

國立臺灣大學生物資源暨農學院森林環境暨資源學系

博士論文

School of Forestry and Resource Conservation

College of Bioresource and Agriculture

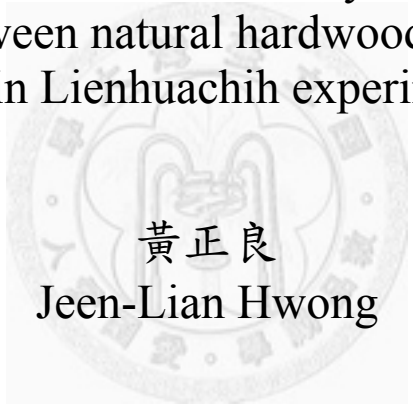
National Taiwan University

Doctoral Dissertation

蓮華池天然闊葉林及杉木人工林試驗集水區

水文與水質特性之探討

Studies on the characteristics of hydrology and water
chemistry between natural hardwood and China-fir
plantation forests in Lienhuachih experimental watersheds



黃正良

Jeen-Lian Hwong

指導教授：陳明杰 博士

Advisor: Ming-Chieh Chen, Ph.D.

中華民國九十九年七月

July, 2010

中文摘要

以適應性、永續性概念之森林生態系經營是目前許多國家的森林經營理念，以期滿足生態、經濟及社會的需求。水文過程為森林生態系重要一環，與能量循環、養分循環、植群分佈，以及土壤化育等密切相關，故推行森林生態系經營時，了解該生態系的森林水文現象與過程是重要的事。林業試驗所自 1966 年起，陸續在蓮華池試驗林設置五座森林試驗集水區，進行森林水文研究；1979 年更選定 4 號及 5 號集水區實施駢對集水區試驗，探討集水區森林經營（伐木作業）造成水文特性的差異，供說明森林對涵養水源、減緩洪害及過濾水質等效益，開創台灣森林水文研究新頁。本論文一方面依蓮華池森林水文特性之相關研究，將其區分成五大主題：氣象水文、地表水文、地下水文、土壤沖蝕及水化學與土壤化學等，進行文獻歸納整理及回顧分析。並且，進行天然闊葉林（5 號集水區）與杉木人工林（4 號集水區）之林下光環境與植群調查、土壤水力傳導度測定、降雨特性與森林經營對退水過程的影響、水化學等相關試驗研究。

本論文利用半球面影像取樣技術與林下植物多樣性分析，比較杉木人工林與天然闊葉林之林下光照環境，結果顯示杉木人工林林下光照指數較天然闊葉林高，林下植物多樣性指數變異程度也較天然闊葉林大，而天然闊葉林則因樹種多樣、冠層結構較複雜，其林下光照指數的變異程度較大。天然闊葉林植群型為九節木—黃杞型，樹冠層高度約 12~18 m，優勢樹種為黃杞、鵝掌柴、紅皮、單刺苦楮、捲斗櫟、香桂等，人工杉木林植群型為三腳鬮—杉木型，林下小樹極多，且具有較多陽性樹種。植物社會的樹冠層高度約 8~15 m，優勢樹種為杉木、白白、墨點櫻桃、鵝掌柴、頷垂豆等。

土壤水力傳導度(soil hydraulic conductivity)與水分入滲、土壤水移動、逕流路徑及化學傳輸等密切相關，因此土壤水力傳導度常是研究森林水文特性之重要指標。本論文探討杉木人工林與天然闊葉林土壤水力傳導度之差異，以 Guelph 滲透計分別調查山頂、山腹及山谷之土壤水力傳導度之特性。結果顯示，杉木人工林與天然闊葉林土壤水力傳導度相似，且山頂、山腹及山谷之土壤水力傳導度亦無差異，但土深 20 cm 處之土壤水力傳導度則明顯高於土深 40 cm 處之土壤水力傳導度。

依據 1976 年至 2006 年間蓮華池氣象站之記錄，本區年平均雨量為 2316.5 mm，每年降雨日數平均為 132 天，乾、濕季分明，雨量集中在 5-8 月份，佔平均年雨量的 71.4%。主要因為中部地區受東北季風降雨之影響很小，大雨來源以颱風豪雨、鋒面型與夏季對流雨為主。

蒐集杉木人工林（4 號集水區）於 1973 年至 2007 年間之雨量及流量資料，其間歷經 1978 年天然闊葉林皆伐作業、1982 年杉木造林與 1997 年疏伐作業等，採用潘斯(Barnes, 1930)之退水曲線逕流分離法，來探討 4 號集水區歷經天然闊葉林、皆伐作業與人工林等森林經營方式對於逕流歷線之退水段造成的影響。結果顯示，皆伐與疏伐作業皆會使地表逕流、地中逕流與基底逕流之退水速度變快。地表逕流退水係數 Kr_1 在皆伐時期、疏伐時期受到降雨條件與地表植被狀況的影響較大。地表逕流終了時間 t_1 與降雨量有顯著的相關。而短時間的降雨量對地表逕流的影響大於地中逕流、基底逕流；基底逕流則受長時期季節性的總雨量影響較大。

在水資源的經營管理上，水量的多寡固然重要，但水質的優劣更是關鍵。最近水質的研究則快速發展，益加受到各方的重視，酸雨即是其中一例。雨水從樹冠、樹幹、土壤到溪流這一連串過程中，水化學的性質不斷地在改變，不同的區位或植生，其改變亦會有所不同。本論文探討天然闊葉林（5 號集水區）與杉木人工林（4 號集水區）之溪流水的水化學，在暴雨期及非暴雨期之差異。結果顯示，集水區的溪流水離子濃度與流量間的關係可分為三種，分別為：(1)稀釋作用：電導度、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- ；(2)接近水文增加作用： NO_3^- ；(3)作用不變： Cl^- 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 H^+ 。 NO_3^- 與 NH_4^+ 不管在天然闊葉林與杉木人工林集水區輸入皆大於輸出，且春夏二季的淨收入量約佔全年的 80%，顯示生態系在生長季仍大量需要氮。而杉木人工林的淨收入都比天然闊葉林為高，表示 4 號集水區杉木在栽植 24 年以後，仍需要比天然闊葉林更多的營養元素以供生長所需。皆伐後的第 24 年，4 號集水區的鹽基陽離子 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 年輸出量仍是 5 號集水區的 1.4~1.8 倍之間。蓮華池天然闊葉林中的 HCO_3^- 的淨輸出量(46.5 Kg/ha)低於福山(250 Kg/ha.yr)及關刀溪(87.7 Kg/ha.yr)，顯示了此處的天然闊葉林生態系統在緩衝酸性沉降的能力可能低於其他地區。

關鍵字：蓮華池、試驗集水區、森林水文、林下光照環境、土壤水力傳導度、水化學

Abstract

Adaptive and sustainable management to meet ecological, economic and social demand has become the basic principle of forest ecosystem management in many countries. Hydrological process is an important component of forest ecosystems and is closely related to energy flow, nutrient cycling, vegetation distribution, and soil development. Therefore, understanding forest hydrology is indispensable in forest ecosystem management. Five experimental watersheds in Lienhuachih Experimental Forest has been set up by Taiwan Forestry Research Institute since 1996. The paired watershed No. 4 (WS4) and watershed No. 5 (WS5) were selected to examine the effect of forest management practice, clearcutting, on forest hydrology and serves as a model of illustrating the benefits of undisturbed forest ecosystems on water resource preservation, flooding mitigation, water purification and to advance studies of forest hydrology in Taiwan. Here I review and analyze five categories of forest hydrology including meteorological hydrology, surface hydrology, groundwater hydrology, soil erosion and water and soil chemistry.

Hemispherical photography was used to study understory light environments at WS4 and WS5 and analyzed its relation to understory plant biodiversity. The result indicates that understory light indices were higher at WS4 (China-fir plantation) than WS5 (natural hardwood forest) but the variability was higher at the WS5 possibly due to the more complex canopy structure resulting from the more diverse tree species. The vegetation of WS5 can be classified as *Psychotria rubra*-*Engelhardtia roxburghiana* type with canopy height ranging from 12 m to 18 m and dominate tree species include *Engelhardtia roxburghiana* · *Schefflera octophylla* · *Styrax suberifolius* · *Castanopsis cuspidate* var. *carlesii* · *Cyclobalanopsis pachyloma* · *Cinnamomum randaiense*. WS4 can be classified as *Tetrastigma dentatum*-*Cunninghamia lanceolata* type with canopy height ranging from 8 m to 15 m and dominate tree species include *Cunninghamia lanceolata* · *Sapium discolor* · *Prunus phaeosticta* · *Schefflera octophylla* · *Archidendron lucidum*.

Soil hydraulic conductivity is closely related to water infiltration, soil water movement and the path of runoff so that is an important characteristic of forest hydrology. This study used Guelph Permeameter was used to measure soil hydraulic conductivity at the ridge, slope and valley at both WS4 and WS5. The result indicates that the two watersheds had similar soil hydraulic conductivity and there was no significant difference among different location on the slopes. However, soil hydraulic conductivity was higher at 20 cm than 40 cm in the soil profile.

Mean annual precipitation between 1976 and 2006 was 2316.5 mm with mean annual rainy days of 132 days. There was distinctive dry and wet seasons with precipitation between May and August contributing to 71.4% of annual precipitation. Due to the lack of northeast monsoon heavy rainfall occurred mainly as typhoon storms, frontal storms and summer convective storms.

The precipitation and discharge data in the WS4 during this period from 1973 to 2007 are collected in this study. However, some forest practices are conducted during this period including natural hardwood forest clear-cutting in 1978, China-fir plantation in 1982, and forest thinning in 1997. In order to understand the effects of different

forest managements including natural hardwood forest, clear-cutting practice, and plantation forest on the water resource utility, we apply the recession curve method (Barnes, 1930) to separate hydrograph. Results show that the recession curves of overland flow, interflow, and base flow are steeper due to the clear-cutting and thinning practices. The coefficient of recession curve of overland flow, Kr_1 , is significantly affected by precipitation condition and land vegetation cover when the clear-cutting and thinning practices are conducted. The time end of overland flow recession, t_1 , is closely related to the amount of rainfall. The overland flow is more significant affected by short period of rainfall than that for interflow and base flow. However, the base flow is more significant affected by the amount of seasonal precipitation.

The relationship between ion concentration and stream discharge can be classified into three groups: 1) dilution with conductivity, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , and HCO_3^- belonging to this group, 2) hydrological access (NO_3^-) and 3) hydrological constant Cl^- , NH_4^+ , K^+ , and H^+ .

Input of NO_3^- and NH_4^+ was greater than output at both the WS5 (natural hardwood forest) and the WS4 (China-fir plantation) with net input during the spring and summer contributing to approximately 80% of the annual net input. The net input was greater at the WS4 than the WS5 suggesting that the China-fir plantation still has higher demand for N than the natural hardwood forest two decades after the planting. The output of Na^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} was 1.4 higher at the 24 year-old China-fir plantation than the natural hardwood forest. The net output of HCO_3^- , 46.5Kg/ha was lower than the levels at Fushan, 250Kg/ha/yr, and Kuandauchi 87.7Kg/ha/yr, suggesting that the natural hardwood forest at Lienhuachih may have lower acid buffering capacity than the other two forests.

Keywords: Lienhuachih, experimental watershed, forest hydrology, understory light environment, soil hydraulic conductivity, water chemistry

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	III
目錄	V
表次	VII
圖次	IX
第一章 緒論.....	1
第一節 研究動機及目的	1
第二節 研究區域	2
第三節 研究架構	7
第二章 相關研究整理分析	8
第一節 氣象水文	8
第二節 地表水文	11
第三節 地下水文	16
第四節 土壤沖蝕	18
第五節 水化學及土壤化學	20
第六節 小結	23
第三章 集水區林下光照環境與植群現況調查分析	24
第一節 林下光照環境調查分析	24
一、前言	24
二、研究方法	25
三、結果與討論	27
四、小結	33
第二節 植群現況調查分析	34
一、前言	34
二、研究方法	34
三、結果與討論	35

四、小結	44
第四章 集水區土壤水力傳導度特性之測定分析.....	46
第一節 前言.....	46
第二節 研究方法.....	47
第三節 結果.....	51
第四節 討論.....	55
第五節 小結.....	60
第五章 降雨特性與森林經營對退水過程之影響.....	61
第一節 前言.....	61
第二節 研究方法.....	61
第三節 結果與討論.....	65
第四節 小結.....	72
第六章 集水區溪流水化學之特性.....	74
第一節 前言.....	74
第二節 研究方法.....	75
第三節 結果與討論.....	75
第四節 小結.....	85
第七章 結論與建議.....	87
第一節 綜合討論.....	87
第二節 結論.....	90
第三節 建議.....	91
參考文獻	93

表 次

表 1	蓮華池氣象站氣象資料統計 (1961-1998)	3
表 2	蓮華池試驗集水區地形因素.....	6
表 3	蓮華池地區樹冠截留量研究結果.....	10
表 4	蓮華池 5 號集水區水化學分析 (1990/2-1993/12)	21
表 5	蓮華池地區不同地表植被之土壤水化學成分	23
表 6	4 號與 5 號集水區林分之胸高直徑、胸高斷面積、林分密度之比較.....	29
表 7	蓮華池與福山試驗林天然闊葉林與人工針葉林林下光照指數之比較	30
表 8	天然闊葉林林下植物各項指數與林內光照環境之相關分析	31
表 9	杉木人工林林下植物各項指數與林內光照環境之相關分析	31
表 10	杉木人工林林分密度與林下植物各項指數之相關性分析	32
表 11	杉木人工林與天然闊葉林林下植物優勢度、歧異度、均勻度與豐富度指數之比較	33
表 12	植群重要指數(IVI)之八分制級值	35
表 13	杉木人工林與天然闊葉林特徵種簡表	37
表 14	天然闊葉林植群重要值指數最高的前 15 種樹種.....	39
表 15	杉木人工林植群重要值指數最高的前 15 種樹種.....	42
表 16	杉木人工林土壤水力傳導度	52
表 17	杉木人工林土壤水力傳導度變異數分析	53
表 18	天然闊葉林土壤水力傳導度	54
表 19	天然闊葉林土壤水力傳導度變異數分析	54
表 20	杉木人工林與天然闊葉林土壤水力傳導度變異數分析比較	55
表 21	張力滲透計與 Guelph 滲透計量測天然闊葉林不同土壤深度飽和水力傳導度結果之比較	58
表 22	張力滲透計(Tension infiltrometer)與 Guelph 滲透計量測杉木人工林不同位置飽和水力傳導度結果之比較	58

表 23	蓮華池地區的降雨特性(1976-2006 年)	65
表 24	蓮華池與福山試驗林的降雨特性之比較(1980-1999 年)	67
表 25	4 號集水區選取降雨事件及其各階段退水曲線係數	68
表 26	4 號集水區森林經營各時期之退水曲線係數統計	70
表 27	各退水階段之退水係數 K_r 值與降雨之關係	71
表 28	不同期間水文資料及時間尺度對退水係數之比較	72
表 29	杉木人工林在基流期與暴雨期的溪水水化學比較	76
表 30	天然闊葉林在基流期與暴雨期的溪水水化學比較	77
表 31	台灣地區不同森林集水區颱風期間溪流最大懸浮質濃度比較	79



圖 次

圖 1	蓮華池研究中心與試驗集水區位置圖	3
圖 2	蓮華池 4 號與 5 號集水區位置圖	6
圖 3	杉木人工林與天然闊葉林孔隙率(Visible Sky)分布圖	27
圖 4	杉木人工林與天然闊葉林散射光立地係數(ISF)分布圖	28
圖 5	杉木人工林與天然闊葉林直射光立地係數(DSF)分布圖	28
圖 6	Cluster Analysis 之林型分群	36
圖 7	樣區在降趨對應分析(DCA)序列軸上的空間分布	36
圖 8	天然闊葉林植群重要值指數最高的前 10 種樹種之徑級分布曲線 ...	41
圖 9	杉木人工林植群重要值指數最高的前 10 種樹種之徑級分布曲線 ...	43
圖 10	Guelph 滲透計基本原理	48
圖 11	Guelph 滲透計研究區域及取樣地點	50
圖 12	杉木人工林與天然闊葉林不同深度土壤水力傳導度	52
圖 13	退水曲線之逕流分離	63
圖 14	蓮華池地區歷年降雨量與年平均雨量	66
圖 15	4 號集水區森林經營各時期 Kr_1 平均值.....	70
圖 16	4 號集水區森林經營各時期 Kr_2 平均值.....	70
圖 17	4 號集水區森林經營各時期 Kr_3 平均值.....	71
圖 18	3、4 與 5 號集水區溪水水質月份濃度變化	83

第一章 緒論

第一節 研究動機及目的

自古以來，人類就已經知道森林對於氣候和水現象 (Water phenomena) 的調節功能，包括森林可調節極端溫度、減少風的危害、減少地表逕流、提高相對濕度等等。從 19 世紀中葉以後，歐美地區開始有系統的觀察、量測森林地區的氣候、水文現象，以科學的方式呈現森林地區氣候、水文特性。工業革命以後，由於人口急速增加，產業發達，從森林地區取得的自然資源包括水、木材等的需求日益迫切，砍伐森林等森林經營過程對氣候、水文的影響受到關注。因此，開始有系統的試驗研究，在全世界各個地區的水文研究大都以試驗集水區為單位的方式展開，目前已經累積有百年以上的資料。1963 年美國集水區經營專家 Dr. Robert Dils 來台考察，鑑於臺灣地區氣候、水文的特殊性，建議政府設立試驗集水區，探討合理的森林經營方法對集水區水文現象的影響，因此，林業試驗所陸續在高雄六龜、南投魚池等地區設立試驗集水區。在這期間，聯合國也於 1965 年至 1974 年大力推行國際水文學 10 年計畫 (International Hydrological Decade, IHD)，臺灣在此內外環境之下，開始有系統的進行森林水文試驗研究工作。近年來，由於人類警覺到地球之溫室效應、環境破壞、物種滅絕等問題日益嚴重，擁有最大之陸生生態系的森林，除了提供人類所需的資源以外，對於二氧化碳減量、物種保育、生態系完整等功能亦深為吾人所期待，因此，特別強調森林生態系永續經營顯得格外重要。而水文過程為森林生態系的物理環境因子，其與能量循環、養分循環、動植物生長發育等皆有密切關係，因此，生態水文的研究與瞭解，為森林生態系永續經營不可或缺的一環。

蓮華池試驗林位於南投縣魚池鄉五城村，海拔高介於 576-925 m 之間，面積 461 ha，林地主要為亞熱帶天然闊葉林，其中 214 ha 為人工林，為台灣中部典型中低海拔之森林生態系，也是台灣中部地區森林水文研究之重要試驗區。自 1966 年起陸續設置五處試驗集水區後，對台灣低海拔森林生態系水文特性之研究助益甚多，尤其是蓮華池 4 號及 5 號集水區作為駢對集水區 (paired watersheds) 試驗之後，更有助於了解森林作業對水文環境的影響 (夏禹九等，1982)。蓮華池 4 號集水區原

本是天然闊葉林，但在 1978 年 11 月至翌年 3 月間進行皆伐作業，一年後低矮灌木幾已完全覆蓋全區，1980 年 10 月再度伐除地表灌木，並於 1981 年 3 月栽植杉木，至今已將屆 30 年。蓮華池 5 號集水區則保留原來天然植被狀況，以資作為對照組。為期能對蓮華池人工林及天然林集水區水文及水質特性有更進一步的認識與瞭解，提供爾後生物地質化學(biogeochemistry)及逕流生成機制(streamflow generation mechanism)等研究所需，並有助於推行長期生態研究及森林生態系經營及復育等參考。本論文以 4 號及 5 號集水區為試驗研究對象，主要研究內容重點包括如下：

- 一、相關研究文獻之總整理。
- 二、林下光照環境與植群現況調查分析。
- 三、土壤水力傳導度之比較。
- 四、降雨特性與森林經營對退水過程的影響。
- 五、溪流水化學之特性。
- 六、結論與建議。



第二節 研究區域

蓮華池試驗林位於南投縣魚池鄉五城村，東經 120°55'，北緯 23°55'，海拔高介於 576-925 m 之間，面積 461.04 ha (圖 1)。位於日月潭北部之丘陵地帶，地形北高南低，屬水里溪上游，區內有蛟龍溪與火培坑溪兩支流，其源頭分別為和尚頭山(958m)及桃米山(778m)，兩條溪至合興橋匯合為合坑溪。主要地質為第三紀始新世之泥質砂岩及頁岩互層所構成。土壤分類上屬於典型老育濕潤極育土(Typic Paleudult)，在砂頁岩母質充分供應鐵源與亞熱帶濕潤氣候條件下，土壤被大量鐵氧化物所染色，形成為紅棕壤，質地為粉質粘壤土或粉質粘土(蔣先覺等，1993)。

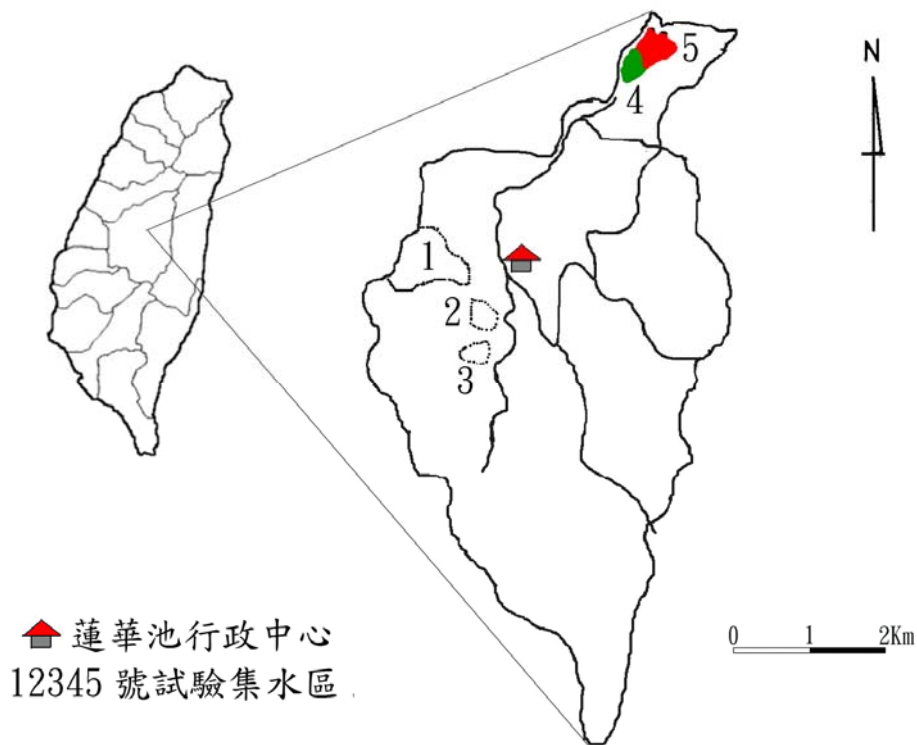


圖 1. 蓮華池研究中心與試驗集水區位置圖

蓮華池氣象站位於東經 $120^{\circ}54'$ ，北緯 $23^{\circ}56'$ ，海拔高 744 m，從 1961 年 1 月開始收集氣象資料，目前主要觀測項目包括氣溫、最高氣溫、最低氣溫、降雨量、蒸發量、日輻射、風向及風速等 (林試所, 1998)。此外，各個量水堰附近亦設有雨量計，收集降雨資料。平均年降雨量為 2,229.1 mm，月降雨量分佈極不平均，乾濕季節極為分明，雨季為 3-9 月，佔全年總降雨量 89.4% (表 1) (Lu *et al.*, 2000)。降雨型態主要為 3、4、5 月份的鋒面雨，夏季的對流雨及颱風帶來之豪雨。每年 6 月為降雨量最高峰，平均為 482.7 mm，佔全年總降雨量的 21.7%，11 月時降雨量最少，只有 21.0 mm。單日最大降雨量為 735.0 mm，發生於 1990 年 8 月 19 日。

表 1. 蓮華池氣象站氣象資料統計 (1961-1998) (Lu *et al.*, 2000)

項目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	總計
降雨量(mm)	50.3	91.8	107.9	134.4	331.4	482.7	333.9	413.3	189.5	41.8	21.0	31.0	2229.1
氣溫($^{\circ}$ C)	14.9	15.9	18.2	21.1	23.3	24.4	25.4	24.9	24.4	22.7	18.6	15.8	20.8*
相對濕度(%)	84.4	85.8	86.3	86.2	86.5	87.1	84.8	86.3	86.2	85.0	84.7	84.1	85.6*
蒸發量(mm)	62.9	60.6	83.7	90.7	89.9	91.9	116.2	104.7	100.8	91.4	70.7	56.9	1020.1

*：平均值

林地主要為亞熱帶天然闊葉林，為台灣中部典型之森林生態系。目前，已登錄的維管束植物計有 177 科、561 屬、879 種。其中，除桃實百日青一種針葉樹以外，全部都是闊葉樹，喬木種類約 53 種，主要由樟科與殼斗科構成之樟儲林，主要樹種有單刺櫛 (*Castanopsis cuspidate* var. *carlesii*)、川上氏櫛 (*Castanopsis kawakamii*)、捲斗櫛 (*Cyclobalanopsis pachyloma*)、三斗石櫛 (*Lithocarpus hancei*)、南投石櫛 (*Lithocarpus nantoensis*)、短尾葉石櫛 (*Lithocarpus harlandii*)、苦扁桃葉石櫛 (*Lithocarpus amygdalifolius*)、厚殼桂 (*Cryptocarya chinensis*)、香楠 (*Machilus zuihoensis*)、南投黃肉楠 (*Actinodaphne nantoensis*)、香桂 (*Cinnamomum randaiense*)、紅楠 (*Machilus thunbergii*) 等，樟科與殼斗科之外主要數種有台灣紅豆樹 (*Ormosia formosana*)、台灣黃杞 (*Engelhardtia roxburghiana*)、木荷 (*Schima superba*)、烏皮茶 (*Pyrenaria shinkoensis*)、山龍眼 (*Helicia formosana*) 等，林下植物主要有柏拉木 (*Blastus cochinchinensis*)、雞屎樹 (*Lasianthus obliquinervis* Merr. var. *obliquinervis*)、黃藤 (*Daemonorops margaritae*)、九節木 (*Psychortia rubra*)、金狗毛蕨 (*Cibotium barometz*)、廣葉鋸齒雙蓋蕨 (*Diplazium dilatatum*) 等 (唐凱軍未發表)。區域內尚有 214 ha 為人工林，樹種包括杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、台灣肖楠 (*Calocedrus macrolepis* Kurz var. *formosana*)、相思樹 (*Acacia confusa*)、楓香 (*Liquidambar formosana*)、檸檬桉 (*Eucalyptus citriodora*)、台灣欒 (*Zelkova formosana*) 等。

就蓮華池五處試驗集水區之植物相而言，並無明顯差異；但各個集水區之主要樹種則有不同，單刺櫛 (*Castanopsis cuspidate* var. *carlesii*)、川上氏櫛 (*Castanopsis kawakamii*)、捲斗櫛 (*Cyclobalanopsis pachyloma*)、烏皮茶 (*Pyrenaria shinkoensis*)、香桂 (*Cinnamomum randaiense*)、紅楠 (*Machilus thunbergii*) 等在 4 號與 5 號試驗集水區較為優勢；三斗石櫛 (*Lithocarpus hancei*)、南投石櫛 (*Lithocarpus nantoensis*)、短尾葉石櫛 (*Lithocarpus harlandii*)、苦扁桃葉石櫛 (*Lithocarpus amygdalifolius*)、厚殼桂 (*Cryptocarya chinensis*)、香楠 (*Machilus zuihoensis*)、南投黃肉楠、台灣紅豆樹 (*Ormosia formosana*)、木荷 (*Schima superba*) 等，則在 1 號與 2 號試驗集水區較為優勢 (唐凱軍未發表)。

葉面積指數 (Leaf Area Index, LAI)，為單位土地面積上之葉片投影面積 (projected area)；是植物葉量多少的指標。LAI 對植物光合作用，太陽能量攔截、蒸發散作用、水分收支平衡及林分生長等有明顯的影響。蓮華池次生林闊葉林的

葉面積指數為 9.01 (ha/ha)。直徑大於 15 cm 的上冠層林木葉面積指數為 4.53，佔全林分葉面積指數 50%，著生於這些林木上的藤葉面積指數為 0.37，佔全林分 4%。中冠層林木的葉面積指數為 2.49，佔全林分 28%。藤類、蘭科植物及樹蕨類的葉面積指數為 0.59，合佔全林分葉面積指數 7%。闊葉林林分的葉面積指數 (9.01) 高於同地區杉木人工林最大葉面積指數 (30 年生的 8.42)，而上、中冠層林的葉面積指數 (7.0) 亦高於杉木林內杉木層最大葉面積指數 (8 年生的 5.67) (洪富文等，1986)。一般森林的葉面積指數可由 0~20，其值因養分、水分、林齡及立木度而產生變化。本林分的葉面積指數與熱帶與林 (7~12)、日本的針葉林 (6~10) 相近，但可能較日本的長綠闊葉林 (5~6) 高，而比美國太平洋西北區的針葉林 (9.7~20) 為低。

1966 年，蓮華池設置五個試驗集水區，分別為第 1、2、3、4、5 號集水區，此五個試驗集水區中，以第 2 號面積最大 (16.13 ha)，第 3 號面積最小 (3.40 ha)，各集水區坡度自 41%至 69%不等，高度介於 670-890 m 之間，各個集水區的地形因素如表 2 (葛錦昭等，1978)。五個試驗集水區皆設置雨量計觀測雨量，和量水堰觀測逕流量，在量水堰設計方面，均採用複式斷面堰口設計，底層為一角度 90° 之三角堰，高度為 30 cm，其上連接一高度 70 cm 之矩形堰組合而成，水位與流量率定曲線則委由台灣大學水工試驗所測定 (台大水工所，1975、1976；陳增壽，1975)。觀測期間發現第 1 號因區外地下水流入集水區內造成逕流量高於降雨量的情形 (范明光、楊楚淇，1979)，故停止觀測。第 2 號因集水區面積不明確也停止觀測。目前只剩第 3、4、5 號集水區仍持續觀測中。除了降雨量、逕流量的觀測之外，並進行溪水之水質取樣分析。另外如圖 2，第 4 號與第 5 號試驗集水區為相同方位且為駢對集水區，面積各為 5.86 公頃與 8.39 公頃，其中 4 號集水區在 1978 年 11 月至翌年 3 月進行皆伐後，隨即人工栽植杉木，5 號試驗集水區則仍維持天然常綠闊葉林的原貌，作為比較不同林相之森林水文特性的差異 (葛錦昭等，1978；夏禹九等，1982)，亦是本論文主要研究對象。

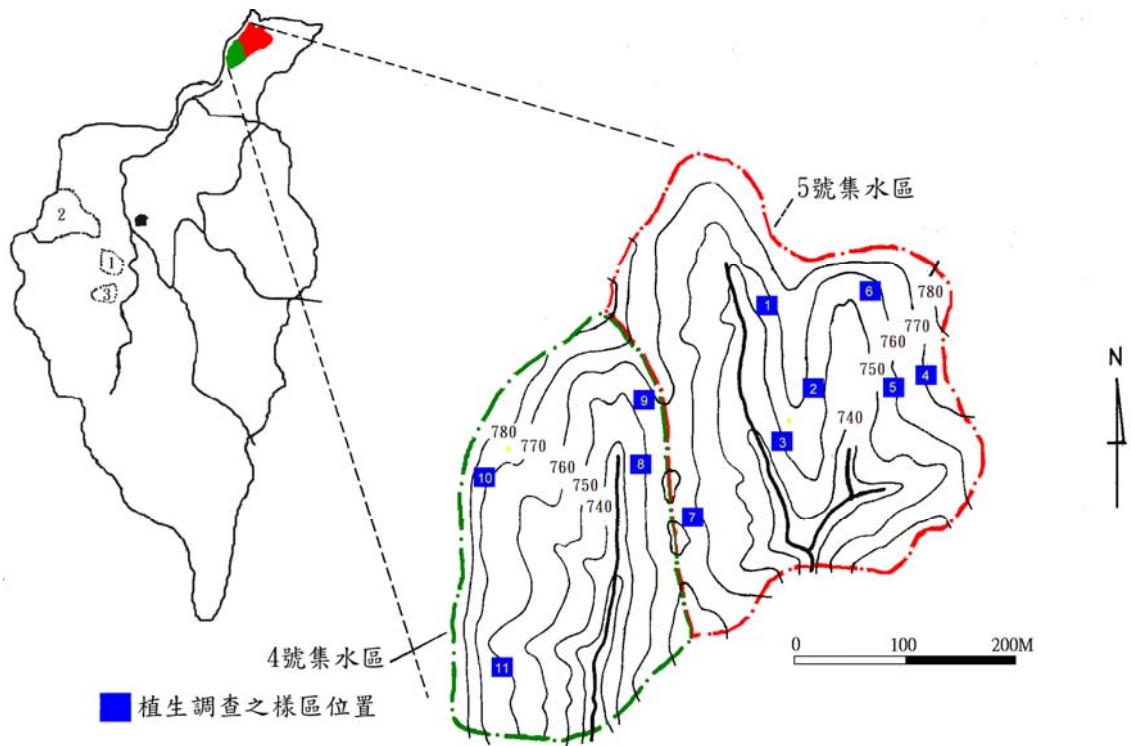


圖 2. 蓮華池 4 號與 5 號集水區位置圖

表 2. 蓮華池試驗集水區地形因素 (葛錦昭等, 1978)

