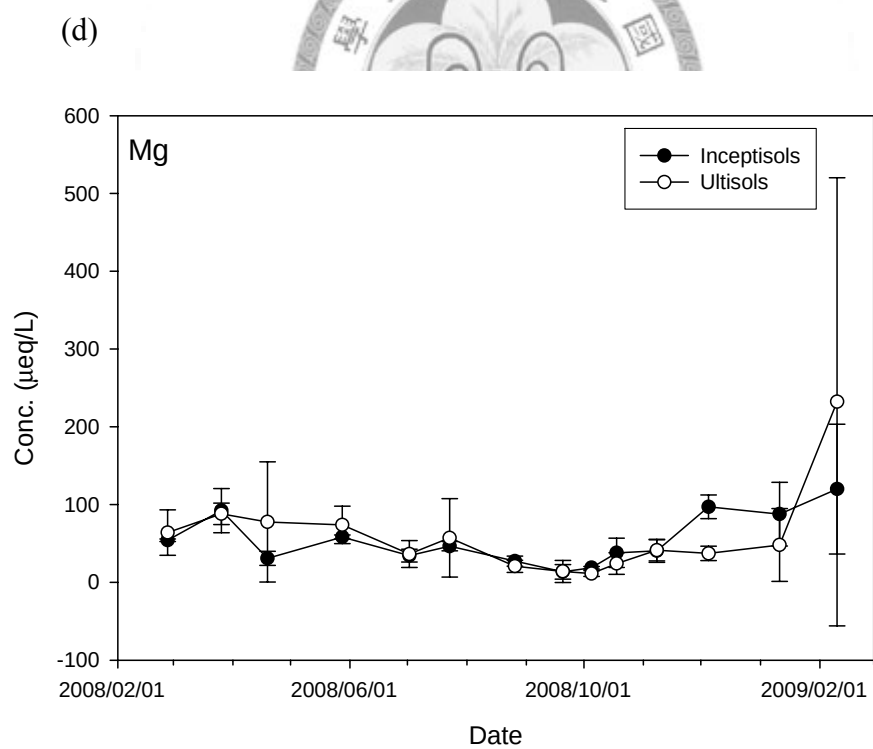
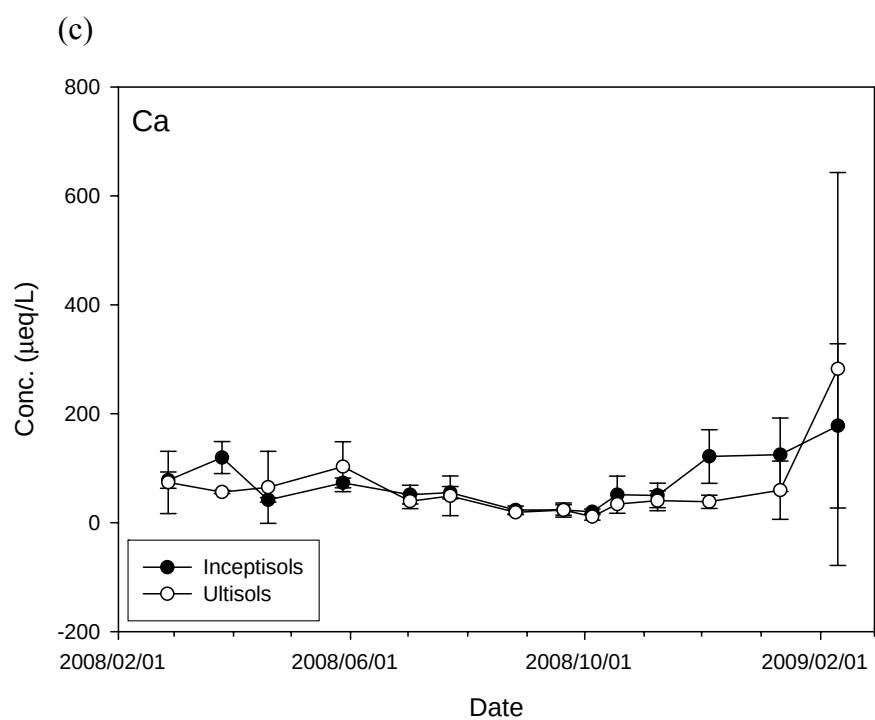
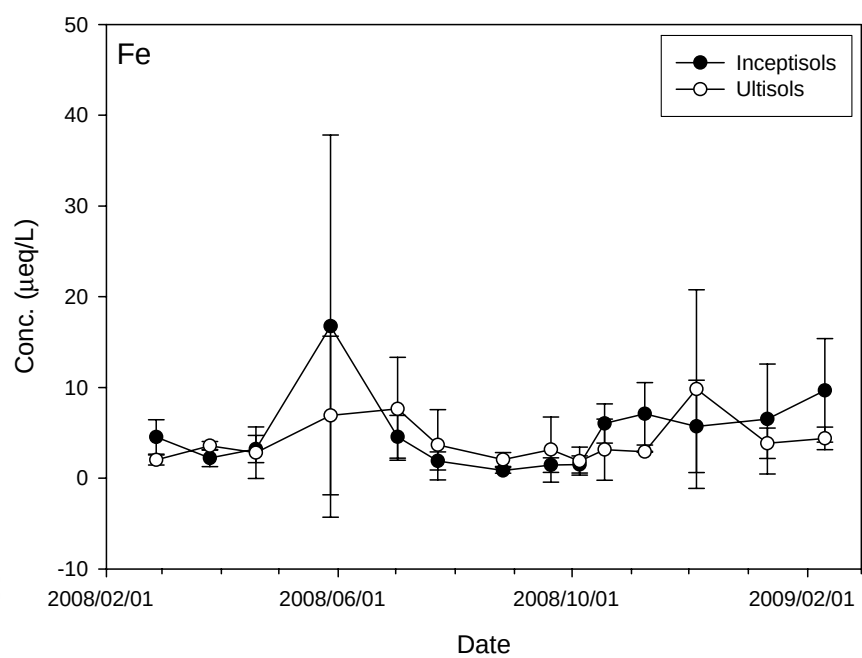


圖 17、(續)

Fig. 17. (continued)

(e)



(f)

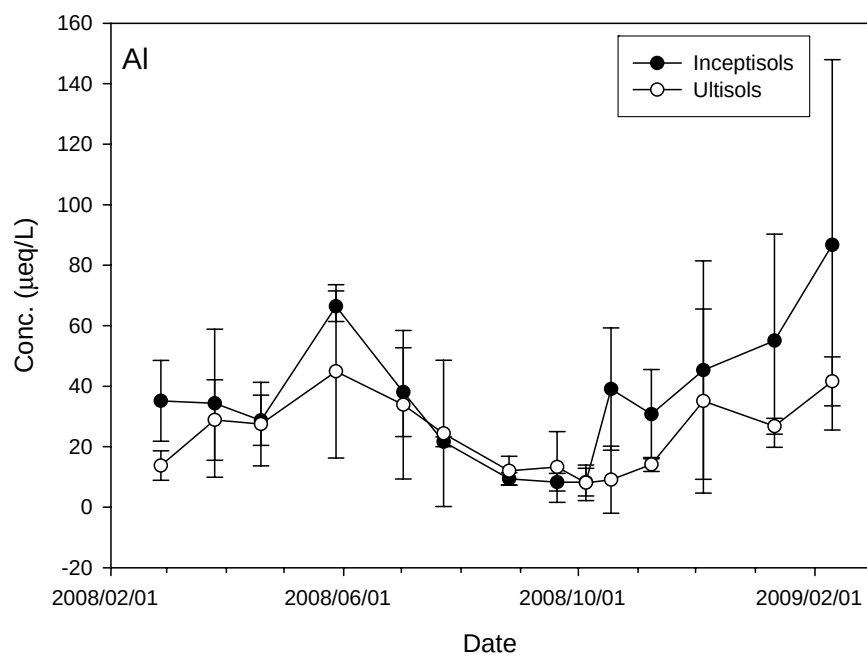
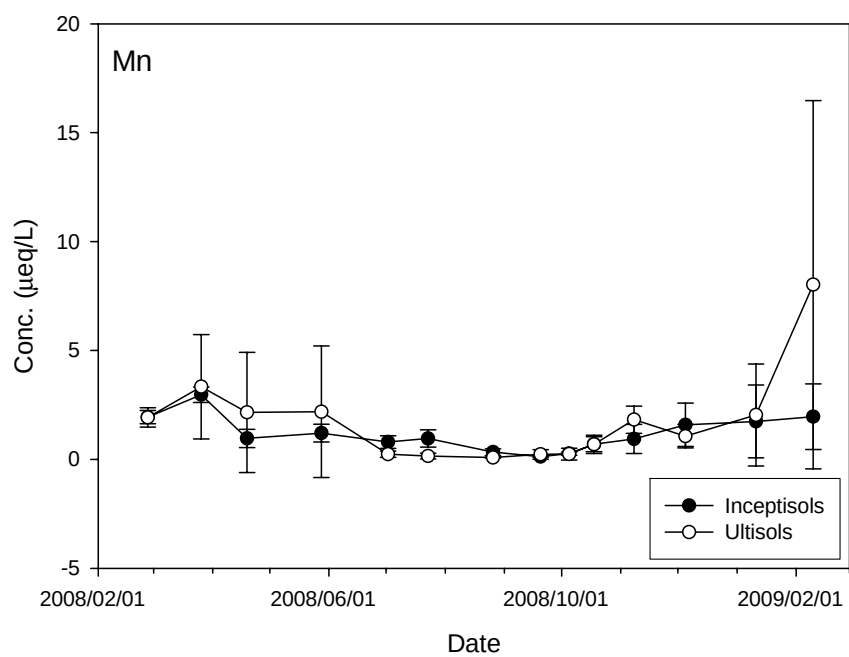


圖 17、(續)

Fig. 17. (continued)

(g)



(h)

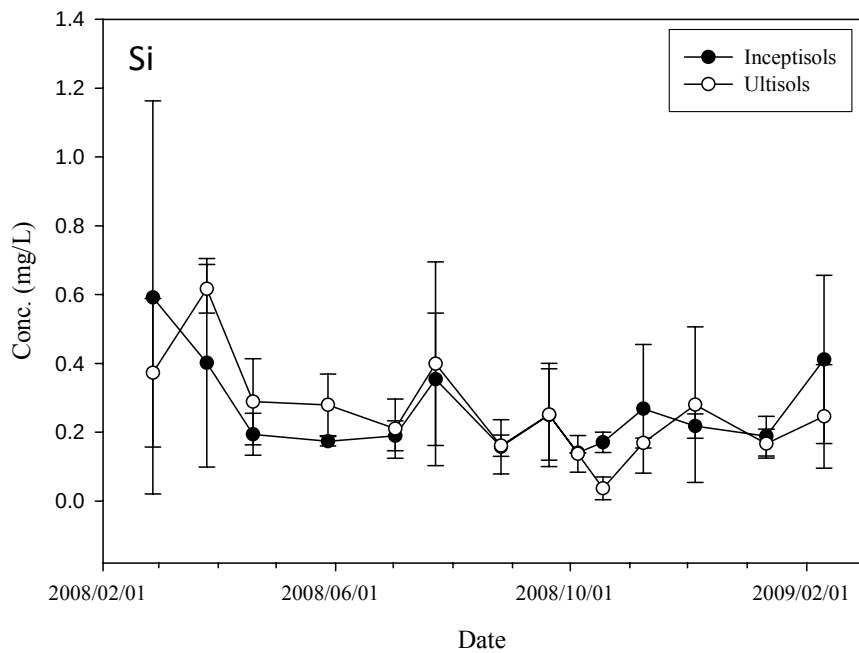


圖 17、(續)

Fig. 17. (continued)

(3) 陰離子與可溶性有機碳

地表逕流水之組成分主要受到穿落水的影響 (圖 18)。前人研究指出，在森林土壤中，地表枝葉層為可溶性有機碳的主要來源，其隨水分入滲進入土壤的過程是森林土壤碳循環 (Carbon cycle) 及補充土壤碳庫 (Carbon pool) 的重要途徑 (Michalzik et al., 2001; Scheel et al., 2008)。

4.1.3. 土壤溶液 (soil solution)

土壤在生態系中扮演緩衝環境劇烈變化、支持生物生長與元素循環的重要角色。森林土壤溶液的化學組成不僅受到土壤性質與植生的影響，大氣中化學物質沉降的影響在工業革命後也更為顯著，值得研究者持續關注森林面對此逆境所產生的改變。

(1) pH 與電導度值

土壤的 pH 值是對森林土壤而言是很重要的一項因子，因為它調控森林土壤養分循環、微量元素之有效性及土壤微生物活性，因此是評估土壤養分之重要因素。研究期間弱育土與極育土樣區 A 層與 B 層底端土壤溶液 pH 值隨時間的變化如圖 19 (a) 與圖 20 (a) 所示。弱育土和極育土樣區穿落水的 pH 值範圍落在 5.5 到 7.5 之間。弱育土樣區 pH 值最高約為 7.5，最低測值為 5.9；極育土樣區 pH 值最高約在 7，最低測值為 5.5。在穿落水入滲進入土壤之後，由滲漏水收集器於土壤層中所收集到的溶液 pH 值提高至接近中性，表示進入土壤的水分溶解了可溶性鹽基，造成溶液 pH 值的提高，此結果與前人研究結果相符 (林登秋，1997)。

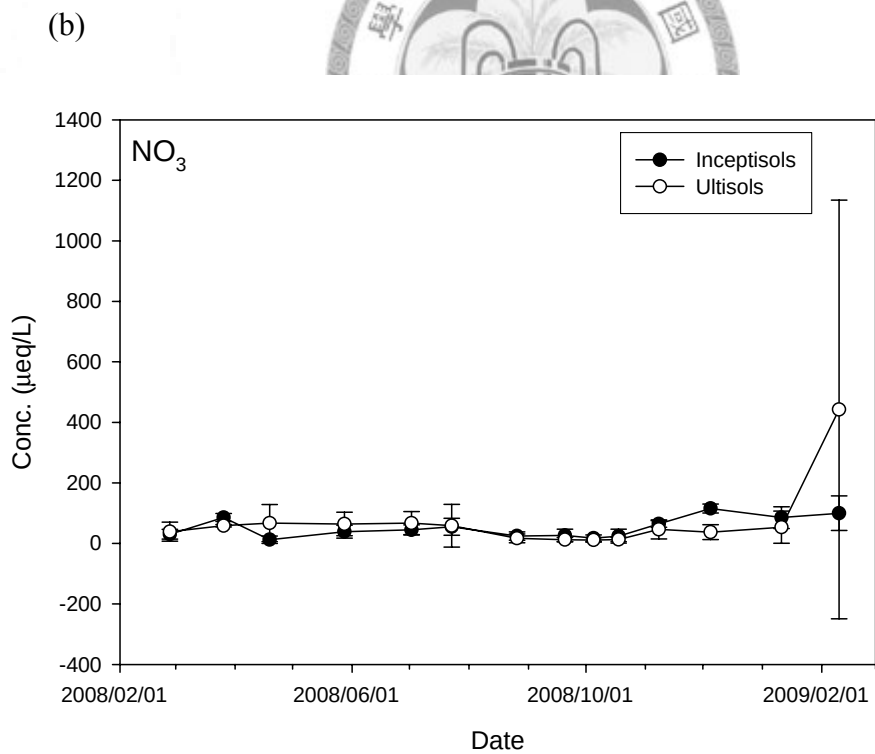
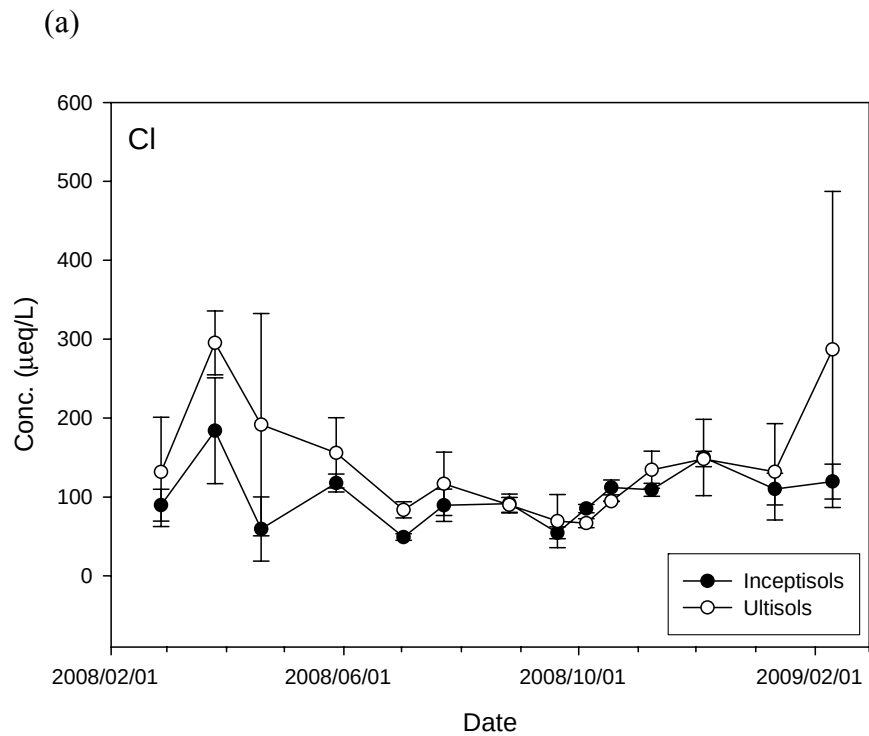
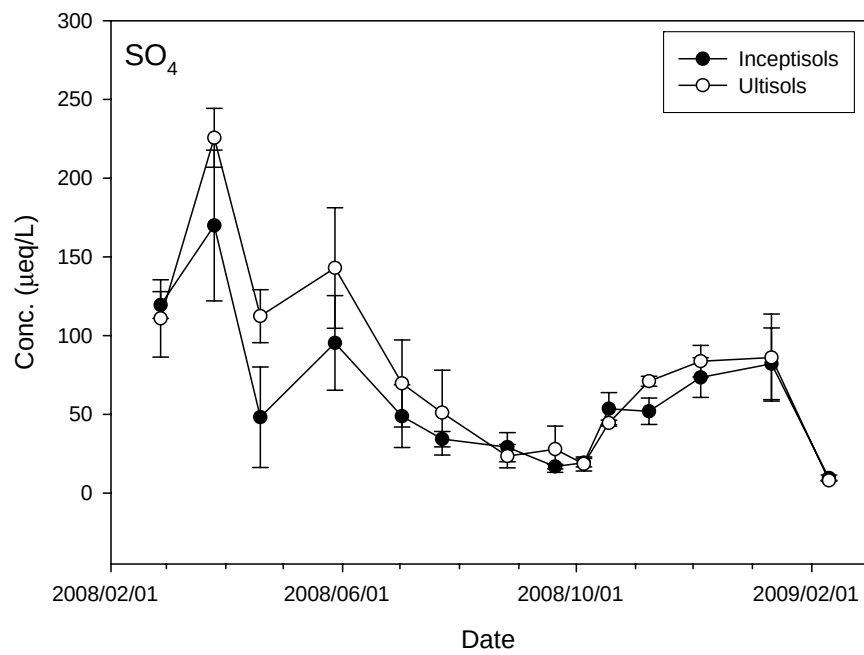


圖 18、兩研究區地表逕流水 (a) 氯、(b) 硝酸根、(c) 硫酸根與 (d) DOC 濃度隨時間的變化

Fig. 18. Dynamics of (a) chloride, (b) nitrate, (c) sulphate, and (d) DOC of surface runoff in two study sites

(c)



(d)