項 目	集水區				
	1 號	2 號	3 號	4 號	5 號
面 積 (A) (ha)	3.53	16.23	3.40	5.86	8.39
周 長 (C) (m)	750	1,910	780	1,000	1,300
溪流長度 (L) (m)	308	603	270	380	420
平均寬度 (A/L) (m)	114.6	272.5	125.9	154.2	199.7
形狀係數 (A/L^2)	0.37	0.45	0.46	0.40	0.47
密 集 度 ($2\sqrt{\pi A}/C$)	0.89	0.38	0.84	0.86	0.79
平均坡度 (%)	63	56	69	40	41
平均海拔 (m)	741	812	723	763	757
最高標高 (m)	825	889	781	797	788
最低標高 (m)	669	726	666	728	735
方 位	SE	NE	SE	SE	SE

第三節 研究架構

本論文第一章為緒論，介紹研究動機、目的與研究區域。第二章是相關研究之文獻總整理及分析；包括氣象水文、地表水文、地下水文、土壤沖蝕、水化學及土壤化學等。第三章是 4 號(杉木人工林)及 5 號(天然闊葉林)集水區林分結構、植群現況，以及林下光照環境之調查。第四章是 4、5 號集水區之土壤水傳導度(soil hydraulic conductivity)測定分析，比較 Guelph 滲透計與定水頭(constant head method)法，在二集水區山頂、山腹與山谷之土層深度 20 cm 及 40 cm 處，其水力傳導度的差異。第五章 4、5 號集水區砍伐後歷年之水文特性，包括年流量、暴雨流量及枯水期之水文特性的分析比較。第六章是 4、5 號集水區之降水、穿落水、幹流水、土壤水、溪流水等水化學之特性分析，並探討溪流流量與水中離子濃度之關係；此外，比較桃芝颱風期間二集水區溪流水化學之反應。第七章是綜合討論與結論，並包括生態水文研究以及未來努力之方向。



第二章 相關研究整理分析

蓮華池研究中心自 1966 年設立試驗集水區後，即有林業試驗所所內及外界的多位專家學者及許多碩、博士班的研究生從事森林水文研究，相關的試驗研究報告非常豐富，本章將收錄的文獻區分成三大部分：(一) 碩、博士論文 21 篇；(二) 具有同儕審查 (peer review) 制度的期刊報告 88 篇；(三) 其他，包括研討會論文、計畫報告及一般簡介文章等。由於第 (三) 部份文獻最多，並且有許多文章與第 (二) 部份期刊報告內容重複或相似，經比較分析後，本文僅選取 13 篇文章進行研討。本研究依據上述相關報告，進行文獻回顧與探討，分析過去蓮華池試驗林森林水文的研究主題、時間長短、研究變遷及發表期刊種類等，據此瞭解蓮華池試驗林的水文特性，期能提供該區未來進行森林水文研究及實施森林生態系經營時之參考。

本文對收錄的歷年來前人試驗研究成果，經過整理分析後，區分為五大主題：(一) 氣象水文；(二) 地表水文；(三) 地下水文；(四) 土壤沖蝕；(五) 水化學及土壤化學等。綜合探討並分析如下：

第一節 氣象水文

一、降雨量

在降雨之時間分布特性方面，本區 24 小時降雨歷線型態為中峰型雨型，最大雨峰時間在 15 小時處，亦即暴雨延時的 62.5% 處，此外，位序法比 Huff 法及分配法適合推求蓮華池地區 24 小時降雨延時的設計雨型歷線 (盧惠生，1997)。不同降雨延時之降雨歷線型態亦均為中峰型雨型，雨峰時間位置 6 小時降雨延時在 50.0% 處，12 小時降雨延時在 41.7% 處，24 小時降雨延時在 62.5% 處，72 小時降雨延時在 54.2%；雨峰降雨比率 6 小時降雨延時為 37.7%，12 小時降雨延時為 27.0%，24 小時降雨延時為 19.0%，72 小時降雨延時為 14.1% (盧惠生，1999)。

二、溫度

年平均氣溫為 20.8 °C，7 月平均氣溫最熱 (25.4 °C)，1 月平均氣溫最低 (14.9 °C) (表 2)。土壤溫度隨不同土地利用而不同，檳榔園及草生地等樹冠較疏或無林冠層之地區，其地表溫度較林冠覆蓋良好的天然闊葉林及杉木人工林高出 2-3°C，夏季時，土壤溫度明顯地隨土深而下降 (陸象豫等，1999)。土壤溫度日週期呈正弦曲線變化，其振幅隨土壤深度增加而減少，其週期的起始隨土壤深度增加而延遲，當土壤深達 50 cm 時，土壤溫度幾乎恆定 (盧惠生等，2000)。

三、蒸發散量

應用經驗公式推估蒸發散量是一簡單便捷的方法。以 Thornthwaite 法推估自 1961 年至 1980 年間之年平均蒸發散量為 1,034.9 mm，7 月最高為 136.7 mm，8 月次之為 126.1 mm，1 月最低為 36.6 mm，若對照降雨量，則每年 10、11 及 12 月蒸發散量均大於降雨量，土壤水含量明顯降低 (夏禹九及林淵霖，1981)。另外，盧惠生 (1983) 指出，自 1961 年至 1979 年間之年平均蒸發散量為 1,203.0 mm，7 月最高 129.6 mm，8 月次之 115.2 mm，1 月最低 77.4 mm。陸象豫 (1997) 則以 Hammon 公式模擬 3 號集水區自 1982 年至 1985 年之蒸發散量，分別為 1,320、1,383、1,361 及 1,372 mm。以 Hammon 公式推估之蒸發散量，明顯地高於 Thornthwaite 法所推估之值。

實測法亦是調查植物蒸發散量方式之一。應用蒸發皿方法，得知自 1961 年起至 1996 年止，平均年蒸發量為 1020.1 mm (Lu *et al.*, 2000) (表 2)。以水份擴散阻礙儀及露點測定儀，測得蓮華池植物平均月蒸發量為 17.6 mm，枯水期時蒸發量為 105.7 mm，枯水期時年蒸發散損失率為 24.3% (楊居成，1976; 1979a; 1979b; 1980)。透過樹葉氣孔傳導度及葉面水勢變化的觀測，亦可應用於植物蒸散量之推估，以 5 號集水區內的鋸葉長尾桫欏及黃杞為例，其實測量與推測量相關係數高達 0.80 及 0.64 (夏禹九等，1984)。陸象豫等 (1999) 應用水平衡法推估夏季時檳榔園日蒸發散量可達 6.80 mm，杉木林 5.36 mm，草生地則為 3.06 mm。

日輻射是主要氣象資料，也是控制植物生長因子之一，並可用於探討集水區能量收支狀況。蓮華池地區 2 年生杉木造林地、10 年生杉木人工林及天然闊葉林的 B 值 (平均淨輻射量除以全天日輻射量) 分別為 0.48、0.66 及 0.67，反射率 (反

射日輻射量/全天日輻射量) 則分別為 15.8%、10.1%及 10.8%，由於 2 年生杉木造林地尚未鬱閉，部份地區裸露，所以 B 值偏低，反射率則為最高 (夏禹九等，1992)。不同植被對輻射能的不同特性，導致其熱收支的差異，對於一地的微氣候及水文收支均有所影響。

四、截留量

樹冠截留量研究之樹種除天然闊葉林外，尚包括杉木、台灣櫟、大葉桉、肖楠及檳榔等人造林，此外同樹種間不同栽植密度及不同修枝程度對樹冠截留量之影響亦有所探討 (潘家聲，1964；1965；1966；1974a；1974b；1974c；1976；夏禹九等，1982；陸象豫及唐凱軍，1995；陸象豫等，1999)，研究結果詳列於表 3 中。

樹冠截留量深受植被形態所影響，當植群密度較高時，樹冠截留量亦較大。同樣的栽植密度，但不同的樹種時，其樹冠截留量亦會有所不同。此外，降雨形態與大小也會影響到樹冠截留量，當降雨較小時則樹冠截留量較大，以檳榔為例，當降雨量低於 1.54 mm (陸象豫等，1999)，或 1.92 mm (孫正春，1995) 時，所有降雨將被樹冠截留。除樹冠截留量外，林地地表的枯枝落葉層亦有截留雨水效果。蓮華池地區人工杉木林、天然闊葉林及桂竹林枯枝落葉層之平均厚度分別為 4.70 cm、3.80 cm及 2.95 cm，枯枝落葉層厚度越深，則截留之水分亦越多，各林相枯枝落葉層最大截留量分別為：人工杉木林 3.39 mm，闊葉林 2.97 mm及桂竹林 1.77 mm (陸象豫等，1988；陸象豫、漆陞忠，1988)。

表 3. 蓮華池地區樹冠截留量研究結果

林況	密度(株/公頃)	穿落水(%)	幹流水(%)	截留量(%)	文獻出處
13 年生杉木林	2033	91.64	0.80	7.56	潘家聲(1964)
19 年生台灣櫟	2400	90.87	7.72	1.41	潘家聲(1965)
天然闊葉林		85.91	1.67	12.42	潘家聲(1966)
18 年生大葉桉	2600	88.96	3.30	7.74	潘家聲(1974a)

16 年生杉木林	2200	88.15	0.90	10.95	潘家聲(1974b)
	1600	89.11	0.82	10.07	
	1280	91.24	0.98	7.78	
	840	94.06	0.56	5.38	
13 年生肖楠	4490	58.89	12.04	28.98	潘家聲(1974c)
	3350	73.00	8.91	18.09	
	2500	69.65	8.21	22.15	
14 年生肖楠	3350				潘家聲(1976)
	不修枝	80.86	9.09	10.05	
	1/2 修枝	82.36	7.34	10.29	
	1/3 修枝	72.47	9.12	18.41	
	1/4 修枝	77.31	7.19	15.50	
天然闊葉林		86.53	1.84	11.63	夏禹九等(1982)
天然闊葉林		84.47	4.20	11.30	陸象豫等(1995)
14 年生檳榔	2500	34.70	29.88	35.42	陸象豫等(1999)

第二節 地表水文

一、溪流水文

逕流率為逕流量與降雨量之比，可反映出集水區的水文特性。3 號集水區自 1967-1975 年間，平均年降雨量為 2,199.9 mm，平均年逕流量為 961.8 mm，逕流率為 43.7%；若以季節區分，5-10 月之逕流量為 914.8 mm，佔全年逕流量 95.1%，11-4 月之逕流量為 47.0 mm，佔全年逕流量 4.9%。4 號集水區自 1971-1975 年間，平均年降雨量為 2,151.7 mm，平均年逕流量為 1,190.3 mm，逕流率為 55.3%；若以季節區分，5-10 月之逕流量為 1,145.5 mm，佔全年逕流量 96.2%，11-4 月之逕流量為 44.8 mm，佔全年逕流量 3.8%。5 號集水區自 1969-1975 年間，平均年降雨量為 2,312.4 mm，平均年逕流量為 966.5 mm，逕流率為 41.8%；若以季節區分，5-10 月之逕流量 922.4 mm，佔全年逕流量 95.4%，11-4 月之逕流量為 44.1 mm，佔全年逕流量 4.6%。由上述之觀測資料顯示，該地區豐枯水期逕流量極不平均 (葛錦昭等，1978)。水文年的選定大都以低流量、乾早期作為開端，故宜以 3 月 1 日

作為起始日 (楊炳炎等, 1978), 但夏禹九及林淵霖 (1981) 根據試驗集水區水平衡特性, 認為水文年應以 7 月為宜, 因為此時雨量與流量十分充沛, 土壤水份達於田間含水量, 若以乾早期作為水文年開端, 則土壤水份變異將相當大, 水文分析上反而易造成困擾。

在水資源的經營管理上, 溪流水量的多寡固然重要, 但溪流水化學的特質更是關鍵。以往水文學的研究大都著重於量的探討, 因為攸關水利工程的安全設計, 晚近溪流水化學的研究則快速發展, 益加受到各方的重視, 溪流水化學於低流量時特性, 於梅雨及午後雷陣雨時變化, 甚至颱風強勢降雨時變動, 對水資源經營管理及土石流災害防制亦極為重要。本章主要目的即是在探討蓮華池試驗林溪流水化學特性, 並比較蓮華池 4、5 號集水區溪流水的水化學, 在颱風暴雨、夏季暴雨期及非暴雨期之差異。

在溪流水方面, 蓮華池試驗林的溪流水離子濃度與流量間的關係可分為三種: (1)稀釋作用: 電導度、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- ; (2)水文增加作用: NO_3^- ; (3)作用不變: Cl^- 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 H^+ 。

NO_3^- 與 NH_4^+ 不管在天然林、人工林是惟二輸入大於輸出的營養元, 在春夏二季的淨收入量約佔全年的八成, 顯示生態系在生長季仍大量需要氮。而人工林的淨收入都比天然林為高, 表示人工林在栽植二十年以後, 仍需要比天然林更多的營養元以供生長所需。

皆伐後的第 24 年, 人工林集水區的鹽基陽離子 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 年輸出量仍是天然林的 1.4~1.8 倍之間。

二、降雨逕流關係

利用人工模擬降雨機可以調整降雨強度, 有助於比較不同降雨強度下, 不同土地利用的水文反應。當模擬降雨強度為 20-30 mm/h 時, 蓮華池裸露地逕流率為 32.5%、草生地為 17.2%、林地為 14.1%, 當模擬降雨強度為 40-50 mm/h 時, 裸露地逕流率為 37.2%、草生地為 23.8%、林地為 17.3%, 逕流率隨降雨強度增高而增高, 此外, 在不同土地利用下以林地的逕流率最低, 此乃由於林地土壤具有較佳的孔隙結構, 有利水資源涵養 (陳信雄, 1984)。類似的結果亦見於盧惠生等

(1987) 報告中。逕流量、逕流曲線指數及洪峰逕流係數以裸露地為最大，砍伐跡地及造林地次之，草生地與竹林再次之，天然闊葉林則為最低。經由室內人工模擬降雨分析，得知逕流率與土壤種類、土壤表面結糊狀態及降雨強度等三因子密切相關 (胡蘇澄等，1995)。除了人工模擬降雨外，透過野外的試驗小區亦可分析不同土地利用時的逕流差異。在相同面積 (50 m²)、坡度 (20⁰) 及降雨量(36 mm) 下，蓮華池滲漏計 (lysimeter) 試區檳榔園的洪峰流量 (1,400 cm³/min)比草生地 (410 cm³/min)及杉木林地 (360 cm³/min) 高出甚多，檳榔園的洪峰流量不是來自地表漫地流，而是主要來自地表下大孔隙的管流 (pipe flow)，雨水能快速入滲於檳榔地內，但也快速地經由地表下管路系統流出，所以對水資源涵養助益較少 (陸象豫等，1999)。

集流時間為降雨逕流分析重點之一，一般而言，集流時間是指集水區內發生降雨時，最遠地點產生的逕流傳播至下游端出水口的時間，亦可以水文歷線開始上升點至洪峰發生的時間訂為集流時間 (陳明杰，1995)。以集水區面積 (A, km²) 及平均坡度 (S, %) 為推估參數，則蓮華池集水區的集流時間 (h) 為 $2.5 \times A^{0.5} S^{-0.5}$ (鄭皆達，1996)。但若考慮降雨強度與地表逕流係數對集流時間之影響，則可應用運動波逕流模式推估之。陳明杰 (1995a)、陳樹群及黃兆章 (1998) 均曾應用運動波逕流模式推估蓮華池集水區集流時間，得知集流時間隨平均降雨強度的增加而減少，且呈指數遞減，當雨峰提前出現時，集流時間較短，若雨峰延後出現，則集流時間相對延長。蓮華池試驗集水區集流時間約為降雨尖峰與流量尖峰的延遲時間的 2 倍，而坡面逕流延遲時間與河道逕流延遲時間的比值約為 7:1 (陳明杰、陳信雄，1987；陳明杰，1995b)。此外，蓮華池集水區之地表阻抗會因水文臨前狀況或植物生長季節之不同而有所改變，所以地表阻抗之變異性直接影響集流時間公式中之糙度係數估算，進而影響尖峰流量的推估 (李光敦、許志揚，1996)。

由於森林集水區滲透能高，土壤大孔隙發達，河川逕流主要來自地表下水流，而非地表逕流 (鄭皆達、夏禹九，1989)。由於地表下水流流速較慢，而一般常以流速較快的地表逕流推估水文歷線，以致集流時間有縮短現象 (鄭皆達，林莉利，1992)。適當地修正合理化公式，有助於準確地推估逕流量，例如採用較高的逕流係數及較長的集流時間，可以合理地推估出具有高滲透能森林集水區的洪峰流量 (鄭皆達等，1994)。蓮華池集水區面積均小於 10 ha，宜採用最大 10 分鐘雨量推求

其最大逕流量，逕流係數介於 0.6-0.7 間 (黃正良、陳信雄，1987)。單場暴雨時，洪峰逕流係數可訂為 0.5，若降雨強度大且降雨延時長，則洪峰逕流係數可訂為 0.75 (陳明杰，1995a)。若以 1975-1986 年資料進行分析，3、4 及 5 號集水區逕流係數分別為 0.60、0.85 及 0.78，4、5 號集水區逕流係數高於 3 號集水區甚多 (劉明芬、陳信雄，1993)。

森林集水區於土壤水份飽和的情況下，逕流歷線隨降雨發生而迅速反應，當降雨停止後，表層土壤大孔隙中的中間逕流將明顯地影響到逕流歷線中的退水曲線 (陳明杰、陳信雄，1987)。蓮華池集水區退水時間約在尖峰流量後 2-3 天，而地下水逕流退水時間約在 12-13 天，退水係數與總雨量呈負相關，3、4 及 5 號集水區平均退水係數分別為 0.957、0.953 及 0.956，4 號集水區於皆伐後退水時間提前 1 天到達，顯示皆伐後集水區涵養水源的功能降低 (陳明杰、李肇文，1993)。

三、駢對集水區 (paired watershed)

森林砍伐對集水區溪流量之影響，是近二十年來世界森林水文研究重點之一，可利用駢對集水區方法，探討砍伐前與砍伐後之水量變化。4 號集水區於 1978 年 11 月至翌年 3 月間進行皆伐作業，使用架空索集材法，減少對地表植被及土壤之破壞，一年後低矮灌木幾已完全覆蓋全區，1980 年 10 月再度伐除地表灌木，並於 1981 年 3 月栽植杉木。5 號集水區則保留原來植被狀況，以資作為對照。4 號 (處理區) 與 5 號 (對照區) 為台灣駢對集水區試驗的開端，為台灣森林水文研究立下一里程碑，意義深遠。

皆伐以後的第一個濕季 (5-9 月)，增加的溪流量達 402 mm (55%)，第二個濕季增加 184 mm (47%)，皆伐以後的第一個乾季 (10-4 月) 則增加 46 mm (108%)，第二個乾季增加 20 mm (293%)，平均洪峰流量則增加 48%，溪流量增加的原因，主要是由於林木砍伐後，樹冠截留量與蒸發散量均降低，而土壤含水量則增加所致 (夏禹九等，1982；Hsia and Koh, 1983；Hsia, 1987)。盧惠生(1983)比較 3 號 (對照區) 及 4 號 (處理區) 集水區於皆伐後第一年水文差異，4 號集水區洪峰時間縮

短 23%，洪峰流量增加 24%，最大起伏流量增加 12%，基流量增加 7%。比較夏禹九等 (1982) 及盧惠生 (1983) 研究，主要差異有二：(1) 夏文以 4、5 號集水區作為駢對試驗，盧文則採 3、4 號集水區進行分析；(2) 夏文以全年逕流量作為比較，盧文則針對暴雨事件進行探討。雖然兩者試驗地點及分析方法略有不同，但都是台灣早期駢對集水區試驗重要成果。

相較於皆伐跡地，森林可以減少起始流量、尖峰流量及直接逕流量(劉明芬、陳信雄，1992)。4 號及 5 號集水區洪峰逕流係數分別為 0.52-0.72 及 0.52-0.69，暴雨流量逕流曲線指數 CN 值則分別為 81 及 76，森林砍伐後逕流量將會增加(盧惠生等，1990)。由於皆伐跡地蒸發散量減少，使得集水區貯蓄量消耗較緩，延長旱季時之基流量，相反地，坡度較陡可能會加速地表下逕流及地下水流速，進而迅速消散掉集水區之貯蓄量 (鄭皆達等，2001)。砍伐森林雖然能夠增加溪流量，但對枯水期水資源的供應而言，其效果是有限的，反而在豐水期時則可能會增加洪水災害。

經由歷線分離後得知，降雨強度較小時 (<10 mm)，4 號與 5 號集水區的水文反應比 (暴雨逕流量/降雨量) 差異不大，分別為 13.7%及 13.9%，但是當降雨強度漸漸增強時，4 號的水文反應比則顯著地高於 5 號，例如降雨強度 50 mm 時兩者水文反應比分別為 39.7%及 29.7%，當降雨強度超過 200 mm，則兩者水文反應比又相近，分別為 68.1%及 67.5%，在極高降雨強度下 (390 mm)，4 號與 5 號的水文反應比依舊相近，分別為 80.3%及 78.5%(鄭皆達、夏禹九，1990；廖學誠等，1998；Hsia, 1987)。由上述數據得知：(1) 暴雨量增加時，水文反應比將升高，亦即林地涵蓄雨水的能力似有飽和現象相對降低；(2) 降雨強度小於 10 mm 時，皆伐作業對水文反應比影響不大；(3) 降雨強度超過 200 mm 時，皆伐跡地與天然闊葉林地的水文反應比相近，主要原因是樹冠截留量與蒸發散量相較於總降雨量時，其所佔份量相對降低所致。

將暴雨逕流量取對數後會與水文反應比呈一直線關係，此可說明在高強度降雨時，大部分雨水將會很快地成為直接逕流 (劉明芬、陳信雄，1992)。陳信雄及陳明杰 (1989) 應用集水區濕潤條件推估出森林的防洪功能極限，當降雨量為 260 mm 時之 4 號集水區及 360 mm 時之 3 號集水區，4 號 (人工林) 與 3 號 (天然林) 的直接逕流率將達到 100%，顯示天然闊葉林集水區的調節洪水功能比人工林佳。

此差異亦可由土壤孔隙率間接得知，蓮華池天然闊葉林土壤表層孔隙率平均為 23.9%，而杉木人工林則僅為 16.1%，孔隙率高有助雨水入滲土壤中（陳明杰，1993）。

四、水文模式

陳明杰 (1991) 曾以 3、4、5 號集水區水文觀測資料，分別以被壓地下水層之逕流模式和自由地下水層之逕流模式，探討無降雨期間基底逕流遞減特性，結果指出，3、4、5 號集水區適用被壓地下水層之逕流模式，此乃由於小面積集水區之逕流遞減較為快速。盧惠生、陸象豫 (1995) 應用臨前降雨指數 (API) 推估 3 號集水區 14 場暴雨流量歷線後得知，逕流體積誤差率介於-35.5%-23.7%之間，洪峰流量的誤差率則介於-42.4%-31.9%之間，此模式只需要四個參數，使用上簡單方便。陸象豫 (1997) 應用水文模式 PHIM 中的 UPLAND 子模式，模擬 3 號集水區之逕流量，結果顯示以日為單位之年流量模擬，無論在歷線形狀及出流量方面皆可獲得 95 % 信賴之接受度；但以小時為單位之暴雨流量歷線模擬，則在洪峰流量及逕流體積方面有高估之現象。

第三節 地下水文

一、土壤入滲

蓮華池林地土壤密度隨土深增加而增加，有機物含量則隨土深增加而減少，土深 0-20 cm 處具有較高的粗孔隙率，且天然闊葉林的土壤粗孔隙率高於人工林，有助於增加土壤入滲率（陳明杰，1993）。在蓮華池滲漏計試區應用單筒入滲計調查土壤入滲率，得知最初滲透率以百喜草最高 102.7 mm/h，杉木次之 80.3 mm/h，裸露地最低 35.5 mm/h；土壤水分最終滲透率亦則以百喜草最高 36.4 mm/h，杉木次之 19.6 mm/h，裸露地最低 2.8 mm/h（盧惠生、楊炳炎，1979）。20 年後，陸象豫等 (1999) 於同試區內（地上植生已更換過），應用單筒入滲計測出最初滲透率檳榔園(原楓香林)為 1,218 mm/h，草地(原白喜草) 為 1,026 mm/h 及杉木林(1986 年移植之杉木)為 1,056 mm/h，最終入滲率檳榔園則為 154.2 mm/h，草地為 117.6 mm/h 及杉木林為 163.2 mm/h。比較上述二者試驗結果，入滲率差異甚大。該試區

土壤於 1979 年時容積密度為 1.11 g/cm^3 ，總孔隙率為 60.21% (盧惠生、楊炳炎，1979)，1993 年時容積密度為 1.36 g/cm^3 ，總孔隙率為 48.81% (胡蘇澄，1993)，土壤有逐漸密實之趨勢，然最終入滲率卻增高，此現象可能與地被植物被更換過後，致使表土鬆動，此外，舊有植物根系枯死後形成管流效應，有助土壤入滲率增加。同樣地，應用單筒入滲計調查不同土地利用下土壤入滲率，得知最終入滲率高低依序為砍伐跡地 (313 mm/h)、60 年生肖楠 (200 mm/h)、20 年生杉木 (187 mm/h)、天然闊葉林 (136 mm/h)、30 年生肖楠 (97 mm/h)、10 年生杉木 (94 mm/h)、3 年生杉木 (75 mm/h)、5 年生肖楠 (47 mm/h)、裸露地 (40 mm/h)，顯見樹齡越老則入滲越大 (謝豪榮、謝政道，1985)。

應用改良型山地滲透計探討不同降雨強度與土壤入滲率之關係，得知蓮華池地區不同地況之土壤滲透率優劣次序分別為天然闊葉林地、杉木造林地、砍伐跡地及舊步道，且土壤不飽和期的土壤滲透率高於飽和期的土壤滲透率 (陳明杰、黃正良，1986)。當降雨強度為 140 mm/h 時，蓮華池闊葉林最終入滲率最高 (58.4 mm/h)，草生地 (50.7 mm/h) 及竹林地 (49.0 mm/h) 次之，砍伐跡地 (44.7 mm/h) 及杉木造林地 (36.7 mm/h) 再次之，裸露地則最低 (8.0 mm/h) (盧惠生、胡蘇澄，1993)。此外，當降雨強度為 140 mm/h 時，坡度 20° 的檳榔園土壤最終入滲為 73 mm/h ，坡度 30° 的檳榔園土壤最終入滲則為 53 mm/h ，顯見坡度平緩有利於土壤入滲率的增加 (盧惠生等，1996)。

綜合比較上述研究後得知，單筒入滲計所測得之土壤入滲率高於改良型山地滲透計所測得之值，此乃由於單筒入滲計有一固定高度的水壓，且水份供應源源不絕，以致測得之土壤入滲率偏高，而改良型山地滲透計可模擬降雨情況，與實際情形較為吻合。此外，不同地點、不同時間所測得之土壤入滲率皆有不同，謝豪榮及謝政道 (1985) 測得砍伐跡地土壤入滲率高於天然闊葉林，而陳明杰及黃正良 (1986)、盧惠生及胡蘇澄 (1993) 則都測得相反的結果，可見蓮華池試驗林土壤入滲率的時空變異性相當高。

二、地下水

雨水入滲土壤後，可由不同土深的電阻值高低反映出水份在土中的移動情

況。陳信雄 (1978) 應用電阻片調查滲漏計試區在不同覆蓋坡面下土壤水份的移動，得知杉木區入滲率高，但蒸發散作用亦強，以致深層土壤較不易滲潤，至於稻草覆蓋區及百喜草區因蒸發散小，所以降雨後水份能往下滲漏移動，土壤中水份儲存量較高。少量降雨僅影響到土壤表層的水份變化，隨著降雨強度增強、時間延長，深層土壤水份才有明顯變化，若長期連續乾旱時，蓮華池不同土深水份含量大都偏低 (吳耀琪，1990)。以水平衡法分析，得知蓮華池年蒸發散量約為 1,195-1,646 mm，年地下水涵蓄調節量約 13-35 mm，年土壤涵蓄調節量約 269-423 mm (楊炳炎等，1978)。4 號集水區土深 1 m 內，全年的貯水量約為 350 mm，5 號則為 370 mm，約佔全年總降雨量的 15%，尤其是濕季時，貯水量為全年的 85% (陳明杰、何正品，1996a；1996b)，與楊炳炎等 (1978) 研究相近。地下水移動常以達西公式推求，而公式中的水力傳導係數則不易精準量測。以 Slug 試驗測得蓮華池水力傳導係數介於 10^{-6} - 10^{-7} m/s 間，為砂岩與頁岩之間 (葉正霖等，2000)。若以單井回復試驗所推求的水力傳導係數則比 Slug 法所推求的低，約介於 10^{-7} - 10^{-8} m/s 間 (鄭皆達等，2000)。

水份除了在土壤中移動外，亦會在地層間移動，影響到集水區內水平衡的計算。1 號集水區設立後歷年來逕流率均高於 100%，此水文現象特異，經比電阻探測法調查該集水區之地層結構，發現集水區右岸陵線下有二含水層，深度分別為 40 m 及 70 m，區外地下水順勢流入集水區內，造成集水區逕流量高於降雨量之現象 (范明光、楊楚淇，1979)。1969 年至 1970 年間在 3 號集水區內實施鑽孔，共計 9 孔，觀測地下水位及食鹽投入檢層試驗等工作，結果顯示本區地下水與降雨量密切相關，並無其他地區地下水流入，區內地表下 30 m 內為強烈風化帶，成為極佳之含水層，地下水流速約 30-40 m/day (楊應塘，1971)。由於 3 號集水區面積極小 (3.40 ha)，但在旱季時仍有水量流出，鍾廣吉及蔡金郎 (1975) 乃再次調查地下水特性，發現 3 號集水區地層往西傾斜，但溪谷水卻往東流，這種狀況本極不利於地下水往東流動，但卻有利於地下水的保存，使其不至很快流盡，此外本區基岩破碎面略與地形面一致，即成為理想的含水層，並可使所保存的地下水慢慢滲流而出。

第四節 土壤沖蝕

一、林道沖蝕

林壯沛等 (1984) 應用沖蝕測定器觀測蓮華池新山林道及三角崙山林道路面沖淤量後得知，坡度超過 5.5° 之林道，路面沖蝕量偏高，林道路面滲透率及植生覆蓋率均隨坡度增加而減少，新山林道路面平均沖蝕量為 6.4 mm/y ，三角崙山林道路面平均沖蝕量則為 5.3 mm/y 。黃正良等 (1990) 應用沖蝕樁測定林道邊坡沖蝕結果指出，雖然邊坡植生覆蓋率只有 33%，但由於林道開闢已久，邊坡已逐漸穩定，故邊坡沖蝕量並不顯著，至於林道路面沖蝕則隨坡度增加而增加，當坡度為 1.5° 、 4.5° 、 5.5° 及 8° 時，路面沖蝕量則分別為 7.0 、 13.4 、 15.4 及 17.0 mm/y 。夏季暴雨時，蓮華池林道路面沖蝕量與降雨量及逕流量成正相關，路面凸埂能有效地分散逕流量並減少 40% 以上的泥砂沖蝕量，凸硬高及長的比若接近 1:4 則不致影響車輛的行駛 (黃正良等，1994)。

二、地表沖蝕

3 號集水區從 1970 年到 1973 年間之淤砂量換算為集水區地表沖蝕深度，得知其平均年沖蝕深度為 1.28 mm ，比扇平 5 號集水區 (0.18 mm)、畢祿溪 11 號 (0.09 mm) 及 12 號集水區 (0.06 mm) 均高出甚多 (林淵霖，1978)。金恆鏞等 (1984) 研究森林皆伐後溪流水中懸浮質濃度之變化，1983 年 8 月 16 日，4 號集水區 (皆伐區) 與 5 號集水區 (對照區) 降雨量分別為 40 mm 及 30 mm ，洪峰時溪水懸浮質濃度分別為 $1,066 \text{ mg/l}$ 及 112 mg/l ，該次降雨土壤沖蝕量則分別為 4.49 kg/ha 及 0.03 kg/ha ，結果顯示皆伐作業確實會提高泥砂輸出量。經由人工模擬降雨後得知，蓮華池裸露地區土壤沖蝕量最大，降雨強度 140 mm/h 時，土壤沖蝕深度為 0.47 mm ，降雨強度 110 mm/h 及 90 mm/h 時，土壤沖蝕深度為 0.27 mm ，降雨強度 60 mm/h 時，土壤沖蝕深度為 0.09 mm ，降雨強度 45 mm/h ，土壤沖蝕深度為 0.07 mm ，降雨強度 30 mm/h 及 15 mm/h 時，土壤沖蝕深度為 0.03 mm ，土壤沖蝕量則隨降雨強度減少而減少，至於闊葉林、草地、竹林、砍伐跡地及杉木造林地等因地表覆蓋達 80% 以上，土壤沖蝕甚小 (盧惠生等，1987)。

由於蓮華池附近檳榔種植面積日益增廣，故探討檳榔對土壤沖蝕之影響是迫

切需要。依據土壤性質分析，幼齡檳榔園土壤沖蝕指數 (K) 最高為 0.34，屬中沖蝕性土壤，至於天然林、杉木林及成熟檳榔園之土壤沖蝕指數皆低於 0.20，屬低沖蝕性土壤 (胡蘇澄，1993)。蓮華池地區土壤粘土含量及有機質含量均較高，於實驗室內以人工降雨器模擬不同降雨強度與延時，分析各種表土水分乾濕、結糊狀態、降雨逕流率與土壤沖蝕率之變化，得知此地區年降雨沖蝕指數約為 596，且土壤沖蝕指數低，降雨強度明顯地影響到土壤流失率 (胡蘇澄等，1995；盧昭堯等，1998)。有關森林抑制坡面淺層崩塌，主要是森林根系補強力量具有穩定坡面的效果，而根系的補強力量主要來自根株的機械力量以及根與土壤的緊縛力量。蓮華池地區之台灣杉根系拉力強度與根系直徑成指數正關係，由於根的存在而使土壤剪力強度增加 15.4-50.4%，使坡面安全係數 F 值增加 16-35%，有助於抑制淺層崩塌 (吳正雄、陳信雄，1991；吳正雄，1993)。

透過土壤沖蝕模式分析地表沖蝕量是一便捷方式。周天穎、葉美伶 (1997) 應用修正土壤沖蝕模式 (RUSLE) 推估水里溪集水區 (含蓮華池試驗林) 土壤沖蝕量約為 0.5-3.5 tons/ha/y，當檳榔種植面積達 85 % 以上，則土壤沖蝕量將增至 10.9 tons/ha/y。盧光輝、胡蘇澄 (1997) 應用農業非點源污染模式 (AGNPS) 推估水里溪集水區土壤沖蝕量，平均為 29.5 tons/ha/y，高出周天穎、葉美伶 (1997) 研究結果甚多。陳萱蓉、夏禹九 (2000) 亦採用 AGNPS 模式分析河川保護帶配置問題。

第五節 水化學及土壤化學

一、降水-穿落水-幹流水-溪流水之水化學

關於降水之水質，本地區的降水為酸性，經過闊葉林林冠緩衝作用後，穿落水、幹流水及溪流水中的 pH 值逐漸增高，葉表的 K^+ 離子明顯地被淋洗出來，穿落水及幹流水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 Na^+ 等離子濃度亦有些微增高 (表 4) (King *et al.*, 1994)。分析降水中的元素，磷為唯一被林冠淨吸收的元素，磷可能為此集水區植物生長的限制因素，此外，林冠淋溶的營養量變異很大，其中以鉀與有機氮溶失量最多 (金恆鏞、薛美麗，1992)。

表 4. 蓮華池 5 號集水區水化學分析 (1990/2-1993/12) (King *et al.*, 1994)

	降水	穿落水	幹流水	溪流水
PH	5.51	5.91	6.56	7.13
Cond., $\mu\text{mhos/cm}$	27.3	57.9	115.9	57.9
Na^+ , mg/l	0.49	0.64	0.71	2.03
K^+ , mg/l	1.50	9.97	34.58	1.44
Ca^{2+} , mg/l	0.94	1.85	3.35	2.45
Mg^{2+} , mg/l	0.12	0.62	0.84	1.61
NH_4^+ , mg/l	0.73	1.23	0.76	0.31
Cl^- , mg/l	1.68	3.31	3.76	1.58
PO_4^{3-} , mg/l	0.63	0.53	0.38	0.00
NO_3^- , mg/l	1.86	4.21	4.30	1.67
SO_4^{2-} , mg/l	3.07	6.20	8.92	2.46
HCO_3^- , mg/l	1.51	0.21	0.91	19.88
Org. N, mg/l	0.54	1.72	1.33	0.21

二、溪流水在暴雨時期其化學濃度-流量-時間之關係

試驗集水區溪流水水質為中性，主要陽離子為 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 Na^+ 等，主要陰離子則為 HCO_3^- 及 SO_4^{2-} 等，土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 Na^+ 等離子的淋洗過程深受 HCO_3^- 及 SO_4^{2-} 離子吸附能力所控制(King *et al.*, 1994)。溪流水在暴雨時的化學濃度—流量—時間關係可歸納為三型：(1)順時型，即某元素在流速上升期的濃度高於同流速的衰退期流速濃度，包括懸浮質、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等；(2)逆時型，即流速上升期的某成分濃度比衰退期同流速的該成分濃度低，包括 H^+ 及 NO_3^- ；(3)線型，某成分在上升期與衰退期的濃度約略相當，包括電導度、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} (金恆鏞等，1984)。

三、駢對試驗集水區水化學之比較

除了探討駢對集水區的水量差異外，水化學濃度變化亦是研究重點之一。比較 12 年生杉木人工林 (4 號) 與相鄰天然闊葉林 (5 號) 集水區溪流水質後發現，在枯水期時 (10-4 月)，人工林集水區溪流水的 pH、傳導度、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、有機氮及全氮等濃度均高於天然闊葉林集水區，至於 K^+ 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 及懸浮質濃度則無差異；在豐水期時 (5-9 月)，兩者之溪水化學無顯著差異，對全年總營養流失量而言，兩集水區差異不大，所以杉木人工林於 12 年後溪流水質已

恢復到接近天然闊葉林溪流水質的狀態 (劉瓊霖等, 1996)。

四、蓮華池森林土壤之化學特性

土壤性質除了會影響到土壤入滲、逕流路徑、土壤含水率等物理特性外，亦會影響到土壤養分、pH 值及溪流水離子濃度等化學特性。3 號集水區土壤有兩種類型：(1) 典型低鹽基淡色瘠弱育土 (Typic Dystrochrept)，風化自頁岩，主要含石英及少量的水雲母，表土 pH 值為 4.2，至 1.2 m 深處時則為 5.0；(2) 典型簡育濕潤極育土 (Typic Hapludult)，風化自砂岩，表土 pH 值為 4.4，至 1.0 m 深處時則為 4.8 (金恆鏞, 1986)。King *et al.* (1990) 證實蓮華池土體結核的內部含有赤鐵礦及針鐵礦，蔣先覺等(1993；1996)也對蓮華池極育土的鐵瘤進行分析，得知鐵結核的粒徑與含量會隨著深度而遞增，有關台灣詳細的森林土壤研究回顧可參看王明光等 (2001) 一文。

酸雨使土壤的鹽基陽離子及鐵鋁錳等離子淋溶量增高，初期時以鹽基陽離子淋溶量較高，但後期則以鐵鋁錳等離子所佔比例較高，此現象亦顯示酸雨會促使土壤養分流失，尤其是鉀與鎂的損失較大 (許世宏, 1995)。蓮華池土壤對 H^+ 的緩衝作用主要機制有三：陽離子交換、硫酸根的吸附、粘土邊緣的鋁和鋁氧化物的溶解，當酸度較高的酸雨 (pH=2.6) 進入土壤時，主要的緩衝機制為粘土邊緣的鋁和鋁氧化物的溶解，當酸度較低時 (pH=3.6)，主要的緩衝機制則為陽離子交換及硫酸根的吸附，當酸度更低時 (pH=4.6)，主要的緩衝機制只剩陽離子交換 (金恆鏞等, 1995；康敏捷等；1996)。此外，蓮華池森林土壤對硫酸根的吸附已快達飽和，且 A 層土壤的硫酸根總吸附量較 B 層土壤少 (黃仁足等, 1998a；1998b)。

五、森林改種檳榔對土壤化學特性之影響及緩衝林帶對農藥之過濾效果

雨水入滲成為土壤水後，化學濃度會因地被植生不同而有所變化。南投地區為全台灣檳榔樹種植面積最廣的縣分，將森林改種檳榔後 14 年，土壤水中的 NH_4^+ 及 NO_3^- 離子濃度均比草生地及杉木林為低，顯示檳榔需要較多的氮素，相反地， Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 及 HCO_3^- 等離子濃度均比草生地及杉木林為高，顯示這

些離子流失較為嚴重，這與檳榔地區土溫較高、有機質分解較快，致使土壤對離子的吸附能力降低有關 (表 5) (陸象豫等，1999)。森林緩衝帶有過濾水質之功能，在蓮華池滲漏計試區測試森林緩衝帶對農藥之過濾能力後得知，水不溶性四氯丹農藥經過 10 m 緩衝林帶後即有明顯的過濾效果，至於水溶性之 2,4-D 農藥在杉木區之減少效果大於百喜草區 (丁昭義、陳信雄，1979)。

表 5. 蓮華池地區不同地表植被之土壤水化學成分 (陸象豫等，1999)

Constituents	檳榔	草生地	杉木林
pH	7.97	7.76	8.10
Cond., $\mu\text{mhos/cm}$	318.0	232.0	264.0
Na^+ , mg/l	7.9	5.6	5.0
K^+ , mg/l	1.4	2.7	2.1
Ca^{2+} , mg/l	72.5	45.8	49.9
Mg^{2+} , mg/l	4.3	3.0	2.7
NH_4^+ , mg/l	2.1	4.3	2.2
Cl^- , mg/l	2.9	3.0	3.0
NO_3^- , mg/l	0.0	6.8	8.1
SO_4^{2-} , mg/l	12.9	0.0	12.0
HCO_3^- , mg/l	167.2	116.3	125.5

第六節 小結

- 一、林業試驗所自 1966 年起，陸續在蓮華池試驗林設置五座森林試驗集水區，進行森林水文研究；1979 年更選定 4 號及 5 號集水區實施駢對集水區試驗，探討集水區隻森林經營(伐木作業)對水文特性的差異，供說明森林對涵養水源、減緩洪害及過濾水質等效益，開創台灣森林水文研究新頁。
- 二、蓮華池 4、5 號駢對試驗集水區自設立至今為各試驗集水區中維持相當完好之狀況，近年來逐步更新設備，架設微氣象監測高塔二座，長期監測從樹冠層上部至地面各層次之微氣象，可作為氣候變遷、國土防災及水資源經營等試驗研究之理想場所。

第三章 集水區林下光照環境與植群現況調查分析

第一節 林下光照環境調查分析

一、前言

台灣森林面積佔全島 58.5%，其中人工造林地佔森林面積 20.1%，而人工造林地又以針葉林面積最大（約佔 51%）(林務局，1995)，可見人工造林地為台灣重要的生態系之一。過去大面積的人工造林地大多以經濟價值為主，隨著台灣產業的轉型，此人工造林地大多已不再從事木材生產。隨著全球暖化日益加劇與京都議定書的生效，此大面積的人工造林地已成為碳吸存的重要來源之一。由於過去偏重造林木之木材利用，人工造林地大多以單一林相的針葉林為主，以柳杉林的面積和材積最多，至今多已為 20 – 30 年林木年齡。此從原生天然闊葉樹林改植為單一林相的人工針葉林生態系是否能適應原有的氣候與水文特性，人工針葉林生態系與鄰近的天然闊葉林生態系有何異同，至今已有相關研究探討(劉瓊霏等，1995；郭孟斯，1998；陳佳慧，2000；廖學誠等，2002a、2002b；蕭泓泯，2006)。但在這些研究中，大多是探討天然闊葉林與人工針葉林土壤、水文與水質的異同，少有探討林冠結構與林下光照。在這些有限的研究監測中，恐不能提供足夠的資訊作為經營管理的依據，為因應京都議定書與妥善管理人工林，加強對於人工林全面性的監測研究為一重要的課題。

太陽輻射是影響植物行光合作用與生長的重要來源，森林冠層的特性與結構常能影響林下光照(Valverde and Silvertown 1997, Trichon et al. 1998, Battaglia et al. 2002)，造成林下微氣候如溫度、水份、輻射及蒸發散等的變化(Breshears et al. 1998, Dietz et al. 2006)。林下光照會隨著太陽的位置、大氣、地形而有所差異(Rich et al. 1993)；林下光照也因自然及人為干擾，造成林冠孔隙的生成，進一步增加林下光照的空間異質性，對林木更新扮演關鍵性的角色(Canham et al. 1990, Beaudet and Messier 2002, Hoshino et al. 2003)。因此監測林下光照環境的變化為了解兩種不同林分之森林生態系重要的一環。

林下植物的成長關係未來林冠的發展，是林分更新的重要來源，而林下光照則是影響林下小苗更新與成長的限制因子之一(Pages et al. 2003)。人工林的栽種可能改變冠層樹種的組成，影響林下光照環境、林下植物組成與多樣性，進一步影響到生態系內的營養循環。雖然陳毓禎(2001)已在台灣東北部進行相關研究，但台灣東北部乃是頻繁遭受颱風侵擾的地區，其森林結構與林分可能與較少颱風侵襲的台灣中部森林結構不同。因此，為了解林相的改變對台灣中部森林生態系結構、過程、功能的影響，本研究選擇蓮華池4號人工杉木林及5號天然闊葉林兩個相鄰的試驗集水區探討：

1. 兩種林分林下光照環境有何異同，以及林下光照環境與環境因子間的關係；
2. 兩種林分林下光照環境與林下植物多樣性間的關係。

二、研究方法

(一) 半球面影像取樣技術

本研究於4號人工杉木林內設置四個20*20m的樣區，於5號天然闊葉林內設置七個20*20m的樣區。於樣區內每5m為間隔設一個樣點，每個樣區共設9個樣點，於每個樣點處拍攝半球面影像。本研究採用半球面影像分析技術，以接近180度超廣角鏡頭拍攝，在所有樣線所設置的樣點上以Nikon Coolpix 4500數位相機配合Nikon FC-E8之半球面廣角鏡頭，於各樣點離地1.3m處水平向上拍攝，並除去鏡頭上方1m以內的枝葉，避免矮灌層植物阻擋鏡頭，拍攝時鏡頭上方朝向北方，所有影像皆於2007年6月1日~2日內拍攝完畢。為求得林冠枝葉與孔隙有最大的對比，以降低林冠反射的光線，提高臨界值判斷的準確性，因此影像拍攝時間皆為天空狀態較均質的陰天，或者日出前與日落後。所拍攝之影像再利用影像分析軟體HemiView2.1計算穿透林冠之孔隙率(Visible Sky)、直射光立地係數(direct site factor, DSF)、散射光立地係數(indirect site factor, ISF)。直射光立地係數為林內相對於林外空曠地(完全無遮蔽)所接受到直射光之比率，散射光立地係數表示林內相對於林外空曠地所接受到散射光之比率，兩者皆介於0%~100%之間，0%表示完全遮蔽，100%表示無遮蔽(Rich 1990)。所有影像皆由單一分析者分析，以降低不同分析者主觀偏差所產生變異。

(二) 林下植物多樣性分析

本研究中林下植物的定義為胸高直徑(DBH)介於 1~3 cm 之間的草本植物及小灌木(包括喬木之小苗)。在每個 20 m X 20 m 樣區內,調查所有 DBH 介於 1~3 cm 之植物種類與株數,以供計算優勢度指數、Simpson 歧異度指數、Shannon 歧異度指數、均勻度指數、物種豐富度指數(劉棠瑞、蘇鴻傑, 1983)。

1. 優勢度指數 (Index of dominance)

某一植物社會中,組成植物之優勢度集中情形,稱為該社會之優勢度指數(C)。C 值介於 0~1 之間,如社會中只有一種植物,則 $C = 1$,如社會是由無數植物組成,各佔一極小之可能率,則 C 趨近於 0。其中 n_i 即為一族群(種)之株數, N 代表所有組成植物之株數總量。

$$C = \sum(n_i / N)^2$$

2. Simpson 歧異度指數 (Simpson's index of diversity)

歧異度指數用來表示植物社會的生態歧異性,優勢度指數越高,歧異度越低。以 D 值代表 Simpson 歧異度指數,介於 0~1 之間, D 值越大,代表歧異性越高。

$$D = 1 - C = 1 - \sum(n_i / N)^2$$

3. Shannon 歧異度指數 (Shannon's index of diversity)

Shannon 自創一公示以直接計算其歧異度指數(H),當生物社會只有一種組成時, $H = 0$,即無歧異性。種數越多,個體分布越平均, H 值越大,此值之最大並不固定。

$$H = -\sum(n_i / N) \log(n_i / N)$$

4. 均勻度指數 (Evenness index)

在一植物社會中,植物個體在不同種間之分布均勻程度,稱為該社會之均勻度指數(e)。某一植物社會有 S 種存在,以此值除 Shannon 歧異度指數,即可得均勻度指數,其值介於 0~1 之間。

$$e = H / \log S$$

5. 物種豐富度指數 (Species richness index)

物種豐富度乃利用種數 S (number of species)及組成樹種之總個體數 N (number of individuals)之關係，以下式表示，其中 R 值代表物種豐富度指數，R 值越大代表物種豐富度越高。

$$R = (S-1) / \log N$$

(三) 統計分析

本研究使用 the Anderson-Darling test 檢定孔隙率、直射光與散色光立地係數是否為常態分配。檢定結果顯示林下光照係數皆為常態分配，故使用 one-way ANOVA 作後續的檢定分析。

三、結果與討論

(一) 杉木人工林與天然闊葉林林下光照環境之比較

單因子變異數分析結果顯示天然闊葉林七個樣區間的孔隙率、DSF、ISF 皆有顯著的差異 ($p < 0.05$) (圖 3~5)，而杉木人工林四個樣區間的孔隙率與 ISF 則未達到顯著差異 ($p > 0.05$)。

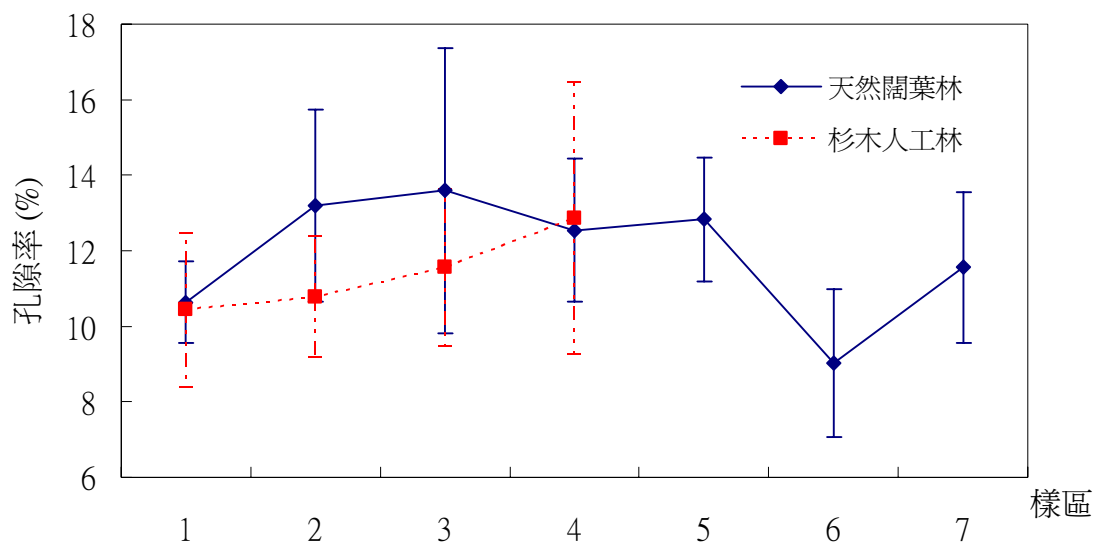


圖 3. 杉木人工林與天然闊葉林孔隙率(Visible Sky)分布圖

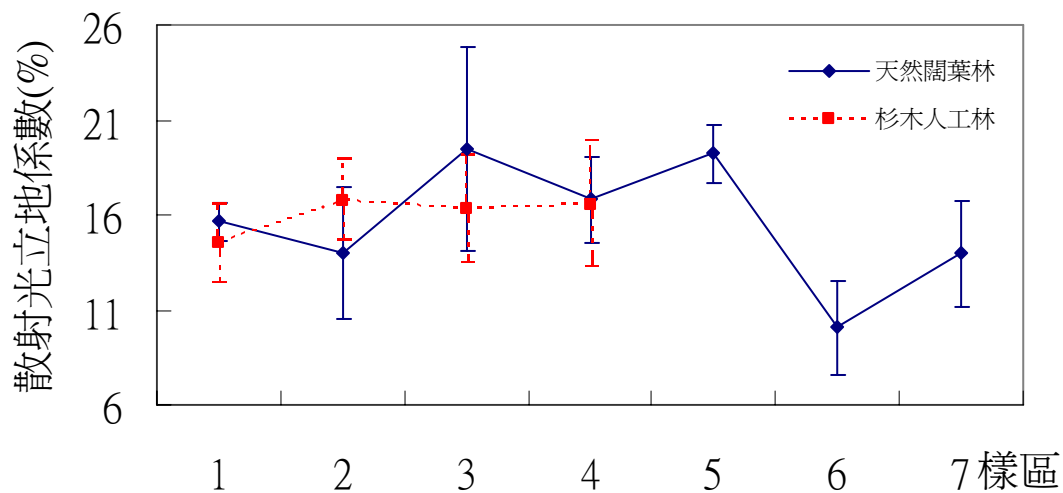


圖 4. 杉木人工林與天然闊葉林散射光立地係數(ISF)分布圖

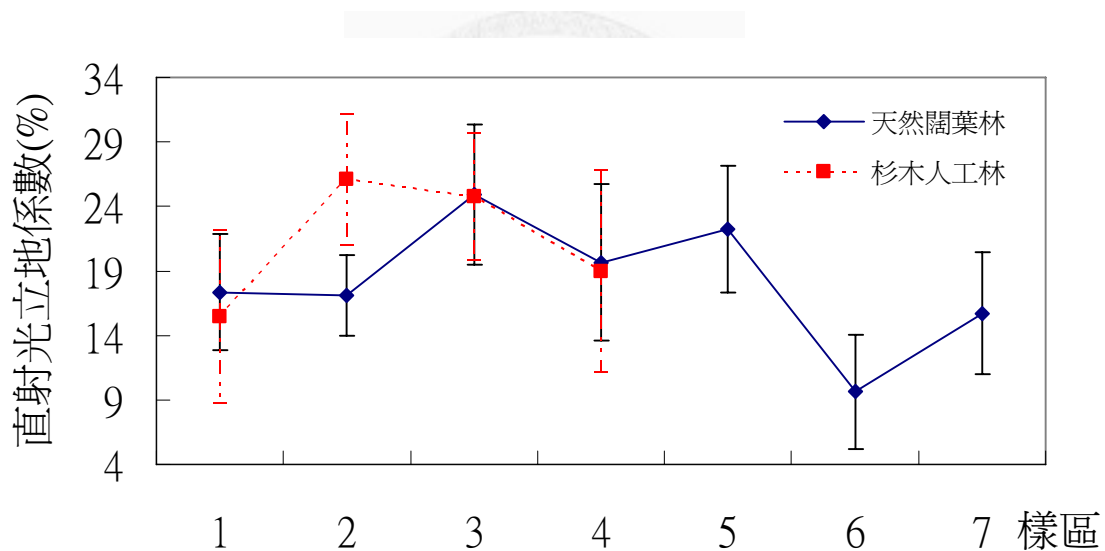


圖 5. 杉木人工林與天然闊葉林直射光立地係數(DSF)分布圖

此結果表示杉木人工林的林下光照空間變異較天然闊葉林小，可能是因為杉木人工林為同一時間大面積栽種，立木在水平空間分布上較單一且均質。反之，天然闊葉林立木水平分布較不規則，冠層結構較複雜且多層次，樹種亦較多樣，使整體林分結構之歧異度較大，使得天然闊葉林林下光照空間變異性較杉木人工林來的複雜(Numata et al., 2006)。林文雄等(2002)在福山試驗林的研究結果亦顯示人工柳杉林林下光照較天然闊葉林均質。

就兩種林相林下光照的比較結果顯示，杉木人工林平均的 ISF(16%)與 DSF(21%)較天然闊葉林(15.6%, 18%)高，此結果與陳毓楨(2001)、林文雄(2002)在福山試驗林的研究結果相反，可能與蓮華池人工杉木林平均的 DBH(3.57cm)與胸高斷面積(basal area)(32.92 m²/ha)皆較天然闊葉林低有關(6.21cm, 42.62 m²/ha)(表 6)。許多研究指出胸高斷面積與林冠覆蓋度和林冠穿透率有相當程度的關係(Mitchell and Popovich 1997, Hale 2003)，胸高斷面積越高，林冠穿透率越低，也越不利於林下小苗的生長(Hale 2001)。雖然杉木人工林的胸高斷面積較天然闊葉林低，但其平均林分密度(7075 trees/ha)卻較天然闊葉林(4493 trees/ha)高，此可能與蓮華池杉木人工林曾進行疏伐(1997 年疏伐至林分密度(1000-1200 trees/ha))。杉木生長 20 年左右即有衰退的情形，常因風倒而產生孔隙，此與多次清理林下地被層(1982、1983、1984、1985 年)等因素，形成有利於小苗之更新環境，此時期林分幼樹小苗生長快速，需要較多的養分如 NH₄⁺、HCO₃⁻ 等供其生長，養分之收支情形和天然闊葉林顯然有所不同。林分生長旺盛有利於 CO₂ 之吸收，對碳匯之效益是今後值得研究之課題。

表 6. 4 號與 5 號集水區林分之胸高直徑、胸高斷面積、林分密度之比較 (One-way ANOVA 天然闊葉林 n = 7；人工杉木林 n = 4)

集水區	DBH (cm)	胸高斷面積 (m ² /ha)	林分密度 (trees/ha)
4 號	3.57	32.92	7075
5 號	6.21	42.62	4493
p-value	< 0.05	> 0.05	> 0.05

天然闊葉林之林下光照指數平均介於 9~13%(Visible Sky)、10~19%(ISF)、9~24%(DSF)之間，而杉木人工林則介於 10~13%(Visible Sky)、14~17%(ISF)、15~26%(DSF)之間(圖 3~5)。與陳毓楨(2001)在福山試驗林的研究相比，蓮華池天然闊葉林林下光照指數較福山天然闊葉林低(表 7)，此差異可能為台灣東北部福山天然闊葉林因頻繁遭受颱風干擾，使其林下光照指數較台灣中部較少受颱風侵擾的蓮華池天然闊葉林高。然蓮華池杉木人工林的林下光照指數與福山人工柳杉林差異不大，可能是因為蓮華池人工林因疏伐、杉木生長衰退、部分風倒形成孔隙

與清理地被層等人為干擾較多，雖然較少受到颱風侵擾但林下光照指數仍然偏高，使其與福山人工林光照指數相近。然與其他熱帶與溫帶森林相較，蓮華池天然闊葉林與杉木人工林林下光照指數皆較熱帶與溫帶森林高(Trichon et al., 1998; Hale, 2001; Beaudet and Messier, 2002)。

表 7. 蓮華池與福山試驗林天然闊葉林與人工針葉林平林下光照指數之比較

天然闊葉林

	本研究	陳毓禎(2001)
ISF	10~19%	15.7~23.6%
DSF	9~24%	18.6~27%

人工針葉林

	本研究	陳毓禎(2001)
ISF	14~17%	15.2~21.9%
DSF	15~26%	19~24.3%

(二) 杉木人工林與天然闊葉林林下植物多樣性之比較

天然闊葉林林下光照環境(光照指數)與林下植物 Simpson 歧異度指數、Shannon 歧異度指數、均勻度指數、物種豐富度指數皆呈現負相關(表 8)，顯示林下光照指數越低，物種歧異度與均勻性越高。光照是許多林下植物拓展的限制因子，光照不足的環境能使得少數優勢物種的拓展受到限制，使許多植物族群能共存於同一地區，導致物種優勢度指數較低，而歧異性與均勻性較高的情形(陳毓禎，2001)。然杉木人工林林下光照環境(光照指數)與林下植物 Simpson 歧異度指數、Shannon 歧異度指數、均勻度指數、物種豐富度指數卻呈現正相關(表 9)，表示林下光照指數越高，物種歧異度與均勻度越高。此結果與天然闊葉林並不相同，此差異可能是因為杉木人工林林下植物的優勢度、歧異度、均勻度、豐富度主要是受到林分密度影響所致。研究結果顯示，杉木人工林林分密度越高，林下植物歧異性與均勻性越低($p < 0.05$)，呈現負相關(表 10)，此現象可能與人工杉木林曾歷經疏伐與多次清理地被層有關，但確切的因果關係，仍需要未來更多的調查與探討，才能進一步釐清。

表 8. 天然闊葉林林下植物各項指數與林內光照環境之相關分析

項目	r (相關係數)	p-value
Visible Sky &		
優勢度指數	0.769	< 0.05
Simpson 歧異度指數	- 0.769	< 0.05
Shannon 歧異度指數	- 0.850	< 0.05
均勻度指數	- 0.695	*
物種豐富度指數	- 0.715	*
ISF&		
優勢度指數	0.488	*
Simpson 歧異度指數	- 0.488	*
Shannon 歧異度指數	- 0.657	*
均勻度指數	- 0.462	*
物種豐富度指數	- 0.735	*
DSF&		
優勢度指數	0.607	*
Simpson 歧異度指數	- 0.607	*
Shannon 歧異度指數	- 0.754	0.05
均勻度指數	- 0.542	*
物種豐富度指數	- 0.753	*

* 表示 Pearson 相關分析結果 p-value > 0.05 (n = 7)。

表 9. 杉木人工林林下植物各項指數與林內光照環境之相關分析

項目	r (相關係數)	p-value
Visible Sky &		
優勢度指數	- 0.762	*
Simpson 歧異度指數	0.762	*
Shannon 歧異度指數	0.817	*
均勻度指數	0.805	*

物種豐富度指數	0.680	*
<hr/>		
ISF&		
優勢度指數	- 0.895	*
Simpson 歧異度指數	0.895	*
Shannon 歧異度指數	0.883	*
均勻度指數	0.846	*
物種豐富度指數	0.961	< 0.05
<hr/>		
DSF&		
優勢度指數	- 0.631	*
Simpson 歧異度指數	0.631	*
Shannon 歧異度指數	0.562	*
均勻度指數	0.563	*
物種豐富度指數	0.582	*

* 表示 Pearson 相關分析結果 p-value > 0.05 (n = 4) 。

表 10. 杉木人工林林分密度與林下植物各項指數之相關性分析

	r (相關係數)	p-value
<hr/>		
林分密度&		
優勢度指數	0.975	< 0.05
Simpson 歧異度指數	- 0.975	< 0.05
Shannon 歧異度指數	- 0.974	< 0.05
均勻度指數	- 0.992	< 0.05
物種豐富度指數	- 0.746	> 0.05

天然闊葉林與杉木人工林之林下植物多樣性比較結果顯示，兩種林分之林下植物多樣性並未有顯著差異($p > 0.05$)(表 11)。但天然闊葉林平均的歧異度與均勻度仍較杉木人工林高，顯示天然闊葉林林下植物多樣性較杉木人工林高。此現象與陳毓禎(2001)在福山試驗林研究的結果相反，可能因蓮華池杉木人工林因受到多次的疏伐與地被層清理，使其林下光照環境較天然闊葉林高，較多的優勢物種得以

生長而排擠掉其他物種生長的空間，造成杉木人工林林下植物優勢物種較多，歧異度較低的現象。就林下植物多樣性指數之變異程度而言，不論是在優勢度、歧異度、均勻度、或豐富度指數，杉木人工林林下植物多樣性指數的變異性皆較天然闊葉林大(表 11)，可能與杉木人工林曾遭受疏伐與多次不同強度清理地被層，使其林下環境差異甚大，造成多樣性指數有較大的差異。但此差異亦可能是來自於杉木人工林樣區樣本數過少，導致空間代表性不足所致。

表 11. 杉木人工林與天然闊葉林林下植物優勢度、歧異度、均勻度與豐富度指數之比較 (One-way ANOVA 天然闊葉林 n = 7；杉木人工林 n = 4)

林分	優勢度指數	Simpson	Shannon	均勻度指數	物種豐富度指數
4 號集水區	0.29	0.71	1.00	0.64	14.76
5 號集水區	0.14	0.86	1.13	0.81	12.57
p-value	> 0.05	> 0.05	> 0.05	> 0.05	> 0.05

本研究顯示，蓮華池杉木人工林疏伐與多次的清理地被層，明顯影響其林下光照環境與林下植物多樣性。游漢明(2000)研究指出杉木人工林內過於鬱閉，使得杉木幼苗生長不易，因此適度的疏伐可改變林冠結構，並提高林冠孔隙率，有助於幼苗的存活(Jr. et al. 2002)。然疏伐亦可能改變林下微氣候，使林下局部光照增加，土壤濕度降低，土壤壓實(soil compaction)，以及競爭者(competitors)增加，造成森林微棲地的改變(Dignan and Bren 2003, Rheeneh et al. 2004)。