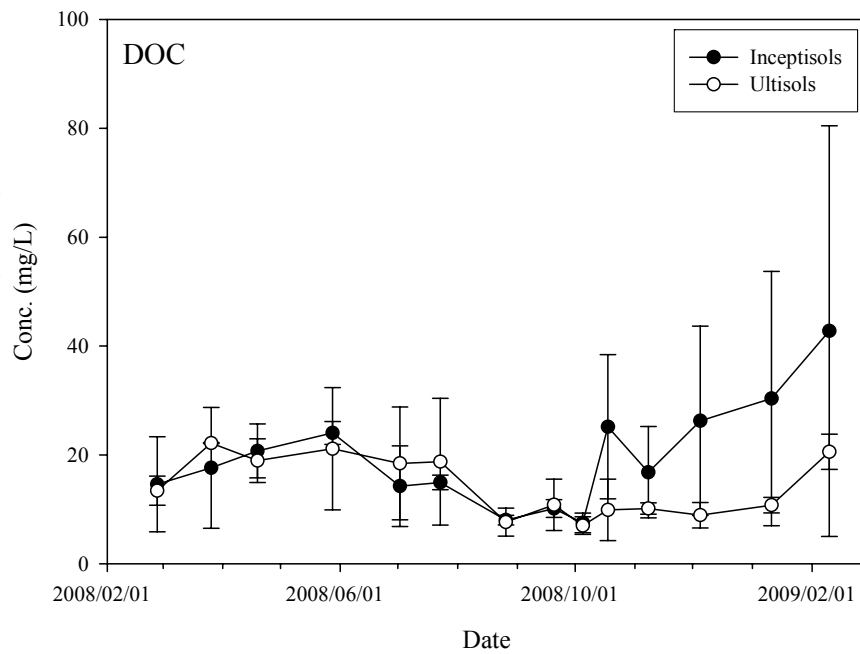
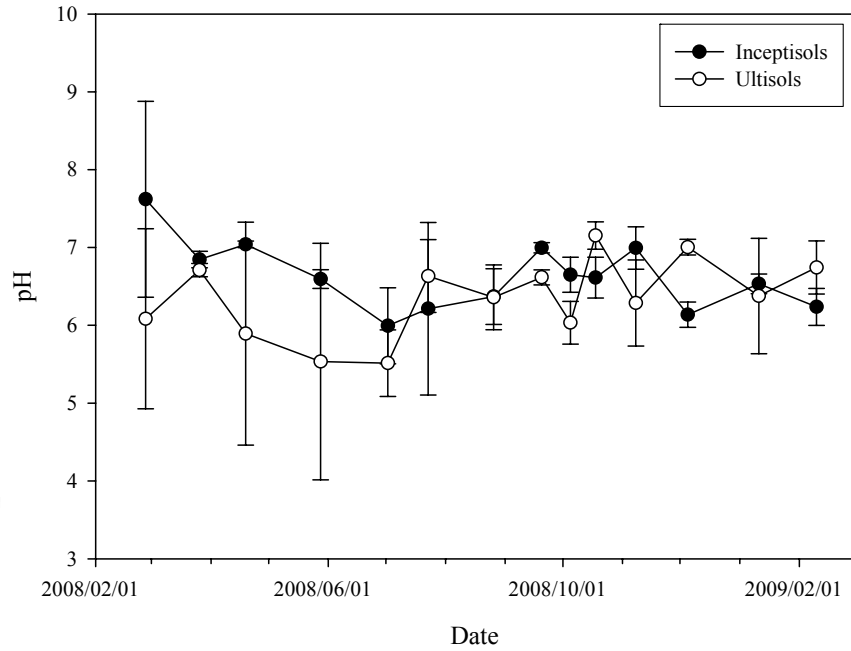


圖 18、(續)

Fig. 18. (continued)

(a)



(b)

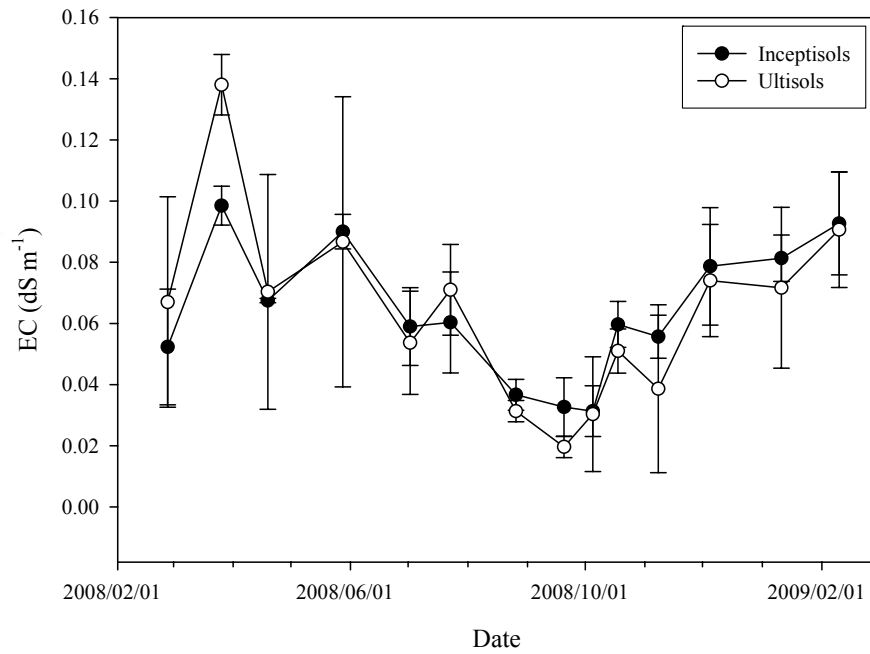


圖 19、兩研究區 A 層土壤溶液之 (a) pH 與 (b) 電導度

Fig. 19. Dynamics of (a) pH and (b) EC of soil solution at A horizon in two study sites

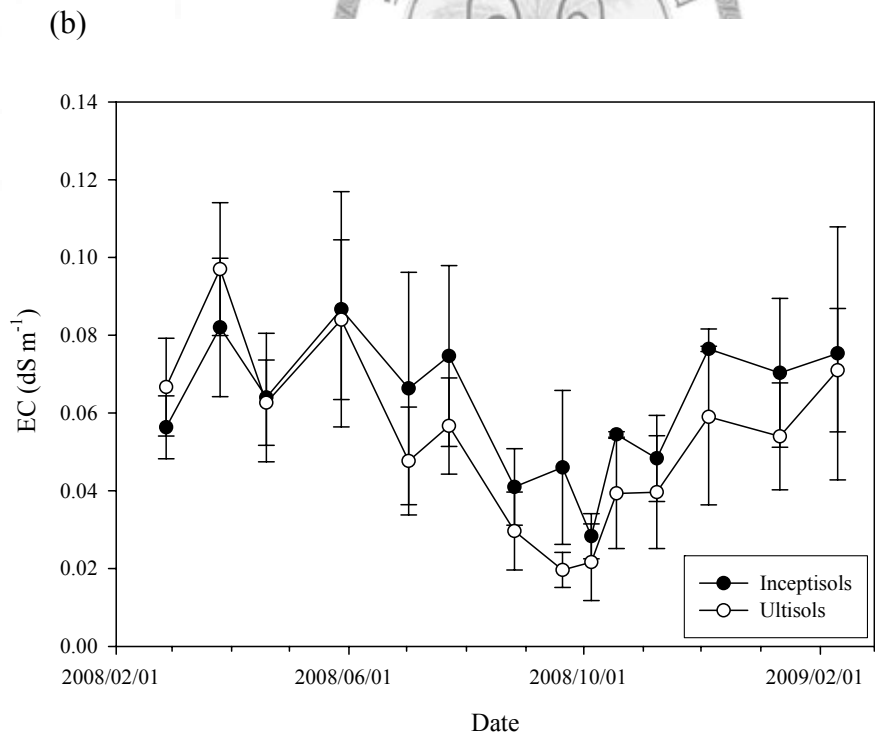
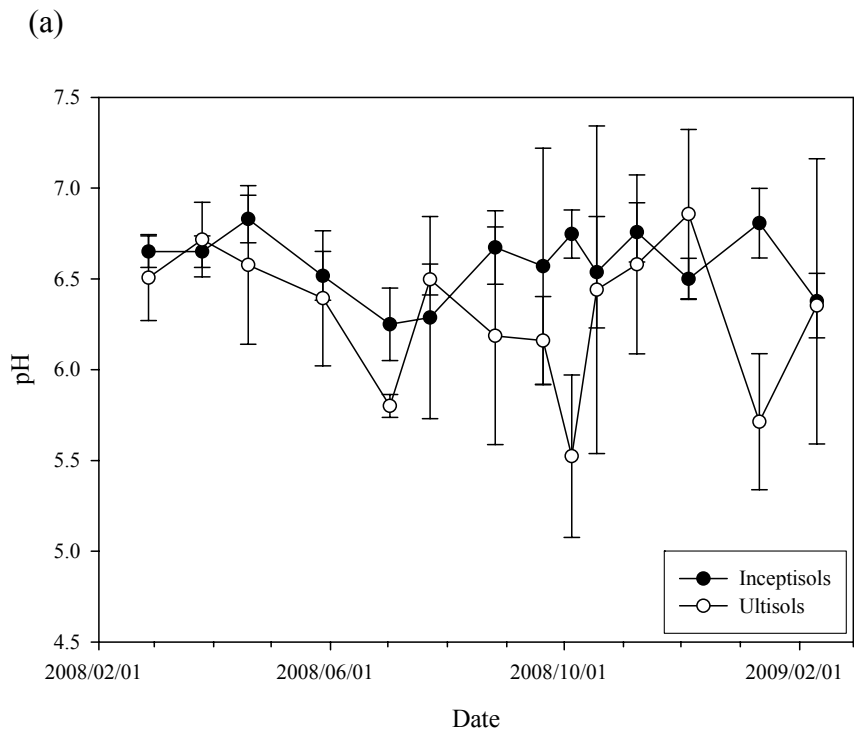


圖 20、兩研究區 B 層底端土壤溶液之 (a) pH 與 (b) 電導度

Fig. 20. Dynamics of (a) pH and (b) EC of soil solution at the bottom of B horizon in two study sites

土壤溶液中特定元素含量的多寡受到母質及該元素溶解度的大小影響，植物根所分泌的有機酸也有促進礦質養分溶解進入土壤溶液的作用。土壤中可溶性鹽類為植物生長所需之養分，可溶性鹽類含量愈多，則電阻越小，導電度越高，因此導電度的大小可以做為土壤溶液中可溶性鹽類含量多寡的指標。一般來說，當土壤溶液的導電度值高於 2 dS m^{-1} 時，就可能會造成某些對鹽害敏感植物生長的逆境，土壤溶液中過高的可溶性鹽類會降低溶液的滲透壓，使植物根部難以吸收水分。研究中觀察到土壤溶液的 pH 皆有高於穿落水與地表逕流水的現象，應為鹽基溶解的關係，因此土壤溶液的 EC 值亦高於穿落水與地表逕流水。

(2) 陽離子

在森林生態系統中，有了水做為媒介，養分得以在生態系中移動與傳輸，在土壤與植物間形成動態的循環。動植物等有機體死亡之後，殘體經由微生物的分解，其所含之養分將能再度釋放至土壤中供給植物生長利用。在福山樣區剖面中，土壤 A 層上覆一層主要由凋落物構成的有機質層。根據張至懿 (2008) 在福山所進行的凋落物研究指出，落葉是凋落物組成中所佔比例最高的成分，經由微生物的分解作用，植物自土壤吸收並同化的養分會再度釋放至土壤環境當中。降雨的作用可加速養分的移動，進入到根圈範圍的養分離子有助於植物的吸收，部分的離子則可能經由地表逕流或繼續向土壤底層滲漏而淋洗流失。

在土壤生態系中，鈣、鎂及鉀離子是土壤溶液中主要的可溶性鹽類，也是植物生長所需的巨量營養要素。圖 21 與圖 22 是研究期間弱育土和極育土兩樣區中，由滲漏水收集器在土壤中所收得土壤溶液的各項陽離子濃度隨時間的變化。鈣與鎂是土壤溶液中較佔優勢的陽離子，鈣是鹽基陽離子中濃度最高的，濃度最高達 $900 \mu\text{eq/L}$ ，鎂離子濃度最高則有 $200 \mu\text{eq/L}$ 。

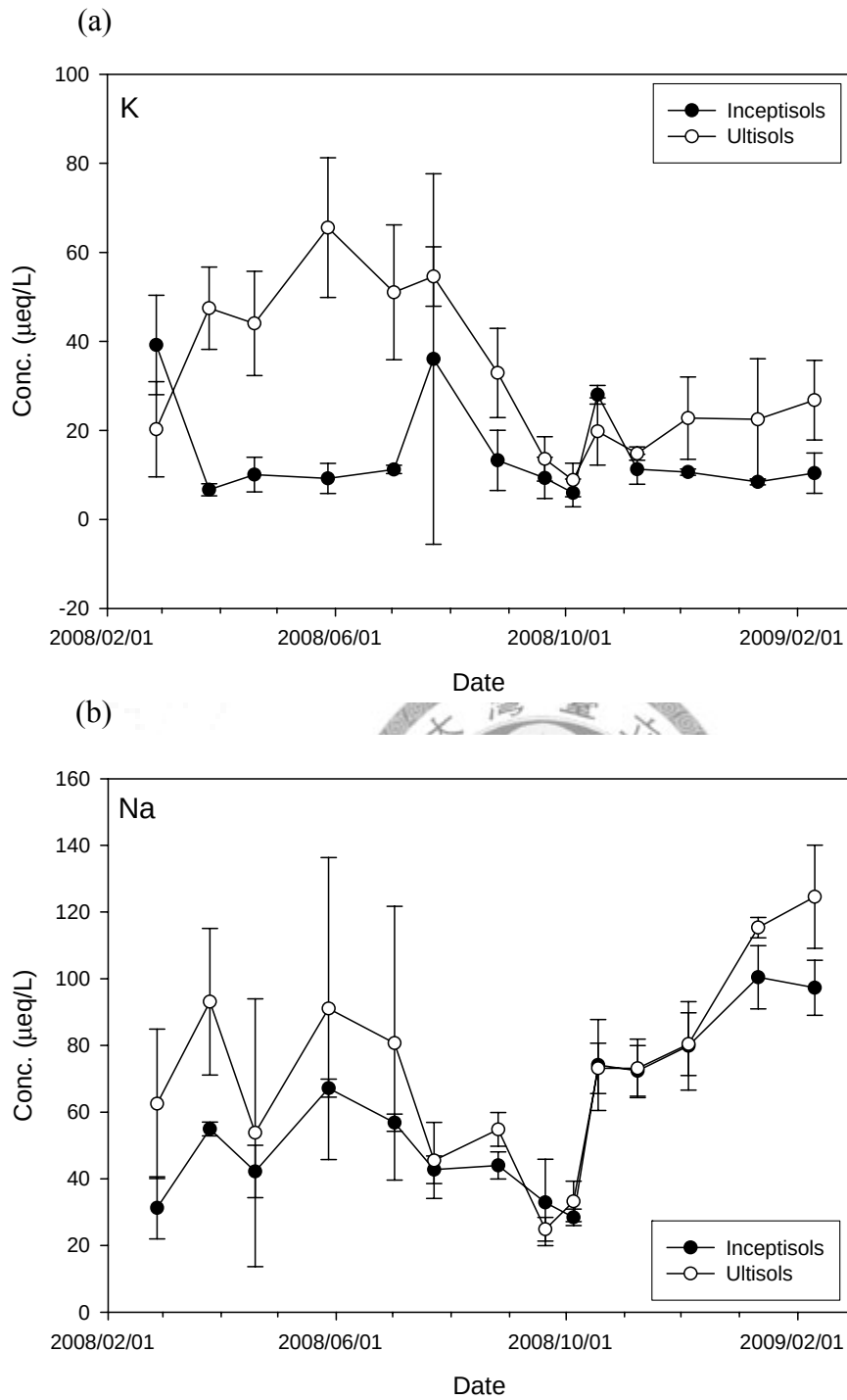
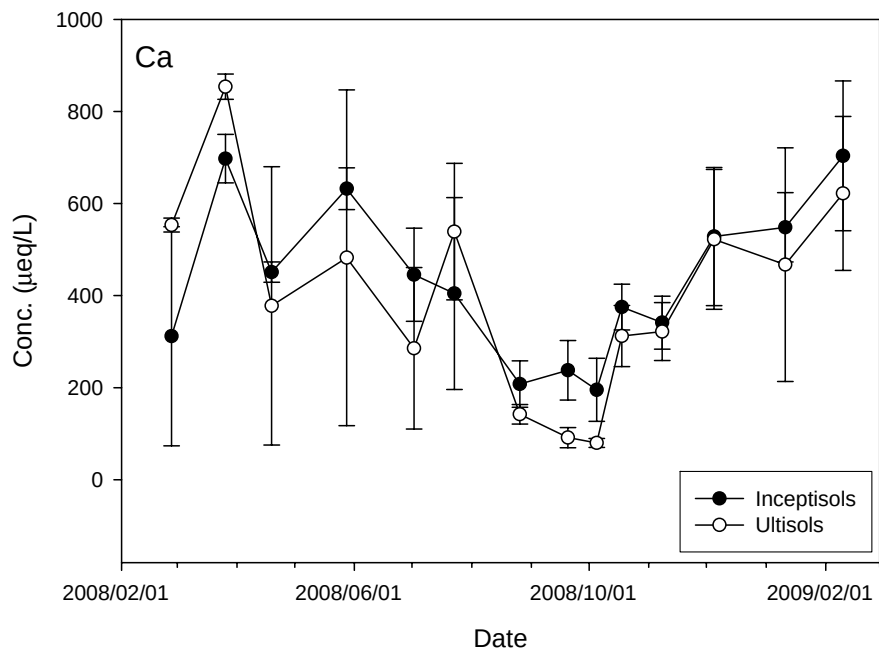


圖 21、兩研究區 A 層土壤溶液陽離子組成 (a) 鉀、(b) 鈉、(c) 鈣、(d) 鎂、
(e) 鐵、(f) 鋁、(g) 錳與 (h) 矽濃度隨時間的變化

Fig. 21. Dynamics of cation concentrations (a) potassium, (b) sodium, (c) calcium, (d) magnesium, (e) iron, (f) aluminum, (g) manganese, and (h) silicon of soil solution at A horizon in two study sites

(c)



(d)

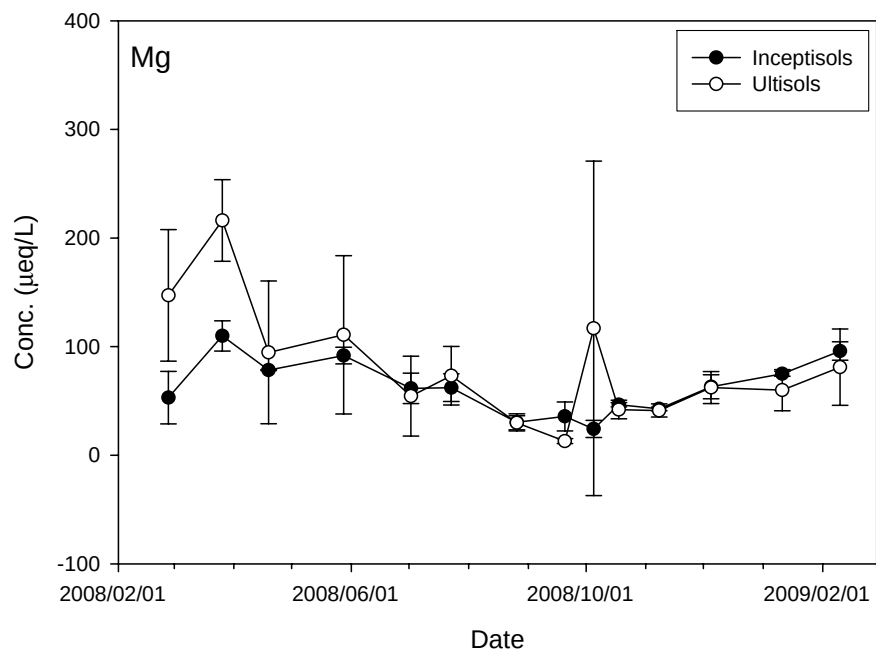
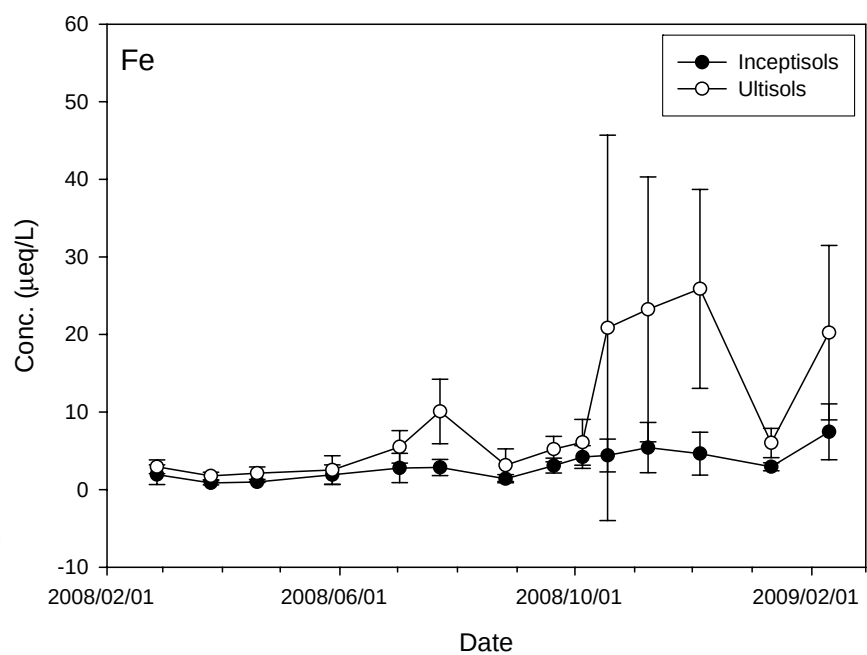