四、小結

(一) 天然闊葉林與杉木人工林林下光照環境之比較結果顯示，杉木人工林由於曾經過 50%強度的疏伐與多次地被層清理，使得人工杉木林林下光照指數較天然闊葉林高，形成有利於小苗更新的環境。

(二) 此時期林分幼樹小苗生長快速，需要較多的養分如 NH_4^+ 、 HCO_3^- 等供其生長，養分之收支情形和天然闊葉林顯然有所不同。

(三) 就林下植物多樣性而言，杉木人工林由於林下光照指數較天然闊葉林高，使其平均的歧異度與均勻度皆較天然闊葉林低，但杉木人工林林下植物多樣性指數變異程度卻較天然闊葉林大。顯示，杉木人工林雖然是單一林相的均勻樹種，但

受到疏伐與多次清理地被層的影響，仍使其林下植物物種豐富度卻比較高。

第二節 植群概況調查分析

一、前言

森林植群係在某環境條件下，所有樹木及其它植物的組合，我們可從植群內的種類組成、外觀、結構等來鑑識植群，加上植群與環境有不可分割的關係，且其具動態的特性，當進行植群調查時從觀察進而計算分析相關介量，即可了解植群的現況以及未來的動態變化。本節同樣針對蓮華池 4 號杉木人工林及 5 號天然闊葉林植群進行調查分析。

二、研究方法

(一) 植生調查

在4、5號集水區中各設置了4個、7個20 m× 20 m的方形樣區，每個方形樣區再切分為4個10 m× 10 m的小區，記錄胸高直徑(DBH)大於1 cm以上的樹種名稱，並測量胸高直徑。此外記錄樣區內地被層植物名稱，並估測覆蓋度百分比。樣區環境因子的量測，使用衛星定位儀(GPS)、高度計測量樣區的位置及海拔高度，使用坡度方位計測量樣區的坡度及坡向，並描述樣區的微地形狀況(稜線、坡面、谷地)。

(二) 資料分析

樣區內植物介量的計算採用重要值指數(Important Value Index, IVI)計算，IVI為一合成介量，即是相對密度、相對優勢度、相對頻度的總和，以百分率表示，每一樣區之總和為300，其計算公式為(蘇鴻傑 1986)：

$$\text{相對密度(\%)} = \frac{\text{樣區內某植物株數}}{\text{樣區全部植物株數}} \times 100$$

$$\text{相對頻度(\%)} = \frac{\text{某植物在小區出現頻度}}{\text{樣區內全部植物在小區出現頻度之總和}} \times 100$$

$$\text{相對優勢度(\%)} = \frac{\text{樣區內某植物胸高直徑總和}}{\text{樣區內全部植物胸高直徑總和}} \times 100$$

徑之總和 $\times 100$

重要值指數(IVI)=相對密度+相對頻度+相對優勢度

求得各樹種之IVI值後，以八分級制(Octave scale)轉為0-9級(表12，Gauch, 1982)，再將原始資料矩陣以套裝軟體PC-ORD (McCune and Mefford 1999)進行資料分析。

在植群分類法中採用最常使用的非加權配對群團分析法(UPGMA)進行群團分析(Cluster Analysis)，比較樣區間彼此的相似程度；並採用雙向指標種分析(Two-way indicator species analysis，TWINSpan)，將樣區分群及找出林型間的特徵種。在分布序列法中採用降趨對應分析(Detrended Correspondence Analysis，DCA)來顯示植群在空間上分布的特性。

表 12. 植群重要指數(IVI)之八分制級值 (Gauch 1982)

IVI (%)	Class	IVI (%)	Class
0	0	4<X<8	5
0<X<0.5	1	8<X<16	6
0.5<X<1	2	16<X<32	7
1<X<2	3	32<X<64	8
2<X<4	4	64<X<100	9

三、結果與討論

(一) 植群分類

綜合群團分析(圖6)、雙向指標種分析(表13)、降趨對應分析(圖7)的分析結果將11個樣區(7個天然林樣區和4個人工林樣區)分為兩型，林型名稱以特徵種及優勢種名稱來命名，分別為九節木—黃杞型(*Psychotria rubra-Engelhardtia roxburghiana* forest type)與三腳壩—杉木型(*Melicope pteleifolia-Cunninghamia lanceolata* forest type)。從圖6、圖7、表13來看，明顯可區分5號集水區之天然闊葉林及4號集水區之杉木人工林，但5號集水區之天然闊葉林中之7個樣區根據上述分析無法再作細分，推測都屬同一植群型，再根據前人文獻描述作比照，應等同於劉靜榆(2003)及劉靜榆等(2006)文中劃分之單刺苦櫛-火燒柯群叢(*Castanopsis cuspidata* var.

carlesii f. *sessilis*-*Castanopsis fargesii* association)及黃獻文(1984)劃分之黃杞-大葉苦櫨-單刺栲優勢型(*Engelhardtia roxburghiana*-*Castanopsis borneensis*-*Castanopsis carlesii* var. *sessilis* dominance type)。

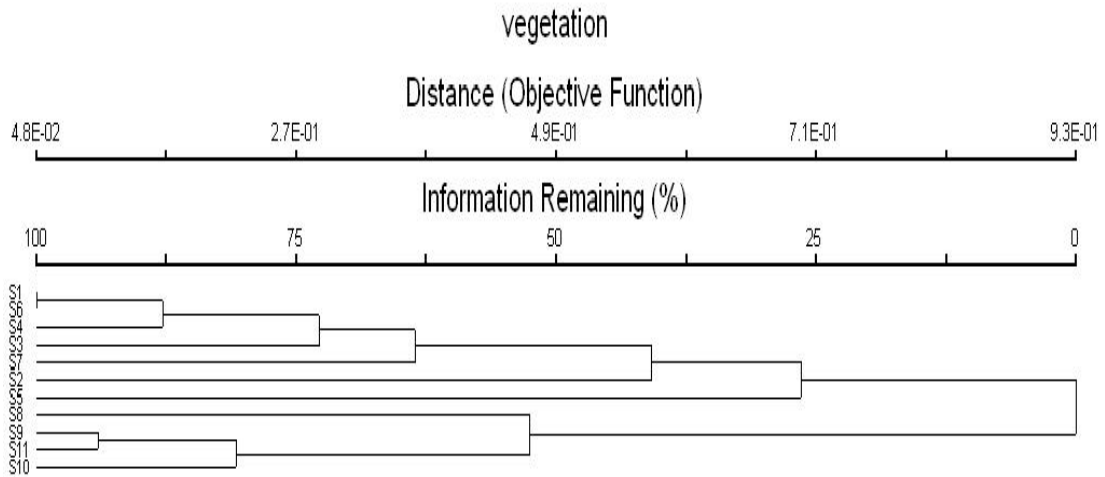


圖 6. Cluster Analysis 之林型分群

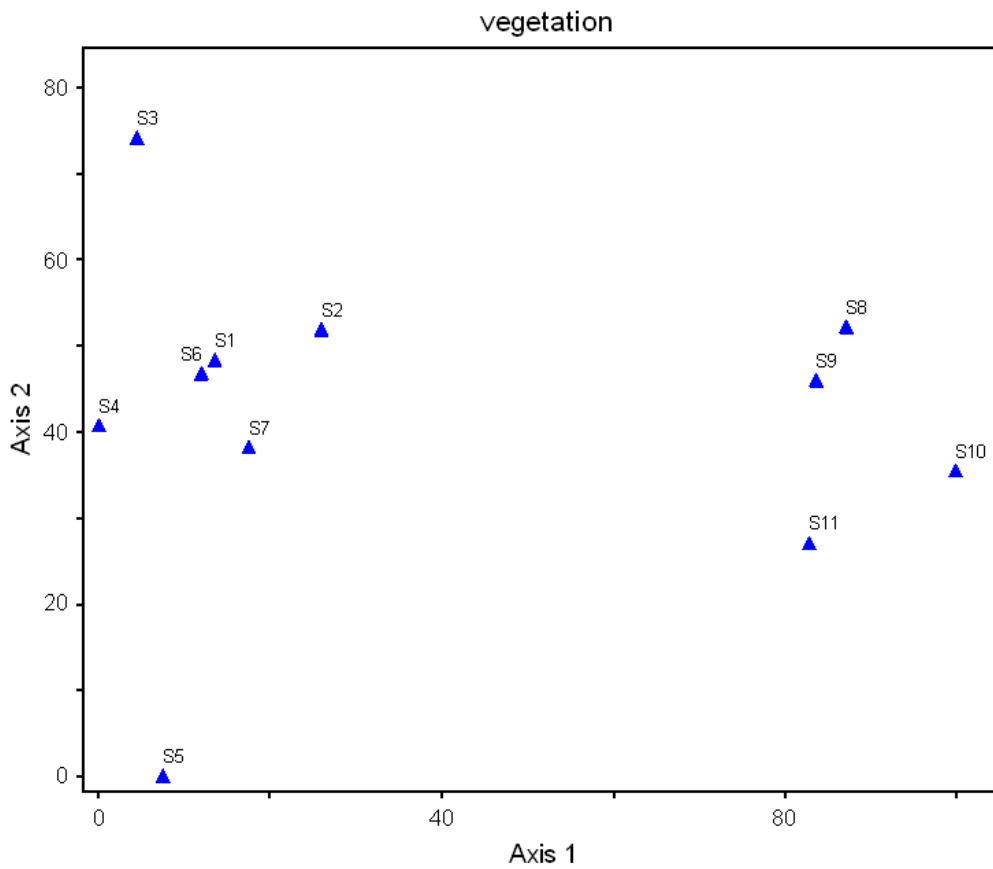


圖 7. 樣區在降趨對應分析(DCA)序列軸上的空間分布

表 13. 杉木人工林與天然闊葉林特徵種簡表

林型	I							II				
	樣區	5	6	2	3	4	8	1	9	10	11	12
數種												
綠樟		2	—	—	—	—	—	3	—	—	—	—
山羊耳		—	2	2	—	—	—	—	—	—	—	—
山黃梔		3	3	—	2	2	—	—	—	—	—	—
忍冬葉冬青		3	3	—	3	3	—	—	—	—	—	—
屏東木薑子		—	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
菱葉衛矛		—	2	3	2	—	—	—	—	—	—	—
山黃皮		—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—
玉山灰木		—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—
厚皮香		—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—
鬼杉櫟		—	—	—	3	—	—	3	—	—	—	—
九節木		5	3	4	2	4	4	3	—	2	—	—
桃實百日青		2	3	3	4	4	2	—	—	—	—	—
台灣紅豆樹		5	3	3	4	3	4	—	—	—	—	2
琉球雞屎樹		—	—	4	2	—	3	3	—	2	—	—
豬腳楠		—	—	3	4	2	—	—	—	—	2	—
佐佐木氏灰木		—	—	3	—	—	—	—	—	2	—	—
糊櫨		—	—	3	—	—	—	—	—	—	—	2
大丁黃		4	3	—	—	3	2	—	—	—	3	3
細枝柃木		1	3	—	—	—	—	—	—	2	—	—
軟毛柿		—	3	—	—	—	—	—	—	—	2	—
台灣八角		2	5	3	5	5	2	5	2	—	2	—
厚殼桂		4	4	5	5	6	5	5	—	2	2	2
垢果山茶		—	3	3	3	2	—	4	—	3	—	—
烏心石		3	—	3	4	3	—	3	—	2	—	—
香桂		4	5	4	4	6	5	5	—	2	—	4
捲斗櫟		6	2	2	3	4	4	4	2	1	—	3
大葉木犀		3	3	—	2	—	2	—	—	—	—	2
小葉赤楠		4	3	—	4	4	—	3	—	—	—	2
烏皮茶		4	4	3	2	3	2	—	—	4	—	—
變葉新木薑子		4	3	—	2	2	2	3	—	2	—	2
紅皮		2	2	4	3	5	4	5	—	2	2	3
山龍眼		1	4	6	4	3	4	5	—	4	2	4
台灣糊櫨		3	3	3	5	2	4	3	2	2	2	2
狗骨仔		3	3	4	2	4	3	4	2	2	3	3
長葉木薑子		4	4	4	4	4	5	4	4	2	2	2
短尾葉石櫟		3	2	5	3	—	5	2	—	2	2	2
黃杞		5	6	4	6	7	6	6	4	4	—	4
鵝掌柴		5	5	6	6	5	5	5	4	3	3	4
瓊楠		3	3	4	3	2	—	4	—	2	3	3
小西式灰木		4	4	3	3	—	3	4	3	4	—	3
小葉樹杞		4	3	2	—	5	4	3	2	2	3	4
茜草樹		7	4	4	—	5	3	5	3	3	4	4
單刺苦槠		4	—	4	4	4	6	2	3	4	4	3
薯豆		4	3	2	2	3	—	3	3	4	4	—
白匏子		—	2	4	—	3	5	—	—	5	5	5
柏拉木		3	5	6	6	5	5	5	8	7	6	6
墨點櫻桃		4	3	5	—	3	3	—	4	4	3	5
大葉苦槠		3	2	—	—	—	—	—	2	2	—	—
山紅柿		1	4	—	—	—	—	4	5	2	3	—
白白		—	—	3	—	—	—	4	3	—	4	4
裏白饅頭果		—	3	—	5	—	—	2	3	4	4	3
頷垂豆		—	4	—	3	—	2	—	4	4	2	3
杜英		—	—	—	—	—	3	2	2	2	3	—
香楠		2	2	—	—	—	—	2	4	—	—	3
木荷		2	—	—	—	—	—	—	4	—	—	2
小西式石櫟		2	—	—	—	—	—	—	—	2	—	3
秀柱花		—	2	—	—	—	—	—	—	—	2	—
廣東油桐		—	2	—	—	—	—	—	—	—	5	—
南投五月茶		—	—	—	—	—	—	2	—	—	—	2
杉木		—	—	—	—	—	—	—	7	7	7	7
三角藤		—	—	—	—	—	—	—	2	4	5	4

大青	—	—	—	—	—	2	—	3	2	5	4
玉山紫金牛	—	—	—	—	—	—	—	2	2	3	3
山胡椒	—	—	—	—	—	—	—	2	2	4	3
火燒柯	—	—	—	—	—	—	—	—	3	—	—
薄葉嘉賜木	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—	—
鬼紫株	—	—	—	—	—	—	—	—	3	4	—
賊仔樹	—	—	—	—	—	—	—	—	2	2	—
銳葉山黃麻	—	—	—	—	—	—	—	—	2	4	2
野牡丹	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—
黃肉樹	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—
杜紅花	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—
香葉樹	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—
呂宋莢蒾	—	—	—	—	—	—	—	2	—	—	2
三斗石櫟	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2
大葉楠	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2
山油麻	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2
冇樟	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2

(二) 5 號集水區天然闊葉林之植群

1、植群型名稱：

單刺苦槠-火燒柯群叢(*Castanopsis cuspidata* var. *carlesii* f. *sessilis*-*Castanopsis fargesii* association)

根據劉靜榆(2003)臺灣中西部氣候區森林植群分類系統之研究，文中將台灣中西部氣候區之植群分類作一系統性的整理，蓮華池一帶之森林屬於火燒柯群團(*Castanopsis fargesii* alliance)下之單刺苦槠-火燒柯群叢(*Castanopsis cuspidata* var. *carlesii* f. *sessilis*-*Castanopsis fargesii* association)。因當地優勢樹種的分布範圍廣泛，且地域性的不同，植物的介量值在空間上會有所不同，本文中命名之九節木—黃杞型(*Psychotria rubra*-*Engelhardtia roxburghiana* forest type)可視為地域性上的差異。

2、生育地及植物相組成

共調查 7 個樣區(樣區編號：S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7)，地形位置以上坡及中坡為主，坡向主要為西坡及東坡，坡度為 17-37 度，屬常綠闊葉林，混有少數幾棵落葉樹(如：白白、頷垂豆、白匏子)。植物社會的樹冠層高度約 12-18 m，優勢樹種為黃杞、鵝掌柴、紅皮、單刺苦槠、捲斗櫟、香桂等，樹冠第二層高度約 6-10 m，優勢樹種為厚殼桂、山龍眼、長葉木薑子、台灣八角等，灌木層高度約 2-3 m，優勢樹種為柏拉木、茜草樹等，地被優勢物種以冷清草、網脈突齒蕨、

細柄双蓋蕨、黃藤、鬼杪欏爲主。

3、稀有及保育物種：桃實百日青、台灣紅豆樹、柳葉山茶、垢果山茶。

4、主要樹種組成及特性

表 14 列出天然闊葉林植群重要值指數最高的前 15 種樹種，黃杞的重要值指數高出其他樹種許多，表示當地黃杞的優勢度高；第 2、3 名的樹種爲茜草樹、柏拉木，爲灌木層主要樹種，表示當地灌木層茂密，林分密度高。

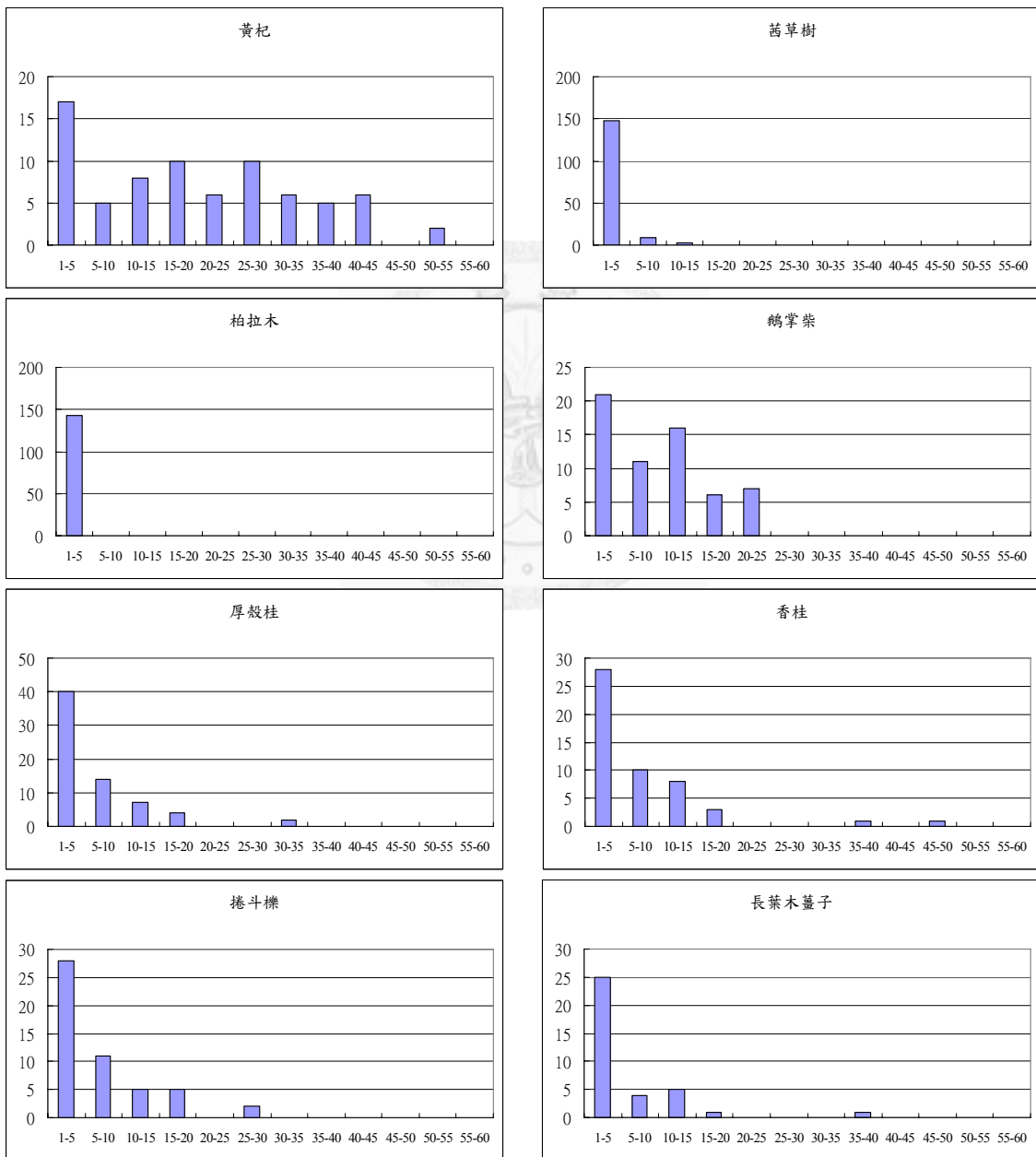
表 14. 天然闊葉林植群重要值指數最高的前 15 種樹種

生物中名	學名	相對密度 (%)	相對頻度 (%)	相對優勢度 (%)	重要值指數 (IVI)(%)
黃杞	<i>Engelhardtia roxburghiana</i>	5.96	4.82	20.50	31.28
茜草樹	<i>Randia cochinchinensis</i>	12.64	3.08	4.98	20.70
柏拉木	<i>Blastus cochinchinensis</i>	11.37	4.24	2.39	18.00
鵝掌柴	<i>Schefflera octophylla</i>	4.85	4.82	8.25	17.92
厚殼桂	<i>Cryptocarya chinensis</i>	5.33	4.62	5.30	15.25
香桂	<i>Cinnamomum subavenium</i>	4.05	4.43	4.93	13.41
捲斗欏	<i>Cyclobalanopsis pachyloma</i>	4.05	2.50	4.39	10.95
長葉木薑子	<i>Litsea acuminata</i>	2.94	3.85	2.88	9.67
山龍眼	<i>Helicia formosana</i>	3.34	2.89	3.34	9.57
台灣八角	<i>Illicium arborescens</i>	3.10	3.66	2.74	9.50
單刺苦櫨(白校欏)	<i>Castanopsis cuspidata</i> var. <i>carlesii</i>	1.59	2.50	5.24	9.34
九節木	<i>Psychotria rubra</i>	3.10	3.08	1.56	7.75
台灣紅豆樹	<i>Ormosia formosana</i>	3.02	2.89	1.02	6.94
紅皮(葉下白)	<i>Styrax suberifolia</i>	1.27	2.12	3.43	6.82
短尾葉石欏	<i>Pasania harlandii</i>	1.75	2.50	2.42	6.67
其他		31.64	47.98	26.62	106.24
合計		100.00	100.00	100.00	300.00

5、主要樹種之徑級結構

圖 8 爲天然闊葉林植群重要值指數最高的前 10 種樹種之徑級分布曲線，顯示樹冠層優勢樹種黃杞、鵝掌柴、捲斗欏、香桂的徑級結構曲線較接近於 S 型，屬於反 J 型的衍生變形，表示族群曾經受到局部的小干擾，但大致上這些族群仍有連

續的繁殖與更新；樹冠第二層的山龍眼、台灣八角、長葉木薑子、厚殼桂的徑級結構曲線除長葉木薑子較接近於 S 型，其餘皆屬反 J 型；灌木層的柏拉木、茜草樹植株以 1-5 cm 徑級為主，且數量極多。綜合上述推測此植群目前繁衍與更新狀況良好，但曾於早期受到小程度的干擾，造成某一徑級的株數增加或減少。5 號集水區之下坡處地形較為陡峭且多有竹林干擾，故樣區多設為上坡及中坡，樹木徑級普遍不大，林下更新良好，小樹小苗數量多，森林垂直結構之層次多，呈複層林景觀。



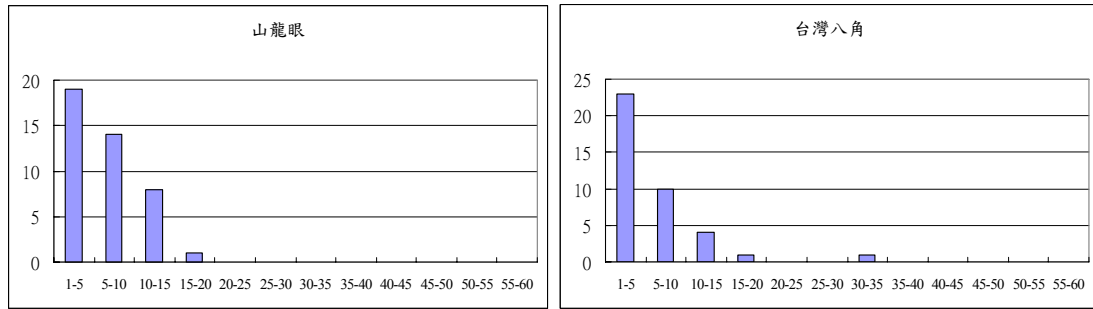


圖 8. 天然闊葉林植群重要值指數最高的前 10 種樹種之徑級分布曲線
(Y：株數，X：徑級 cm)

(三) 4 號集水區杉木人工林之植群描述

1、植群型名稱：

三腳壠—杉木型(*Melicope pteleifolia*-*Cunninghamia lanceolata* forest type)

植群型原本應推測為單刺苦楮-火燒柯群叢(*Castanopsis cuspidata* var. *carlesii* f. *sessilis*-*Castanopsis fargesii* association)，但因之後的造林撫育而成為杉木人工林，經本次調查命名為三腳壠—杉木型(*Melicope pteleifolia*-*Cunninghamia lanceolata* forest type)。

2、生育地及植物相組成

共調查 4 個樣區(樣區編號：S8、S9、S10、S11)，地形位置以上坡及中坡為主，坡向為西、東南，坡度為 18-36 度，屬杉木造林地，林下小樹極多，且具有較多陽性樹種。植物社會的樹冠層高度約 8-15 m，優勢樹種為杉木、白臼、墨點櫻桃、鵝掌柴、頷垂豆等，幾無樹冠第二層，灌木層高度約 3 m，優勢樹種為柏拉木、三腳壠等，地被優勢物種以細柄雙蓋蕨、烏毛蕨、沙皮蕨、台灣金狗毛蕨為主。

3、稀有及保育物種：桃實百日青、台灣紅豆樹、垢果山茶。

4、主要樹種組成及特性

表 15 列出杉木人工林植群重要值指數最高的前 15 種樹種，樹冠層的杉木及灌木層的柏拉木，其重要值指數遠高出其他樹種，分別為樹冠層及灌木層的主要

優勢樹種，其餘樹種的重要值指數驟減，表示當地植物組成以杉木及柏拉木為主要組成物種，其餘植物的比重都不高。

表 15. 杉木人工林植群重要值指數最高的前 15 種樹種

生物中名	學名	相對密度 (%)	相對頻度 (%)	相對優勢度 (%)	重要值指數 (IVI)(%)
杉木	<i>Cunninghamia lanceolata</i>	49.41	11.40	5.50	66.30
柏拉木	<i>Blastus cochinchinensis</i>	16.85	44.08	4.81	65.74
白匏子	<i>Mallotus paniculatus</i>	4.05	3.80	4.12	11.97
三腳龜	<i>Melicope pteleifolia</i>	1.57	3.00	4.47	9.04
黑星櫻(墨點櫻桃)	<i>Prunus phaeosticta</i>	2.05	2.12	3.44	7.61
茜草樹	<i>Randia cochinchinensis</i>	1.14	2.39	3.44	6.96
黃杞	<i>Engelhardtia roxburghiana</i>	1.37	2.47	2.75	6.59
大青	<i>Clerodendrum cyrtophyllum</i>	0.84	2.65	3.09	6.58
裏白饅頭果	<i>Glochidion acuminatum</i>	0.93	1.77	3.78	6.48
頷垂豆	<i>Archidendron lucidum</i>	2.18	0.97	3.09	6.24
鵝掌柴	<i>Schefflera octophylla</i>	2.01	1.41	2.75	6.18
單刺苦櫛(白校欖)	<i>Castanopsis cuspidate var. carlesii</i>	0.87	1.06	3.44	5.36
白白	<i>Sapium discolor</i>	2.42	0.97	1.72	5.11
薯豆	<i>Elaeocarpus japonicus</i>	0.67	1.68	2.75	5.10
小葉樹杞	<i>Ardisia quinquegona</i>	0.62	1.50	2.75	4.87
其他		13.03	18.73	48.11	79.87
合計		100.00	100.00	100.00	300.00

5、主要樹種之徑級結構

圖 9 為杉木人工林植群重要值指數最高的前 10 種樹種之徑級分布圖，顯示樹冠層優勢樹種杉木的徑級結構曲線較接近於鈴型，表示目前其繁殖更新狀態不佳；其他樹冠層優勢樹種如墨點櫻桃、頷垂豆的徑級結構曲線皆較接近於 S 型，表示族群曾受到小干擾但仍有持續繁殖更新；灌木層優勢樹種柏拉木，及其他樹種如白匏子、三腳龜、茜草樹、黃杞、大青、裏白饅頭果等的植株皆以 1-5cm 徑級為主，其中柏拉木的植株高達 499 株，表示當地林分密度極高。綜合上述推測此地造林樹種杉木植群呈現逐漸衰退，而出現於樹冠層的其他樹種多為陽性樹種，有逐漸取而代之的趨勢，且林下更新之小樹極多，代表族群更新力旺盛。杉木人工林之林相較為簡單，上層以杉木為主，間或些許陽性樹種，下層則由於陽光透射率高，小樹及草本植物長得極為茂盛。

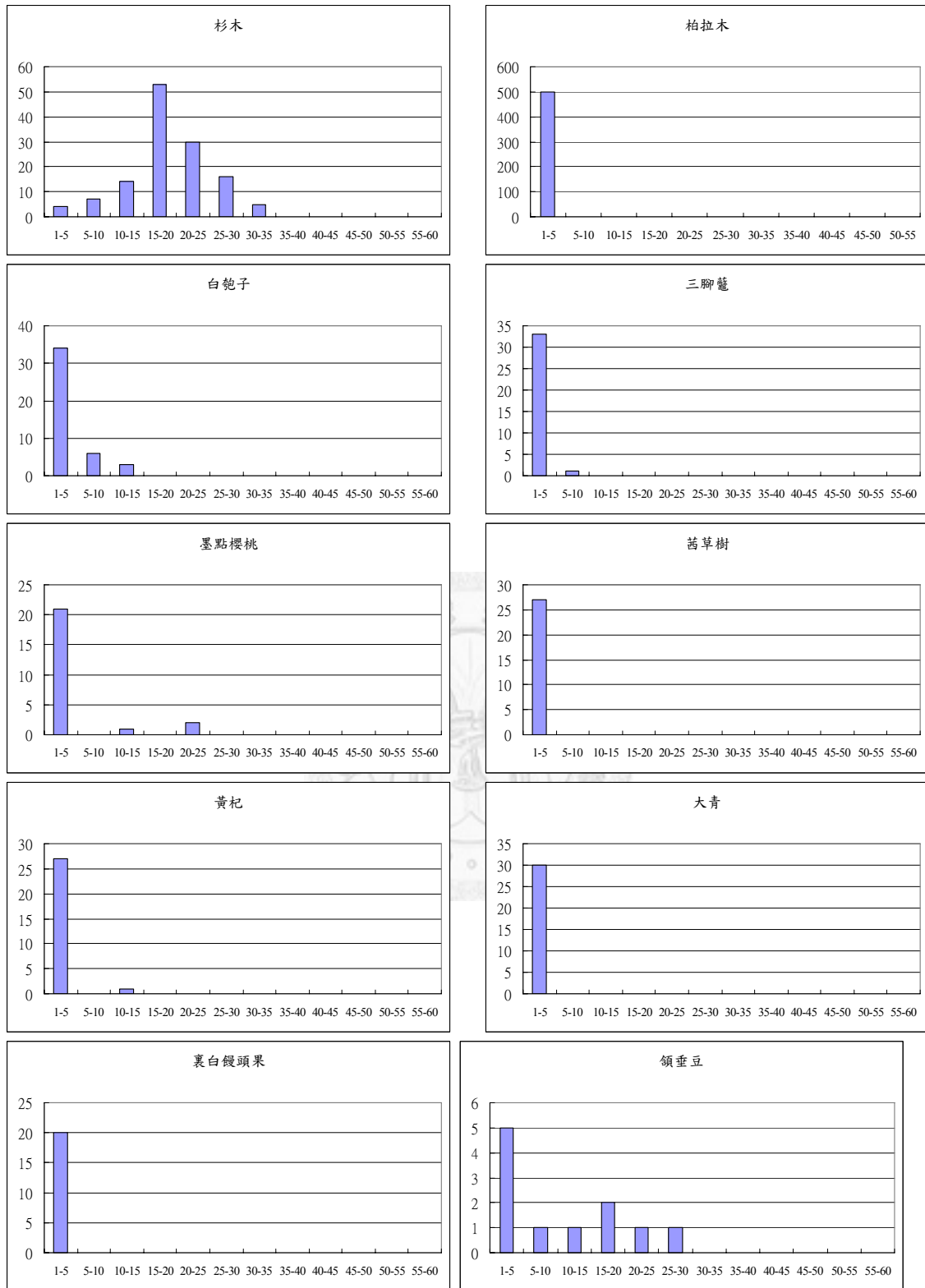


圖 9. 杉木人工林植群重要值指數最高的前 10 種樹種之徑級分布曲線
(Y：株數，X：徑級 cm)