圖 21、(續)

Fig. 21. (continued)

(e)



(f)

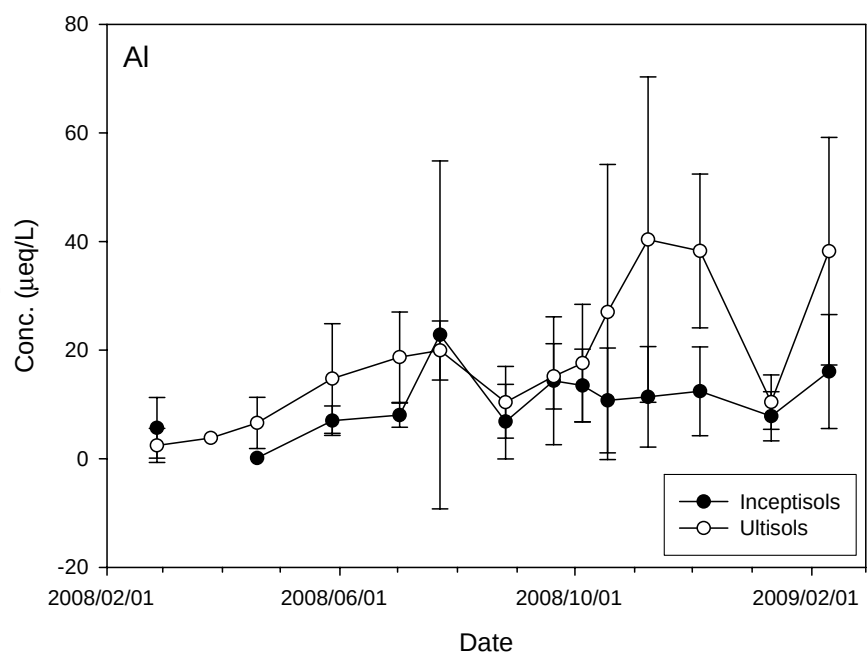
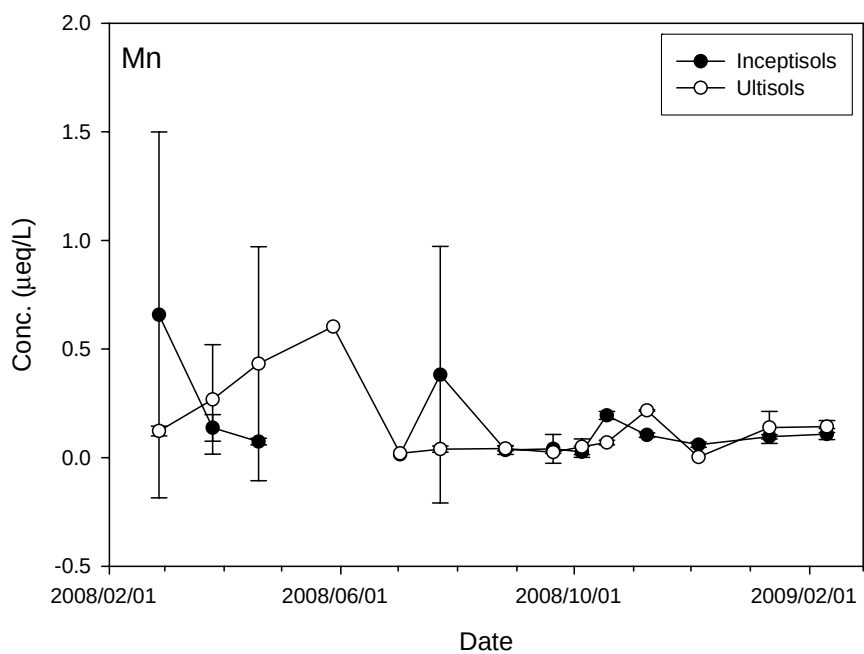


圖 21、(續)

Fig. 21. (continued)

(g)



(h)

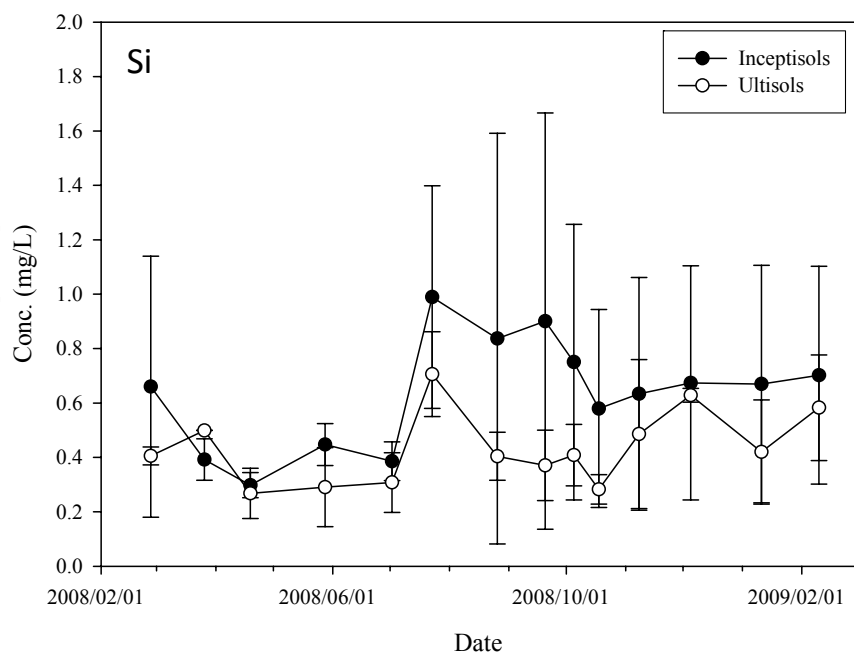


圖 21、(續)

Fig. 21. (continued)

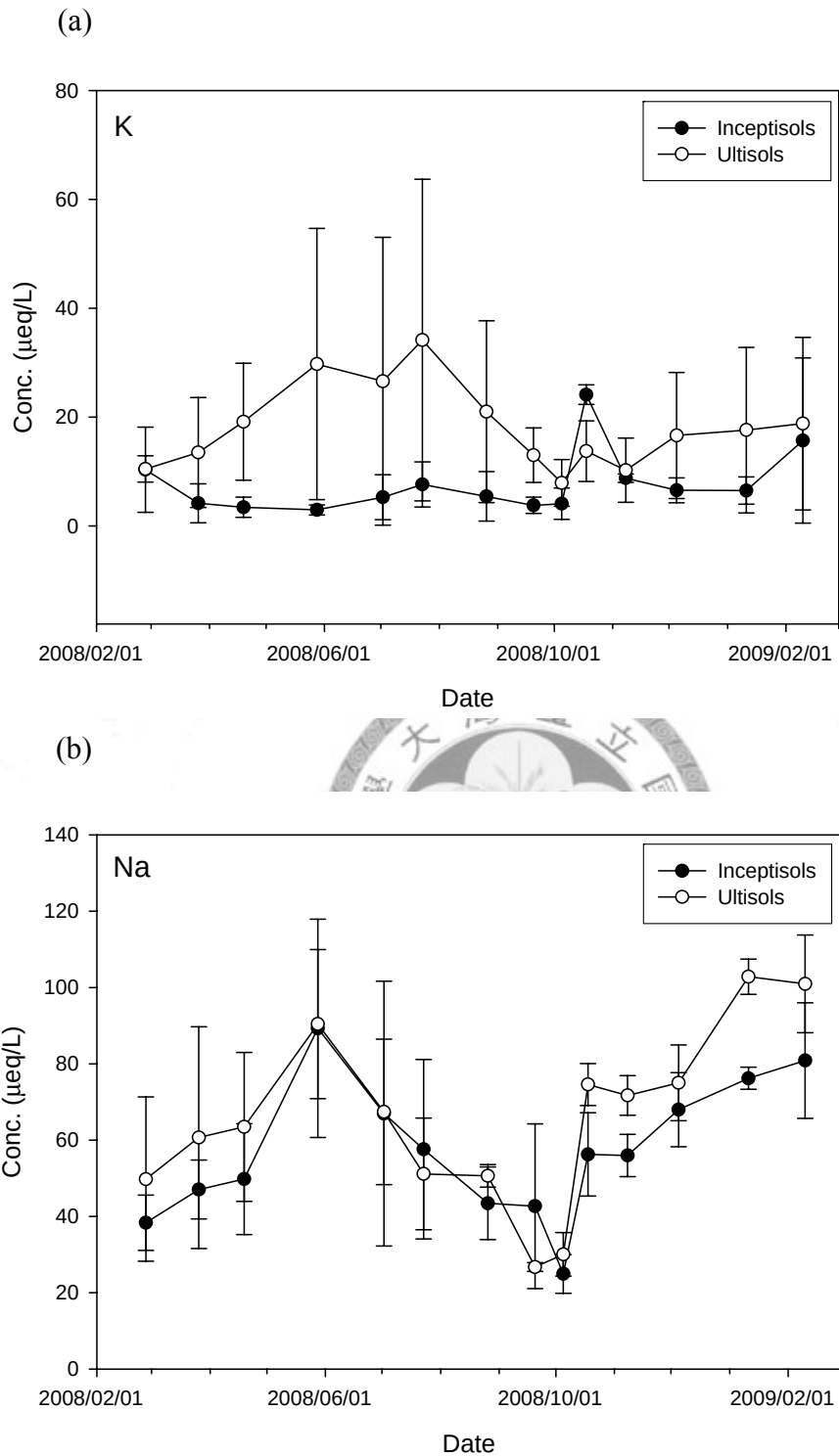
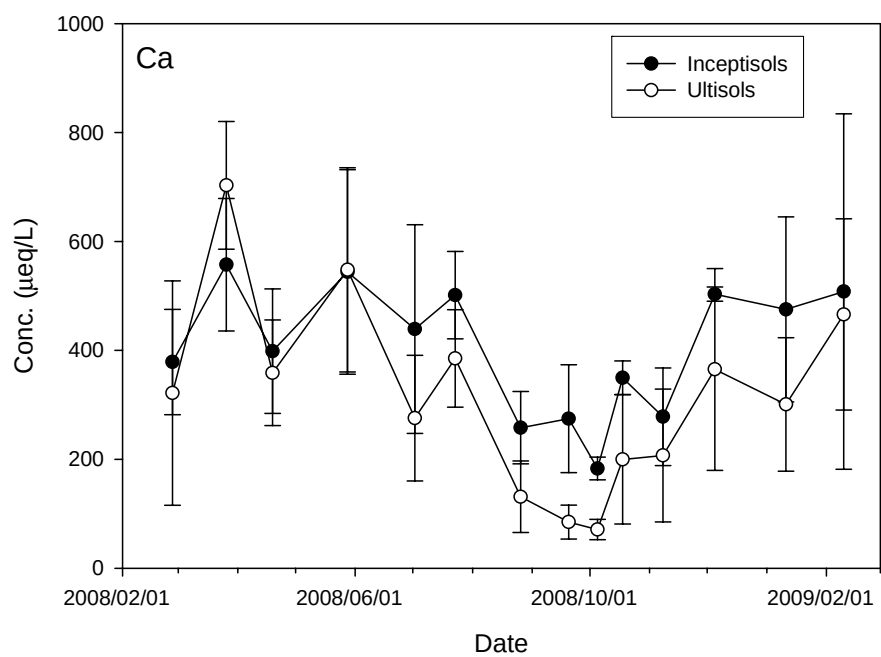


圖 22、兩研究區 B 層底端土壤溶液陽離子組成 (a) 鉀、(b) 鈉、(c) 鈣、
(d) 鎂、(e) 鐵、(f) 鋁、(g) 錳與 (h) 矽濃度隨時間的變化

Fig. 22. Dynamics of cation concentrations (a) potassium, (b) sodium, (c) calcium, (d) magnesium, (e) iron, (f) aluminum, (g) manganese, and (h) silicon of soil solution at the bottom of B horizon in two study sites

(c)



(d)

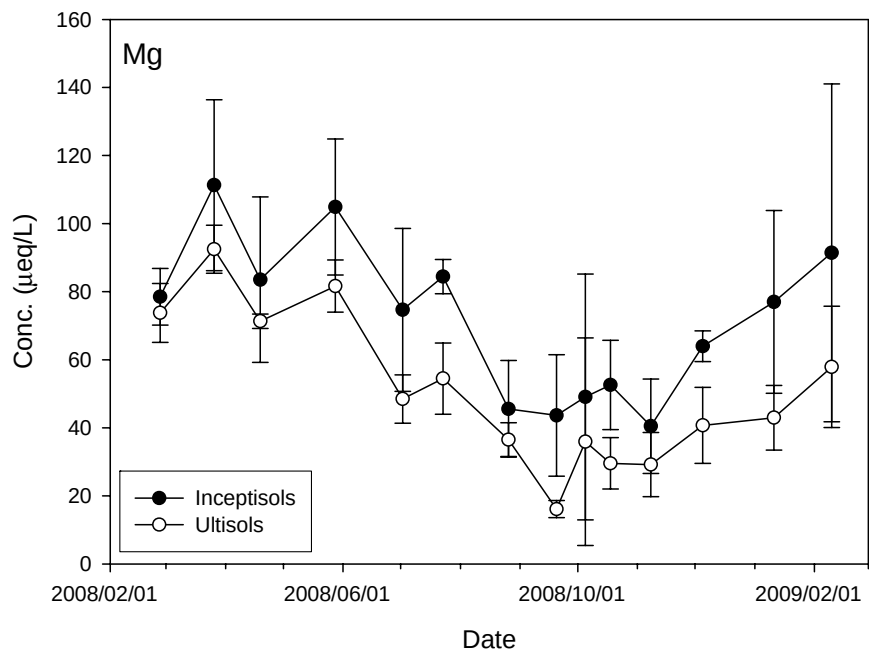
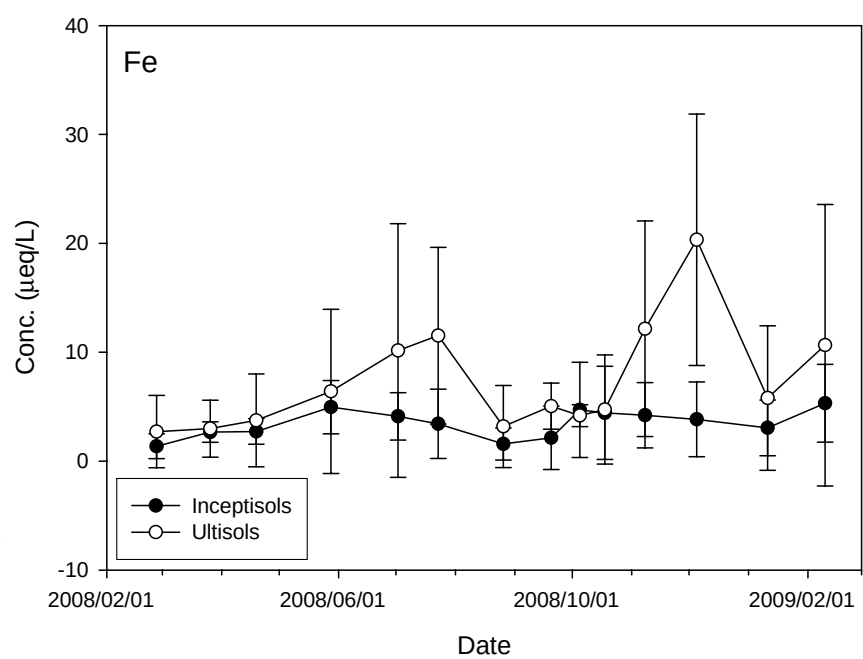


圖 22、(續)

Fig. 22. (continued)

(e)



(f)

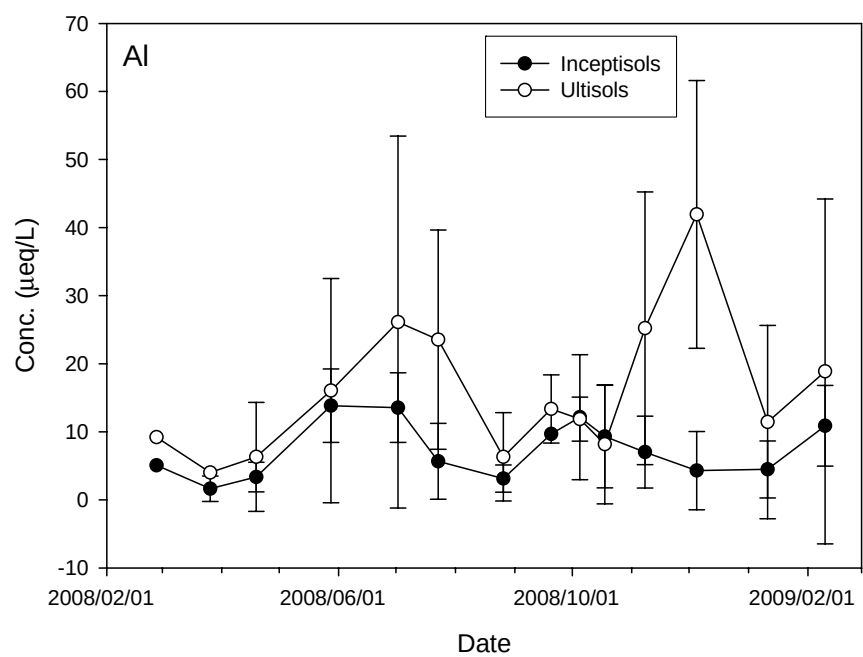
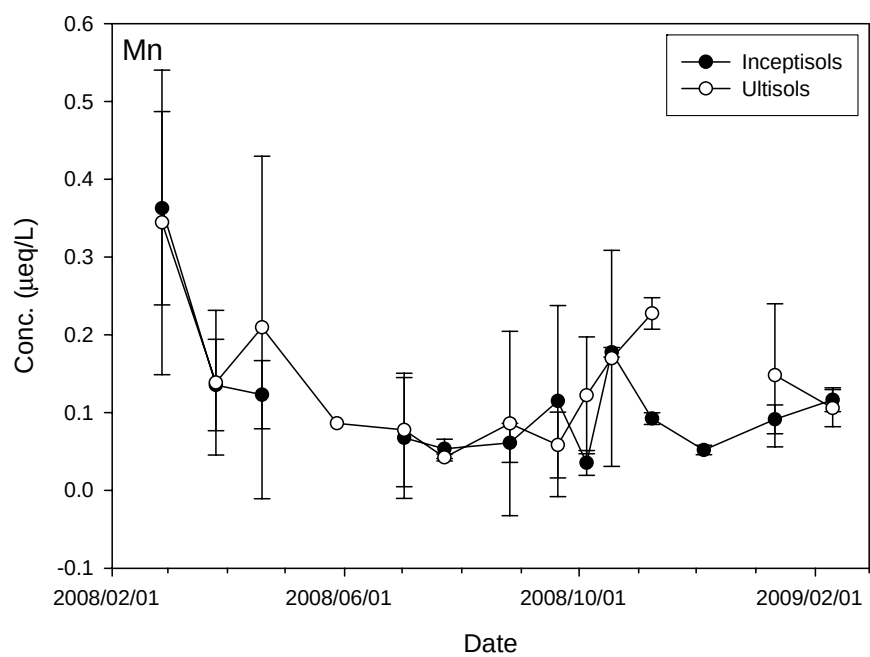


圖 22、(續)

Fig. 22. (continued)

(g)



(h)

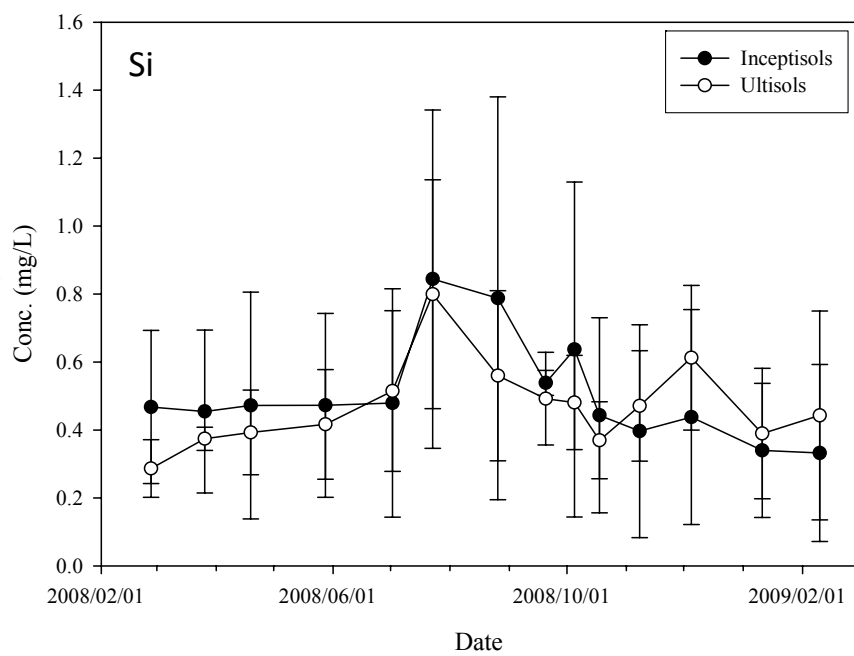


圖 22、(續)

Fig. 22. (continued)

(3) 陰離子與可溶性有機碳

圖 23、24 為土壤溶液中氯離子、硝酸態氮硫酸鹽組成及可溶性有機碳濃度隨時間的動態變化。土壤中富含帶有負電荷之層狀矽酸鹽礦物及有機質的官能基，由於陰離子在土壤表面的吸持僅能以靜電吸引力的方式吸附在土壤粒子的表面上，陰離子隨水分在土壤層中移動時常無法有效的被土壤粒子吸持，甚至被水淋洗至母質層以下，無法為植物所吸收利用。



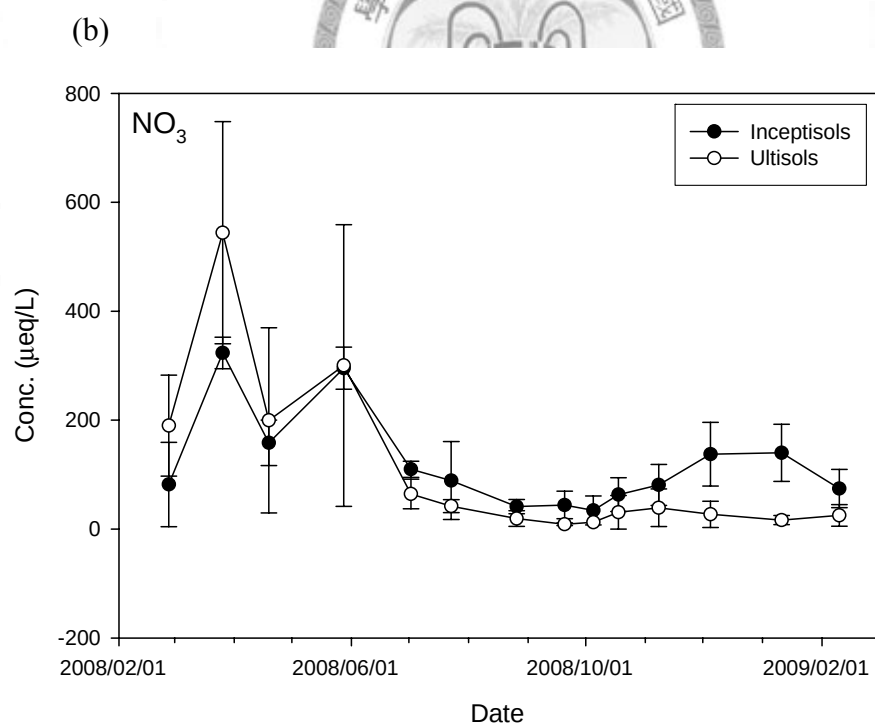
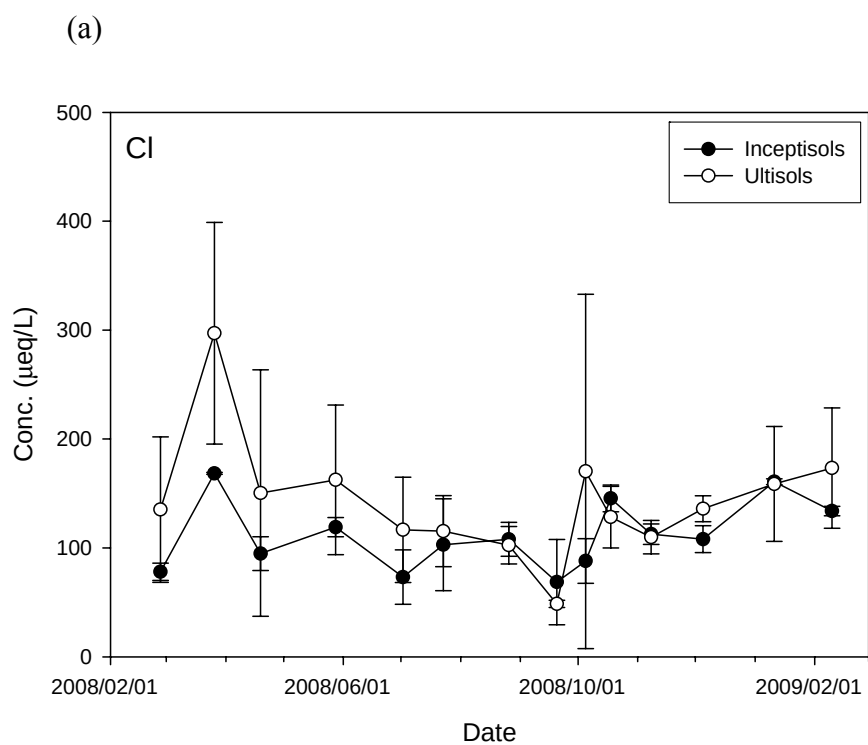
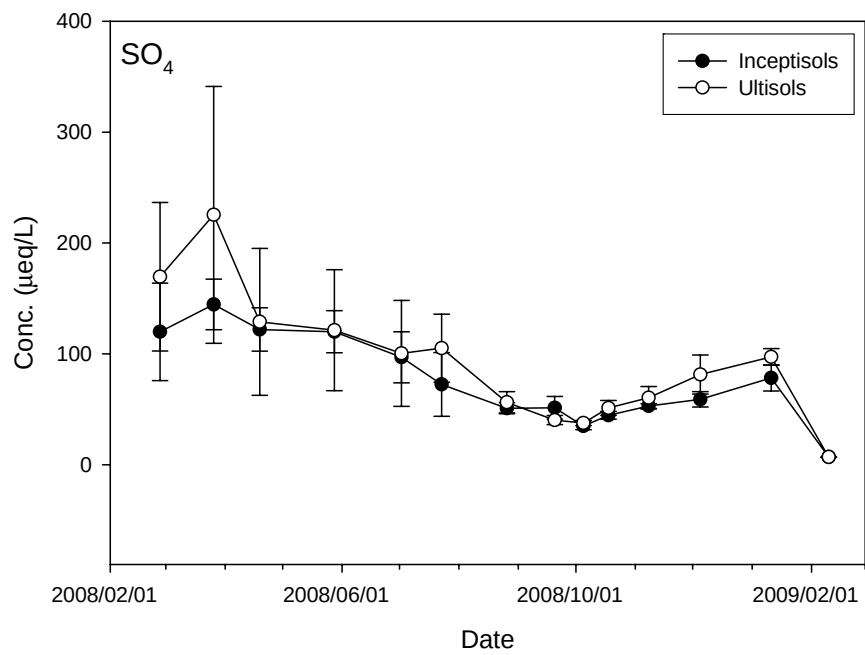


圖 23、兩研究區 A 層土壤溶液 (a) 氯、(b) 硝酸根、(c) 硫酸根與 (d) DOC 濃度隨時間的變化

Fig. 23. Dynamics of (a) chloride, (b) nitrate, (c) sulphate, and (d) DOC of soil solution at A horizon in two study sites

(c)



(d)

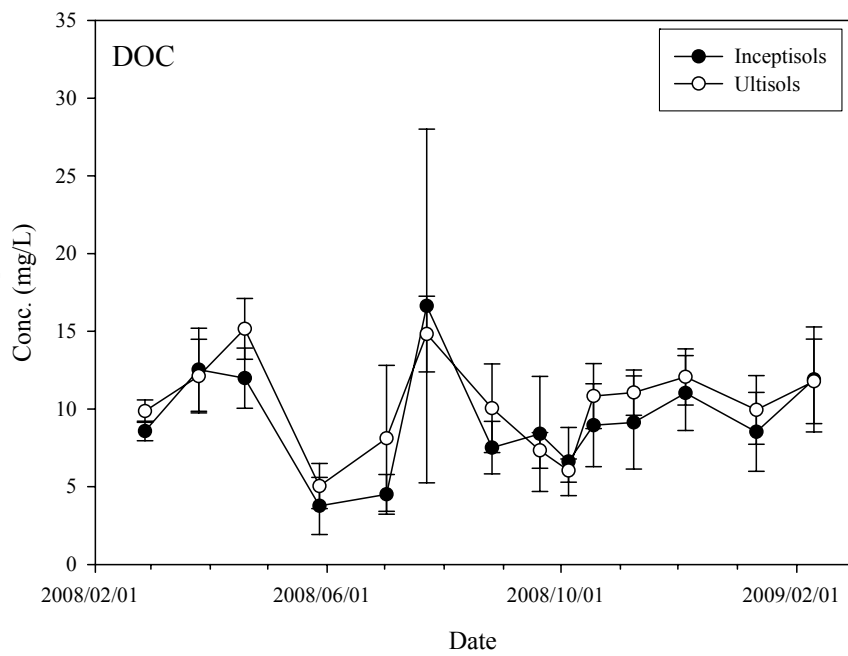


圖 23、(續)

Fig. 23. (continued)

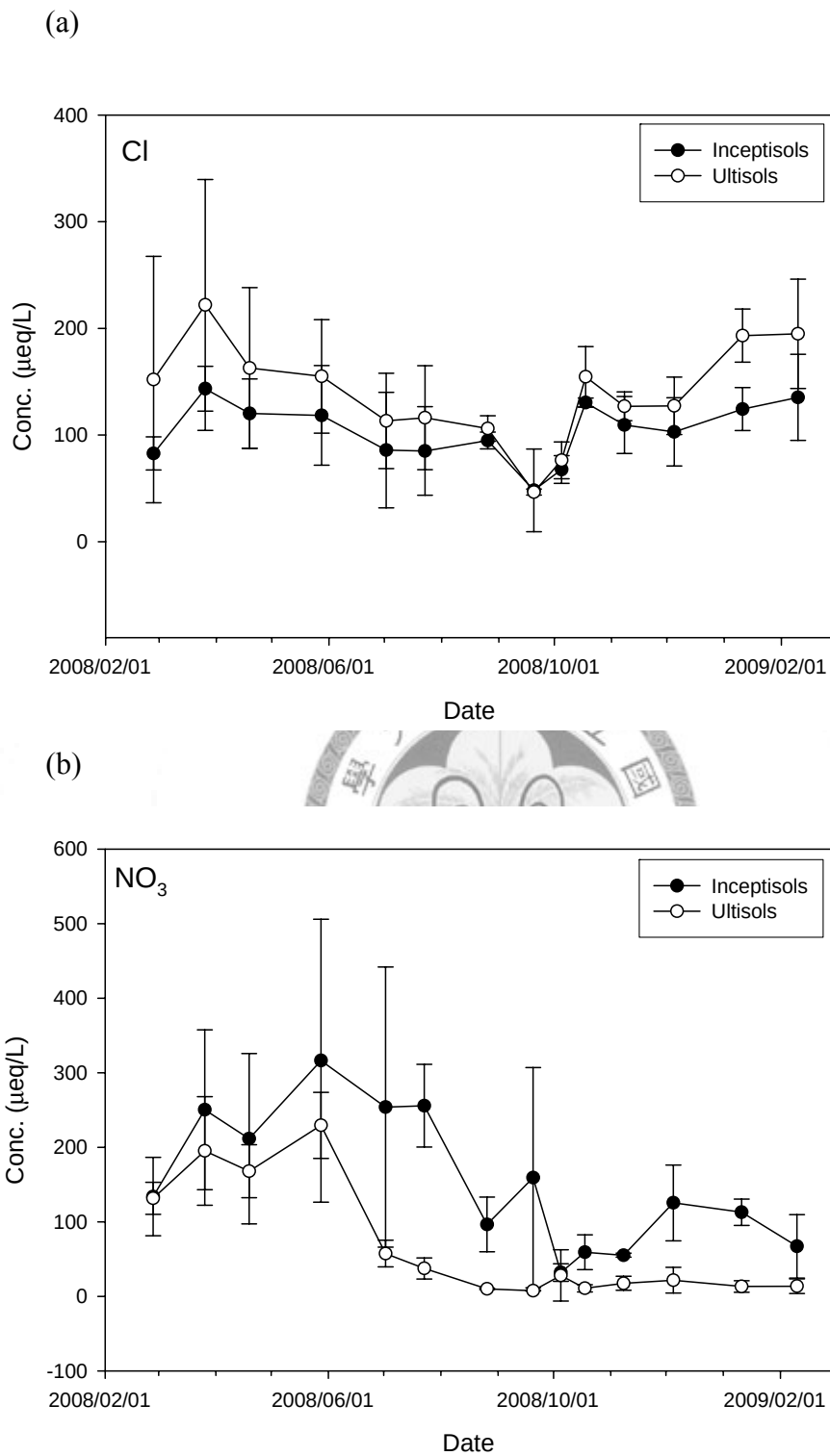
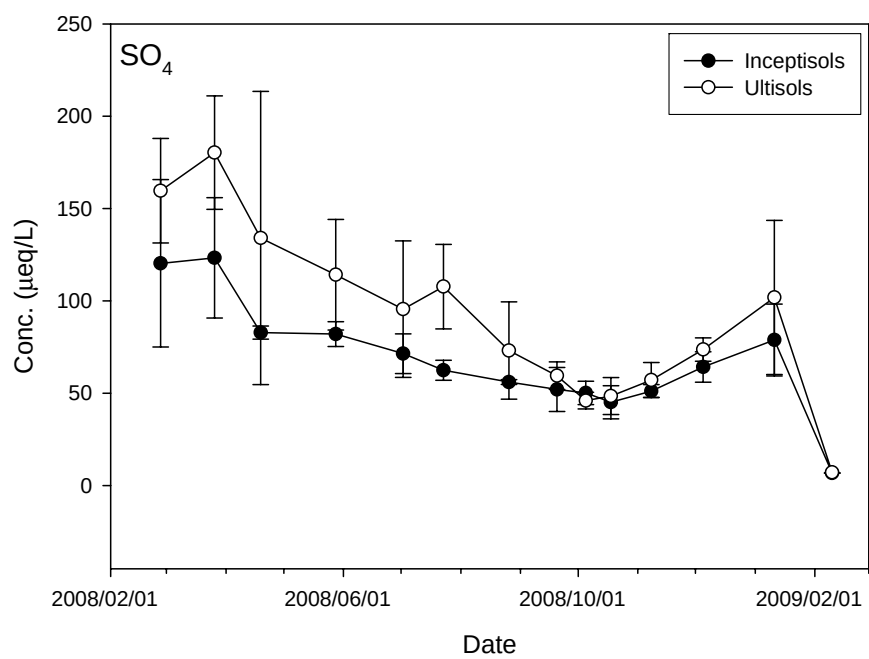


圖 24、兩研究區 B 層底端土壤溶液 (a) 氯、(b) 硝酸根、(c) 硫酸根與 (d) DOC 濃度隨時間的變化

Fig. 24. Dynamics of (a) chloride, (b) nitrate, (c) sulphate, and (d) DOC of soil solution at the bottom of B horizon in two study sites

(c)



(d)

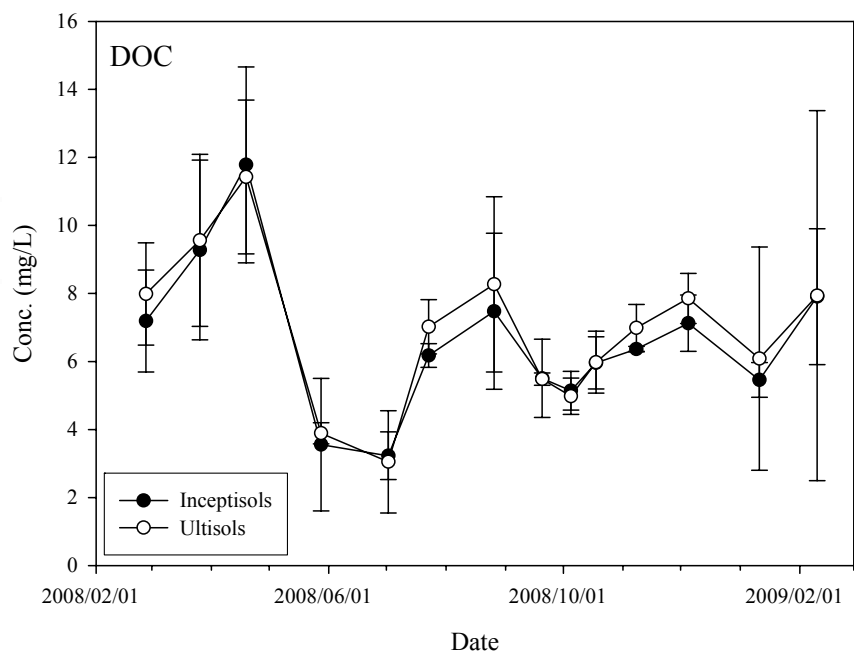


圖 24、(續)

Fig. 24. (continued)