(四)蒸發散估算之應用

太陽輻射是影響植物行光合作用與生長的重要來源，森林冠層的特性與結構常能影響林下光照(Valverde and Silvertown 1997; Trichon et al. 1998; Battaglia et al. 2002)，造成林下微氣候如溫度、水份、輻射及蒸發散等的變化(Breshears et al. 1998; Dietz et al. 2006)。蒸發散為整個水文收支上重要的一環，也是水資源經營管理上重要的基本參考資料；然而森林地區的蒸發散量常依據當地的氣候特性，應用不同的方法來推估。目前最常應用者有 Penman-Monteith、Priestley-Taylor、Thornthwaite、Hargreaves 及 Hamon 等方法。

早期多應用 Thornthwaite 及 Hamon 等方法來推估蒸發散量，其所需參考的氣象資料為月平均氣溫、日平均氣溫及日照時數，其推估結果誤差較大。為求得更加準確的推算結果，近年來先後有 Penman-Monteith 及 Priestley-Taylor 等方法的發展出來。此二方法是結合能量收支以及氣體動力學所導出的估算公式，以淨輻射能、風速、氣溫和水蒸氣壓等具有物理意義的各項參數，另外還加入植物冠層阻抗及空氣阻抗的觀念，在解釋蒸發散現象的因果關係時，更接近實際情形。

本文對 4 號杉木人工林及 5 號天然闊葉林的林分結構、植群分佈，尤其是林分之孔隙率及樹冠之結構層次有深入的調查分析。在此二集水區各新近設置完成一座氣象觀測塔，長期進行雨量、風速、風向、日輻射、不同樹冠層淨輻射、溫溼度、不同土層深度之土壤溫度、土壤水分等資料之收集，有助於應用 Penman-Monteith 及 Priestley-Taylor 等方法推估不同林分之蒸發散量。

四、小結

(一) 經過分析結果，植群型分為二型，5 號集水區為九節木—黃杞型，林分垂直結構之層次多，分為主林冠層、次林冠層級地被層等，呈現複層林狀態，林下更新良好幼樹小苗數量多。4 號集水區為三腳壠—杉木型，林冠層次結構簡單，僅分為林冠及地被層，底層植被組成，有陽性樹種及耐蔭性樹種間雜，代表林下微環境多樣，造就不同生活型態植物能夠暫且共存。

(二) 對 4、5 號集水區不同林分之結構、植群分佈、樹冠層次及孔隙率有深入之調查分析，當地又架設二座微氣象觀測高塔，可提供從林冠上層至地面各層次之微氣象資料，有助於應用 Penman-Monteith 及 Priestley-Taylor 等方法推估不同林分之蒸發散量之研究。



第四章 集水區土壤水力傳導度特性之測定分析

台灣人工林面積約 42 萬公頃，佔台灣全部森林面積的 20%，這些已遭受人為干擾之林地對水文環境有何影響，是目前極待探討之課題，除有助於基礎水文研究外，亦有利於森林生態系經營之推行。由於土壤水力傳導度與入滲、土壤水移動、逕流路徑及化學傳輸等密切相關，因此研究森林水文特性時，土壤水力傳導度常是重要指標之一。本文主要目的即是在探討人工林與天然林土壤水力傳導度之差異，研究試區為蓮華池 4 號杉木人工林及 5 號天然闊葉林，分別以 Guelph 滲透計調查二集水區內山頂、山腹及山谷土壤水力傳導度之特性，研究結果可以提供相關研究者參考。

第一節 前言

台灣森林面積共計 210 萬公頃，其中 42 萬公頃(約 20%)為人工造林地，這些已遭受人為干擾之林地應如何經營管理，以符合森林生態系經營之目標，是目前林業單位施政上的當務之急(黃裕星，2002)。由於人工林與天然林植被類型不同，對水文特性有何影響一直是許多專家學者所極欲探討之對象，研究項目包括日輻射(夏禹九等，1992)、樹冠截留(潘家聲，1964；1966)、穿落水及幹流水化學分析(許世宏等，1994；劉瓊霖，2000)、入滲率(陳明杰、何正品，1996；陸象豫等，1999；盧惠生、胡蘇澄，1993)、逕流量(夏禹九等，1982；鄭皆達等，2001)等。雖然經由上述研究人工林與天然林水文循環差異已漸被瞭解，但影響土壤水移動甚鉅的土壤水力傳導度(hydraulic conductivity)卻尚未被分析比較。

土壤水力傳導度又名滲透係數(coefficient of permeability)，由達西定律(Darcy's law)推衍而出，是許多水文模式的參數之一，它不僅會影響到入滲、土壤水流動及逕流路徑等特性外，更與化學傳輸密切相關(Govindaraju *et al.*, 1996; Fares *et al.*, 2000)。土壤水力傳導度可由實際量測或間接推估而得，實際量測又可分為野外及室內方法，應用的調查儀器及分析工具種類繁多。Daniel(1989)曾比較八種不同儀器於野外調查土壤水力傳導度時之差異，Benson 等(1997)則比較四種不同

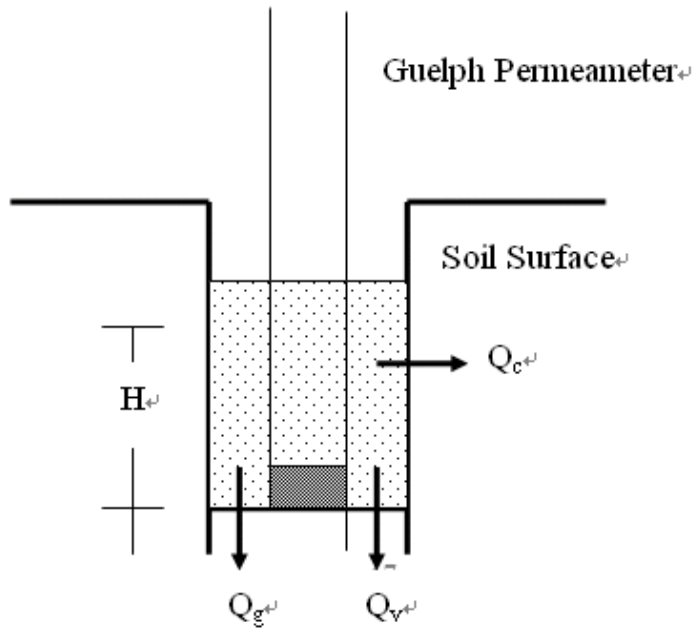
方式於室內及室外調查時之差別。間接推估大都以土壤的理化性質，如粒徑大小、密度、孔隙率、有機質含量及土壤質地等作為參數，再配合統計迴歸分析，以預估土壤水力傳導度。Zhuang 等(2000)應用八種模式推估土壤水力傳導度，Poulsen 等(1999)則以四種不同模式分析飽和及非飽和土壤水力傳導度。由於空間上的變異性與應用時的重要性，所以不論是實際量測或間接推估，土壤水力傳導度一直是水文及土壤界專家學者所極欲探討的重點之一。

為期能對蓮華池人工林及天然林集水區水文特性有更進一步的認識與瞭解，提供爾後生物地質化學(biogeochemistry)及逕流生成機制(streamflow generation mechanism)等研究所需，並有助於推行長期生態研究及森林生態系經營，土壤水力傳導度的調查分析是刻不容緩。因此，本研究 2001 年期間於應用 Guelph 滲透計調查蓮華池杉木人工林及天然闊葉林集水區土壤水力傳導度特性，並比較兩集水區之差異，期能提供未來相關研究所需。

第二節 研究方法

一、Guelph 滲透計原理

Guelph 滲透計是以三維穩定狀態滲透流原理調查野外土壤水力傳導度，操作簡易，使用方便。儀器具有內外管裝置，可用於儲水及量測，內管底部裝設有活動式活塞，量測時往上移，則管內儲水將會流出，並應用 Mariotte 虹吸原理控制水頭，以活塞移動距離來決定水頭高低。當土壤滲透率較小時，可由內管量測以提高精確度，當土壤滲透率較大時，則應內外管合用，避免內管水位下降過快來不及記錄。Guelph 滲透計量測範圍介於 $10^{-2} \sim 10^{-6}$ cm/s 間(Soil moisture Corp., 1986)。



10. Guelph 滲透計基本原理(修改自 Reynolds and Zebchuk, 1996)

內管底部置於事先已挖好的圓形土孔中，水分由內管流至土孔，並擴散至周圍土壤。水分移動受到三種力量影響(鄒天練及鄭皆達，1996；Reynolds and Elrick, 1985；Reynolds and Zebchuk, 1996)(圖 9)：(1)垂直水壓差(vertical hydrostatic pressure)；(2)地心引力(gravitational force)；(3)毛細管作用(capillarity force)。假設這三種力量所影響的移動水量分別為 Q_v 、 Q_g 及 Q_c ，則水份總滲透量(Q_t)為：

$$Q_t = Q_v + Q_g + Q_c \quad (1)$$

依據理察(Richard)公式，方程式(1)可轉換為下列方程式表示：

$$Q_t = \frac{2\pi H^2}{C} K_{fs} + \pi r^2 K_{fs} + \frac{2\pi H}{C} \phi_m \quad (2)$$

式中 Q_t 為總滲透量(cm^3/s)； H 為水頭高(cm)； r 為土孔半徑(cm)； K_{fs} 為野外土壤水力傳導度(cm/s)； ϕ_m 為基質流束勢能(cm^2/s)； C 為形狀係數，無單位，由土壤質地與 H/a 之關係圖中查出(Reynolds and Elrick, 1985)。應用二次不同水頭高重復量測之後，即可求出土壤水力傳導度(K_{fs})，此為雙水頭量測法。

第一次量測：

$$Q_1 = \frac{2\pi H_1^2}{C_1} K_{fs} + \pi r^2 K_{fs} + \frac{2\pi H_1}{C_1} \phi_m \quad (3)$$

第二次量測：

$$Q_2 = \frac{2\pi H_2^2}{C_2} K_{fs} + \pi r^2 K_{fs} + \frac{2\pi H_2}{C_2} \phi_m \quad (4)$$

應用方程式(3)及(4)進行方程式解即可求得土壤水力傳導度：

$$K_{fs} = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \quad (5)$$

其中

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + r^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (6)$$

$$G_1 = G_2 \frac{H_2 C_1}{H_1 C_2} \quad (7)$$

二、調查方法

若考慮使用情況、精確度、成本、優點及限制條件等因素，則野外實測土壤水力傳導度儀器以 Guelph 滲透計最為適宜(Ragab and Cooper, 1993)。因此，本研究採用 Guelph 滲透計(Model 2800K1)現場量測蓮華池 4 號及 5 號集水區野外土壤水力傳導度。調查流程如下(Soilmoisture Corp., 1986)：

(一)挑選樣點：

先於地形圖上將研究區域區分為山頂(ridge)、山腹(hillslope)及山谷(valley)三大部份，每一部份以隨機取樣方式選定 9 個樣點，如圖 11。

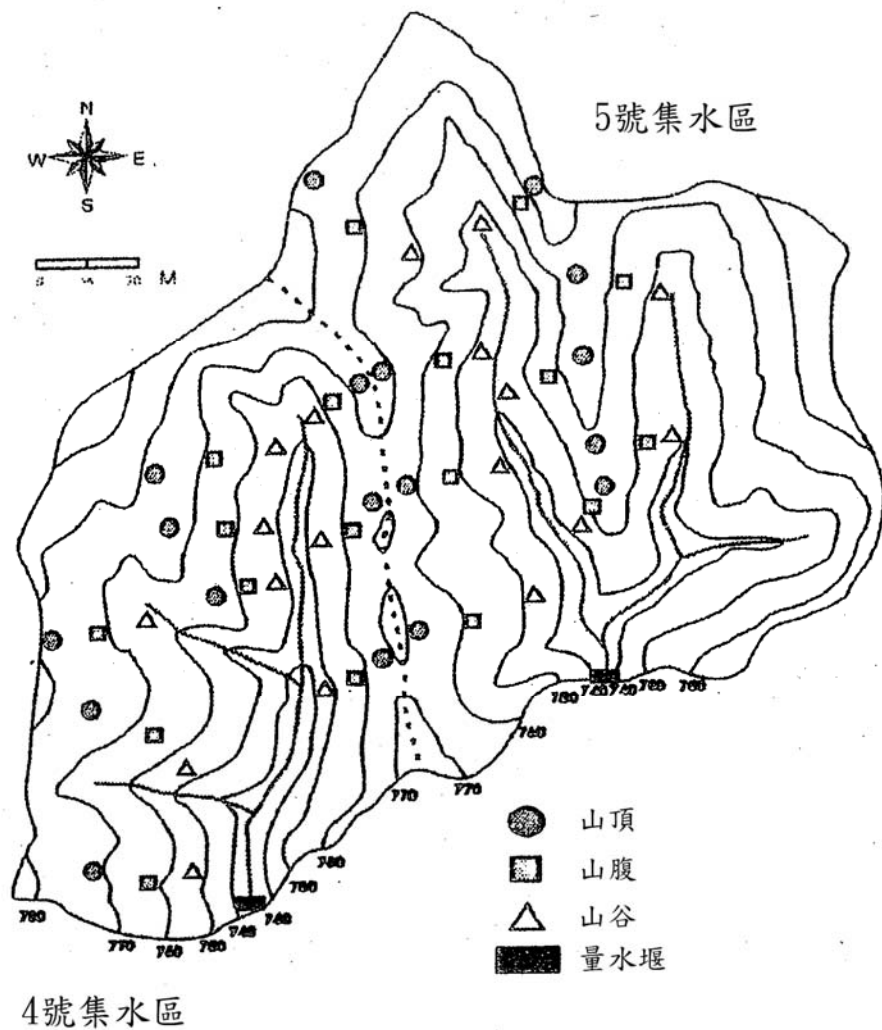


圖 11. Guelph 滲透計研究區域及取樣地點

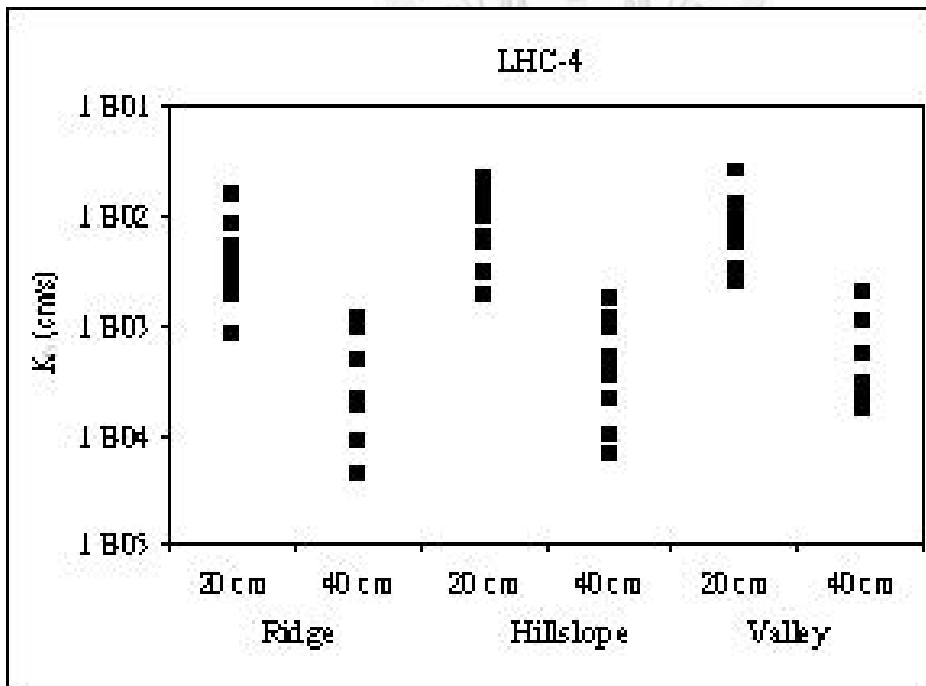
(二)野外實測：

測量樣點坡度後，以直徑 6 cm 的土鑽挖出深 20 cm 的土孔，並以細刷清除孔內碎土。將 Guelph 滲透計置於孔內，並將內外管裝滿水。由於研究區域土壤入滲率大，故 Guelph 滲透計內外管合用，並以雙水頭量測法實測土壤水力傳導度。首先拉高空氣內管離地 5 cm，亦即設定水頭高為 5 cm，量測最終流速 R_1 (cm/s)，接著再拉高空氣內管至離地 10 cm，量測最終流速 R_2 (cm/s)。內外管斷面積合計為 35.39 cm^2 ，乘以流速 R_1 及 R_2 即可得知流量 Q_1 及 Q_2 (cm^3/s)，再代入方程式(5)即可求出飽和土壤水力傳導度(K_{fs})。以同樣方式再測定土深 40 cm 處之飽和土壤水力傳導度(K_{fs})。

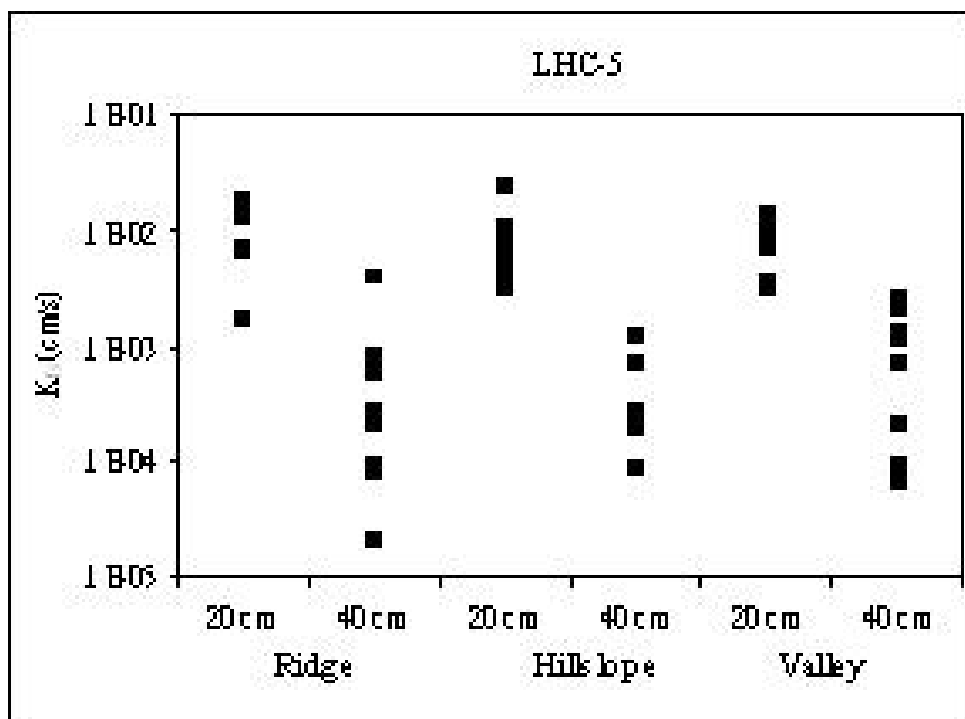
第三節 結果

一、杉木人工林

本研究於杉木人工林（4 號集水區）共計調查 27 處樣點，其中山頂、山腹及山谷各 9 處。山頂樣點的平均坡度為 26%，山腹樣點的平均坡度為 48%，山谷樣點的平均坡度為 54%，全部樣點的平均坡度則為 43%。在土深 20 cm 處，山頂區域土壤水力傳導度介於 $8.1 \times 10^{-4} \sim 15.8 \times 10^{-3}$ cm/s 間，平均為 5.0×10^{-3} cm/s；山腹區域介於 $1.9 \times 10^{-3} \sim 21.8 \times 10^{-3}$ cm/s 間，平均為 9.3×10^{-3} cm/s；山谷區域介於 $2.4 \times 10^{-3} \sim 25.9 \times 10^{-3}$ cm/s 間，平均為 8.8×10^{-3} cm/s；全部樣點的總平均則為 7.7×10^{-3} cm/s；土壤水力傳導度的變異係數大小以山頂最高(0.92)、山谷次之(0.84)、山腹最低(0.72)。此外，在土深 40 cm 處量測結果得知，山頂區域土壤水力傳導度介於 $4.0 \times 10^{-5} \sim 11.8 \times 10^{-4}$ cm/s 間，平均為 4.2×10^{-4} cm/s；山腹區域介於 $1.0 \times 10^{-4} \sim 17.5 \times 10^{-4}$ cm/s 間，平均為 6.1×10^{-4} cm/s；山谷區域介於 $1.7 \times 10^{-4} \sim 19.7 \times 10^{-4}$ cm/s 間，平均為 5.5×10^{-4} cm/s；全部樣點的總平均則為 5.3×10^{-4} cm/s；土壤水力傳導度的變異係數大小以山谷最高(1.11)、山頂及山腹次之(0.93)(表 16、圖 12)。



a.



b.

圖 12. 杉木人工林與天然闊葉林不同深度土壤水力傳導度

表 16. 杉木人工林土壤水力傳導度

土壤深度	位置	平均值	最大值	最小值	標準差	變異係數	樣本數
20 cm	山頂	0.00499	0.01578	0.00081	0.00461	0.92	9
20 cm	山腹	0.00933	0.02182	0.00185	0.00675	0.72	9
20 cm	山谷	0.00878	0.02585	0.00235	0.00738	0.84	9
20 cm	總和	0.00770	0.02585	0.00081	0.00642	0.83	27
40 cm	山頂	0.00042	0.00118	0.00004	0.00039	0.93	9
40 cm	山腹	0.00061	0.00175	0.00010	0.00057	0.93	9
40 cm	山谷	0.00055	0.00197	0.00017	0.00061	1.11	9
40 cm	總和	0.00053	0.00197	0.00004	0.00052	0.98	27

SD: standard deviation; CV: coefficient of variation; unit is cm/s except for CV.

雖然杉木人工林不論在土深 20 cm 或 40 cm 處，其平均土壤水力傳導度大小均以山腹最高，但為求統計上的可靠度，本研究以變異數分析(analysis of variance, ANOVA)方法，信賴區間 95%作為評定依據，比較山頂、山腹及山谷間土壤水力傳導度之差異。分析後得知在土深 20 cm 處，杉木人工林之山頂與山腹、山腹與山谷、及山頂與山谷土壤水力傳導度均無差異，同樣地，在土深 40 cm 處亦得相

同結果，山頂、山腹及山谷土壤水力傳導度均無差異。不過若比較土深 20 cm 及 40 cm 處之差異，則不同土深的土壤水力傳導度則呈現顯著的差異(表 17)，土深 20 cm 處的平均土壤水力傳導度遠高於土深 40 cm 處，兩者相差將近 14.5 倍。

表 17. 杉木人工林土壤水力傳導度變異數分析

土壤深度	位置	F	臨界值	P
20 cm	山頂 vs. 山腹	2.253	4.494	0.131
20 cm	山腹 vs. 山谷	0.026	4.494	0.873
20 cm	山谷 vs. 山頂	1.708	4.494	0.210
40 cm	山頂 vs. 山腹	0.669	4.494	0.425
40 cm	山腹 vs. 山谷	0.047	4.494	0.831
40 cm	山谷 vs. 山頂	0.283	4.494	0.602
20 cm vs. 40 cm	總和 vs. 總和	33.539**	4.027	<0.0001

$H_0 : a_1 = a_2$; $H_1 : a_1 \neq a_2$; $\alpha = 0.05$; ** : significant.

二、天然闊葉林

與杉木人工林相同，本研究亦於天然闊葉林（5 號集水區）調查 27 處樣點，山頂、山腹及山谷各 9 處。山頂樣點的平均坡度為 22%，山腹樣點的平均坡度為 50%，山谷樣點的平均坡度為 50%，全部樣點的平均坡度則為 41%。在土深 20 cm 處，山頂區域土壤水 $1.9 \times 10^{-2} \sim 1.6 \times 10^{-3}$ cm/s 間，平均為 9.2×10^{-3} cm/s；山腹區域介於 $2.3 \times 10^{-2} \sim 3.2 \times 10^{-3}$ cm/s 間，平均為 8.3×10^{-3} cm/s；山谷區域介於 $3.0 \times 10^{-3} \sim 14.6 \times 10^{-3}$ cm/s 間，平均為 8.5×10^{-3} cm/s；全部樣點的總平均則為 8.6×10^{-3} cm/s；土壤水力傳導度的變異係數大小以山腹最高(0.75)、山頂次之(0.64)、山谷最低(0.43)。此外，在土深 40 cm 處量測結果得知，山頂區域土壤水力傳導度介於 $2.0 \times 10^{-5} \sim 38.8 \times 10^{-4}$ cm/s 間，平均為 6.9×10^{-4} cm/s；山腹區域介於 $9.0 \times 10^{-5} \sim 12.1 \times 10^{-4}$ cm/s 間，平均為 6.0×10^{-4} cm/s；山谷區域介於 $6.0 \times 10^{-5} \sim 26.3 \times 10^{-4}$ cm/s 間，平均為 10.0×10^{-4} cm/s；全部樣點的總平均則為 7.6×10^{-4} cm/s；土壤水力傳導度的變異係數大小以山頂最高(1.77)、山谷次之(0.90)、山頂最低(0.82)(表 18、圖 12)。

經變異數分析後得知($\alpha = 0.05$)，在土深 20 cm 處，天然闊葉林山頂與山腹、山腹與山谷、及山頂與山谷土壤水力傳導度均無差異，同樣地，在土深 40 cm 處亦得相同

結果，山頂、山腹及山谷土壤水力傳導度均無差異。不過若比較土深 20 cm 及 40 cm 處之差異，則不同土深的土壤水力傳導度則呈現顯著的差異(表 19)，土深 20 cm 處的平均土壤水力傳導度遠高於土深 40 cm 處，兩者相差將近 11.4 倍。

表 18. 天然闊葉林土壤水力傳導度

土壤深度	位置	平均值	最大值	最小值	標準差	變異係數	樣本數
20 cm	山頂	0.00916	0.01858	0.00163	0.00584	0.64	9
20 cm	山腹	0.00826	0.02348	0.00318	0.00631	0.75	9
20 cm	山谷	0.00848	0.01463	0.00296	0.00368	0.43	9
20 cm	總和	0.00864	0.02348	0.00163	0.00521	0.60	27
40 cm	山頂	0.00069	0.00388	0.00002	0.00122	1.77	9
40 cm	山腹	0.00060	0.00121	0.00009	0.00049	0.82	9
40 cm	山谷	0.00100	0.00263	0.00006	0.00090	0.90	9
40 cm	總和	0.00076	0.00388	0.00002	0.00090	1.18	27

SD: standard deviation; CV: coefficient of variation; unit is cm/s except for CV.

表 19. 天然闊葉林土壤水力傳導度變異數分析

土壤深度	位置	F	臨界值	P
20 cm	山頂 vs. 山腹	0.098	4.494	0.757
20 cm	山腹 vs. 山谷	0.008	4.494	0.928
20 cm	山谷 vs. 山頂	0.086	4.494	0.772
40 cm	山頂 vs. 山腹	0.049	4.494	0.827
40 cm	山腹 vs. 山谷	1.403	4.494	0.253
40 cm	山谷 vs. 山頂	0.371	4.494	0.551
20 cm vs. 40 cm	總和 vs. 總和	59.949**	4.027	<0.0001

$H_0 : a_1 = a_2 ; H_1 : a_1 \neq a_2 ; \alpha = 0.05 ; ** : \text{significant.}$

三、杉木人工林與天然闊葉林之比較

經變異數分析後得知($\alpha = 0.05$)，杉木人工林與天然闊葉林在土深 20 cm 處，無論是山頂、山腹或山谷其土壤水力傳導度均無顯著差異，同樣地在土深 40 cm 處，無論是山頂、山腹或山谷其土壤水力傳導度亦無顯著差異(表 20)。

表 20. 杉木人工林與天然闊葉林土壤水力傳導度變異數分析比較

土壤深度	位置	F	臨界值	P
20 cm	山頂 vs. 山腹	2.825	4.494	0.112
20 cm	山腹 vs. 山谷	0.119	4.494	0.734
20 cm	山谷 vs. 山頂	0.012	4.494	0.915
20 cm	山頂 vs. 山腹	0.346	4.027	0.559
40 cm	山腹 vs. 山谷	0.403	4.494	0.534
40 cm	山谷 vs. 山頂	0.003	4.494	0.957
40 cm	總和 vs. 總和	1.553	4.494	0.231
40 cm	山頂 vs. 山腹	1.401	4.027	0.242

$H_0 : a_1 = a_2 ; H_1 : a_1 \neq a_2 ; \alpha = 0.05 ; ** : \text{significant.}$

第四節 討論

一、杉木人工林與天然闊葉林之比較

本文最主要目的即在瞭解杉木人工林與天然闊葉林土壤水力傳導度之差異，經調查分析後得知，杉木人工林與天然闊葉林無論是在山頂、山腹或山谷其土壤水力傳導度均無差異，顯示二十年生的杉木人工林其土壤水力傳導度已恢復至天然闊葉林時之狀態。由於蓮華池 4 號集水區進行皆伐作業時採用空中集材法 (skyline yarding)，儘量避免破壞地表植被及土壤構造，因此林地土壤並未被集材作業而嚴重夯實。1985 年時(皆伐後 7 年)杉木人工林與天然闊葉林土深 20 cm 處之土壤孔隙率分別為 61.5%及 56.9%(陳明杰、黃正良，1986)；1993 年時(皆伐後 15 年)杉木人工林與天然闊葉林土深 20 cm 處之土壤孔隙率則分別為 58.2%及 54.6%(陳明杰、何正品，1996)。這些數據均顯示杉木人工林與天然闊葉林土壤孔隙率相當接近，並未因皆伐作業而造成明顯差異。就杉木人工林與天然闊葉林而言，在不嚴重干擾林地土壤的森林作業下，林相變更似乎對土壤水力傳導度並無造成巨大影響。此外，經變異數分析後顯示，杉木人工林與天然闊葉林具有高度的均質性(homogenous)，未來該區進行水文模擬或化學傳輸研究時，可考慮將整個集水區視為同一土壤水力傳導度，以利分析計算並簡化操作程序。

二、坡度與土壤水力傳導度之關係

杉木人工林調查樣點的平均坡度大小，由低至高依序為山頂(26%)、山腹(48%)及山谷(54%)；而天然闊葉林平均坡度大小亦依序為山頂(22%)、山腹(50%)及山谷(50%)。由於嶺線附近地勢平坦，坡度較緩，而山腹及山谷附近樣點大都位於溪流兩側山腳坡面，地勢較陡。廖學誠等(2001)曾調查福山及扇平集水區，得知土壤水力傳導度與坡度呈指數關係遞增，坡度越陡則水力傳導度越大，此乃由於坡度陡峭處崩塌頻繁，坡面土石鬆散，以致水力傳導度增高。本研究將調查樣點進行迴歸分析後得知，不論是杉木人工林與天然闊葉林，其土壤水力傳導度與坡度並無顯著相關，土壤水力傳導度不隨著坡度而改變，此特性與福山及扇平集水區不同。

土壤水力傳導度空間變異甚大，許多模式常以土壤的理化性質如粒徑大小、密度、孔隙率、有機質含量及土壤質地等作為參數，配合空間統計分析以預估水力傳導度，這些模式大都應用於地勢平坦、樣點密集、且土壤基本資料充足的農地(Zhuang *et al.*, 2000；Poulsen *et al.*, 1999)。但是對地勢陡峭、且土壤基本資料不足的森林集水區而言，若欲應用上述模式推估整個集水區的水力傳導度則屬不易。因此，如何以簡易參數，並配合數值地形模型(DTM)及地理資訊系統(GIS)，快速推求整個集水區土壤水力傳導度的空間分佈特性是未來研究重點。

三、與其它調查方法之比較

蓮華池試驗林土壤質地主要為粉質粘壤土及粉質粘土(蔣先覺等，1994)，經由土壤質地換算為水力傳導度後得知(Cosby *et al.*, 1984)，土壤水力傳導度約為 10^{-4} cm/s。將此數據與 Guelph 滲透計所測得之平均土壤水力傳導度相比較，在土深 20 cm 處，Guelph 滲透計所測得之土壤水力傳導度比經由土壤質地換算後之值略高，但在土深 40 cm 處則相當。由於 Cosby 等(1984)方法係在實驗室內分析，著重於土壤質地與土壤水力傳導度之關係，而 Guelph 滲透計則是在野外實測，其中粗孔隙常形成管流現象(pipe flow)，對土壤水力傳導度影響甚大，尤其是在森林林地裏。因此，在土深 20 cm 處 Guelph 滲透計所測得之土壤水力傳導度比應用土壤質地推算後所求得之土壤水力傳導度較高。

除了應用土壤質地推算水力傳導度外，亦可經由地下水井試驗來估計水力傳

導度。葉正霖等(2000)以 Slug 試驗測得蓮華池 3 號集水區水力傳導度介於 10^{-4} ~ 10^{-5} cm/s 間，屬於砂岩與頁岩之間。鄭皆達等(2000)則以單井回復試驗推求蓮華池 3 號集水區水力傳導度，其結果比 Slug 法所推求的低，約介於 10^{-5} ~ 10^{-6} cm/s 間。相較於本文研究結果，地下水井不論是 Slug 試驗或單井回復試驗所測得的水力傳導度均明顯地偏低。由於地下水井試驗是在地下深處進行，而 Guelph 滲透計則是在地表下 20 cm 處實施，一般而言，水力傳導度會與土壤深度呈指數關係遞減(Beven, 1984)，所以地下水井試驗所測得的水力傳導度明顯地低於 Guelph 滲透計甚多。