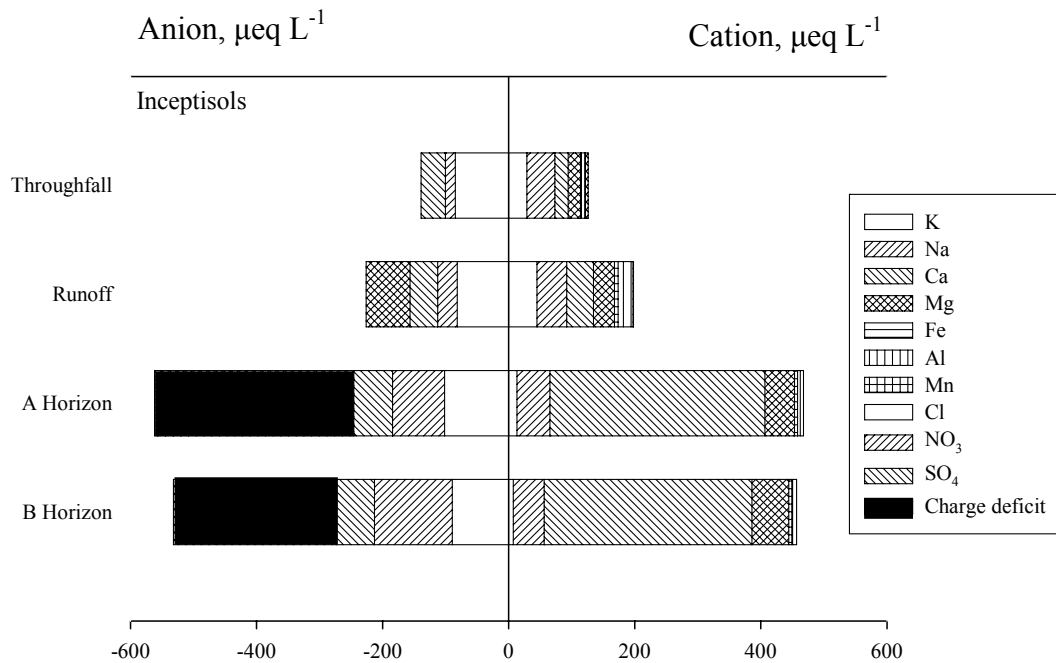
4.2 溶液之陰陽離子平衡

圖 25 呈現的是各溶液組成在極育土與弱育土樣區中，穿落水、地表逕流與 A、B 層土壤溶液的體積加權當量濃度 (volume-weighted equivalent means of solutes)。溶液的總離子濃度由穿落水降至地面、成為土壤溶液的過程中逐漸升高，至 B 層後略降。

鉀離子在溶液中的濃度在穿落水與地表逕流中皆高於土壤溶液，其中地表逕流水的鉀濃度又高於穿落水。Berg and Staaf (1987) 的研究表示，鉀是移動性最強的陽離子，在凋落物分解的初期，鉀就會快速被淋洗。這可能是逕流水中鉀濃度較穿落水高的原因。另外，土壤溶液中的鉀，主要源於水分入滲作用帶來地表凋落物礦化的養分及岩石風化的釋出。鉀離子在環境中的循環速度快，土壤溶液中的鉀容易被植物根再度吸收利用 (Sposito, 1984; Grimaldi et al., 2004)，故在土壤溶液中的濃度較低。

氯離子和鈉離子在穿落水、地表逕流水及土壤溶液中的濃度皆高。氯的平均當量濃度在 44 到 60 $\mu\text{eq/L}$ 間，鈉離子則落在 82 到 120 $\mu\text{eq/L}$ 之間，這反映了福山地區受海鹽飛沫的影響。此現象與李芳胤 (1997) 與 Moffat (2002) 的土壤溶液組成研究有相似的結果。溶液在進入土壤之後，鈣離子成為土壤溶液中最主要的陽離子成分，此現象可能是福山森林土壤緩衝高量硫酸鹽與硝酸鹽沉降的機制。酸沉降物質對森林生態系可能的危害之所以引起學者注意，原因在於雨水中高濃度的氫離子會將土壤中鈣、鎂、鉀、鈉等鹽基陽離子自土壤膠體表面的吸附位置交換至土壤溶液當中。由於土壤粒子多帶負電荷，大量同樣帶負電的硫酸根及硝酸根離子在超出土壤所能吸持能力的情況下，將容易因雨水的淋洗向下移動至深層土壤，而土壤溶液中為植物生長所必需的鹽基陽離子也可能在此過程中伴隨著陰離子自此土壤生態系中流失。土壤不僅無法維持植物養分的正常供應，鹽基陽離子的流失也會降低土壤對外來酸性物質的緩衝能力，產生土壤酸化的情形。

(a)



(b)

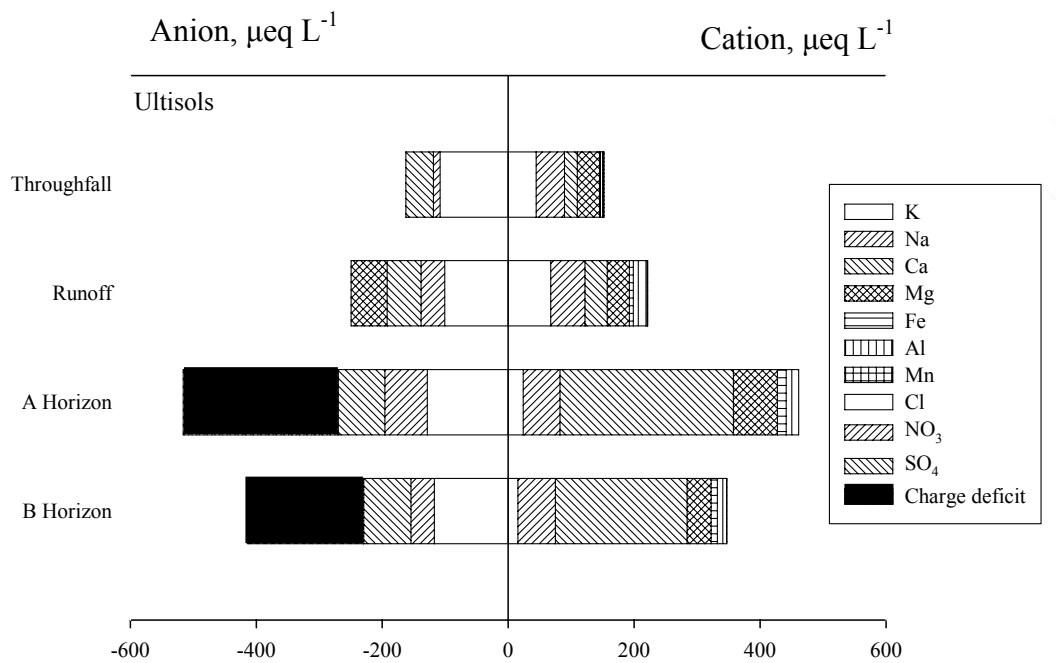


圖 25、(a) 弱育土與 (b) 極育土樣區中穿落水、地表逕流與 A、B 層土壤溶液陰陽離子的體積加權當量濃度

Fig. 25. Volume-weighted equivalent means of cations and anions in throughfall, runoff, and soil solution (A and B horizon) of (a) Inceptisols and (b) Ultisols

Liu et al. (2008) 的文獻中指出，在其 2001 至 2004 年於福山樣區內不同地形位置所監測土壤溶液的試驗發現，各坡面不同深度的土壤溶液 pH 值皆呈現隨著時間而逐漸變酸的趨勢。土壤溶液 pH 值的持續降低，顯示人為及自然產生的酸性沉降可能已經超過土壤的緩衝能力 (Moffat et al., 2002)。

臺灣東北部受到季風的影響使位居於此的福山試驗林擁有豐沛的雨水，此現象自森林形成之初即有，森林生態系應具有適應此自然條件達到平衡的能力。即便福山土壤本身的鹽基陽離子含量不高，植物或可藉由根部的快速運送將風化及礦化作用所釋出的養分吸收至植體內，避免鹽基離子皆為高雨量所淋洗流失。然而，酸沉降卻是工業化及污染物長距離傳送所加諸在原來自然環境限制上的新現象，值得學者持續關注此大氣酸性物質沉降與森林生態系交互作用的動態變化 (Lin et al., 1996)。



4.3 元素輸入與輸出量的估計

本研究以滲漏水收集裝置收取土壤溶液 (重力水)，以其化學組成與溶液總量的數據，估算輸入與輸出土壤生態系的元素總量，單位是每公頃的元素公斤數。這項資料可用來量化隨穿落水進入研究區內的元素量，有助於了解酸性物質沉降對森林環境造成影響的程度；另一方面，元素的輸出量數據也提供研究人員評估有多少元素經由滲漏作用而從植物根圈底部離開此土壤生態系。

4.3.1. 元素輸入 (element input)

弱育土與極育土研究區之元素輸入量與輸出量估計值表 (表 5) 顯示，在本研究監測的溶液組成元素當中，鉀、鈉、鎂、氯等離子與硫酸鹽在極育土樣區的元素輸入量有大幅高於弱育土樣區的情形。氯與鈉離子的高沉降量與前人研究一致，應為福山地區近海受到季風挾帶海洋中鹽分輸入的影響。雖然在永久樣區內兩研究區間僅距離一百公尺遠，但穿落水的組成卻大不相同。本研究中並未針對降雨的化學組成進行監測分析，但根據前人在溫帶地區的研究中指出，空間變異對穿落水的組成具有很大的影響，且其變異會隨著樣區特性 (如林分、地形等) 的不同而有差異 (Peterson and Rolfe, 1979 ; Robson et al., 1994)。

值得注意的是，酸沉降主要成分之一的硝酸鹽在研究進行的兩樣區中沉降量與飽受酸沉降威脅的歐洲森林相當。試驗期間，硝酸鹽在福山極育土樣區的沉降量約 41 kg ha^{-1} ，弱育土樣區的沉降量達 52 kg ha^{-1} ，高於荷蘭的 $40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。在硫酸鹽方面，弱育土與極育土樣區之沉降量分別為 99 與 127 kg ha^{-1} ，大幅高於荷蘭在 1982 年的沉降量 $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。在經過荷蘭國內法令的制定及歐洲國家共同簽署公約的努力之下，2006 年在荷蘭 De Rouwkuilen 自然保留區內所監測到氮與硫化物沉降量各別降低了 35% 及 65% 至 15.6 及 $19.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (表 6)。研究樣區位於福山試驗林中，且宜蘭地區工業污染源較少，受當地污染源影響應不大，在地形及風向的影響下，北台灣之硫沉降中有 52% 來自長程輸送貢獻 (林能暉等人，2000)。在許多溫帶國家的研究報告中都指出酸沉降對森林生態系的潛在威脅，可能的影響包括有森林土壤酸化、樹冠劣化、土壤養分有效性降低、鋁毒害等情形 (Reuss, 1983)。在降雨豐沛的福山地區，空氣污染所帶來之酸性污染物可能加速土壤中鹽基離子流失，使植物的生長受到影響。

表 4、試驗期間弱育土與極育土樣區之元素輸入量與輸出量估計值

Table 4. Estimated element input and output values in two sampling sites

	Input (kg ha ⁻¹)	Output (kg ha ⁻¹)	
	Throughfall	Surface runoff	B Horizon
Inceptisols			
K	60.6	13.8	2.76
Na	54.6	8.53	12.3
Ca	22.4	6.68	75.1
Mg	12.6	3.17	8.02
Fe	1.81	0.87	1.01
Al	2.86	1.67	0.71
Mn	0.58	0.16	0.03
Si	4.84	1.55	5.96
Cl	160	22.7	33.3
NO ₃	52.0	15.0	86.2
SO ₄	99.3	16.7	32.8
Ultisols			
K	105	10.4	7.31
Na	62.6	4.91	14.7
Ca	24.4	2.79	48.5
Mg	26.0	1.69	6.33
Fe	1.41	0.46	2.22
Al	2.31	0.79	1.66
Mn	0.69	0.08	0.04
Si	4.35	0.77	6.52
Cl	231	14.1	48.1
NO ₃	40.6	9.18	31.4
SO ₄	127	10.2	44.4

表 5、福山與其它森林元素輸入量的比較

Table 5. Comparison of element inputs between other forests and Fushan

Site	Precipitation mm/yr	Ca -----	Mg -----	K kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	NO ₃ -----	SO ₄ -----	Reference
Fushan, Taiwan	4271	23.4	19.3	82.8	46.3	113.2	This study
<i>Sierra de Gata</i> , Spain	1580	10.8	5.37	12.2	1.46	5.27	Menéndez et al., 2007
Nanjenshan, Taiwan	4720	23.1	14.1	27.8	37.2	75.4	吳佳其, 2002
De Rouwkuilen, Netherlands	700	-	-	-	15.6	19.4	Boxman et al., 2008



4.3.2 元素之輸出 (element output)

表 7 整理出弱育土與極育土兩樣區之元素年輸入、輸出量與收支的估算結果。在元素輸出量方面，除鈣離子、硝酸鹽與硫酸鹽之外，兩樣區的元素輸出量沒有太大的差別。在兩樣區中鈣離子的輸出量皆高（弱育土樣區 82 kg ha^{-1} ；極育土樣區 51 kg ha^{-1} ），使鈣離子在本研究中成為少數呈現大量淋洗的元素。

在高量的硫與氮化物沉降之下，研究中測得硫與氮自土壤底層流失的量也較其它森林高（表 8）。造成此現象可能的原因除了酸性物質的沉降量高之外，福山地區的高雨量也會使大氣中硫與氮化物的輸入增加，本試驗以 B 層底部收得之土壤溶液視為流失的部分則可能會造成輸出量的高估。硫酸鹽是福山地區降雨中主要的致酸物質，其沉降量在弱育土樣區是硝酸鹽的兩倍，而在極育土樣區是硝酸鹽的三倍。兩研究區中硫酸鹽的輸出量皆小於輸入量，顯示出土壤對硫酸根的吸附能力。硝酸鹽在極育土樣區之輸入與輸出量幾乎一致，而在弱育土樣區的輸出量大幅高於輸入量，淨釋放量達 49 kg ha^{-1} 。前人研究指出，當氮沉降量高於微生物及環境所能固定的能力時，會破壞生態系氮循環的穩定，無法由土壤吸持的氮將因淋洗而自根圈底部流失，此現象是歐洲許多森林生態系所共同面臨的問題，它不僅影響林木的正常生長，對生態多樣性更是嚴重的威脅。另有學者指出，大氣中氮與硫化物的結合會使污染物沉降的作用更加顯著 (Boxman et al., 2008)。高量的硝酸鹽與硫酸鹽沉降，加上豐沛的雨水淋洗，可能使得土壤中的鹽基陽離子伴隨著陰離子自根圈底部流失而離開生態系，進而導致土壤酸化。

在本研究中，樣區之土壤普遍能吸持溶液中之離子，供為植物生長所需的養分。唯少數元素有輸出量大於輸入量的情形，除了上述弱育土樣區的硝酸鹽之外，呈現淨釋放的溶液組成還有鈣與矽離子。大量鈣離子的淨釋放可能是森林土壤緩衝外來酸性物質輸入的機制。矽於兩樣區之淨釋放量皆約為 3 kg ha^{-1} ，可能是土壤中矽酸鹽礦物風化所致。

表 6、試驗期間弱育土與極育土樣區之元素收支估計值

Table 6. Estimated element budget in two sampling sites

	Inputs (kg ha ⁻¹)	Outputs (kg ha ⁻¹)	Inputs-Outputs (kg ha ⁻¹)
Inceptisols			
K	60.6	16.6	44.0
Na	54.6	20.9	33.8
Ca	22.4	81.8	-59.3
Mg	12.6	11.2	1.44
Fe	1.81	1.88	-0.07
Al	2.86	2.38	0.48
Mn	0.58	0.19	0.39
Si	4.84	7.51	-2.68
Cl	160	56.0	104
NO ₃	52.0	101	-49.2
SO ₄	99.3	49.5	49.8
Ultisols			
K	105	17.7	87.5
Na	62.6	19.6	43.0
Ca	24.4	51.3	-26.9
Mg	26.0	8.02	18.0
Fe	1.41	2.68	-1.27
Al	2.31	2.44	-0.13
Mn	0.69	0.13	0.6
Si	4.35	7.29	-2.94
Cl	231	62.2	169
NO ₃	40.6	40.5	0.03
SO ₄	127	54.6	72.2

表 7、福山與其它森林元素輸出量的比較

Table 7. Comparison of element outputs between other forests and Fushan

Site	Precipitation mm/yr	Ca -----	Mg -----	K kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	NO ₃ -----	SO ₄ -----	Reference
Fushan, Taiwan	4271	61.8	7.17	5.03	58.8	38.6	This study
<i>Sierra de Gata</i> , Spain	1580	1.58	2.23	3.95	1.17	6.3	Menéndez et al., 2007
Nanjenshan, Taiwan	4720	0.99	2.03	1.77	7.77	-	吳佳其, 2002
De Rouwkuilen, Netherlands	700	-	-	-	28.9	10.1	Boxman et al., 2008



4.3.3 估算元素收支之誤差與不確定因素

福山 25 公頃永久樣區的養分收支均為估計值，因此建立在許多不確定因素上，包括 (1) 樣區採樣數量與大小之限制；(2) 土壤性質與森林樹種的空間分佈的差異；(3) 不同樹種養分濃度的差異；(4) 森林生質量與凋落物的估算；(5) 土層內土壤溶液橫向移動；(6) 森林受颱風擾動造成之影響；(7) 乾沉降造成之養分輸入與揮發方式造成之養分輸出與 (8) 本研究將 B 層底端所收集之土壤溶液視為自土壤流失的養分，有可能造成元素輸出量的高估。



第五章 結論

1. 環保署已將 pH 低於 5.0 定義為受到人為致酸物質影響的雨水，而福山的雨水 pH 平均為 4.6，顯示福山森林生態系已處於酸沉降環境中。本研究期間福山 25 公頃天然闊葉林樣區降下之穿落水 pH 值平均為 4.7，在穿落水入滲進入土壤後，土壤溶液 pH 值較穿落水提高約 1.5 單位，溶液 pH 平均為 6.4，顯示福山天然闊葉林土壤具有緩衝酸雨的能力。
2. 鈣離子是土壤溶液中主要的鹽基陽離子，其年平均濃度達 $341 \mu\text{eq/L}$ ，大幅高於穿落水的 $20.9 \mu\text{eq/L}$ 及地表逕流水的 $42.4 \mu\text{eq/L}$ 。降水中的鈣來源包含海鹽飛沫及雨水通過森林時的林冠交換（淋溶/留置）作用。在土壤溶液方面，酸雨的沉降會使礦物元素溶解釋出的速度加快，研究區土壤可能是藉由礦物風化釋出鈣離子以緩衝外來酸性物質的沉降。此外，土壤溶液中鈣離子濃度的提高也可解釋土壤 pH 酸性減弱的情形。
3. 土壤養分輸出量大於養分輸入量者有矽 (2.81 kg ha^{-1})、鈣 (43.1 kg ha^{-1}) 與硝酸根 (24.8 kg ha^{-1})，呈現淨釋放的現象。土壤礦物風化會增加矽酸與鈣的釋出，硝酸根的高釋出量則反映了氮化物在此生態系的高沉降量。鐵、鋁與錳等微量元素的輸入與輸出接近平衡；鉀、鈉、鎂、氯與硫酸根離子的輸出量小於輸入量，可能多被土壤所吸持或被植物吸收利用。儘管在可能高估元素流失量的條件下估算元素的收支，除了鈣與硝酸根離子呈現大量釋出的情形，其餘元素仍多能被保留於福山土壤環境中。在氮與硫化物沉降量皆高的條件下 (46.3 與 113.2 kg ha^{-1})，持續觀察福山森林土壤未來元素動態的趨勢仍極具重要性。

4. 極育土較弱育土受到更強烈的淋洗作用，A層土壤溶液的平均總陽離子濃度（鈣、鎂、鉀、與鈉等）在極育土研究區（515.9 $\mu\text{eq/L}$ ）比弱育土研究區（561.5 $\mu\text{eq/L}$ ）低約 45.7 $\mu\text{eq/L}$ 。在穿落水降至地面形成地表逕流及土壤溶液後，溶液之總陽離子濃度與總陰離子開始出現不平衡的情形，陰陽離子濃度的差值可能源於試驗中未測定的有機酸。在地表逕流水、A層與B層土壤溶液中，A層溶液的陰離子與陽離子濃度差值最高（281.9 $\mu\text{eq/L}$ ），B層溶液居次（221.4 $\mu\text{eq/L}$ ），而地表逕流最低（63.5 $\mu\text{eq/L}$ ），可能與表層土壤有機質含量較高有關。



參考文獻

- 陳慧美。2004。南仁山溪谷樣區土壤水分含量與土壤溶液組成隨時間與空間之變異。國立臺灣大學農業化學所碩士論文。
- 何學哲。1998。福山地區坡面土壤水分變化之研究。國立臺灣大學森林學學所碩士論文。
- 黃仁欽。1997。福山森林土壤之氮素動態：硝化作用、移動與植群吸收。國立臺灣大學農業化學所碩士論文。
- 謝長富、陳尊賢。2004。福山 25 公頃永久樣區之設置及監測。行政院國科會委託計劃期末報告。
- 金恒鑣、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。臺灣林業科學。18 (4):363-373。
- 陳尊賢、蔡呈奇、邱春媚。2004。阿里山區粗質地淋澱土的化育作用與土壤溶液化學。行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告 (NSC 93-2313-B-002-035)。
- 李芳胤。1997。全球變遷：南仁山森林生態系研究-土壤性質及植物養分之探討。行政院國科會委託研究計畫報告 (NSC 86-2621-B-020-001-A07)。
- 洪富文、林光清、程煒兒、蔣先覺、張雲翔。1996。福山試驗林土壤調查與分類。臺灣林業科學。11 (2):159-174。
- 林能暉、劉振榮、李崇德及嚴明鉦。2000。東亞地區空氣污染跨國長程傳輸對臺灣地區之影響。行政院環保署。
- 廖偉志。2006。福山天然闊葉林 25 公頃永久樣區土壤性質之空間變異。國立臺灣大學農業化學所碩士論文。
- 張至懿。2008。福山永久樣區優勢樹種凋落物養分釋出及土壤氮礦化之季節性變動。國立臺灣大學農業化學所碩士論文。
- 林國銓。1997。福山闊葉林枯落物及枝葉層之動態變化。臺灣林業科學。12 :135-144。
- 林登秋。1997。土壤水在福山森林生態系營養循環中所扮演角色之探討。行政院國家科學委員會委託研究計畫報告 (NSC87-2621-B-018-001-A07)。
- 吳佳其。2002。南仁山亞熱帶雨林優勢樹種養分含量與環境因子之關係。國立臺灣大學農業化學所碩士論文。
- Barbee, G.C., and K.W. Brown. 1986. Comparison between suction and free-drainage soil solution samplers. Soil Sci. 141:149-154.