除此之外，林俐玲等(2002)曾應用定水頭法分析蓮華池試驗林附近九份二山的土壤水力傳導度，七個土樣的平均水力傳導度為 1.7×10^{-3} cm/s，將此數據與蓮華池試驗林相比較，則略低於土深 20 cm 處 Guelph 滲透計所測得之土壤水力傳導度。Benson 等(1997)曾指出，由於採土罐太小而無法充分代表土壤中的孔隙網路，以致於在實驗室內所測得的土壤水力傳導度偏低。可是 Bagarello 及 Provenzano(1996)卻指出，應用採土罐採取土樣後，於實驗室以定水頭法所測得之土壤水力傳導度，其值將較高，主要原因是當採土罐中的土樣有根系或其他大孔隙時，水份會比較快速流入，產生優先流動(preferential flow)現象，造成水力傳導度偏高。蓮華池的實際狀況將是如何？這是未來值得進一步探討。

以張力滲透計(Tension infiltrometer)在杉木人工林之山頂、山腹及山谷不同地點，於土深 20 cm 所量測推算之結果(陳明杰、洪志遠，2007)，和本論文以 Guelph 滲透計現場實際量測之結果作比對時，前者在山頂、山腹及山谷之水力傳導度分別是 1.02×10^{-3} 、 1.38×10^{-3} 及 2.88×10^{-3} ，而 Guelph 滲透計之實測值分別為 4.99×10^{-3} 、 9.33×10^{-3} 及 8.78×10^{-3} ；不管是山頂、山腹及山谷之水力傳導度後者都比前者大；其中，山頂部分相差 4.9 倍，山腹及山谷部份各相差 6.77 倍及 3.1 倍(表 21)。

但是，同樣是以張力滲透計於天然闊葉林分別在土壤深度 20 cm 及 40 cm 量測推算之結果(陳明杰、黃禱慧，2006)；和本論文以 Guelph 滲透計之現場實際量測的結果作比較時則是明顯的不同(表 22)；前者在土壤深度 20 cm 及 40 cm 之水力傳導度分別為 6.28×10^{-3} 及 7.35×10^{-3} ；然而，以 Guelph 滲透計之實測值分別為 8.64×10^{-3} 及 7.63×10^{-4} ，前者明顯大於後者；兩者相較其比值為 7.3 倍及 9.6 倍，分析其原因應和兩集水區的土壤質地、砂粒、沉泥及黏粒之含量、有機質含量、團粒結構、總孔隙率及粗孔隙率等有關。尤其土壤中，大孔隙的存在對於飽和水分

流動的影響相當大(Beven and Germann,1982)。Watsen and Luxmoore(1986)的研究結果指出，直徑 0.1 cm 的大孔隙雖然僅佔土壤體積的 0.04%，在飽和滲透情形下有 73%的流速(flux)經過這些大孔隙。表層土壤之大孔隙中的水分優勢流(Preferential flow)，快速的往深層土壤滲透，使降雨時表層土壤並無飽和滲透的情形。於天然闊葉林土壤水分張力觀測結果，濕季期間深度 40 cm範圍內的土壤，因大孔隙率較高，滲透性佳，常呈現不飽和狀態，僅在降雨強度特別大的情況下形成短暫的現象(陳明杰、何正品，1996b)。

表 21. 張力滲透計與 Guelph 滲透計量測天然闊葉林不同土壤深度飽和水力傳導度結果之比較

土壤深度 (cm)	Tension infiltrometer*			Guelph permeameter		
	平均值 (cm sec ⁻¹)	變異係數 (%)	樣本數	平均值 (cm sec ⁻¹)	變異係數 (%)	樣本數
20	6.28×10 ⁻²	142	12	8.64×10 ⁻³	60	27
40	7.35×10 ⁻³	207	12	7.63×10 ⁻⁴	118	27

*資料來源：黃孺慧(2006)。CV：coefficient of variation。

表 22. 張力滲透計(Tension infiltrometer)與 Guelph 滲透計量測杉木人工林不同位置飽和水力傳導度結果之比較(Depth 20 cm)

試驗方法	K _s (m sec ⁻¹)		
	山頂	山腹	山谷
Tension infiltrometer*	1.02×10 ⁻³	1.38×10 ⁻³	2.88×10 ⁻³
Guelph permeameter	4.99×10 ⁻³	9.33×10 ⁻³	8.78×10 ⁻³

*資料來源：洪志遠(2007)

經由上述分析得知，不同的調查方式所求得的土壤水力傳導度均會有所不同，不論是 Guelph 滲透計、土壤質地推估法、地下水井試驗或採土罐定水頭法，彼此間的調查結果均略有差異。

四、與其它試區之比較

福山 1 號與扇平 4 號集水區均為天然闊葉林，分別位於台灣北部及南部。同樣以 Guelph 滲透計調查土深 20 cm 處之土壤水力傳導度，福山 1 號集水區平均為 1.1×10^{-3} cm/s，扇平 4 號集水區則為 3.0×10^{-3} cm/s(廖學誠等，2001)。相較於福山 1 號與扇平 4 號集水區，蓮華池 4 號(7.7×10^{-3} cm/s)及 5 號(8.5×10^{-3} cm/s)集水區土壤水力傳導度均明顯偏高。

以土壤質地觀之，福山 1 號集水區土壤剖面 A 層的粘粒、粉粒及砂粒百分比分別為 36.6%、33.8%及 29.6%(陳明杰、何學哲，2001)，扇平 4 號集水區分別為 14.0%、42.5%及 43.5%(林試所，1997b)，蓮華池 4 號及 5 號集水區則平均為 37.8%、27.6%及 34.6%(陳明杰、何正品，1996)。一般而言，粘粒含量越高則土壤水力傳導度越低(Cosby *et al.*, 1984；Poulsen *et al.*, 1999)，蓮華池集水區粘粒含量最高，但土壤水力傳導度卻也最高，此現象與 Cosby 等(1984)及 Poulsen 等(1999)研究結果不同。若以地形觀之，福山集水區平均坡度為 44%，扇平集水區為 59%，蓮華池集水區則為 42%。由於坡度陡峭易有崩塌發生，造成坡面土石鬆散，以致土壤水力傳導度有隨著坡度增加而增高之趨勢(廖學誠等，2001)。蓮華池集水區坡度最緩，但土壤水力傳導度卻最高，與上述研究結果不盡相符。蓮華池集水區土壤水力傳導度遠高於福山及扇平集水區，其原因可能與林地表層粗孔隙密佈有關。蔣先覺等(1994)指出，蓮華池試驗林表層土壤具有團粒構造，有極粗的樹根、細根系及細根孔，以及具有許多管狀不連續孔隙。這些管狀孔隙將有利於土壤水移動，增高水力傳導度(Buttle and House, 1997)。

五、對退水過程及溪流水化學之影響

杉木人工林 20 cm、40 cm 深之土壤水力傳導度平均分別為 7.7×10^{-3} cm/s、 5.3×10^{-4} cm/s；天然闊葉林 20 cm、40 cm 深之土壤水力傳導度平均分別為 8.6×10^{-3} cm/s、 7.6×10^{-4} cm/s，另鄭皆達等(2000)以單井回復試驗估算蓮華池 3 號深層之水力傳導度為 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/s 間，將前面的統計數據整理後，蓮華池地區土壤深度 20 cm 處之水力傳導度為 10^{-3} cm/s，40 cm 處 10^{-4} cm/s，其它更深層處則為 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/s，在分析逕流水文歷線之退水段時，20 cm 處之水力傳導度對地表退水段有影響，40 cm 處對中間退水段有影響，深層之水力傳導度對基底逕流退水段有關係。其流動

速度以地表段最快，中間逕流次之，基底逕流段最緩慢。

蓮華池溪流水中各化學離子濃度變化隨豐水期及枯水期有明顯之差異；國外研究發現 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 及 HCO_3^- 等離子濃度深受表層土壤水及深層地下水所影響 (Tsujimura et al., 2001)。而蓮華池地區於 2005 年週採樣的溪水化學分析結果也指出，在豐水期，溪水的主要來源為表層土壤水，水在土壤中留存時間較短，所以離子濃度偏低，加上大量雨水的進入產生稀釋作用，乃因雨水中此等離子較土壤水中濃度為低，使濃度更為下降。而在枯水期，河川流量主要來自深層地下水，這些水在土壤中留存時間較長，經風化、淋溶、滲漏作用後，使 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 及 HCO_3^- 呈現較高的濃度 (蕭泓泯，2006)

第五節 小結

一、應用 Guelph 滲透計實地調查後得知，杉木人工林土深 20 cm 及 40 cm 處之平均土壤水力傳導度分別為 $7.7 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 及 $5.3 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ；天然闊葉林則分別為 $8.6 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 及 $7.6 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。

二、經變異數分析後得知，20 年生杉木人工林與天然闊葉林集水區土壤水力傳導度並無顯著差異，山頂、山腹及山谷的土壤水力傳導度亦無顯著差異，但在 20 cm 及 40 cm 不同的土壤深度則有顯著差異。

三、不論是張力滲透計(Tension infiltrometer)、Guelph 滲透計、地下水井試驗或採土罐定水投法，各種不同方法之調查結果均略有差異，其主要原因除各方法間之差異外，林地土壤中之團粒孔隙結構之差異相當大，尤其是大孔隙之特性影響更是關鍵。

第五章 降雨特性與森林經營對退水過程之影響

第一節 前言

森林生態系的水文循環過程式了解生態系功能所必須的基本資料。以集水區為單位的監測水文、營養鹽能量收支，因其輸入與輸出較易確認，是許多生態系研究依循的方式。而森林在水資源的循環上扮演著極為重要的角色，降雨在到達地面之前會先遇到樹冠層的截留，部份經過地表的入滲、蒸發散，其餘的水分以地表逕流(Surface runoff)、中間逕流(Interflow)及地下水逕流(Baseflow)等形態流出，此過程地表逕流會受到植被、地表粗糙度等因素影響，而中間逕流(Interflow)及地下水逕流則受到地形、地質、土壤、面積等因素影響，待逕流量逐漸升高直至尖峰流量後，隨著雨勢的減弱流量會逐漸減退，即為逕流歷線中之退水階段。潘斯氏(Barnes)在 1939 年提出不同的逕流過程會有不同的退水情況，將退水過程分為表面逕流退水、中間逕流退水及基底逕流退水三個階段，三階段各有不同之退水係數(Recession constant)，即在相同之退水常數階段，可視為同一逕流型態。本單元蒐集蓮華池 4 號集水區降雨量與逕流量等資料，挑選出單獨降雨之相對逕流歷線，應用潘斯法對降雨停止後的退水曲線(Recession curve)做分析，了解天然闊葉林期間、皆伐作業與造林、疏伐作業等森林經營方式對於退水過程造成的影響。

第二節 研究方法

本單元蒐集林業試驗所蓮華池分所第 4 號試驗集水區於 1973 年至 2007 年間之雨量及流量資料，選取單獨降雨事件之相對流量紀錄進行分析。由於降雨過程變化多端，必須明確定義出一場單獨降雨事件，才能作為選取資料的標準，本文係指於此場降雨前五天內無降雨發生或降雨量在 5 mm 以下者為一場單獨降雨事件。4 號試驗集水區於 1978 年 11 月至翌年 3 月進行天然林皆伐作業，1981 年 3 月開始以杉木造林，1997 年 3 月則實施強度 50%之疏伐作業。

分析方法以潘斯(Barnes)法為主，應用在退水過程分析來探討森林經營對於退

水流量的影響。將退水過程各相對流量取對數為縱軸，經過時間為橫軸，連接各點可得到若干折線，此乃因在不同退水階段，具不同退水係數所致。如圖 13，退水歷線的第一個折點以 S 表示即當 $t = t_0 \sim t_1$ 時，為地表逕流(Surface flow)之退水，為 P~S 段，其退水係數為 Kr_1 ；當 $t = t_1 \sim t_2$ 時，及地中逕流(inter flow) 之退水，為 S~G 段，其退水係數為 Kr_2 ；當 $t > t_2$ 時，表示基底逕流(Baseflow)的退水，為 G~H 段，基底逕流退水係數為 Kr_3 。

由潘斯法，各段的退水過程以指數遞減的型態表示，即：

$$Q_t = Q_0 \cdot Kr^t$$

上式兩邊取對數後得

$$\ln Q_t = \ln Q_0 + t \cdot \ln Kr$$

上式， Q_t ：經過 t 日後之流量(mm/day)；

Q_0 ：起始流量(mm/day)；

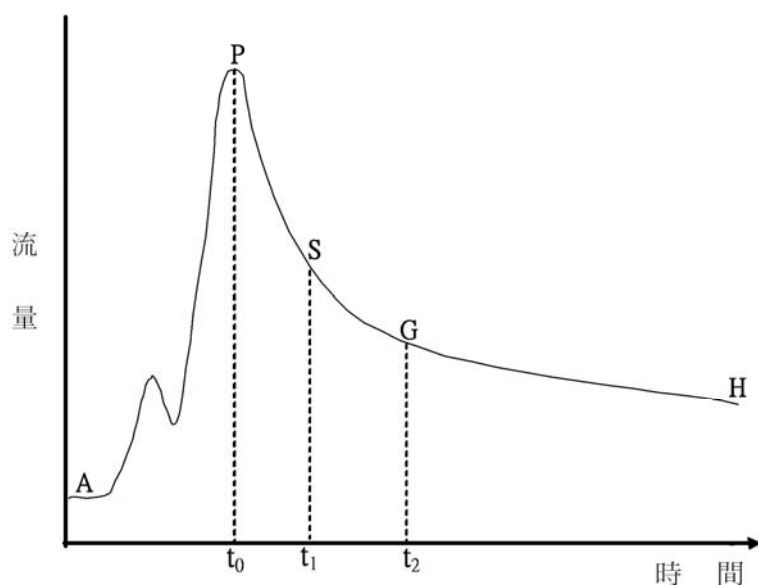
t：經過時間(day)

Kr：退水係數。

令 $\ln Q_t = Y$ ， $\ln Kr = a$ ， $\ln Q_0 = b$ ，則上式可以寫成

$$Y = a \cdot t + b$$

即將流量定義為一時間的函數式。



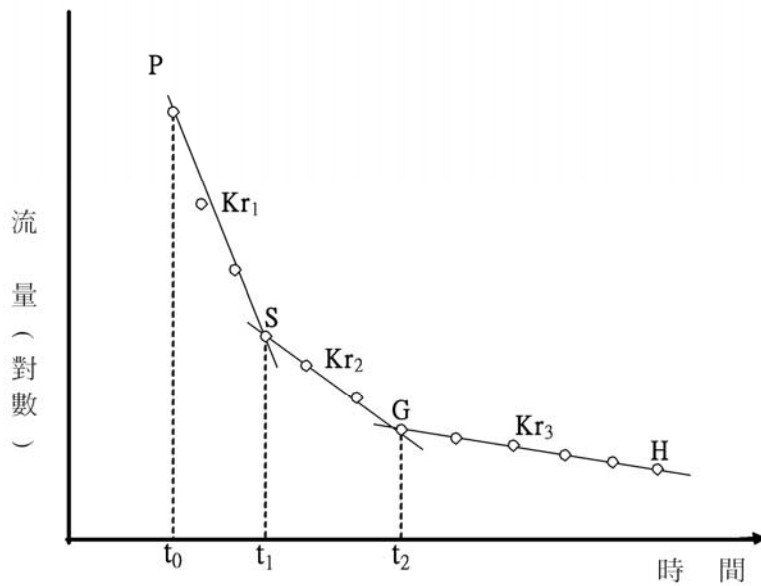


圖 13. 退水歷線之逕流分離

將退水過程之逕流量取對數與時間對應做圖，找出二個折點 S、G 及 t_1 、 t_2 值，即將退水歷線分為三個部份，再將各部份分別做迴歸分析，得到三個退水係數 Kr_1 、 Kr_2 、 Kr_3 。在 P~S 段中，尖峰流量為 Q_0 值，第一段退水歷線為 $Q_t = Q_0 \cdot Kr_1^t$ ，此歷線在 t 日(S 點)時終止。而第二段退水歷線為 S~G 段，自 t_1 開始 t_2 結束，此段的起始流量以 t_1 日之流量代替，即起始流量為 $Q_s = Q_0 \cdot Kr_1^{t_1}$ ，因此第二段退水歷線為 $Q_t = Q_s \cdot Kr_2^{(t-t_1)}$ 。

同理，當第二段退水歷線在 t_2 日(G 點)結束之時，也為第三段退水歷線開始之日，故第三段退水歷線之起始流量為 $Q_g = Q_s \cdot Kr_2^{(t_2-t_1)}$ ，而此段退水歷線的表示法為 $Q_t = Q_g \cdot Kr_3^{(t-t_2)}$ 。即：

1. 當 $t_1 < t_2$ 時

$$Q_t = Q_0 \cdot Kr_1^t$$

2. 當 $t_1 \leq t \leq t_2$ 時

$$Q_t = Q_s \cdot Kr_2^{(t-t_1)}$$

$$= Q_0 \cdot \mathbf{K}r_1^{t_1} \cdot \mathbf{K}r_2^{(t-t_1)}$$

3. $t_2 \leq t$ 時

$$\begin{aligned} Q_t &= Q_g \cdot \mathbf{K}r_3^{(t-t_2)} \\ &= Q_0 \cdot \mathbf{K}r_1^{t_1} \cdot \mathbf{K}r_2^{(t_2-t_1)} \cdot \mathbf{K}r_3^{(t-t_2)} \end{aligned}$$

Q_t ：尖峰流量後第 t 日之逕流量(mm/day)；

t_1 ：第一段退水結束之日(day)；

t_2 ：第二段退水結束之日(day)；

$\mathbf{K}r_1$ ：第一段退水係數；

$\mathbf{K}r_2$ ：第二段退水係數；

$\mathbf{K}r_3$ ：第三段退水係數；

Q_s ：第一個折點(S)時的流量(mm/day)；

Q_g ：第二個折點(G)時的流量(mm/day)。

由式可計算尖峰流量後第 t 日之逕流量，為比較計算值與觀測值的偏差，以下列公式計算二者之間的相對誤差平均值：

$$R = \left[\sum_{t=1}^N \frac{|Q_0(t) - Q_c(t)|}{Q_0(t)} \right] / N$$

上式

R ：相對誤差平均值；

N ：分析退水歷線的日數；

$Q_0(t)$ ：第 t 日之觀測逕流量(mm/day)；

$Q_c(t)$ ：第 t 日之觀測逕流量(mm/day)。

第三節 結果與討論

(一)降雨特性

圖 14 為蓮華池地區 1976 年至 2006 年間的年雨量變化，平均年雨量為 2316.5 mm，其中可以觀察出豐雨年與早年年雨量的差距在近年有增大的趨勢，是否與全球暖化有關，還要再做更深入的分析。表 23 顯示，蓮華池每年降雨日數平均為 132 天，本區乾、濕季分明，雨量集中在 5-8 月份，佔平均年雨量的 71.4%，這四個月的月平均雨量 413.3 mm。1976-2006 年間降雨日數共 4086 天，而日雨量大於 50 mm 的大雨日數只有 301 天，僅佔總下雨日數的 7.4%，顯示本區主要的降雨類型為日雨量小於 50 mm 的小雨。

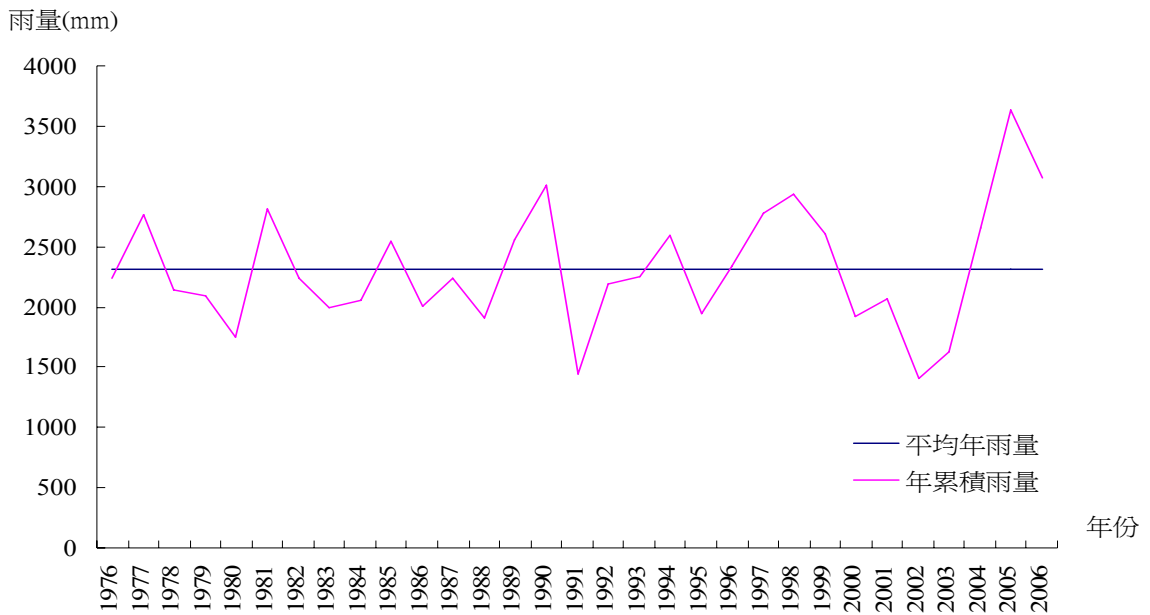


表 23. 蓮華池地區的降雨特性 (1976-2006)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	總和
降雨量(mm)	52.6	85.7	116.2	161.4	365.7	450.7	391.8	444.8	157.7	30.5	26.9	32.5	2316.5
(%)	2.3%	3.7%	5.0%	7.0%	15.8%	19.5%	16.9%	19.2%	6.8%	1.3%	1.2%	1.4%	100.0%
降雨天數	7	9	11	12	16	19	16	18	12	4	5	5	132
(%)	5.6%	6.5%	8.3%	8.8%	12.0%	14.2%	11.8%	13.8%	8.8%	2.9%	3.5%	3.9%	100.0%
降雨量大於 50 mm 天數	0	0	0	1	2	2	2	2	1	0	0	0	10

圖 14. 蓮華池地區歷年降雨量與年平均雨量

在降雨的分析中，每一降雨事件定義為至少間隔 6 小時無雨，始為另一降雨事件。表 24 顯示由 1980 年至 1999 年蓮華池地區共有 1765 場降雨事件，其中降雨量超過 10 mm 的降雨總共達 688 次，10 至 19 mm 的降雨佔了 36.8%，小於 50 mm 的降雨佔 80%。而大於 100 mm 之降雨次數為 39 場，大約每兩年就有 2.7 場。與福山地區降雨型態比較(夏禹九，1999)，表 24 顯示在降雨量小於 200 mm 時，蓮華池地區單位時間的平均降雨強度隨著降雨量的增加而增強，而福山地區其單位時間平均降雨強度卻沒有隨降雨量變大而增加，主要因為福山受東北季風的影響，在冬季時有相當多的降雨事件屬於降雨延時很長的綿綿細雨，而蓮華池則無此特性，降雨主要以降雨延時短卻集中的鋒面型與夏季對流雨等型式，使的蓮華池的平均降雨強度要大於福山地區。



表 24. 蓮華池與福山試驗林的降雨特性之比較 (1980-1999)

總降雨量 (mm)	降雨次數		半小時降雨強度, mm		每小時降雨強度, mm		(%)	
	蓮華池	福山	蓮華池	福山	蓮華池	福山	蓮華池	福山
<10	1077							
10- 20	253	102	6.3(1-14.8)	4.0(0.5-18.0)	8.2(2-18.5)	5.0(1.0-18.5)	36.8	30.8
20- 30	136	60	10.8(2.5-25.2)	9.0(1.0-26.0)	13.7(3-28.5)	11.5(1.5-28.5)	19.8	18.1
30- 50	161	75	14.1(2.9- 45.0)	10.0(1.0-36.0)	19.6(2.9- 41.4)	13.0(2.0-44.5)	23.4	22.7
50- 100	99	45	18.3(3-37.5)	12.0(1.5-46.0)	27.5(5-73.5)	18.0(2.5-62.5)	14.4	13.6
100- 200	29	29	23.3(0.6-58.7)	10.5(2.5-46.5)	34.3(1.4-77.0)	16(4.0-81.5)	4.2	8.8
>200	10	20	35.0(14.4- 53.3)	24.0(5.5-53.5)	58.3(17.3-89.8)	39(10.0-86.0)	1.5	6.0

*蓮華池 1981、1984、1985、1988、1989、1996 年等資料未納入統計。福山資料(1992-1997 年)

(二)森林經營各時期對退水曲線之影響

在水文理論基礎中，一條完整的退水曲線在半對數紙上大致可以分為三個直線段，第一段是代表地表逕流之退水曲線，第二段是中間逕流之退水曲線，第三段是基底逕流退水曲線，三段退水曲線的斜率都不同，分別是地表逕流 > 中間逕流 > 基底逕流；而地表逕流的遞減速率明顯較為急速，表現出降雨過後逕流歷線之洪峰流量會急速退減之現象；基流減水狀況較為緩和，會影響枯水時期之流量狀況。

另根據第四章有關土壤水力傳導度之調查分析結果；杉木人工林的土壤水力傳導度，在土壤深度 20 cm 處所量測的結果，不論是在集水區之山頂、山腹及山谷均大於土壤深度 40 cm 處，20 cm 處量測者可表示 20 cm 以上土壤表層的水力傳導度，40 cm 處則表示土壤較深層的水力傳導度。水力傳導度越大表示水分在土壤流動速度越快速。因此，在退水曲線中代表地表逕流的遞減速呈現比較快速的狀態，而表示中間逕流退水曲線之遞減速率，則相對比較緩和。

如表 25 由蓮華池 4 號試驗集水區之水文資料紀錄中選取 1976 年起至 2007 年間之水文事件，作為分析之樣本。由相關研究指出，蓮華池試驗集水區之損失雨量為 15~17 mm(陳明杰, 1987)，故資料選取時，以降雨量大於 15 mm 之事件為基準。另外降雨量 5 mm 以下對於相對逕流量無明顯增加者，則在退水歷線分析過程視為無效事件。

表 25. 4 號集水區選取降雨事件及其各階段退水曲線係數

天然林時期

年度	日期	t ₁ (day)	t ₂ (day)	kr ₁	R1	kr ₂	R2	kr ₃	R3	降雨量(mm)
1976	7.4~7.30	4	15	0.5394	0.11958	0.7946	0.44989	0.9270	0.17373	441.0
	5.29~6.10	2	6	0.6681	0.05523	0.6335	0.15634	0.8565	0.06333	64.0
1977	8.23~9.21	3	11	0.4926	0.52044	0.8504	0.18631	0.9428	0.34972	230.0
	7.7~7.24	2	8	0.3556	0.00005	0.8544	0.26738	0.9384	0.23778	28.0
1978	8.1~8.20	2	9	0.3839	0.12289	0.8455	0.22309	0.9102	0.34898	283.0
	8.29~9.10	1	7	0.5784	0.00004	0.8612	0.19411	0.9957	0.05743	54.0
	9.12~9.29	1	7	0.5835	0.00005	0.8103	0.03415	0.9951	0.02593	67.5

皆伐時期

年度	日期	t ₁ (day)	t ₂ (day)	kr ₁	R1	kr ₂	R2	kr ₃	R3	降雨量(mm)
1979	6.13~6.25	3	7	0.6839	0.06765	0.8100	0.07908	0.9268	0.05134	87.5
1980	8.28~10.23	2	10	0.2106	0.86228	0.8405	0.23260	0.9627	0.56205	388.0

1982	5.6~5.27	2	6	0.4602	0.13368	0.7208	0.17001	0.8973	0.12954	143.0
造林時期										
年度	日期	t ₁ (day)	t ₂ (day)	kr ₁	R1	kr ₂	R2	kr ₃	R3	降雨量(mm)
1983	4.10~5.8	9	17	0.7687	0.12065	0.9102	0.04484	0.9772	0.20902	73.0
1986	3.29~5.9	1	10	0.7003	0.00003	0.8498	0.03704	0.9731	0.02343	33.0
	7.18~8.5	1	8	0.7358	0.00005	0.9063	0.07380	0.9758	0.03888	61.0
	8.7~8.19	1	5	0.4598	0.00001	0.8825	0.09731	0.9294	0.12155	91.0
1987	4.14~5.3	2	9	0.6304	0.06399	0.7714	0.19417	0.9862	0.26148	43.0
	5.4~5.16	1	7	0.5009	0.00003	0.7999	0.23570	0.9559	0.20712	76.0
	7.27~8.21	3	13	0.4753	0.13897	0.8624	0.21731	0.9453	0.16489	192.0
1990	4.24~5.9	1	6	0.3848	0.00003	0.7323	0.21673	0.8344	0.17247	115.0
	9.8~10.8	2	10	0.7284	0.06140	0.7876	0.12816	0.9608	0.18430	76.5
1992	4.22~5.1	1	4	0.5383	0.00003	0.7944	0.05353	0.9558	0.04353	86.0
	9.23~10.14	1	8	0.5893	0.00002	0.8052	0.10451	0.9533	0.03338	92.5
1993	8.16~8.26	1	4	0.4809	0.02714	0.7486	0.08744	0.9901	0.01758	124.5
	5.5~5.13	1	4	0.3175	0.00005	0.6527	0.12304	0.8681	0.03784	137.5
1994	9.1~9.15	2	11	0.2750	0.24106	0.7687	0.25068	0.9671	0.32145	221.5
	8.10~8.26	3	10	0.5705	0.02959	0.8742	0.12276	0.9391	0.30597	631.0
疏伐時期										
年度	日期	t ₁ (day)	t ₂ (day)	kr ₁	R1	kr ₂	R2	kr ₃	R3	降雨量(mm)
1997	7.18~8.5	3	10	0.5813	0.11632	0.7967	0.08252	0.9175	0.06948	150.5
1998	9.9~9.27	4	12	0.6077	0.09978	0.8512	0.06432	0.9681	0.07911	61.5
	10.26~11.11	2	10	0.8066	0.02936	0.9204	0.02191	0.9506	0.04809	47.5
2006	9.14~10.17	2	16	0.7094	0.04411	0.8821	0.27216	0.9498	0.22076	67.5
	7.15~8.22	2	8	0.4591	0.15723	0.7269	0.06318	0.9299	0.55831	360.0
2007	7.5~7.23	2	6	0.5727	0.09788	0.7622	0.08703	0.9185	0.14335	173.0
	10.7~10.24	1	6	0.1635	0.00005	0.6954	0.31864	0.8936	0.22339	311.0

退水係數代表逕流遞減的狀況，若退水係數值越大，則表示退水的情況較為平緩，即流量較穩定；反之，退水常數值越小退水的情況較為快速。如表 26 及圖 15~圖 17，三段退水係數在四個時期中，**Kr₂** 與 **Kr₃** 在天然林時期、造林時期為較高，而皆伐時期、疏伐時期則較低的趨勢，顯示皆伐與疏伐作業皆會使三段退水趨勢均變快速。但 **Kr₁** 在 1997 年疏伐作業後不降反升，推測原因是由疏伐作業後，將砍除的木材與枝葉皆留存於現場，而阻擋了地表逕流的流通，使地表粗糙度增加

而導致 Kr_1 升高。另外 Kr_1 之標準差相較於 Kr_2 、 Kr_3 最大，且在皆伐時期、疏伐時期 Kr_1 標準差皆較天然林時期、造林時期高，顯示 Kr_1 為地表逕流之退水係數，在地質、地形與土壤不變的情況下，受到降雨條件與地表植被狀況的影響也最大。 t_1 為第一段退水結束之日，表 26 顯示四個時期之 t_1 差別不大，以皆伐與疏伐時期較長些，將 t_1 與降雨量做迴歸分析，得到顯著值為 0.026，即 t_1 與降雨量有顯著的相關，故影響 t_1 長短之因素不僅地表植被狀況，降雨量大小也會影響，而 t_2 與降雨量之迴歸分析顯著值為 0.34，則與雨量相關性低。另外，受到記錄器精度、記錄間隔時間之影響退水歷線變化會呈現不穩定現象，因此在決定 S 與 G 時會較為困難(陳明杰等，1993)，也影響了 t_1 與 t_2 的時間。表 27 顯示 Kr_1 與該場次的降雨量有顯著關係，短時間的降雨量影響地表逕流大於地中逕流、基底逕流，且降雨量越大地表逕流退水的速度也越快。但若將降雨時間拉長為降雨季節的總雨量，則變為 Kr_3 與總雨量有顯著關係，顯示基底逕流受長時間的降雨量影響較大，季節的總雨量越大則基底逕流退水的速度會越快。

表 26. 4 號集水區森林經營各時期之退水曲線係數統計

	t_1		t_2		Kr_1		Kr_2		Kr_3	
	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
天然林時期	2.1	1.1	9.0	3.1	0.515	0.112	0.807	0.080	0.938	0.049
皆伐時期	2.3	0.6	7.7	2.1	0.452	0.237	0.791	0.062	0.929	0.033
造林時期	2.1	2.0	8.5	3.6	0.546	0.147	0.809	0.071	0.946	0.042
疏伐時期	2.2	1.0	9.7	3.9	0.553	0.2255	0.806	0.091	0.9351	0.027