- Beier, C., and P. Gundersen. 1989. Atmospheric deposition to the edge of a spruce forest in Denmark. *Environ. Pollut.* 60:257-271.
- Berg, B., and H. Staaf. 1987. Release of nutrients from decomposing white birch leaves and Scots pine needle litter. *Pedobiologia* 30:55-63.
- Bini, C., and F. Bresolin. 1998. Soil acidification by acid rain in forest ecosystems: A case study in northern Italy. *Sci. Total Environ.* 222:1-15.
- Bormann, F.H., and G.E. Likens. 1979. Catastrophic disturbance and the steady-state in northern hardwood forests. *Am. Sci.* 67:660-669.
- Boxman, A.W., H.F.G. van Dijk, and J.G.M. Roelofs. 1994. Soil and vegetation responses to decreased atmospheric nitrogen and sulphur inputs into a Scots pine stand in the Netherlands. *For. Ecol. Manage.* 68:39-45.
- Boxman, A.W., R.C.J.H. Peters, and J.G.M. Roelofs. 2008. Long term changes in atmospheric N and S throughfall deposition and effects on soil solution chemistry in a Scots pine forest in the Netherlands. *Environ. Pollut.* 156:1252-1259.
- Chang, S.C., C.P. Wang, C.M. Feng, R. Rees, U. Hell, and E. Matzner. 2007. Soil fluxes of mineral elements and dissolved organic matter following manipulation of leaf litter input in a Taiwan *Chamaecyparis* forest. *For. Ecol. Manage.* 242:133-141.
- De Schrijver, A., L. Nachtergale, J. Staelens, S. Luyssaert, and L. De Keersmaecker. 2004. Comparison of throughfall and soil solution chemistry between a high-density Corsican pine stand and a naturally regenerated silver birch stand. *Environ. Pollut.* 131:93-105.
- de Vries, W., G.J. Reinds, and E. Vel. 2003. Intensive monitoring of forest ecosystems in Europe 2: Atmospheric deposition and its impacts on soil solution chemistry. *For. Ecol. Manage.* 174:97-115.
- de Vries, W., E. Leeters, and C.M.A. Hendriks. 1995. Effects of acid deposition on Dutch forest ecosystems. *Water Air Soil Pollut.* 85:1063-1068.
- de Vries, W., C. van der Salm, G.J. Reinds, and J.W. Erisman. 2007. Element fluxes through European forest ecosystems and their relationships with stand and site characteristics. *Environmental Pollution* 148:501-513.
- Dechert, G., E. Veldkamp, and R. Brumme. 2005. Are partial nutrient balances suitable to evaluate nutrient sustainability of land use systems? Results from a case study in Central Sulawesi, Indonesia. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 72:201-212.
- Derome, J. 1991. Boron immobilization in limed forest soils. *Abstracts of Papers of the Am. Chem. Soc.* 201:18-34.
- Dezzeo, N., and N. Chacon. 2006. Nutrient fluxes in incident rainfall, throughfall, and stemflow in adjacent primary and secondary forests of the Gran Sabana, southern Venezuela. *For. Ecol. Manage.* 234:218-226.
- Eriksson, E., and V. Khunakasem. 1969. Chloride concentration in groundwater, recharge rate and rate of deposition of chloride in the Israel coastal plain. *J. Hydrol.* 7:178-197.

- Giesler, R., U.S. Lundstrom, and H. Grip. 1996a. Comparison of soil solution chemistry assessment using zero-tension lysimeters or centrifugation. *Eur. J. Soil Sci.* 47:395-405.
- Giesler, R., F. Moldan, U. Lundstrom, and H. Hultberg. 1996b. Reversing acidification in a forested catchment in southwestern Sweden: Effects on soil solution chemistry. *J. Environ. Qual.* 25:110-119.
- Grimaldi, C., M. Grimaldi, A. Millet, T. Bariac, and J. Boulegue. 2004. Behaviour of chemical solutes during a storm in a rainforested headwater catchment. *Hydrol. Processes* 18:93-106.
- Goudie, A. S., and N. J. Middleton. 2001. Saharan dust storms: nature and consequences. *Earth Sci. Rev.* 56:179-204.
- Hafner, S.D., P.M. Groffman, and M.J. Mitchell. 2005. Leaching of dissolved organic carbon, dissolved organic nitrogen, and other solutes from coarse woody debris and litter in a mixed forest in New York State. *Biogeochemistry* 74:257-282.
- Hendershot, W.H., and F. Courchesne. 1991. Comparison of soil solution chemistry in zero tension and ceramic-cup tension lysimeters. *J. Soil Sci.* 42:577-583.
- Hostin, P.J., and S.J. Titus. 1996. Indirect site productivity models for white spruce in Alberta's boreal mixedwood forest. *Forestry Chronicle* 72:73-79.
- Huber, C., W. Weis, and A. Gottlein. 2006a. Tree nutrition of Norway spruce as modified by liming and experimental acidification at the Hoglwald site, Germany, from 1982 to 2004. *Ann. For. Sci.* 63:861-869.
- Huber, C., R. Baier, A. Gottlein, and W. Weis. 2006b. Changes in soil, seepage water and needle chemistry between 1984 and 2004 after liming an N-saturated Norway spruce stand at the Hoglwald, Germany. *For. Ecol. Manage.* 233:11-20.
- Laclau, J.P., J. Ranger, J.P. Bouillet, J.D. Nzila, and P. Deleporte. 2003a. Nutrient cycling in a clonal stand of Eucalyptus and an adjacent savanna ecosystem in Congo - 1. Chemical composition of rainfall, throughfall and stemflow solutions. *For. Ecol. Manage.* 176:105-119.
- Laclau, J.P., J. Ranger, J.D. Nzila, J.P. Bouillet, and P. Deleporte. 2003b. Nutrient cycling in a clonal stand of Eucalyptus and an adjacent savanna ecosystem in Congo 2. Chemical composition of soil solutions. *For. Ecol. and Manage.* 180:527-544.
- Lawrence, G.B., and M.B. David. 1996. Chemical evaluation of soil-solution in acid forest soils. *Soil Sci.* 161:298-313.
- Lin, T.C., H.B. Hing, Y.J. Hsia, L.J. Wang, J.L. Hwong, and C.B. Liou. 1996. Evaluating rainfall contamination in Fu-shan Experimental Forest by using factor analysis. *Quart. J. Chin. For.* 29(1): 121-132.
- Lin, T.C., T.T. Lin, Z.M. Chiang, Y.J. Hsia, and H.B. King. 1999. A study on typhoon disturbance to the canopy of natural hardwood forest in northeastern Taiwan. *Quart. J. Chin. For.* 32:67-78.

- Liu, C.P., S.Y. Lu, C.H. Wang, and L.S. Hwang. 2008. Soil solution chemistry on the three slopes of a natural hardwood stand in the subtropics of the Fushan forest. *Soil Sci.* 173:845-856.
- Lovett, G.M., and J.D. Kinsman. 1990. Atmospheric pollutant deposition to high-elevation ecosystems. *Atmos. Environ. Part A-General Topics* 24:2767-2786.
- Lubchenco, J., A.M. Olson, L.B. Brubaker, S.R. Carpenter, M.M. Holland, S.P. Hubbel, S.A. Levin, J.A. Macmahon, P.A. Matson, J.M. Melillo, H.A. Mooney, C.H. Peterson, H.R. Pulliam, L.A. Real, P.J. Regal, and P.G. Risser. 1991. The sustainable biosphere initiative-An ecological research agenda. *Revista Chilena De Historia Natural* 64:175-226.
- Ludwig, B., K.J. Meiwes, P. Khanna, R. Gehlen, H. Fortmann, and E.E. Hildebrand. 1999. Comparison of different laboratory methods with lysimetry for soil solution composition-experimental and model results. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 162:343-351.
- Meiresonne, L., A. De Schrijver, and B. De Vos. 2007. Nutrient cycling in a poplar plantation (*Populus trichocarpa* x *Populus deltoides* 'Beaupre') on former agricultural land in northern Belgium. *Can. J. For. Res.* 37:141-155.
- Menendez, J., G. Moreno, J.F. Gallardo, and J. Saavedra. 2007. Hydrogeochemical balance of forest umbrisol profiles ('Sierra de Gata', central western Spain). *Hydrol. Processes* 21:1949-1956.
- Michalzik, B., K. Kalbitz, J.H. Park, S. Solinger, and E. Matzner. 2001. Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen - a synthesis for temperate forests. *Biogeochemistry* 52:173-205.
- Moffat, A.J., H. Kvaalen, S. Solberg, and N. Clarke. 2002. Temporal trends in throughfall and soil water chemistry at three Norwegian forests, 1986-1997. *For. Ecol. Manage.* 168:15-28.
- Newell, R.E., E.P. Condon, and H.G. Reichle. 1981. Measurements of CO and CH₄ in the troposphere over Saudi-Arabia, India, and the Arabian Sea during the 1979 international summer monsoon experiment (Monex). *J. Geophys. Res.* 86:9833-9838.
- Nissinen, A., H. Ilvesniemi, and N. Tanskanen. 1999. Equilibria of weak acids and organic Al complexes explain activity of H⁺ and Al³⁺ in a salt extract of exchangeable cations. *Eur. J. Soil Sci.* 50:675-686.
- Parker, G.G. 1983. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Adv. Ecol. Res.* 13:57-133.
- Peterson, D.L., and G.L. Rolfe. 1979. Determining sample-size in throughfall studies. *For. Sci.* 25:582-584.
- Ranger, J., S. Loyer, D. Gelhaye, B. Pollier, and P. Bonnaud. 2007. Effects of the clear-cutting of a Douglas-fir plantation (*Pseudotsuga menziesii* F.) on the chemical composition of soil solutions and on the leaching of DOC and ions in drainage waters. *Ann. For. Sci.* 64:183-200.

- Raulund-Rasmussen, K. 1989. Effect of artificial acid rain and liming on the base status in an acid forest *Picea abies* L. Karst. Soil typic Haplohumod. Scand. J. For. Res. 4:417-426.
- Reuss, J. O. 1983. Implications of the Ca-Al exchange system for the effect of acid precipitation on soils. J. Environ. Qual. 12:591-595.
- Robson, A.J., C. Neal, G.P. Ryland, and M. Harrow. 1994. Spatial variations in throughfall chemistry at the small plot scale. J. Hydrol. 158:107-122.
- Scheel, T., L. Haumaier, R.H. Ellerbrock, J. Ruhlmann, and K. Kalbitz. 2008. Properties of organic matter precipitated from acidic forest soil solutions. Org. Geochem. 39:1439-1453.
- Shilova, Y. E. I. 1955. A method of obtaining the soil solution under natural conditions Pochvovedeniye, 11.
- Sposito, G. 1984. The future of an illusion-ion activities in soil solutions. Soil Sci. Soc. Am. J. 48:531-536.
- Su, S. H., C. H. Chang Yang, C. L. Lu, T. T. Lin, W. L. Chiou, I. F. Hsieh, H. B. King. 2006. The ecology of tree species in Fushan forest dynamics plot, Taiwan. Taiwan Forest Research Institute, Taipei.
- Su, S. H., C. H. Chang Yang, C. L. Lu, C. C. Tsui, T. T. Lin, C. L. Lin, W. L. Chiou, L. H. Kuan, Z. S. Chang, and C. F. Hsieh. 2007. Fushan subtropical forest dynamics plot: tree species characteristics and distribution patterns. Taiwan Forest Research Institute. Taipei.
- Thomas, F.M., and G. Büttner. 1998. Nutrient relations in healthy and damaged stands of mature oaks on clayey soils: two case studies in northwestern Germany. For. Ecol. Manage. 108:301-319.
- Vandijk, H.F.G., A.W. Boxman, and J.G.M. Roelofs. 1992. Effect of nitrogen and sulfur on the mineral balance and vitality of a Scots pine stand in the Netherlands. For. Ecol. Manage. 51:207-215.
- Vogt, K.A., C.C. Grier, and D.J. Vogt. 1986. Production, turnover, and nutrient dynamics of aboveground and belowground detritus of world forests. Adv. Ecol. Res. 15:303-377.
- Weis, W., V. Rotter, and A. Gottlein. 2006. Water and element fluxes during the regeneration of Norway spruce with European beech: Effects of shelterwood-cut and clear-cut. For. Ecol. Manage. 224:304-317.
- Zabowski, D., and F.C. Ugolini. 1990. Lysimeter and centrifuge soil solutions - seasonal differences between methods. Soil Sci. Soc. Am. J. 54:1130-1135.

附錄目錄

表 A1、試驗期間兩研究區穿落水陽離子組成鉀、鈉、鈣、鎂、鐵、鋁與錳的濃度變化.....	88
表 A1、(續)	89
表 A1、(續)	90
表 A1、(續)	91
表 A2、試驗期間兩研究區地表逕流水陽離子組成鉀、鈉、鈣、鎂、鐵、鋁與錳的濃度變化.....	92
表 A2、(續)	93
表 A2、(續)	94
表 A2、(續)	95
表 A3、試驗期間兩研究區 A 層土壤溶液陽離子組成鉀、鈉、鈣、鎂、鐵、鋁與錳的濃度變化.....	96
表 A3、(續)	97
表 A3、(續)	98
表 A3、(續)	99
表 A4、試驗期間兩研究區 B 層土壤溶液陽離子組成鉀、鈉、鈣、鎂、鐵、鋁與錳的濃度變化.....	100
表 A4、(續)	101
表 A4、(續)	102
表 A4、(續)	103
表 A5、試驗期間兩研究區穿落水陰離子組成氯、硝酸根、與硫酸根離子的濃度變化.....	104
表 A5、(續)	105
表 A6、試驗期間兩研究區地表逕流水陰離子組成氯、硝酸根、與硫酸根離子的濃度變化.....	106
表 A6、(續)	107
表 A7、試驗期間兩研究區地表 A 層土壤溶液陰離子組成氯、硝酸根、與硫酸根離子的濃度變化.....	108
表 A7、(續)	109
表 A8、試驗期間兩研究區地表 B 層土壤溶液陰離子組成氯、硝酸根、與硫酸根離子的濃度變化.....	110
表 A8、(續)	111

表 A1、試驗期間兩研究區穿落水陽離子組成鉀、鈉、鈣、鎂、鐵、鋁與錳的濃度變化

Table A1. K, Na, Ca, Mg, Fe, Al, and Mn concentrations of throughfall in two study sites during the experiment

Sampling date	Sampling sites					
	X1 [#]	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Potassium						
2008/2/27	27.0	22.5	48.3	34.0	264	33.1
2008/3/26	95.4	56.6	55.7	58.2	234	159
2008/4/19	56.8	43.0	37.2	51.1	139	86.0
2008/5/28	76.7	66.4	115	51.2	166	89.3
2008/7/2	40.5	30.6	59.9	43.9	96.8	48.1
2008/7/23	55.3	32.9	93.4	115	108	137
2008/8/26	22.6	16.2	52.8	21.5	32.0	11.2
2008/9/20	9.08	6.05	15.0	4.96	14.8	6.20
2008/10/5	13.4	5.61	43.6	7.49	41.0	9.37
2008/10/18	19.4	18.7	47.9	25.8	43.0	19.0
2008/11/8	6.59	15.9	10.6	28.5	30.5	35.3
2008/12/5	24.5	15.6	21.6	40.1	34.4	58.5
2009/1/11	21.8	18.9	16.1	31.5	36.1	71.5
2009/2/10	44.8	41.6	17.9	40.0	60.1	98.3
Sodium						
2008/2/27	22.2	24.2	22.5	23.5	40.3	27.6
2008/3/26	85.1	57.2	50.3	46.4	117	56.2
2008/4/19	23.6	16.6	14.8	13.2	27.8	24.2
2008/5/28	72.6	51.8	81.0	37.9	78.9	55.8
2008/7/2	17.3	13.9	28.2	12.4	28.3	22.3
2008/7/23	40.5	37.1	42.3	53.9	49.3	47.1
2008/8/26	44.4	47.2	48.3	43.4	46.6	39.9
2008/9/20	16.3	15.4	17.0	9.97	16.8	11.4
2008/10/5	54.3	52.9	55.1	46.0	61.9	47.0
2008/10/18	64.3	59.6	71.2	76.9	71.5	60.3
2008/11/8	55.6	60.3	55.2	56.5	58.8	74.3
2008/12/5	123	111	114	90.5	103	148
2009/1/11	71.9	59.9	47.3	49.9	51.1	121
2009/2/10	95.6	95.0	61.5	55.1	42.4	148

表 A1、(續)

Table A1. (continued)

Sampling date	Sampling sites					
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Calsium						
2008/2/27	27.2	21.6	29.3	34.2	57.2	27.3
2008/3/26	112	65.9	77.5	63.0	137	51.7
2008/4/19	39.9	27.9	26.2	18.5	38.8	26.0
2008/5/28	48.4	28.9	47.7	35.6	67.2	36.2
2008/7/2	37.2	14.2	25.5	15.5	49.8	11.7
2008/7/23	34.0	27.5	32.0	1.10	33.1	10.2
2008/8/26	10.7	12.5	11.6	4.23	17.9	10.6
2008/9/20	4.69	5.47	6.05	n.d.	1.93	n.d.
2008/10/5	14.2	10.9	11.9	8.02	17.0	6.88
2008/10/18	26.7	15.2	32.7	33.8	23.6	21.1
2008/11/8	18.6	21.4	16.7	20.4	27.5	21.9
2008/12/5	35.8	29.8	23.4	35.5	40.0	39.9
2009/1/11	30.0	43.5	23.1	33.5	34.9	43.2
2009/2/10	44.7	47.1	30.5	44.5	17.2	43.8
Magesium						
2008/2/27	20.1	16.6	22.9	19.7	70.5	19.9
2008/3/26	71.7	46.3	61.2	46.7	130	50.2
2008/4/19	28.1	18.0	21.9	9.65	38.7	24.5
2008/5/28	47.4	26.3	49.5	22.9	65.9	39.3
2008/7/2	20.2	10.4	18.8	6.82	41.1	12.2
2008/7/23	27.7	27.3	30.7	9.57	37.3	15.6
2008/8/26	33.2	15.6	24.8	25.3	20.7	6.78
2008/9/20	2.42	2.71	3.67	1.34	3.40	1.74
2008/10/5	13.7	19.9	12.3	12.4	299	108
2008/10/18	25.0	16.9	36.6	37.1	23.8	30.2
2008/11/8	17.8	19.3	15.9	18.9	19.1	20.8
2008/12/5	38.8	39.3	26.5	30.3	41.5	45.2
2009/1/11	22.5	24.9	12.6	18.6	24.8	39.3
2009/2/10	31.1	31.0	17.8	20.9	11.7	51.3

表 A1、(續)

Table A1. (continued)

Sampling date	Sampling sites					
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Iron						
2008/2/27	0.42	1.02	2.07	0.43	1.84	0.47
2008/3/26	0.94	1.88	1.51	0.64	1.18	1.33
2008/4/19	2.10	3.26	0.69	0.71	0.99	1.12
2008/5/28	1.00	3.53	2.40	0.16	0.86	0.12
2008/7/2	0.48	2.69	1.36	0.35	0.42	0.37
2008/7/23	0.75	2.11	1.98	0.75	0.69	0.73
2008/8/26	0.47	0.36	0.85	0.43	0.46	0.18
2008/9/20	0.49	0.47	0.59	0.21	0.62	0.31
2008/10/5	0.63	0.40	0.63	0.83	0.80	1.29
2008/10/18	1.18	1.38	1.59	2.65	1.61	1.15
2008/11/8	4.79	1.27	1.53	2.74	2.22	1.27
2008/12/5	2.51	1.49	0.82	0.68	0.79	1.36
2009/1/11	1.96	1.47	0.90	0.57	0.67	1.29
2009/2/10	2.95	4.61	0.98	1.03	0.88	1.51
Aluminum						
2008/2/27	2.99	6.27	16.0	2.32	15.0	3.80
2008/3/26	9.10	19.5	16.1	9.04	15.1	14.4
2008/4/19	6.27	13.8	8.92	4.66	18.4	10.0
2008/5/28	8.46	14.2	39.1	5.50	10.9	10.7
2008/7/2	4.89	5.73	7.82	1.35	6.87	5.48
2008/7/23	6.73	4.97	9.81	2.78	11.0	11.5
2008/8/26	4.24	2.09	3.91	1.43	4.42	0.94
2008/9/20	1.98	1.03	1.79	0.54	1.82	1.50
2008/10/5	3.59	2.13	2.24	0.84	2.69	1.87
2008/10/18	5.52	4.56	10.0	8.46	5.34	4.58
2008/11/8	12.0	2.70	3.70	6.47	5.11	3.95
2008/12/5	10.7	5.65	3.29	1.76	1.98	4.68
2009/1/11	11.9	5.06	4.06	1.57	3.47	5.02
2009/2/10	20.1	19.8	6.08	2.32	3.14	8.06

表 A1、(續)

Table A1. (continued)

Sampling date	Sampling sites					
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Manganese						
2008/2/27	0.73	0.77	1.33	1.63	3.23	0.83
2008/3/26	2.68	1.87	3.44	4.44	7.83	2.05
2008/4/19	1.00	1.15	0.76	0.34	0.98	0.48
2008/5/28	0.57	0.70	1.14	0.02	0.13	0.17
2008/7/2	0.00	0.14	0.17	0.00	0.20	0.14
2008/7/23	0.06	0.29	0.46	0.03	0.05	0.06
2008/8/26	0.04	0.15	0.03	0.03	0.04	0.03
2008/9/20	0.01	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02
2008/10/5	0.06	0.18	0.05	0.12	0.07	0.14
2008/10/18	0.58	0.57	0.83	1.02	0.19	0.63
2008/11/8	0.32	0.65	0.37	0.39	1.09	0.86
2008/12/5	0.97	0.87	0.48	0.51	0.10	1.42
2009/1/11	0.59	0.56	0.28	0.35	1.26	1.18
2009/2/10	1.21	1.31	0.57	0.25	0.26	1.49

*樣區代號。X 代表弱育土研究區，Y 代表極育土研究區，數字表示重複樣區。

*Sampling site. X means Inceptisols study site. Y means Ultisols study site. The number means the duplicated site.

表 A2、試驗期間兩研究區地表逕流水陽離子組成鉀、鈉、鈣、鎂、鐵、鋁與錳的濃度變化

Table A2. K, Na, Ca, Mg, Fe, Al, and Mn concentrations of surface runoff in two study sites during the experiment

Sampling date	Sampling sites					
	X1 [#]	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Potassium						
2008/2/27	40.7	134	75.0	88.9	48.7	49.4
2008/3/26	84.9	20.5	155	-	137	233
2008/4/19	49.1	42.7	65.7	151	84.1	164
2008/5/28	103	134	139	160	220	250
2008/7/2	79.3	57.2	63.6	157	105	125
2008/7/23	44.3	56.0	68.5	45.5	138	184
2008/8/26	24.6	20.6	36.1	50.9	50.0	51.9
2008/9/20	32.6	14.9	20.1	22.2	55.1	18.8
2008/10/5	-	11.4	20.3	14.2	16.0	14.4
2008/10/18	54.5	39.4	43.9	13.2	-	28.6
2008/11/8	37.9	19.1	49.0	54.1	25.6	-
2008/12/5	74.8	44.6	58.4	63.1	-	39.1
2009/1/11	84.0	35.6	62.1	100	-	47.9
2009/2/10	121	35.8	73.5	152	262	52.5
Sodium						
2008/2/27	60.7	36.0	32.1	52.6	35.9	33.2
2008/3/26	122	55.0	82.6	-	119	91.5
2008/4/19	57.1	30.9	32.2	75.9	38.6	42.3
2008/5/28	142	93.5	73.8	67.9	137	105
2008/7/2	90.0	31.9	26.7	41.8	35.0	53.8
2008/7/23	53.3	33.3	31.8	32.3	42.7	54.0
2008/8/26	45.6	40.7	43.0	45.6	53.1	53.8
2008/9/20	35.1	19.9	22.9	15.4	51.8	25.2
2008/10/5	-	38.8	31.9	27.6	22.5	29.2
2008/10/18	86.1	75.8	61.2	54.4	-	70.9
2008/11/8	79.5	63.7	78.9	75.1	80.6	-
2008/12/5	113	148	77.8	93.5	-	98.6
2009/1/11	144	70.1	121	114	-	77.4
2009/2/10	183	71.7	120	119	278	100

表 A2、(續)

Table A2. (continued)

Sampling date	Sampling sites					
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Calsium						
2008/2/27	93.8	76.0	63.9	139	48.7	33.4
2008/3/26	151	94.1	112	-	54.1	58.4
2008/4/19	45.1	42.9	37.5	140	32.6	21.1
2008/5/28	80.8	63.1	74.8	150	97.5	59.7
2008/7/2	71.1	43.2	39.5	34.1	28.9	54.6
2008/7/23	67.6	51.8	45.6	26.7	29.3	91.2
2008/8/26	31.5	20.4	17.5	14.0	20.4	22.6
2008/9/20	31.1	25.9	12.8	n.d.	32.2	13.9
2008/10/5	-	23.4	16.2	4.47	11.0	17.1
2008/10/18	90.7	29.4	33.6	n.d.	-	33.7
2008/11/8	66.1	24.3	59.6	53.0	27.3	-
2008/12/5	178	92.5	93.7	46.9	-	29.6
2009/1/11	194	59.8	119	97.3	-	21.6
2009/2/10	341	44.4	147	104	697	44.7
Magesium						
2008/2/27	56.0	53.2	53.4	97.6	51.0	43.6
2008/3/26	122	67.0	86.7	-	78.1	97.8
2008/4/19	35.1	37.0	20.5	166	39.9	26.5
2008/5/28	60.3	59.2	55.4	64.9	101	55.6
2008/7/2	43.3	33.4	26.7	30.3	23.0	56.0
2008/7/23	50.1	49.9	39.7	19.4	37.7	114
2008/8/26	25.7	34.3	21.6	11.8	24.5	25.7
2008/9/20	24.4	9.81	6.70	2.39	29.8	9.93
2008/10/5	-	17.6	19.9	7.97	10.6	15.4
2008/10/18	59.7	27.7	26.7	14.5	-	34.1
2008/11/8	47.3	23.5	50.7	50.8	31.6	-
2008/12/5	114	89.6	87.1	43.7	-	30.8
2009/1/11	118	41.2	103	81.2	-	14.9
2009/2/10	201	34.7	123	93.1	563	40.7

表 A2、(續)

Table A2. (continued)

Sampling date	Sampling sites					
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Iron						
2008/2/27	3.43	6.73	3.47	1.50	1.94	2.59
2008/3/26	3.08	2.38	1.20	-	3.90	3.23
2008/4/19	1.52	4.38	3.74	0.87	1.48	6.08
2008/5/28	2.62	40.9	6.69	1.87	1.87	17.0
2008/7/2	2.40	4.20	7.07	2.64	6.48	13.8
2008/7/23	0.98	1.74	2.97	0.33	2.79	7.92
2008/8/26	0.51	1.08	0.96	1.19	2.30	2.68
2008/9/20	0.53	1.82	2.00	0.24	7.16	2.05
2008/10/5	-	0.85	2.18	0.41	3.49	1.76
2008/10/18	5.36	4.28	8.43	0.76	-	5.54
2008/11/8	4.23	6.15	10.9	2.88	2.95	-
2008/12/5	4.98	1.03	11.1	2.09	-	17.5
2009/1/11	3.22	2.82	13.5	2.65	-	5.03
2009/2/10	7.19	5.64	16.1	3.98	5.80	3.40
Aluminum						
2008/2/27	47.2	20.8	37.4	10.6	11.2	19.3
2008/3/26	62.1	16.3	24.5	-	19.4	38.2
2008/4/19	38.2	23.1	24.7	20.6	18.4	43.9
2008/5/28	68.0	60.6	70.4	22.3	35.2	77.1
2008/7/2	50.8	22.0	41.3	15.0	24.9	61.6
2008/7/23	21.0	20.3	23.4	3.69	18.5	50.9
2008/8/26	11.5	7.61	8.97	6.50	14.9	14.6
2008/9/20	5.14	8.81	10.8	1.39	24.7	13.7
2008/10/5	-	5.03	11.5	1.37	10.4	12.2
2008/10/18	58.6	18.2	40.3	1.23	-	16.9
2008/11/8	30.1	16.2	45.7	12.4	15.7	-
2008/12/5	74.0	4.7	57.1	13.5	-	56.6
2009/1/11	75.9	14.3	74.8	28.6	-	24.9
2009/2/10	144	22.7	92.6	40.9	49.9	33.8

表 A2、(續)

Table A2. (continued)

Sampling date	Sampling sites					
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Manganese						
2008/2/27	1.70	2.29	1.84	1.44	2.30	2.03
2008/3/26	3.37	2.83	2.71	-	1.64	5.03
2008/4/19	0.90	1.41	0.58	5.35	0.67	0.46
2008/5/28	1.66	1.08	0.87	n.d.	4.32	0.05
2008/7/2	0.76	0.53	1.10	n.d.	0.34	0.14
2008/7/23	0.81	0.66	1.41	0.11	0.05	0.30
2008/8/26	0.50	0.20	0.30	0.05	0.09	0.11
2008/9/20	0.16	0.14	0.09	0.01	0.45	0.23
2008/10/5	-	0.21	0.32	0.02	0.17	0.54
2008/10/18	0.98	0.31	0.79	0.39	-	0.98
2008/11/8	0.61	0.49	1.71	2.27	1.38	-
2008/12/5	1.21	0.83	2.72	1.45	-	0.68
2009/1/11	0.72	0.83	3.68	3.70	-	0.38
2009/2/10	1.54	0.72	3.64	4.82	17.6	1.63

*樣區代號。X 代表弱育土研究區，Y 代表極育土研究區，數字表示重複樣區。

*Sampling site. X means Inceptisols study site. Y means Ultisols study site. The number means the duplicated site.

-無水樣。

-no data.

表 A3、試驗期間兩研究區 A 層土壤溶液陽離子組成鉀、鈉、鈣、鎂、鐵、鋁與錳的濃度變化

Table A3. K, Na, Ca, Mg, Fe, Al, and Mn concentrations of soil solution at A horizon in two study sites during the experiment

Sampling date	Sampling sites					
	X1 [#]	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Potassium						
2008/2/27	48.6	42.1	26.8	-	27.8	12.7
2008/3/26	7.63	5.71	-	-	54.0	40.9
2008/4/19	7.3	12.8	-	32.4	55.8	43.8
2008/5/28	11.6	6.82	-	55.3	57.7	83.6
2008/7/2	11.9	10.6	-	68.5	41.8	42.7
2008/7/23	14.8	9.34	84.0	55.5	47.5	60.7
2008/8/26	13.5	6.39	19.9	43.7	31.2	23.9
2008/9/20	8.75	5.00	14.2	19.3	9.91	11.6
2008/10/5	4.31	4.01	9.55	13.2	6.55	6.81
2008/10/18	25.9	27.9	30.2	28.2	17.7	13.5
2008/11/8	11.1	8.01	14.7	16.4	13.5	14.6
2008/12/5	10.2	10.2	11.4	33.1	20.1	15.2
2009/1/11	7.9	8.2	9.17	37.9	12.2	17.3
2009/2/10	15.3	6.35	9.52	31.8	32.1	16.5
Sodium						
2008/2/27	29.6	41.4	22.9	-	78.4	46.7
2008/3/26	53.5	56.4	-	-	109	77.6
2008/4/19	36.7	47.8	-	15.1	95.3	51.0
2008/5/28	65.3	69.1	-	44.8	135	93.0
2008/7/2	58.6	55.0	-	125	73.5	43.7
2008/7/23	39.2	41.8	47.3	38.0	58.6	39.9
2008/8/26	47.6	39.6	44.8	49.0	57.8	57.6
2008/9/20	30.4	21.4	46.9	28.8	22.0	23.8
2008/10/5	29.7	25.6	30.0	29.9	29.6	40.2
2008/10/18	88.0	73.7	60.7	64.6	78.7	76.2
2008/11/8	77.8	75.6	63.7	63.1	79.4	76.9
2008/12/5	84.6	90.1	64.9	89.5	80.9	70.7
2009/1/11	111	93.8	96.2	118	116	112
2009/2/10	106	96.7	89.3	113	142	119

表 A3、(續)

Table A3. (continued)

Sampling date	Sampling sites					
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Calsium						
2008/2/27	428	469	37.7	-	543	564
2008/3/26	660	735	-	-	873	834
2008/4/19	467	436	-	31.1	588	514
2008/5/28	600	664	-	61.3	704	681
2008/7/2	374	517	-	136	479	242
2008/7/23	467	574	172	658	586	373
2008/8/26	188	170	265	147	161	119
2008/9/20	208	194	312	100	66.7	108
2008/10/5	213	120	253	68.7	86.2	84.8
2008/10/18	363	430	333	302	383	251
2008/11/8	332	403	289	368	348	250
2008/12/5	541	672	373	679	512	376
2009/1/11	503	635	506	744	413	245
2009/2/10	636	889	585	795	610	461
Magesium						
2008/2/27	60.4	72.7	26.2	-	190	104
2008/3/26	100	120	-	-	243	190
2008/4/19	78.8	78.2	-	21.6	149	114
2008/5/28	86.3	97.3	-	31.9	175	126
2008/7/2	51.8	71.5	-	29.1	96.7	37.8
2008/7/23	62.7	74.8	49.3	67.5	103	49.7
2008/8/26	27.2	24.4	39.4	28.0	37.2	24.6
2008/9/20	40.6	20.7	46.0	14.6	10.3	14.0
2008/10/5	27.6	15.2	30.0	14.2	42.5	294
2008/10/18	46.7	48.5	44.5	38.5	51.8	35.9
2008/11/8	41.5	44.7	42.1	44.0	45.3	34.4
2008/12/5	68.7	70.2	50.3	74.4	66.6	46.1
2009/1/11	73.1	77.6	74.6	73.7	67.8	38.4
2009/2/10	92.5	106	89.7	70.7	120	52.3

表 A3、(續)

Table A3. (continued)

Sampling date	Sampling sites					
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Iron						
2008/2/27	3.31	0.80	1.70	-	2.32	3.58
2008/3/26	1.06	0.69	-	-	2.12	1.42
2008/4/19	0.95	1.05	-	1.22	2.46	2.70
2008/5/28	1.03	2.83	-	0.46	3.25	3.90
2008/7/2	1.47	4.13	-	3.14	6.37	7.07
2008/7/23	1.77	3.81	3.02	14.9	7.90	7.45
2008/8/26	0.91	1.41	1.94	2.09	1.79	5.58
2008/9/20	2.05	3.31	3.92	5.44	6.75	3.50
2008/10/5	5.09	2.52	5.01	4.51	4.28	9.51
2008/10/18	3.36	3.02	6.84	7.28	49.5	5.76
2008/11/8	3.18	3.97	9.14	40.1	23.7	5.94
2008/12/5	3.99	2.29	7.69	29.3	36.7	11.7
2009/1/11	2.74	2.58	3.54	5.56	8.11	4.42
2009/2/10	4.50	6.42	11.5	32.4	18.2	10.2
Aluminum						
2008/2/27	5.55	0.20	11.4	-	0.23	4.69
2008/3/26	n.d.	n.d.	-	-	n.d.	3.83
2008/4/19	0.15	n.d.	-	7.69	1.43	10.7
2008/5/28	5.11	8.93	-	7.33	10.7	26.2
2008/7/2	6.45	9.60	-	11.9	16.3	28.0
2008/7/23	3.55	5.14	59.8	21.0	14.1	24.7
2008/8/26	3.07	2.68	14.8	6.36	6.83	18.0
2008/9/20	7.20	7.95	28.0	12.5	22.1	11.0
2008/10/5	13.2	6.94	20.3	11.3	11.4	30.1
2008/10/18	6.03	4.38	21.9	9.49	58.3	13.3
2008/11/8	6.54	5.59	22.1	72.8	34.5	13.8
2008/12/5	6.66	n.d.	18.2	40.3	51.3	23.2
2009/1/11	7.80	3.32	12.4	4.68	13.8	12.8
2009/2/10	10.4	9.65	28.2	62.4	27.2	25.1

表 A3、(續)

Table A3. (continued)

Sampling date	Sampling sites					
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Manganese						
2008/2/27	0.22	0.13	1.63	-	0.11	0.14
2008/3/26	0.09	0.18	-	-	0.09	0.45
2008/4/19	0.06	0.09	-	1.05	0.09	0.15
2008/5/28	n.d.	n.d.	-	0.60	n.d.	n.d.
2008/7/2	0.01	n.d.	-	0.02	n.d.	n.d.
2008/7/23	0.05	0.03	1.06	0.04	0.02	0.05
2008/8/26	0.02	0.02	0.06	0.04	0.04	0.06
2008/9/20	0.00	0.00	0.12	0.03	0.03	0.02
2008/10/5	0.01	0.01	0.06	0.02	0.04	0.09
2008/10/18	0.21	0.17	0.20	0.06	0.08	0.07
2008/11/8	0.10	0.10	0.12	0.22	0.22	0.21
2008/12/5	0.06	0.05	0.07	n.d.	0.00	n.d.
2009/1/11	0.10	0.09	0.10	0.09	0.10	0.22
2009/2/10	0.10	0.09	0.14	0.12	0.17	0.14

*樣區代號。X 代表弱育土研究區，Y 代表極育土研究區，數字表示重複樣區。

*Sampling site. X means Inceptisols study site. Y means Ultisols study site. The number means the duplicated site.

-無水樣。

-no data.