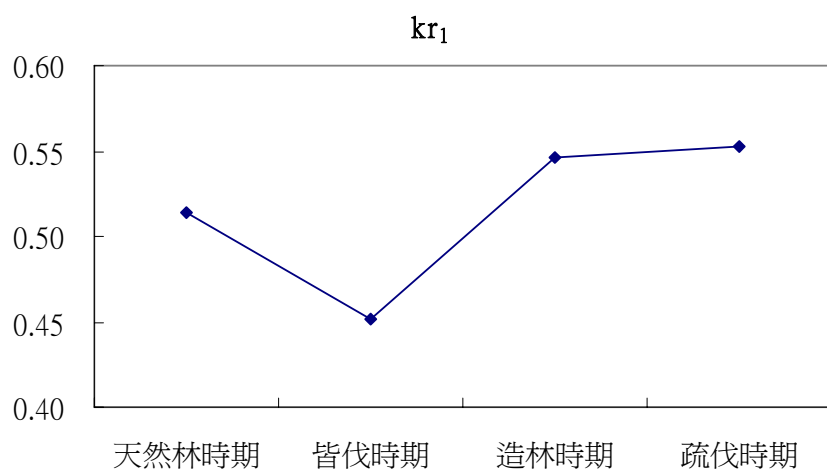


圖 15. 4 號集水區森林經營各時期之 Kr_1 平均值

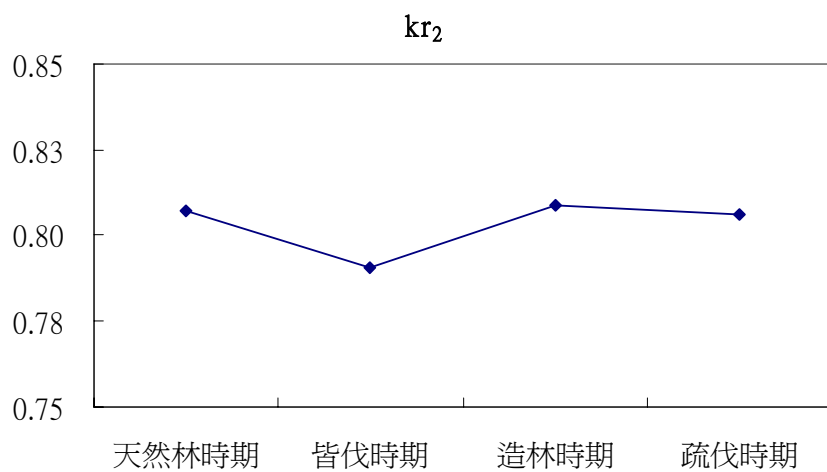


圖 16. 4 號集水區森林經營各時期之 Kr_2 平均值

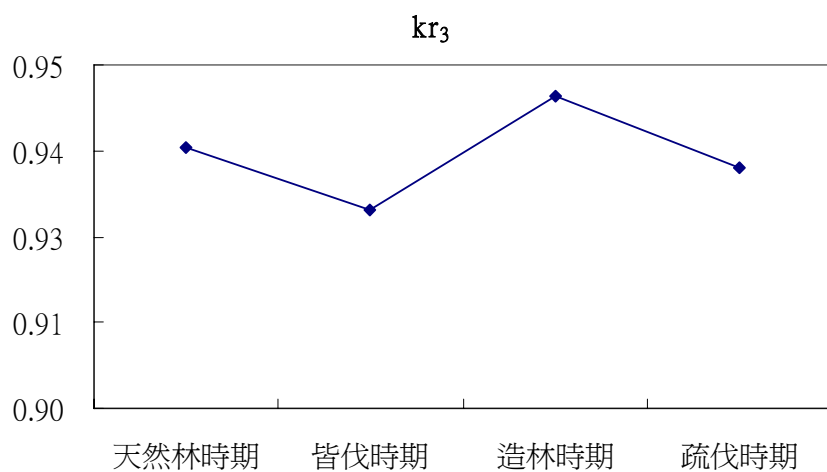


圖 17. 4 號集水區森林經營各時期之 Kr_3 平均值

表 27. 各退水階段之退水係數 Kr 值與降雨之關係

	與該場次降雨量顯著值	與該年 3~10 月總雨量顯著值
Kr_1	0.013*	0.97
Kr_2	0.7	0.21
Kr_3	0.3	0.033*

(二)選取水文資料之時間尺度適當性之探討

在統計分析相關水文資料時，所採取的時間尺度有所不同，其中郭芯穎(2003)是根據陳明杰(1987)研究中指出，蓮華池 4 號集水區之集流時間約為 20~40 min.；因而選擇接近集流時間的小時水文資料來進行分析。李肇文及本論文則選取日流量來統計。

李肇文(1993)曾針對森林試驗集水區退水歷線進行研究，試驗地以蓮華池地區 3、4、5 號試驗集水區及畢祿溪 11、12 號試驗集水區為對象，蒐集民國 64 至 74 年間日降雨量與日逕流量資料，分離出各場單場降雨之相對逕流量歷線，以 Barnes 法為基礎，利用最小平方法，求出洪峰流量發生之後的退水曲線之各項退水係數值。郭芯穎計算 4 號集水區退水係數之方式亦與李肇文研究方法相同，唯一不同的是所擷取的水文資料時間尺度不同，資料來源為 1990~1994 年間小時降雨量與小時流量，而本論文統計分析之資料，則是 1976~2007 年之日降雨量與逕流量，期藉由比較本論文、郭芯穎與李肇文研究所得退水係數結果(表 28)，討論選取水文資料之時間尺度對於退水係數之影響及其適當性。另外比較本論文與李肇文，顯示本論文所得之各退水係數皆要比李肇文所得為低，推測可能與近年降雨特性改變有關係，降雨強度增大，使退水速度加快，將更不利於林地水源的涵養。

降雨發生而反應的流量變化，若以日雨量與其對應之日流量為研究資料，會因資料本身被平均化，而使其反應會較為不敏銳。又降雨後所產生流量之反應時間受到集水區的集流時間所影響，若集水區面積縮小，集流時間亦相對縮短，如果採取時間尺度過大之流量資料，則繪出的逕流曲線較為平緩，無法適當反映出單場降雨造成之流量歷線的實際變化情況，因此以流量對數計算的退水係數值會較高。而對照表 28 三者之研究結果的數據差異，確實可以看出李肇文及本論文統計所得之退水係數值皆比郭芯穎所得之數值高。

由上述之比較結果得知，在探討降雨與逕流相關性分析之研究時，所選取的水文資料時間尺度需考量集水區面積之大小，應採取與集流時間同尺度之水文資料時間，才可適當的反應研究試驗地的實際水文狀況，所求得的水文特性結果才會與實際狀況較為符合。

表 28 不同期間水文資料及時間尺度對退水係數之比較

退水係數	本論文	李肇文(1993)	郭芯穎(2003)
Kr₁	0.516	0.668	0.118
Kr₂	0.803	0.859	0.552
Kr₃	0.937	0.953	0.668

*本論文與李肇文(1993)資料選取以日為單位，郭芯穎(2003)則以小時為單位。

第四節 小結

- (一) 蓮華池地區豐雨年與早年年雨量的差距在近年有增大的趨勢，本區乾、濕季分明，雨量集中在 4~9 月份，佔平均年雨量的 85%，
- (二) 蓮華池地區單位時間的平均降雨強度隨著降雨量的增加而增強，降雨主要以降雨延時短卻集中的鋒面型與夏季對流雨等型式，使得蓮華池的平均降雨強度要大於福山地區。
- (三) 皆伐與疏伐作業皆會使地中逕流與基底逕流之退水速度變快。地表逕流在皆伐時期、疏伐時期受到降雨條件與地表植被狀況的影響較大，若疏伐作業使地面的粗糙度增加，則將阻擋地表逕流使退水速度變慢。
- (四) 短時間的降雨量影響地表逕流大於地中逕流、基底逕流；基底逕流則受季節的總雨量影響較大。
- (五) 本論文所得之各退水係數皆要比李肇文所得為低，推測可能與近年降雨特性改變有關係，降雨強度增大，使退水速度加快，將更不利於林地水源的涵養。
- (六) 探討降雨與逕流相關性分析之研究時，所選取的水文資料時間尺度需考量集水區面積之大小，應採取與集流時間同尺度之水文資料時間，才可適當的反應研究試驗地的實際水文狀況，所求得的水文特性結果才會與實際狀況較為符合。



第六章 集水區溪流水化學之特性

在水資源的經營管理上，溪流水量的多寡固然重要，但溪流水化學的特質更是關鍵。以往水文學的研究大都著重於量的探討，因為攸關水利工程的安全設計，晚近溪流水化學的研究則快速發展，益加受到各方的重視，溪流水化學於低流量時特性，於梅雨及午後雷陣雨時變化，甚至颱風強勢降雨時變動，對水資源經營管理及土石流災害防制亦極為重要。本章主要目的即是在探討蓮華池試驗林溪流水化學特性，並比較蓮華池 4、5 號集水區溪流水的水化學，在颱風暴雨、夏季暴

雨期及非暴雨期之差異。

第一節 前言

蓮華池溪流水化學相關研究僅曾見於金恒鏞等(1984)，當時重點在了解不同暴雨時溪水懸浮質及水文—養分濃度關係。唯蓮華池溪流在基流期與颱風極端暴雨期及不同林相溪水化學研究相對缺乏。王立志等曾於北部福山森林集水區長期觀測溪流水化學變化，顯示福山溪流受冬季東北季風影響，另受夏季午後對流雨及颱風極端降雨影響，溪水化學變化不一(Wang, 1994; Wang, *et al.*, 1997; 王立志等, 1998、1999)。蓮華池集水區位於台灣中部，冬季不受東北季風影響，是明顯乾旱時期，初夏受梅雨季影響，且夏季易受午後對流雨及颱風極端降雨影響，溪流水化學變化可能不同於福山。且蓮華池 4 號集水區曾經過森林砍伐並改種為杉木人工林超過 30 年，而蓮華池 5 號集水區則一直維持天然闊葉林覆蓋。為進一步比較人工林與天然林集水區於基流時期，午後雷雨及颱風極端暴雨期間水化學變化，本研究則透過 2001 年採樣的溪水化學資料及近十年來影響本地區最大的桃芝颱風期間溪水採樣資料來分析，以比較不同林相間在不同基流期與暴雨期間水化學的異同。地震、颱風及土石流為生態系中大型干擾因子，本章也比較分析颱風期間，蓮華池、福山及溪頭等森林集水受到大型干擾因子後之反應。

第二節 研究方法

溪流水水樣之採取方式分為兩種：平時每週一次分別在 4、5 號兩集水區量水堰上方之天然河段中，用掬瓢法 (scoop sampling) 進行採樣。另外，在颱風暴雨時之採樣方式是以 ISCO-3700 溪水自動取樣機採定時取樣方式進行。桃芝颱風期間，兩集水區最小取樣間隔前 24 瓶為 30 分鐘，後改為 45 分鐘，希望取樣能涵蓋整個颱風事件。取得之水樣則裝入 500ml 塑膠瓶內，所取得之水樣並於 24 小時內進行 4°C 冷藏，再送至台北林業試驗所水化學實驗室進行化學分析，運送過程不超過 6 小時。

水質分析項目包括電導度、懸浮質、pH 值、陽離子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、

NH_4^+)及陰離子(F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 HCO_3^-)等，分析方法依照 APHA(American Public Health Association, 1995)標準方法，流程如下：

- (一)水樣與室溫平衡後，以電極量測電導度及 pH 值。
- (二)取水樣 100 cc 用 $0.45\mu\text{m}$ 濾紙(GN-6)過濾，並將濾紙烘乾測出懸浮質。
- (三)過濾水樣以 DX-100 離子層析儀(Dionex, USA)分析陰陽離子含量。
- (四)利用 $0.01\text{M H}_2\text{SO}_4$ 滴定水樣，以 pH 4.5 為滴定終點，測出 HCO_3^- 含量。

第三節 結果與討論

基流期與暴雨期溪水化學的比較

2001 年的桃芝颱風 (Typhoon Toraji, 07/30~07/31)為近十年來影響蓮華池地區最大的颱風，於 19 hrs 內降下 390 mm 的雨，此強勢降水對溪水化學及輸出必產生重大影響。颱風期間，每小時最大降雨強度為 103 mm，5 小時最大雨量為 297 mm，蓮華池 4 號與 5 號駢對集水區最大洪峰量各為 1533 l/sec (5.86ha)及 1976 l/sec (8.39ha)。關於桃芝颱風期間的相關資訊可以參考黃正良等(2003)的論文。

福山暴雨時期的研究指出，離子濃度與流量可分三種形式：(1)離子濃度隨流量增加而減少，(2) 離子濃度隨流量增加而上升，(3)離子濃度與流量無密切相關 (王立志等，1998、1999)。Salmon 等人(2001)曾在智利西南部 Chiloé 國家公園內未經人為干擾的小森林集水區 (1.2ha, 650~700 m)以隔週採樣的方式也提出相似的結果，該研究以修改後的雙曲線稀釋公式將離子濃度與流量的關係分成三類：(1)稀釋作用(Dilution)，(2)水文增加作用 (Enhanced Hydrologic Access)，(3)水文不變作用(Hydrologically Constant) (Salmon et al., 2001)。蓮華池溪水在桃芝颱風期間，依上述方法分析後，各項離子濃度與流量間的三種關係如下：(1)稀釋作用---電導度、pH、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- ，(2) 水文增加作用--- NO_3^- ，(3) 水文不變--- NH_4^+ (黃正良等，2003)。較之於暴雨期的濃度流量關係，在基流期各項離子的最大值一般也比暴雨期的最大值高，僅 NO_3^- 例外 (表 29、表 30)。

表 29. 杉木人工林在基流期與暴雨期的溪水水化學比較

項目	基流期			暴雨期(桃芝颱風)			
	最大值	最小值	中值	最大值	最小值	中值	平均值
電導度($\mu\text{S/cm}$)	197.4	55.1	157.5	138.9	21.2	36.3	59.2
懸浮值 mg/L	11.0	--	6.3	1450.0	--	51.0	213.3
pH	8.12	7.34	7.94	9.18	5.06	7.0	6.79
Na ⁺	5.39	1.87	3.85	3.79	0.31	1.43	1.77
K ⁺	3.24	0.55	0.62	2.00	0.55	0.91	0.93
Ca ²⁺	18.92	3.24	14.03	13.01	0.67	1.33	4.21
Mg ²⁺	8.47	1.94	5.58	5.35	0.52	1.21	2.11
NH ₄ ⁺	0.02	--	--	--	--	--	--
Cl ⁻	1.81	1.00	1.10	1.21	0.55	0.87	0.90
NO ₃ ⁻	6.37	6.54	3.25	12.21	0.58	7.19	6.19
SO ₄ ²⁻	19.39	3.62	12.72	8.72	1.09	2.52	3.43
HCO ₃ ⁻	106.61	20.01	67.93	70.76	2.07	9.23	21.97

*陰陽子濃度單位均為 ppm

表 30. 天然闊葉林在基流期與暴雨期的溪水水化學比較

項目	基流期			暴雨期(桃芝颱風)			
	最大值	最小值	中值	最大值	最小值	中值	平均值
電導度(μ S/cm)	67.5	25.8	38.3	43.10	20.80	32.8	33.8
懸浮值 mg/L	24.0	0.0	8.5	2131.0	5.0	20.0	123.4
pH	7.62	6.06	7.08	7.13	4.42	5.96	5.87
Na ⁺	2.25	1.55	1.91	2.01	0.29	1.19	1.11
K ⁺	2.06	0.37	0.76	1.81	0.33	0.88	0.96
Ca ²⁺	2.64	0.67	1.28	1.51	0.38	0.94	0.93
Mg ²⁺	1.94	0.93	1.54	2.02	0.69	1.32	1.26
NH ₄ ⁺	1.63	0.94	1.10	0.09	--	--	--
Cl ⁻	1.63	0.94	1.10	1.26	0.33	1.02	0.96
NO ₃ ⁻	11.14	0.53	1.88	12.67	0.86	10.39	8.46
SO ₄ ²⁻	12.24	2.24	2.81	3.13	1.10	1.53	1.75
HCO ₃ ⁻	0.16	0.00	0.00	12.36	--	2.89	4.84

*陰陽子濃度單位均為 ppm

國外研究發現 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻及 HCO₃⁻等離子濃度深受表層土壤水及深層地下水所影響 (Tsujiura et al., 2001)。而蓮華池地區於 2005 年每週採樣的溪水化學分析結果也指出，在高流量時期，溪水的主要來源為表層土壤水，水在土壤中留存時間較短，所以離子濃度偏低，加上大量雨水的進入產生稀釋作用，乃因雨水中此等離子較土壤水中濃度為低，使濃度更為下降。而在枯水期，河川流量主要來自深層地下水，這些水在土壤中留存時間較長，經風化、淋溶、滲漏作用後，使 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻及 HCO₃⁻呈現較高的濃度 (蕭泓泯, 2006)。NO₃⁻濃度在本研究中亦隨著流量增加而升高，金恆鏞等在二十多年前蓮華池暴雨期亦呈相同現象 (金恆鏞等, 1984)，此一特徵也普遍見於北部的福山、南部的六龜等試驗林 (王立志等, 1998、1999；廖學誠, 2004)，這是由於土壤中的 NO₃⁻易於流動及淋溶，隨著近地表水流入河川中，故其離子濃度隨流量增加而上升 (Ohru and Mitchell, 1996, 1997)。一般而言，溪水裡的 Cl⁻幾乎不隨流量改變，同時亦幾

乎不隨季節性升降。但蓮華池在桃芝颱風期間，CI 呈現稀釋現象，這可能為暴雨期間，大量雨水 CI 的輸入會改變溪水的變化，但也未必固定呈何種形式，如福山葛樂禮颱風 CI 濃度隨溪水增加而上升，賀伯颱風期間則呈稀釋作用（王立志等，1998、1999）。

地震、颱風及土石流為生態系中不尋常之大型干擾因子（Foster and Boose, 1995；Everham and Brokaw, 1996；Foster *et al.*, 1998），可能造成生態系條件完全改變（Foster *et al.*, 1998）。比較颱風期間，蓮華池、福山及溪頭等森林集水區水化學反應，可顯示出雖各集水區地質、地形與土壤條件不一，森林集水區之水質與水量均因颱風影響而發生劇大改變，三處森林集水區水主要差異顯示於懸浮質最大濃度不同（如表 31 所列：1996 年賀伯颱風期間，福山 1 號為 180 ppm；福山 2 號為 190 ppm（王立志等，1999）；2001 年桃芝颱風期間，蓮華池 4 號為 1450 ppm；蓮華池 5 號為 2130 ppm，顯示 921 地震後，桃芝颱風雖於蓮華池地區降下極端降雨，因森林覆蓋的保護，尚未引起土石流災害（黃正良等，2007 及本研究）；2005 年泰利颱風期間，蓮華池 4 號為 150 ppm；蓮華池 5 號為 20 ppm；（Tsai *et al.*, 2009）。此次泰利颱風於蓮華池地區降雨強度較低，加上森林覆蓋緩衝，溪流最大懸浮質濃度明顯降低，且明顯低於同期間，溪頭神木溪(9140ppm)及巨石溪(270 ppm)表現。（王立志等，2010）。僅受颱風影響之原始森林覆蓋的福山溪流懸浮質最大濃度高於非颱風時濃度，可能因流量增高因坡面及河道沖蝕所致；受地震及颱風雙重影響之蓮華池溪流懸浮質最大濃度高於非颱風時濃度，且可高於福山溪流約 10 倍；然 2005 年泰利颱風期間，蓮華池集水區因日降雨(120 mm/24hr)及最大時雨強度(32 mm/hr)較低，可能致使蓮華池 4 號溪流降為 150 ppm；蓮華池 5 號溪流降為 20 ppm（Tsai *et al.*, 2009）。而受地震，桃芝土石流及颱風強勢降水(日降雨 355mm/24hr，最大時雨強度 43.5mm/hr)等三重影響之溪頭神木溪懸浮質最大濃度更遠高於非颱風時濃度，且可高於福山溪流約 100 倍，差異極大。蓮華池集水區雖受地震嚴重影響，亦受桃芝颱風強勢降雨衝擊，並未發生土石流災害，集水區森林覆蓋維持完整可能為重要緩衝機制，而濱岸森林維持完整則可能提供另一緩衝機制。王立志等(2010)曾建議，受土石流災害衝擊(如溪頭神木溪)之中部溪流復育規劃，以迅速恢復濱岸植群、增加河道粗糙與過濾機制，可達成水質保護之

功效。本蓮華池研究結果亦顯示。維持集水區完整森林覆蓋及維持完整濱岸森林，則可能提供緩衝土砂傳輸重要機制，並有助於源頭溪流生態多樣性的維持與增進。

表 31. 台灣地區不同森林集水區颱風期間溪流最大懸浮質濃度比較

集水區	懸浮質最大時雨日降雨量(mm)	懸浮質 (ppm)	影響因子
蓮華池 4 號	390 mm/19hr	1450	921 地震、桃芝颱風
蓮華池 5 號	390 mm/19hr	1230	921 地震、桃芝颱風
蓮華池* 4 號	120 mm/24hr	150	921 地震、桃芝颱風、泰利颱風
蓮華池* 5 號	120 mm/24hr	20	922 地震、桃芝颱風、泰利颱風
溪頭** 神木溪	355 mm/24hr	9140	921 地震、桃芝颱風、泰利颱風、土石流
溪頭** 巨石溪	355 mm/24hr	270	921 地震、桃芝颱風、泰利颱風
福山*** 1 號	625 mm/24hr	180	賀伯颱風
福山*** 2 號	625 mm/24hr	190	賀伯颱風

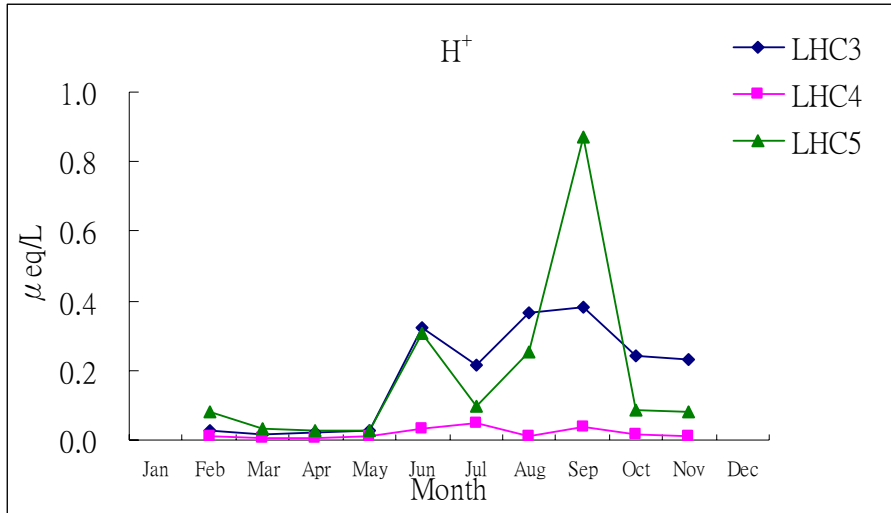
*依 Tsai *et al.*, 2009；**依王立志等，2010；***依王立志等，1999。

五、溪水化學季節性變化

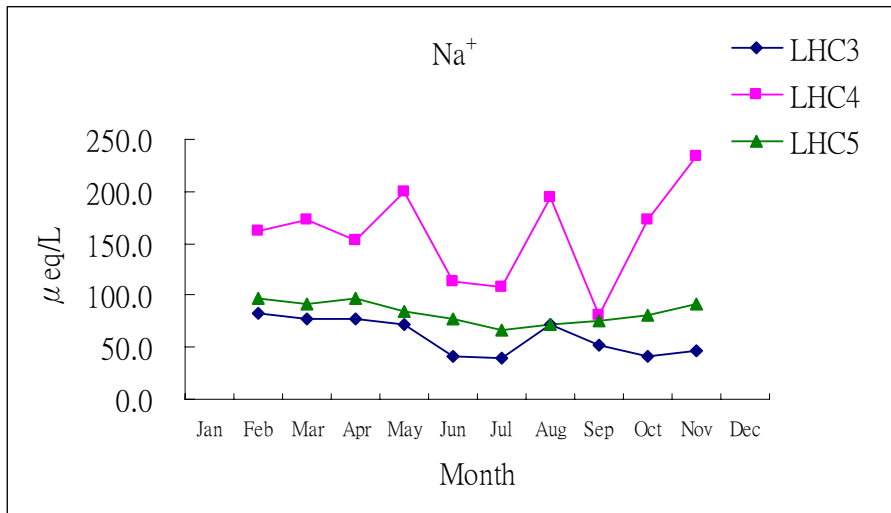
由於蓮華池乾溼季分明，雨季時間為 3-9 月，雨季降雨佔全年總降雨量約九成 (Lu *et al.*, 2000)，所以本研究所採樣的月份從 2~11 月應足以顯示主要的季節差異，從 3 號、4 號、5 號 3 個集水區溪水化學的 10 個月濃度來看，人工林 H⁺離子濃度較天然林低，與溪水中主要的致鹼性離子 Ca²⁺、Mg²⁺濃度偏高有關。在雨量較多的月份尤其是在颱風或豪雨後，大量的雨水來不及入滲到地面下，直接進入河道，溪水因為較酸的雨水輸入而使得 H⁺濃度上升，此現象在其他的研究中如福山、蓮華池也有同樣的現象 (王立志等，1997、1998；蕭泓泯，2006)。國外的研究也曾指出大量的降水除了將雨水中 H⁺直接輸入溪流中，同時也會使水份增加與地表枯枝落葉層接觸的機會，讓土壤表層中的腐植酸會隨地表逕流進入河川，造成溪水水中的 H⁺濃度上升 (Salmon, *et al.*, 2001)

鹽基陽離子的 Na⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺在天然林的月變化較人工林為小(圖 18-b、18-c 和 18-e)，表示在相同的降雨條件下，天然林溪水化學濃度變化較易不受到擾動。這三種離子主要來源是風化作用，因此在大量雨水進入溪流水中就會有稀釋的現象。

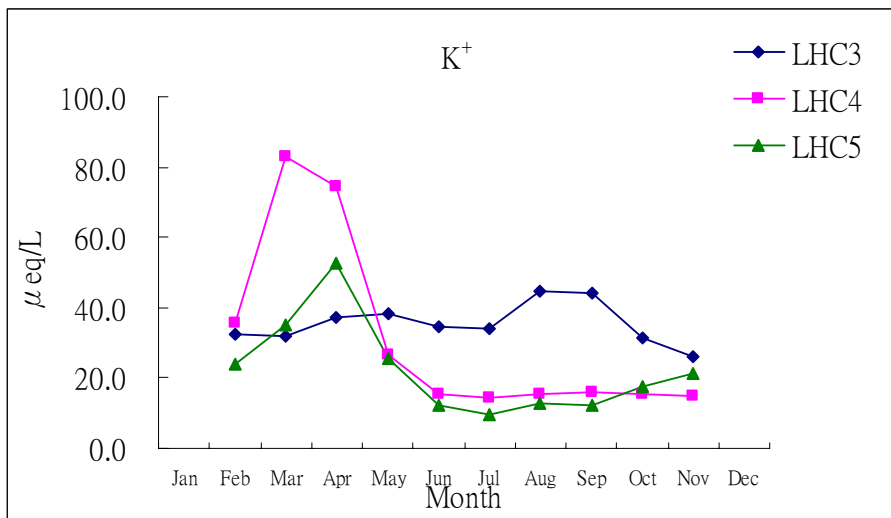
a.



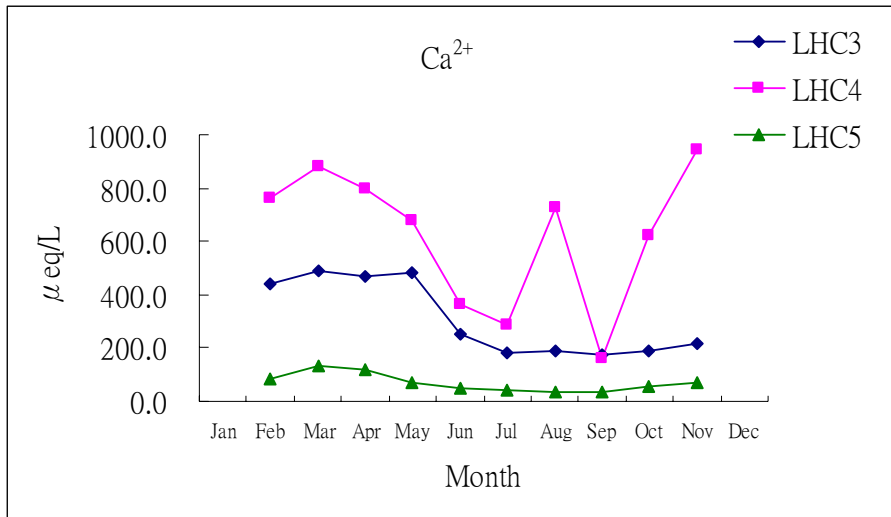
b.



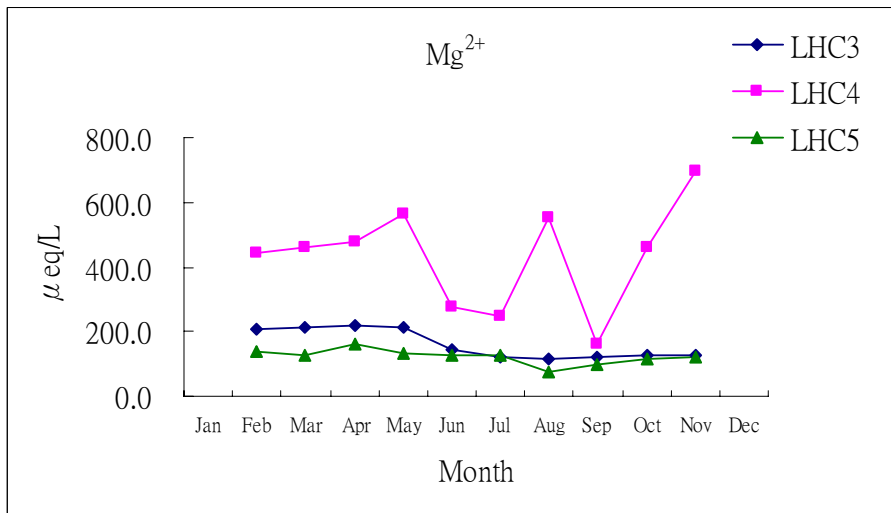
c.



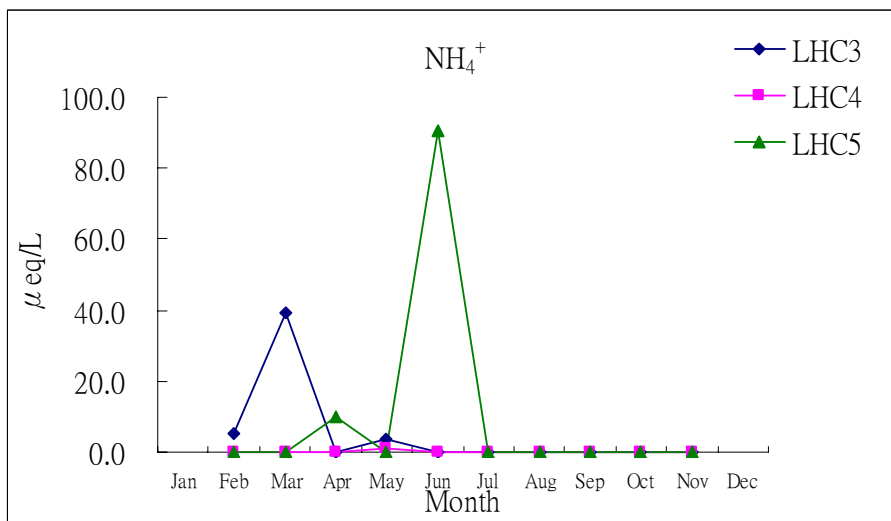
d.



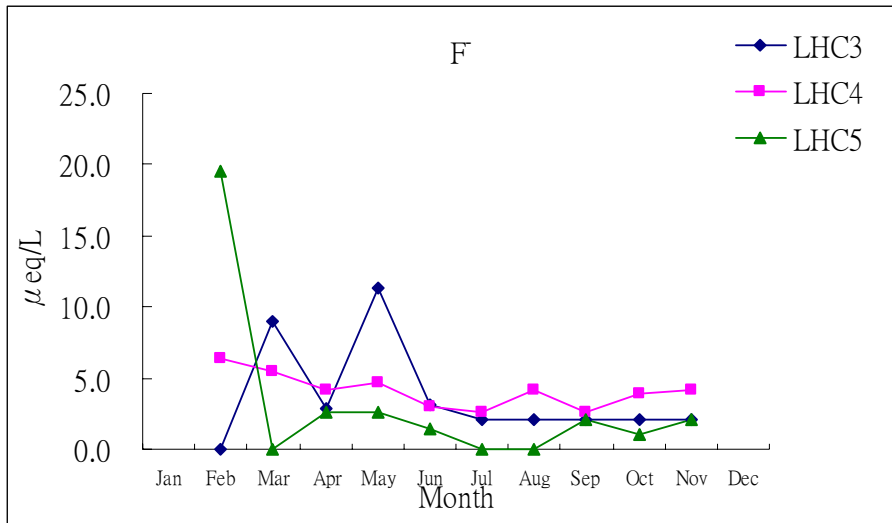
e.