表 A4、試驗期間兩研究區 B 層土壤溶液陽離子組成鉀、鈉、鈣、鎂、鐵、鋁與錳的濃度變化

Table A4. K, Na, Ca, Mg, Fe, Al, and Mn concentrations of soil solution at B horizon in two study sites during the experiment

Sampling date	Sampling sites					
	X1 [#]	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Potassium						
2008/2/27	8.00	3.95	19.1	13.2	8.78	9.38
2008/3/26	2.39	1.82	8.27	24.9	5.53	10.1
2008/4/19	1.65	5.37	3.27	31.1	16.2	10.2
2008/5/28	1.89	3.28	3.65	57.3	23.0	8.90
2008/7/2	2.85	2.93	10.0	57.1	12.9	9.79
2008/7/23	4.89	5.57	12.4	68.2	19.3	15.01
2008/8/26	2.93	2.66	10.7	40.3	10.7	12.0
2008/9/20	-	2.72	4.85	18.7	10.8	9.49
2008/10/5	3.95	1.28	7.02	12.8	5.66	5.20
2008/10/18	22.6	23.7	26.1	20.1	11.1	9.97
2008/11/8	8.01	8.73	9.59	16.9	7.97	5.80
2008/12/5	-	4.92	8.17	29.7	7.74	12.4
2009/1/11	4.07	9.05	6.40	35.1	9.91	7.80
2009/2/10	32.63	3.37	11.1	37.1	10.5	8.74
Sodium						
2008/2/27	36.7	32.1	46.3	40.1	74.4	34.8
2008/3/26	46.5	39.6	55.1	49.5	93.7	38.8
2008/4/19	44.4	38.7	66.2	50.2	85.8	54.4
2008/5/28	69.5	76.3	122	82.2	112	76.3
2008/7/2	55.1	39.8	106	59.9	89.1	53.3
2008/7/23	50.3	38.6	83.9	47.4	67.3	38.8
2008/8/26	43.1	34.1	53.1	47.3	51.8	52.8
2008/9/20	-	27.4	57.9	27.3	25.4	27.5
2008/10/5	26.6	19.2	29.0	36.4	25.3	28.5
2008/10/18	60.3	64.5	43.9	80.9	71.0	71.8
2008/11/8	56.2	61.4	50.3	77.3	67.0	70.9
2008/12/5	-	74.9	61.1	85.5	65.8	73.7
2009/1/11	78.1	77.7	72.9	108	100	101
2009/2/10	95.2	65.0	82.4	116	94.2	92.9

表 A4、(續)

Table A4. (continued)

Sampling date	Sampling sites					
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Calsium						
2008/2/27	299	486	351	519	108	338
2008/3/26	481	493	698	718	812	579
2008/4/19	416	276	503	429	399	248
2008/5/28	498	384	751	747	522	375
2008/7/2	369	292	656	406	233	188
2008/7/23	461	449	594	459	410	286
2008/8/26	287	182	305	203	116	75
2008/9/20	-	204	344	111	93.3	50.7
2008/10/5	175	168	207	87.7	75.5	51.0
2008/10/18	322	344	383	300	231	69
2008/11/8	193	269	372	327	211	83
2008/12/5	-	512	494	572	215	307
2009/1/11	297	492	636	397	343	163
2009/2/10	138	631	755	595	536	266
Magesium						
2008/2/27	87.7	71.6	76.3	68.7	83.7	68.8
2008/3/26	133	83.7	117	92.4	99.5	85.5
2008/4/19	105	57.0	88.8	73.7	70.4	69.9
2008/5/28	113	82.1	119	88.2	73.2	83.5
2008/7/2	70.3	53.2	100	56.5	45.8	43.0
2008/7/23	84.3	79.5	89.5	66.0	51.7	45.7
2008/8/26	47.8	30.3	58.5	31.2	37.5	40.9
2008/9/20	-	31.0	56.2	16.6	13.4	18.3
2008/10/5	89.5	20.1	37.5	20.7	71.0	16.0
2008/10/18	53.6	39.0	65.2	35.0	32.7	21.0
2008/11/8	31.2	33.8	56.4	39.1	28.3	20.2
2008/12/5	-	60.8	67.2	53.2	31.6	37.4
2009/1/11	50.7	76.0	104	52.8	42.1	33.9
2009/2/10	38.2	99.8	136	76.6	56.0	41.1

表 A4、(續)

Table A4. (continued)

Sampling date	Sampling sites					
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Iron						
2008/2/27	2.57	1.24	0.30	6.45	1.59	0.10
2008/3/26	3.43	1.62	2.95	5.96	1.94	1.05
2008/4/19	1.52	2.78	3.88	8.53	2.31	0.38
2008/5/28	3.29	3.83	7.77	15.1	2.29	1.82
2008/7/2	2.19	3.67	6.48	23.6	3.64	3.24
2008/7/23	0.92	2.36	7.02	20.6	4.98	8.98
2008/8/26	1.03	0.45	3.24	7.51	1.39	0.64
2008/9/20	-	4.20	0.09	7.08	2.86	5.21
2008/10/5	2.93	1.51	9.70	4.92	3.04	4.59
2008/10/18	2.18	1.76	9.36	10.3	3.18	0.70
2008/11/8	2.91	2.09	7.64	22.1	12.1	2.28
2008/12/5	-	1.41	6.26	33.6	15.0	12.4
2009/1/11	1.66	1.49	6.02	13.4	2.92	1.10
2009/2/10	1.31	8.16	6.48	25.4	5.07	1.46
Aluminum						
2008/2/27	5.06	n.d.	n.d.	9.21	n.d.	n.d.
2008/3/26	3.78	0.28	0.87	4.00	n.d.	n.d.
2008/4/19	0.83	4.78	4.42	12.0	0.65	n.d.
2008/5/28	10.4	11.1	20.0	35.0	5.60	7.52
2008/7/2	8.12	14.2	18.3	57.6	8.88	11.8
2008/7/23	0.26	5.37	11.4	39.1	6.98	24.5
2008/8/26	2.60	1.45	5.34	13.8	2.84	2.32
2008/9/20	-	9.67	n.d.	17.1	7.64	15.4
2008/10/5	8.59	5.27	22.6	11.8	8.71	15.2
2008/10/18	4.57	5.36	18.0	18.0	5.14	1.32
2008/11/8	6.30	2.12	12.6	46.1	23.3	6.21
2008/12/5	-	0.23	8.36	61.7	41.7	22.4
2009/1/11	3.11	1.14	9.18	27.8	4.22	2.31
2009/2/10	6.51	17.6	8.52	48.0	6.30	2.28

表 A4、(續)

Table A4. (continued)

Sampling date	Sampling sites					
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Manganese						
2008/2/27	0.38	0.23	0.48	0.29	0.18	0.56
2008/3/26	0.15	0.07	0.19	0.07	0.10	0.24
2008/4/19	0.09	0.10	0.17	0.02	0.15	0.45
2008/5/28	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.09
2008/7/2	0.00	0.05	0.15	n.d.	0.03	0.13
2008/7/23	0.06	0.04	0.06	0.05	0.04	0.04
2008/8/26	0.04	0.09	0.06	0.01	0.02	0.22
2008/9/20	-	0.03	0.20	0.02	0.06	0.10
2008/10/5	0.02	0.03	0.05	0.06	0.10	0.21
2008/10/18	0.17	0.18	0.18	0.06	0.12	0.33
2008/11/8	0.08	0.09	0.10	0.22	0.21	0.25
2008/12/5	-	0.05	0.06	n.d.	n.d.	n.d.
2009/1/11	0.11	0.08	0.08	0.13	0.07	0.25
2009/2/10	0.12	0.10	0.13	0.11	0.08	0.13

*樣區代號。X 代表弱育土研究區，Y 代表極育土研究區，數字表示重複樣區。

*Sampling site. X means Inceptisols study site. Y means Ultisols study site. The number means the duplicated site.

-無水樣。

-no data.

表 A5、試驗期間兩研究區穿落水陰離子組成氯、硝酸根、與硫酸根離子的濃度變化

Table A5. Cl, NO₃, and SO₄ concentrations of throughfall in two study sites during the experiment

Sampling date	Sampling sites					
	X1 [#]	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Cl						
2008/2/27	58.7	54.9	66.3	63.2	239	59.8
2008/3/26	166	112	129	100	361	125
2008/4/19	81.5	52.7	67.1	45.2	149	67.2
2008/5/28	101	77.6	122	65.4	198	88.1
2008/7/2	39.6	32.3	71.1	34.9	85.7	40.7
2008/7/23	90.0	78.8	138	140	127	110
2008/8/26	87.8	87.7	115	84.0	98.9	87.3
2008/9/20	45.3	46.1	54.7	39.3	50.0	42.4
2008/10/5	100	94.9	128	90.8	415	179
2008/10/18	104	96.4	126	125	136	102
2008/11/8	91.7	97.7	89.6	92.3	98.4	111
2008/12/5	175	156	162	144	164	203
2009/1/11	97.2	86.0	74.4	75.1	94.9	151
2009/2/10	125	118	88.3	114	79.8	177
NO ₃						
2008/2/27	13.6	14.7	6.72	13.4	4.48	12.1
2008/3/26	77.8	69.5	42.7	51.9	30.5	40.9
2008/4/19	21.0	10.4	12.3	18.3	9.23	17.1
2008/5/28	31.9	27.3	12.2	20.8	16.4	19.6
2008/7/2	19.9	18.3	19.4	15.0	10.3	16.0
2008/7/23	18.9	10.1	16.8	12.2	8.42	10.2
2008/8/26	10.8	13.1	18.0	7.95	8.13	12.8
2008/9/20	7.54	8.01	7.43	n.d.	n.d.	8.84
2008/10/5	7.34	8.65	12.7	n.d.	7.54	7.62
2008/10/18	14.4	19.5	7.12	27.9	n.d.	11.8
2008/11/8	26.3	24.2	21.2	15.1	18.3	15.0
2008/12/5	28.2	27.1	28.1	14.5	15.1	16.7
2009/1/11	25.3	15.9	15.2	16.1	15.4	17.4
2009/2/10	25.8	18.0	23.5	22.5	8.95	18.2

表 A5、(續)

Table A5. (continued)

Sampling date	Sampling sites					
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
SO ₄						
2008/2/27	71.4	70.6	71.6	74.2	155	78.0
2008/3/26	183	137	131	132	258	153
2008/4/19	58.3	38.6	41.0	42.6	82.5	60.3
2008/5/28	80.9	63.3	69.9	70.0	117.3	85.7
2008/7/2	33.2	27.1	28.6	28.5	50.2	30.7
2008/7/23	36.4	24.8	30.2	24.5	45.1	31.2
2008/8/26	25.9	26.4	32.0	40.0	28.7	26.4
2008/9/20	13.9	13.0	14.1	12.2	14.4	15.3
2008/10/5	21.1	22.7	21.9	16.8	26.5	18.0
2008/10/18	48.6	43.7	47.6	57.7	51.9	46.0
2008/11/8	55.3	58.5	52.7	54.5	57.7	64.7
2008/12/5	78.1	77.0	72.0	70.3	78.5	86.4
2009/1/11	59.4	48.3	45.2	52.5	57.4	92.6
2009/2/10	8.12	n.d.	7.01	n.d.	n.d.	7.36

*樣區代號。X 代表弱育土研究區，Y 代表極育土研究區，數字表示重複樣區。

*Sampling site. X means Inceptisols study site. Y means Ultisols study site. The number means the duplicated site.

表 A6、試驗期間兩研究區地表逕流水陰離子組成氯、硝酸根、與硫酸根離子的濃度變化

Table A6. Cl, NO₃, and SO₄ concentrations of surface runoff in two study sites during the experiment

Sampling date	Sampling sites					
	X1 [#]	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Cl						
2008/2/27	80.1	75.9	113	211	100	84.3
2008/3/26	208	108	236	-	324	267
2008/4/19	12.4	82.8	83.1	354	116	105
2008/5/28	113	131	110	113	202	153
2008/7/2	53.8	45.4	48.4	92.3	86.3	72.5
2008/7/23	82	74	113	72	128	150
2008/8/26	87.1	82.6	105	82.9	86.6	101
2008/9/20	63.1	48.7	52.1	47.0	108	53.2
2008/10/5	-	81.5	89.1	71.5	60.7	68.4
2008/10/18	117	118	101	94.2	-	94.9
2008/11/8	110	101	117	151	118	-
2008/12/5	127	206	117	155	-	141
2009/1/11	112	89.3	129	175	-	89
2009/2/10	136	94.6	128	241	506	114
NO ₃						
2008/2/27	43.5	34.7	12.6	74.9	20.8	20.0
2008/3/26	96.4	89.4	70.6	-	61.6	55.7
2008/4/19	3.7	26.3	7.27	138	39.7	24.0
2008/5/28	51.7	13.9	50.1	50.7	108	34.2
2008/7/2	50.8	57.4	25.6	93.7	23.6	84.2
2008/7/23	75.3	66.0	22.9	8.08	27.9	139
2008/8/26	39.5	21.9	12.3	8.74	7.93	33.4
2008/9/20	49.1	20.5	9.18	n.d.	7.43	17.4
2008/10/5	-	24.8	9.93	7.14	7.02	19.9
2008/10/18	7.16	49.8	14.2	7.81	-	17.8
2008/11/8	52.1	69.1	72.4	68.7	24.0	-
2008/12/5	131	113	102	54.7	-	19.8
2009/1/11	67.8	61.8	127	91.0	-	16.0
2009/2/10	135	34.1	130	69.6	1241	17.0

表 A6、(續)

Table A6. (continued)

Sampling date	Sampling sites					
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
SO ₄						
2008/2/27	121	127	110	139	100	93.5
2008/3/26	215	120	175	-	239	212
2008/4/19	16.4	80.2	48.1	112	95.7	129
2008/5/28	128	88.2	69.6	98.9	168	162
2008/7/2	70.9	43.5	32.1	102	52.3	55.0
2008/7/23	37.6	36.6	28.6	21.2	58.4	73.5
2008/8/26	39.7	24.8	22.8	16.0	23.6	30.8
2008/9/20	17.6	17.9	15.1	15.4	44.1	24.1
2008/10/5	-	21.3	17.4	13.7	22.4	19.3
2008/10/18	61.7	56.9	42.1	43.2	-	45.8
2008/11/8	60.1	43.3	52.5	73.3	68.8	-
2008/12/5	86.5	72.5	61.2	76.7	-	90.9
2009/1/11	99.9	56.4	90.1	106	-	66.6
2009/2/10	11.2	7.36	10.1	7.94	7.96	8.3

*樣區代號。X 代表弱育土研究區，Y 代表極育土研究區，數字表示重複樣區。

*Sampling site. X means Inceptisols study site. Y means Ultisols study site. The number means the duplicated site.

-無水樣。

-no data.

表 A7、試驗期間兩研究區地表 A 層土壤溶液陰離子組成氯、硝酸根、與硫酸根離子的濃度變化

Table A7. Cl, NO₃, and SO₄ concentrations of soil solution at A horizon in two study sites during the experiment

Sampling date	Sampling sites					
	X1 #	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Cl						
2008/2/27	69.0	83.2	82.2	-	182	88.0
2008/3/26	168	169	-	-	369	225
2008/4/19	83.8	105	-	61.2	278	112
2008/5/28	113	125	-	98.5	235	154
2008/7/2	55.5	90.8	-	154	133	62.2
2008/7/23	78.8	78.3	152	103	152	91.2
2008/8/26	102	96.0	126	85.8	120	102
2008/9/20	49.4	42.6	114	52.1	45.6	48.1
2008/10/5	87.5	67.8	109	73.9	78.8	358
2008/10/18	140	159	137	108	161	116
2008/11/8	104	111	123	95.1	126	109
2008/12/5	121	107	96.1	147	123	138
2009/1/11	158	162	162	168	206	102
2009/2/10	133	130	139	177	227	116
NO ₃						
2008/2/27	76.6	162	6.97	-	124	255
2008/3/26	302	343	-	-	400	688
2008/4/19	188	129	-	10.2	249	339
2008/5/28	268	323	-	22.2	345	534
2008/7/2	120	99.2	-	41.5	94.4	57.1
2008/7/23	144	115	8.25	44.4	29.2	52.5
2008/8/26	46.0	26.5	51.0	8.12	13.7	35.4
2008/9/20	56.0	15.0	61.3	7.13	10.6	n.d.
2008/10/5	64.2	14.4	23.7	n.d.	n.d.	12.4
2008/10/18	95.5	60.7	33.4	7.07	19.7	65.6
2008/11/8	117	84.4	41.9	8.93	31.5	76.7
2008/12/5	170	173	69.9	9.22	17.2	54.5
2009/1/11	158	181	80.7	11.1	12.4	25.9
2009/2/10	68.7	112	42.4	17.5	10.0	47.6

表 A7、(續)

Table A7. (continued)

Sampling date	Sampling sites					
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
SO ₄						
2008/2/27	118	165	76.7	-	217	122
2008/3/26	128	161	-	-	307	143
2008/4/19	108	136	-	65.4	198	123
2008/5/28	106	133	-	70.4	179	115
2008/7/2	80.6	113	-	51.8	147	102
2008/7/23	69.3	102	45.3	87.0	141	87.7
2008/8/26	45.4	51.9	55.2	46.3	65.4	57.3
2008/9/20	40.0	54.2	59.7	45.0	37.2	38.4
2008/10/5	32.6	38.8	33.1	36.0	40.3	36.5
2008/10/18	48.4	41.5	43.6	47.6	58.9	47.1
2008/11/8	55.2	51.0	52.5	62.0	69.6	49.6
2008/12/5	64.9	60.3	51.3	93.2	89.8	61.1
2009/1/11	86.1	64.7	83.9	89.6	97.2	104
2009/2/10	6.88	6.72	7.23	n.d.	6.87	n.d.

*樣區代號。X 代表弱育土研究區，Y 代表極育土研究區，數字表示重複樣區。

*Sampling site. X means Inceptisols study site. Y means Ultisols study site. The number means the duplicated site.

-無水樣。

-no data.

表 A8、試驗期間兩研究區地表 B 層土壤溶液陰離子組成氯、硝酸根、與硫酸根離子的濃度變化

Table A8. Cl, NO₃, and SO₄ concentrations of soil solution at B horizon in two study sites during the experiment

Sampling date	Sampling sites					
	X1 [#]	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
Cl						
2008/2/27	75.5	72.0	101	111	282	63.0
2008/3/26	141	124	165	169	357	140
2008/4/19	110	93.9	156	124	250	115
2008/5/28	104	80.9	171	137	215	113
2008/7/2	67.4	43.2	147	90.1	165	85.0
2008/7/23	67.7	55	132	109	168	71.6
2008/8/26	94.9	86.9	103	97.6	120	101
2008/9/20	20.7	75.5	45.2	49.8	44.5	
2008/10/5	67.1	54.9	80.9	94.1	75.1	59.7
2008/10/18	135	131	126	163	178	123
2008/11/8	99.3	89.1	140	129	139	112
2008/12/5	-	80.3	125	141	144	96.3
2009/1/11	102	131	140	182	222	176
2009/2/10	121	104	181	181	252	152
NO ₃						
2008/2/27	92.2	116	193	110	131	153
2008/3/26	224	159	369	221	252	113
2008/4/19	210	97.8	326	198	129	177
2008/5/28	264	158	527	261	179	248
2008/7/2	164	128	470	70.0	36.9	65.4
2008/7/23	213	236	318	42.2	21.7	48.7
2008/8/26	106	56.1	128	11.3	9.23	10.0
2008/9/20	54.9	264	-	7.3	n.d.	8.0
2008/10/5	41.9	35.1	19.0	67.8	7.32	9.27
2008/10/18	84.3	55.7	37.7	7.43	8.82	16.4
2008/11/8	57.6	55.8	52.5	10.3	14.1	28.1
2008/12/5	-	161	89.4	9.53	14.1	41.5
2009/1/11	104	102	133	8.16	9.72	22.2
2009/2/10	48.6	37.0	116	7.13	9.04	25.1

表 A8、(續)

Table A8. (continued)

Sampling date	Sampling sites					
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
	-----µeq/L-----					
SO ₄						
2008/2/27	95.8	173	92.6	181	128	170
2008/3/26	87.9	130	152	214	172	155
2008/4/19	86.3	83.1	79.2	226	89.5	86.9
2008/5/28	74.8	88.2	83.2	149	94.6	99.3
2008/7/2	70.5	61.1	82.6	136	64.2	86.0
2008/7/23	66.8	56.3	64.2	132	86.6	104
2008/8/26	56.8	54.6	56.8	103	54.7	61.4
2008/9/20	60.4	43.6	-	66.4	51.5	60.5
2008/10/5	43.9	50.0	56.6	45.8	41.5	50.7
2008/10/18	38.6	41.4	55.3	58.5	38.5	48.3
2008/11/8	47.8	54.9	50.7	68.0	51.7	51.6
2008/12/5	-	58.4	70.0	79.6	67.0	74.5
2009/1/11	60.4	77.0	99.1	99.1	61.6	144
2009/2/10	6.70	n.d.	6.82	7.25	n.d.	n.d.

*樣區代號。X 代表弱育土研究區，Y 代表極育土研究區，數字表示重複樣區。

*Sampling site. X means Inceptisols study site. Y means Ultisols study site. The number means the duplicated site.

-無水樣。

-no data.