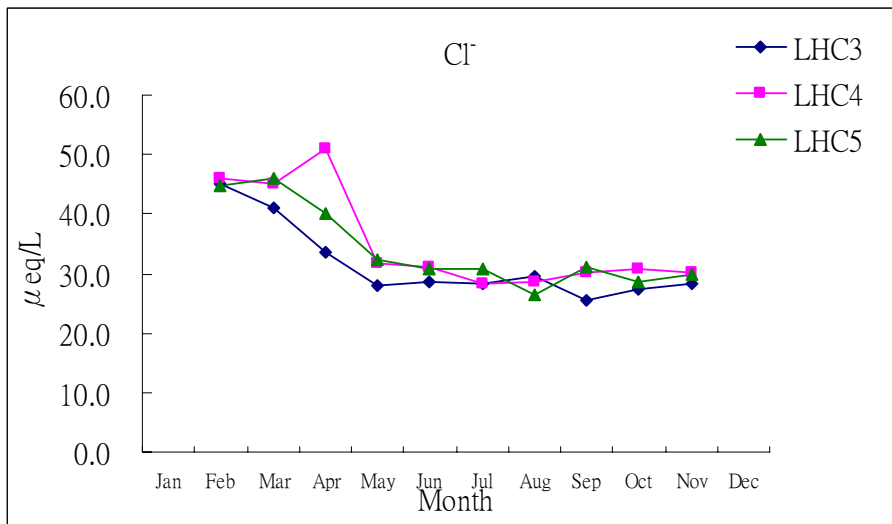
f.



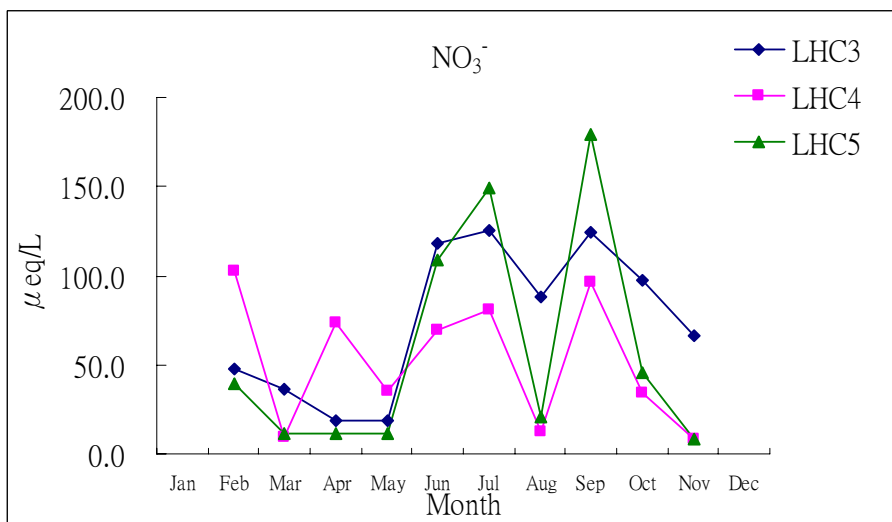
g.



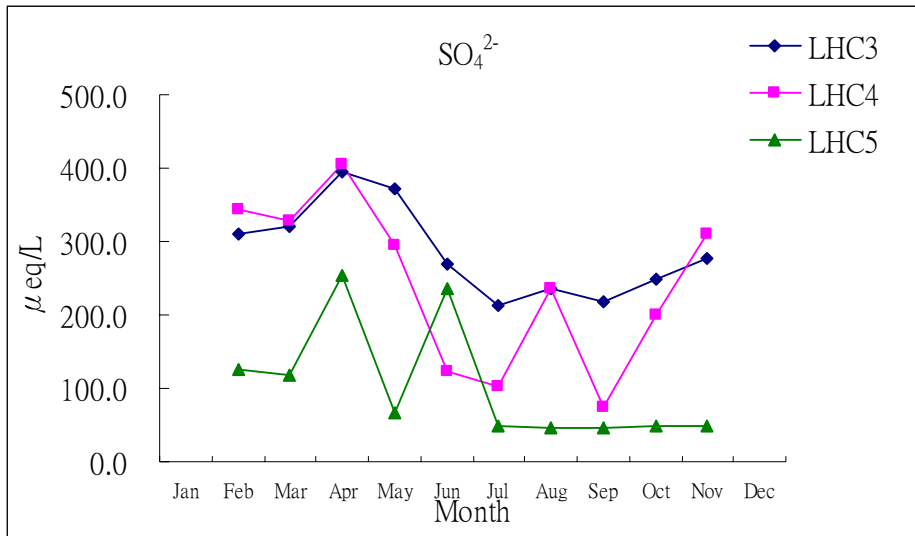
h.



i.



j.



k.

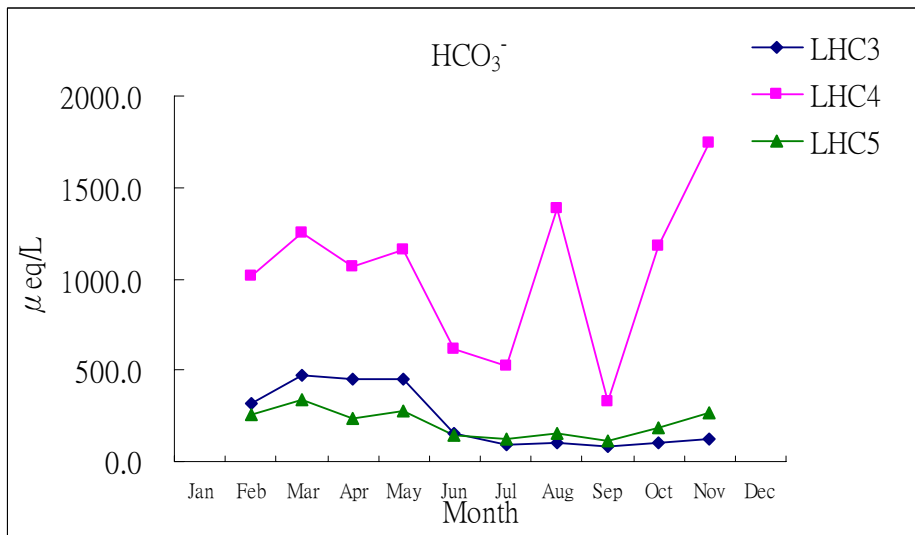


圖 18. 3、4 與 5 號試驗集水區溪水水質之月濃度變化

蓮華池溪水中在乾季有較高濃度的 SO_4^{2-} ，是受到降雨特性、土壤和地質的交互影響結果，溪水中的 SO_4^{2-} 濃度遠高於降雨，在 2005 年針對溼沉降與溪水的研究中亦指出，溪水中的 SO_4^{2-} 濃度有明顯的季節性並且與流量成顯著的負相關，即在降雨事件後會有濃度被稀釋的現象 (蕭泓泯，2006)，而暴雨事件如針對桃芝颱風、海棠颱風和泰利颱風的溪水化學研究也呈現相同的趨勢 (黃正良等，2003；Tsai *et al.*, 2009)。同時前人對於土壤的研究也指出其吸附 SO_4^{2-} 能力已近飽和 (金恆鏞等，1995)，另一項對蓮華池 2 號、3 號集水區頁岩淋洗的研究初步結果，也顯示有高濃度的 SO_4^{2-} 的洗出 (林登秋、蕭泓泯，未發表資料)，可能是本研究中 3

號集水區溪水中 SO_4^{2-} 偏高的原因之一，但本研究中 5 號天然闊葉林集水區的濃度則較其他二個天然林為低，可能表示蓮華池地區的天然闊葉林集水區在 SO_4^{2-} 的來源上存有一定程度的異質性，值得進一步的研究分析。

在植物生長所需要的營養元素， NH_4^+ 和 NO_3^- 等在杉木人工林集水區的溪流水中都比天然闊葉林溪流水中低(圖 18-i)，這可能與杉木人工林尚未達成熟期，故在主要生長季須要營養來重建生物量有關，這個現象同樣發生在國外如日本 Gunma Prefecture 試驗集水區，當地的研究指出，正值重建的 24 年生的人工針葉林(sugi, *Cryptomeria japonica*; hinoki, *Chamaecyparis obtusa*)，溪流水中 NO_3^- 的濃度低於 7 年生、84 年生及 86 年生的森林 (Ohruai and Mithell, 1997)。美國東北部 Harbard Brook Experimental Forest 的研究發現， K^+ 和 NO_3^- 在輸出入上的濃度變化對於生物活動因子的影響相當敏感，二者都會在植物生長季節有顯著的下降而在休眠季則是上升的現象 (Likens and Bormann, 1995)，本研究略有不同的是，即在主要生長季 3 月到 10 月之間，無論天然闊葉林或杉木人工林溪流水中的濃度並沒有下降的現象，而 K^+ 則在 4 號、5 號駢對集水區中，在生長季中出現較為一致的趨勢(圖 18-c)，這與臨前降雨有關，因為本研究中的 6 月、7 月與 9 月採樣日前一週降雨量分別為 77、186 和 153 mm，亦為十次採樣中降雨量的前三名高，對照 2005 年於蓮華池的研究發現， NO_3^- 與流量具有顯著的正相關，所以此三個月份資料的 NO_3^- 較其他月份為高，不易看出季節性差異，但是人工林溪水中 NO_3^- 的濃度比天然林為低，可以看出人工林在生長季節，比天然林更容易留置住 NO_3^- 。在 2005 年對杉木人工林及天然闊葉林林冠葉面積指數的監測亦發現，二種林分的葉面積指數在 3 月以後明顯上升，顯示此期間為植物生長最旺盛，營養需要最高的時期，而植物得吸收利用，反應在溪流水化學的就是營養元濃度下降 (陳青香，2006)。在同樣都是天然林的 3 號和 5 號集水區， K^+ 的月變化則不相同，其機制目前仍沒有更詳細的資料可供解釋。

溪水中的 Cl^- 幾乎不隨季節改變(圖 18-h)。生態系統中對 Cl^- 的需求很低，植物也甚少需要，在輸出入上，則是保持相當平衡的狀態，即輸入多少，大約就輸出多少，尤其在長期的監測資料中更可發現這個趨勢 (Likens and Bormann, 1995)。國內外的研究亦指出，岩石中含氯的成份大多很低，植物體亦多不蓄積 Cl^- ，故溪

流水中 Cl^- 濃度略高於降水的濃度，同時 Cl^- 亦幾乎不隨季節性升降，此與其他研究相同 (金恆鏞和楊炳炎，1984；Vitousek, 1977)。

森林中的 NH_4^+ 會經硝化作用轉換為 NO_3^- ，易於流動及淋溶，而與流量呈現正相關作用 (Ohruai and Mitchell, 1996, 1997)，惟本研究中並無此現象，此與南部六龜的結果相同，但與日本的研究則有異 (Ohruai and Mitchell, 1996; 1997)。本研究中 NH_4^+ 最高的月份，3 號、5 號集水區分別出現在 3 月和 5 月，4 號集水區則是 4 月(圖 18-f)，對照 2005 年的研究，2 號集水區出現的濃度高峰是在 5 月和 6 月，顯示不同的溪流中仍存有一些差別，這是由於無機氮 NH_4^+-N 及 NO_3^--N 是植物能直接利用，在溪水中變化常不易預測 (金恆鏞和楊炳炎，1984)，除了會因生物活動因子或濱水帶土壤有機氮的礦質化作用而改變 (Cirimo and McDonnell, 1997)，甚至也可能受臨前降雨狀況的影響 (廖學誠等，2002)。另外 NH_4^+ 也易受農業施肥的影響，因為氮的循環過程非常複雜，因此在不同地區也很容易因當地的溪流水中的變動，很容易受當地的生物、土壤及大氣沉降的差異而有所不同。

HCO_3^- 是溪水中主要緩衝酸性物質的指標，經大氣沉降輸入的量甚低，主要來源有岩石風化、濱水帶土壤微生物活動產生的 CO_2 經由洗出作用進入溪水及空氣中的 CO_2 的溶入均會提高溪水 HCO_3^- 濃度 (劉瓊霏、許博行，1998；Wang, 1994; Hornbeck et al., 1997; Wissmar, et al., 1997)。在本研究中，天然闊葉林集水區溪水的 HCO_3^- 濃度較杉木人工林為低，表示此處的天然闊葉林集水區對於緩衝酸性物質的能力較不若杉木人工林集水區，這與溫帶林的研究有異，其原因除了可能是林份差異外，也有可能是其土壤及地質等本身條件的差異所產生。

第四節 小結

(一) 在溪流水方面，蓮華池集水區溪流水離子濃度與流量間的關係可分為三種：

(1)稀釋作用： 電導度 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- ；(2)水文增加作用： NO_3^- ；(3)作用不變： Cl^- ； NH_4^+ 、 K^+ 、 H^+ 。

(二) NO_3^- 與 NH_4^+ 不管在天然闊葉林、杉木人工林是惟二輸入大於輸出的營養元，在春夏二季的淨收入量約佔全年的 80%，顯示生態系在生長季仍大量需要氮。而

杉木人工林的淨收入都比天然闊葉林為高，因杉木人工林在 1997 年經強度 50%疏伐，生長 20 年左右之杉木林有衰退情形，部份風倒形成孔隙，以及地被層經多次清除，形成有利於小苗之更新環境，因幼樹小苗成長旺盛，仍需要比天然闊葉林更多的營養元以供生長所需。

(三) 皆伐後的第 24 年，杉木人工林集水區的鹽基陽離子 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 年輸出量仍是天然闊葉林的 1.4~1.8 倍之間。



第七章 結論與建議

第一節 綜合討論

水文過程為森林生態系重要一環，與能量循環、養分循環、植群分佈，以及土壤化育等密切相關，故推行森林生態系經營時，了解該生態系的森林水文現象與過程是重要的事。林業試驗所自 1966 年起，陸續在蓮華池試驗林設置五座森林試驗集水區，進行森林水文研究；1979 年更選定 4 號及 5 號集水區實施駢對集水區試驗，探討集水區森林經營 (伐木作業) 造成水文特性的差異，供說明森林對涵養水源、減緩洪害及過濾水質等效益，開創台灣森林水文研究新頁。迄今已達 31 年，期間因天災或儀器故障觀測紀錄偶有中斷外，相較於其他試驗集水區，4、5 號駢對試驗集水區的狀況最為完善。

林業試驗所原在福山烏來、石門水庫、蓮華池、畢祿溪、扇平及太麻里設立 16 處試驗集水區；福山烏來、石門水庫及太麻里等地之試驗集水區由於經費、人力及必要性之考量已停止觀測多年，畢祿溪 11、12 兩集水區因龍王颱風土石淤積，2005 年停止觀測。2009 年 88 風災南部之六龜扇平試驗集水區嚴重損壞短期內無法修復，目前僅剩東北部福山試驗集水區及中部的蓮華池試驗集水區，維持正常運作。

蓮華池 4、5 號駢對試驗集水區觀測時間最長，相關的基礎資料最為豐富，近年來逐步更新設備，架設二座微氣象觀測高塔加強自林冠上層至地面各層次之監測，期能有助於未來人工林及天然林集水區之林分垂直結構、林下植物多樣性、水文模式、生態水文等研究課題，也可作為全球氣候變遷、國土防災、生態復育等課題之理想研究場所，應該妥善規劃永久經營使其功能充分發揮。

太陽輻射是植物行光合作用的主要能量來源，森林冠層的特性與結構常能影響林下光照，造成林下微氣候如溫度、水分、輻射及蒸發散等的變化。因此監測林下光照環境的變化為了解兩種不同林分之森林生態系組成重要的一環。本論文利用半球面影像取樣技術與林下植物多樣性分析，比較杉木人工林 (4 號集水區) 與天然闊葉林 (5 號集水區) 之林下光照環境。結果顯示杉木人工林之林下光照指

數較天然闊葉林高，且林下植物多樣性指數變異程度也較天然闊葉林大，而天然闊葉林則因樹種多樣、冠層結構較複雜，其林下光照指數的變異程度較大。天然闊葉林之植群型為九節木—黃杞型(*Psychotria rubra-Engelhardtia roxburghiana* forest type)，樹冠層高度約 12~18 m，優勢樹種為黃杞(*Engelhardtia roxburghiana*)、鵝掌柴(*Schefflera octophylla*)、紅皮(*Styrax suberifolius*)、單刺櫛(*Castanopsis cuspidate* var. *carlesii*)、捲斗櫛(*Cyclobalanopsis pachyloma*)、香桂(*Cinnamomum randaiense*)等。人工杉木林之植群型為三腳龍—杉木型(*Melicope pteleifolia-Cunninghamia lanceolata* forest type)，林下小樹極多，且具有較多陽性樹種。植物社會的樹冠層高度約 8~15 m，優勢樹種為杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、白栂(*Sapium discolor*)、墨點櫻桃(*Prunus phaeosticta*)、鵝掌柴(*Schefflera octophylla*)、頷垂豆(*Archidendron lucidum*)等。

應用 Guelph 滲透計於杉木人工林(4 號集水區)與天然闊葉林(5 號集水區)之山頂、山腹及山谷處，土層深度 20 cm 及 40 cm 之飽和水力傳導度(Saturated hydraulic conductivity)的測定分析。結果顯示，杉木人工林土深 20 cm 及 40 cm 處之平均飽和水力傳導度分別為 7.7×10^{-3} cm/s 及 5.3×10^{-4} cm/s；天然闊葉林土深 20 cm 及 40 cm 處之平均土壤水力傳導度則分別為 8.6×10^{-3} cm/s 及 7.6×10^{-4} cm/s。經變異數分析後得知，杉木人工林與天然闊葉林之飽和水力傳導度並無顯著差異，山頂、山腹及山谷的土壤水力傳導度亦無顯著差異，只有不同的土壤深度具有顯著差異。此結果顯示，在不嚴重干擾林地土壤的森林作業下，30 年生的杉木人工林其土壤飽和水力傳導度已恢復至天然闊葉林時之狀態。

逕流歷線之尖峰流量之後的退水曲線部分，繪製在單對數紙上大致可以區分為三個直線段落，第一段是代表地表逕流之退水，第二段是中間逕流之退水，第三段是基流退水，三段退水曲線的斜率都不同，分別是地表逕流 > 中間逕流 > 基流；而地表逕流的遞減速率明顯較為急速，表現出降雨過後逕流歷線之洪峰流量會急速退減之現象；基流減水狀況較為緩和，會影響枯水時期之流量狀況。本論文採用潘斯(Barnes, 1930)之退水曲線逕流分離法來探討 4 號集水區歷經天然闊葉林、皆伐、人工林造林及疏伐作業等經營方式，對於逕流歷線之退水段造成的影響。結果顯示，(1) 皆伐與疏伐作業皆會使地中逕流與基底逕流之退水速度變快。

地表逕流在皆伐時期、疏伐時期受到降雨條件與地表植被狀況的影響較大，若疏伐作業使地面的粗糙係數增加，則將阻擋地表逕流使退水速度變慢。(2) 短時間的降雨量影響地表逕流大於地中逕流、基底逕流；基底逕流則受季節的總雨量影響較大。(3) 本論文所得之各退水係數皆要比李肇文所得為低，推測可能與近年降雨結構改變有關係，降雨強度增大，使退水速度加快，將更不利於林地水源的涵養。(4) 探討降雨與逕流相關性分析之研究時，所選取的水文資料時間尺度需考量集水區面積之大小，應採取與集流時間同尺度之水文資料時間，才可適當的反應研究試驗地的實際水文狀況，所求得的水文特性結果才會與實際狀況較為符合。

在水資源的經營管理上，溪流水量的多寡固然重要，但溪流水化學的特質更是關鍵。以往水文學的研究大都著重於量的探討，因為攸關水利工程的安全設計，晚近溪流水化學的研究則快速發展，益加受到各方的重視，溪流水化學於低流量時特性，於梅雨及午後雷陣雨時變化，甚至颱風強勢降雨時變動，對水資源經營管理及土石流災害防制亦極為重要。本章主要目的即是在探討蓮華池試驗林溪流水化學特性，並比較蓮華池 4、5 號集水區溪流水的水化學，在颱風暴雨、夏季暴雨期及非暴雨期之差異。

在溪流水方面，蓮華池試驗林的溪流水離子濃度與流量間的關係可分為三種：(1)稀釋作用：電導度、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- ；(2)水文增加作用： NO_3^- ；(3)作用不變： Cl^- ； NH_4^+ 、 K^+ 、 H^+ 。 NO_3^- 與 NH_4^+ 不管在天然闊葉林、杉木人工林是惟二輸入大於輸出的營養元，在春夏二季的淨收入量約佔全年的八成，顯示生態系在生長季仍大量需要氮。而杉木人工林的淨收入都比天然林為高，表示杉木人工林在栽植二十年以後，仍需要比天然林更多的營養元以供生長所需。皆伐後的第 24 年，人工林集水區的鹽基陽離子 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 年輸出量仍是天然林的 1.4~1.8 倍之間。

太陽輻射是影響植物行光合作用與生長的重要來源，森林冠層的特性與結構常能影響林下光照(Valverde and Silvertown 1997, Trichon et al. 1998, Battaglia et al. 2002)，造成林下微氣候如溫度、水份、輻射及蒸發散等的變化(Breshears et al. 1998, Dietz et al. 2006)。林下光照對幼樹小苗更扮演關鍵的角色，幼樹小苗之生長需要大量的營養之供其建構生態系。蓮華池杉木人工林經過疏伐、杉木衰退風倒形成

孔隙及多次清理地被等原因，其光照指數大於天然闊葉林，而且有利於小苗之更新，由於幼樹小苗生長旺盛，需要較多之營養元如 NH_4^+ 、 HCO_3^- 等供其生長，養分之收支情形和天然闊葉林顯然有所不同。此點由二集水區溪流水中之化學離子濃度的差異可以應證。

集水區中不同土壤層次之水力傳導度，影響水文對水曲線之地表逕流、中間逕流及基底逕流之反應，在豐水期溪流量主要來自地表逕流，在枯水期則以基底逕流為主，相關的研究發現 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 及 HCO_3^- 等離子濃度深受表層土壤水及深層地下水所影響 (Tsujiura et al., 2001)。而蓮華池地區於 2005 年週採樣的溪水化學分析結果也指出，在豐水期，溪水的主要來源為表層土壤水，水在土壤中留存時間較短，所以離子濃度偏低，加上大量雨水的進入產生稀釋作用，乃因雨水中此等離子較土壤水中濃度為低，使濃度更為下降。而在枯水期，河川流量主要來自深層地下水，這些水在土壤中留存時間較長，經風化、淋溶、滲漏作用後，使 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 及 HCO_3^- 呈現較高的濃度 (蕭泓泯, 2006)。

由前述可知，林分結構、光照環境、土壤水力傳導度、水文退水曲線及溪流化學等各環節息息相關，為因應未來氣候變遷、國土開發水資源經營及生態水文等重要課題，需要結合各方面人才組成研究團隊才能畢其功。

第二節 結論

- 一、杉木人工林與天然闊葉林集水區土壤水力傳導度並無差異，山頂、山腹及山谷的土壤水力傳導度亦無差異，只有不同的土壤深度具有顯著的差異。
- 二、不論是張力滲透計、Guelph 滲透計、地下水井試驗或採土罐定水頭法，彼此間的調查結果均略有差異。其主要原因和土壤中之孔隙結構組成，尤其是大孔隙之特性有關。
- 三、地表逕流退水係數 Kr_1 在皆伐時期、疏伐時期受到降雨條件與地表植被狀況的影響較大。地表逕流終了時間 t_1 與降雨量有顯著的相關。
- 四、皆伐與疏伐作業皆會使地表逕流、地中逕流與基底逕流之退水速度變快。
- 五、短時間的降雨量影響地表逕流大於地中逕流、基底逕流；基底逕流則受季節

的總雨量影響較大。

六、採用日流量統計之退水係數較採用小時流量者，因資料已被平均化，所得之數值較高，若資料夠完備，仍因選取和集流時間相當之尺度之水文資料來統計為宜。

七、在溪流水方面，蓮華池試驗林的溪流水離子濃度與流量間的關係可分為三種：(1)稀釋作用：電導度、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- ；(2)水文增加作用： NO_3^- ；(3)作用不變： Cl^- 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 H^+ 。

八、 NO_3^- 與 NH_4^+ 不管在天然闊葉林、杉木人工林是輸入大於輸出的營養元，在春夏二季的淨收入量約佔全年的 80%，顯示生態系在生長季仍大量需要氮。而杉木人工林的淨收入都比天然闊葉林為高，表示杉木人工林在栽植二十年以後，仍需要比天然闊葉林更多的營養元以供生長所需。

九、皆伐後的第 24 年，杉木人工林集水區的鹽基陽離子 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 年輸出量仍是天然闊葉林的 1.4~1.8 倍之間。

第三節 建議

蓮華池試驗林水文特性之試驗研究在農委會林業試驗所長期的經營管理，以及所內外眾多的學者專家們的積極努力下已打下良好的基礎，獲得相當的成果，如今已是台灣中部森林集水區經營試驗研究之重要場所。近 20~30 年來，由於全球氣候變遷，氣候極端化的問題日益嚴重，森林生態系已面臨到極大的衝擊。此外，以往研究大都著重於自然生態方面，往往忽略掉「人」的面向；事實上，人類的社會結構和經濟活動與集水區經營息息相關，必須加以重視。展望未來，綜合前述各章節的研究分析，對於今後森林集水區經營相關研究，提出以下六點建議：

一、由於全球氣候變遷對環境變化之衝擊日愈受到重視，為能明瞭氣候變遷對森林集水區之影響、現有的各項水文觀測設施如氣象站、量水堰等是否應調整改進，使觀測資料的處理能更加快速、準確以及完整，是值得我們深入探討

及加強之課題。

- 二、近年來生態水文為學術界新興的研究領域，它整合生態及水文知識，以瞭解生態系如何改變水文特性，而這些水文特性又如何影響生態系功能。
- 三、蓮華池 4、5 號駢對試驗集水區之相關研究，經過 31 年已有相當的成果，建議進行第二次之經營處理，並配合規劃，5 號試驗集水區原是由 2 個小集水區合併而成，為能量測更準確的流量資料，建議將 5 號集水區分別設置成 5-1 及 5-2 兩個較小的試驗集水區，這樣和 4 號試驗集水區的相似度會更高，更符合駢對試驗集水區之試驗研究。
- 四、蓮華池研究中心在 2009 年已完成光纖網路之鋪設，資訊之傳輸速度已大為提高，今後應用無線傳輸連接網際網路，經由遠端監控的方式來取得氣象水文觀測資料，或是其他影音的監測資料。這些資料也可交由功能強大的電腦來儲存、計算及分析。如此可以大大的節省人力及時間，資料之品質也能大為提升。
- 五、為瞭解複雜森林生態系結構、功能的變化，以及水文循環特性在森林生態系中所扮演的角色為何，不同學門間的合作研究是值得推行，並且應擴展國際間之合作分工，加強交流溝通，達到分享經驗、互惠互利的目標。
- 六、加強土壤沖蝕之試驗研究，土地利用型態改變後，必定會引發不同程度土壤沖蝕，目前大都用經驗公式與模式來推估，今後應加強現場之觀測實驗，所得到的資料可以和推估的結果作一比較。

參考文獻

- 丁昭義、陳信雄 (1979) 森林緩衝帶對農藥之過濾試驗，中華水土保持學報 10(1)：115-126。
- 王立志、鄧子菁、夏禹九、金恆鏞、劉瓊靄 (1998) 1996 年葛樂禮颱風期間福山試驗林溪流水化學變化之研究，臺大實驗林研究報告 12(3)：189-201。
- 王立志、鄧子菁、夏禹九、金恆鏞、劉瓊靄、林登秋 (1999) 1996 年賀伯颱風期間福山試驗林溪流水化學變化之研究，中華林學季刊 32(2)：217-232。
- 王明光、蔣先覺、白創文、金恆鏞 (2001) 台灣高山森林土壤研究的近況，土壤與環境 3(1)：43-48。
- 臺大水工所 (1975) 森林集水區試驗之不同量水堰型水位—流量率定試驗，臺大水工所試驗報告 第 40 號，16 頁。
- 臺大水工所 (1976) 複式堰口率定試驗，臺大水工所試驗報告 第 48 號，19 頁。
- 吳正雄 (1988) 植生根力與坡面穩定關係之研究—台灣赤楊、山黃麻、台灣杉之根力與土坡剪力相關之研究，臺大森林研究所博士論文。
- 吳正雄、陳信雄 (1991) 台灣杉根力與坡面穩定關係之研究，中華林學季刊 24(1)：27-40。
- 吳正雄 (1993) 樹根力與坡面穩定關係之研究，中華水土保持學報 24(2)：23-37。
- 吳耀琪 (1990) 不同覆蓋林地未飽和帶土壤水份變化之研究，臺大森林研究所碩士論文，67 頁。
- 李光敦、許志揚 (1996) 糙度係數變異性對集流時間估算之影響，八十五年農業工程研討會論文集，pp. 423-429。
- 李肇文 (1993) 森林試驗集水區退水歷線之研究，臺大森林研究所碩士論文，105 頁。
- 何正品 (1994) 蓮華池森林集水區坡面土壤水份變化對降雨之反應，臺大森林研究所碩士論文，92 頁。
- 金恆鏞、夏禹九、黃正良、陳春雄、楊炳炎 (1984) 蓮華池試驗集水區暴雨時期水文特性及其與溪水懸浮質、養分濃度的關係，台灣省林業試驗所報告 第 425

號，15 頁。

金恆鏞、楊炳炎 (1984) 畢祿溪試驗集水區的降水及溪水化學，台灣省林業試驗所報告 第 427 號，1-32 頁。

金恆鏞 (1986) 蓮華池地區森林土壤分類的研究—採用美國農部的土壤分類系統，林業試驗所研究報告季刊 1(2)：155-176。

金恆鏞、薛美麗 (1992) 蓮華池森林集水區的酸性沈降及營養循環，空氣污染、土壤微生物及林木生物技術國際研討會論文集，101-115 頁。

金恆鏞、康敏捷、王明光 (1995) 蓮華池兩森林土壤之硫酸吸附現象，林業試驗所研究報告季刊 10(1)：65-74。

周天穎、葉美伶 (1997) 水里溪集水區檳榔種植對土壤沖蝕之影響及其經濟分析，中華水土保持學報 28(2)：87-97。

林文雄 (2002) 台灣東北部三種相鄰林分林下光照環境之比較，林業研究季刊 24(3)：49-58。

林壯沛、盧惠生、漆陞忠、黃正良 (1984) 林道路面之沖蝕調查，林試所試驗報告 第 429 號，12 頁。

林壯沛、葉正霖、黃良鑫、唐凱軍 (2001) 台灣中部合坑溪水文網站之規劃設置，水土保持學報 33(2)：123-134。

林俐玲、謝銘、林明義、杜怡德 (2002) 九份二山崩場地土壤水份特性之研究，中華水土保持學報 33(2)：79-86。

林莉利 (1992) 台灣上游集水區洪峰流量的產生特性和計算方法之研究，中興大學水土保持研究所碩士論文，89 頁。

林務局 (1995) 第三次台灣森林資源及土地利用調查，258 頁。

林淵霖 (1978) 國外與台灣森林集水區經營，中華水土保持學會印行，188 頁。

林試所 (1997a) 林業試驗所蓮華池分所氣象資料(1961-1996)，林業試驗所林業叢刊 第 76 號，449 頁。

林試所 (1997b) 臺灣森林土壤調查報告(二)—林業試驗所六龜試驗林，150 頁。

林試所 (1998) 林試所六龜分所氣象資料，林試所，517 頁。

胡蘇澄 (1993) 蓮華池地區陡坡地栽植檳榔對土壤水文性質與沖蝕性之影響，林業試驗所研究報告季刊 8(4)：271-276。

- 胡蘇澄、盧昭堯、吳益裕、陳台芳 (1995) 台灣中部蓮華池地區高粘土含量土壤之紋溝間沖蝕率，林業試驗所研究報告季刊 10(1)：33-40。
- 孫正春 (1995) 蓮華池地區不同樹種截留特性之研究，臺大森林研究所碩士論文，79 頁。
- 夏禹九、林淵霖 (1981) 森林集水區水文年之選擇，台灣省林業試驗所報告 第 353 號，15 頁。
- 夏禹九、楊炳炎、金恆鏞、漆陞忠 (1982) 皆伐作業對蓮華池試驗集水區溪流流量的影響，林業試驗所試驗報告 第 381 號，17 頁。
- 夏禹九、唐凱軍、顏江河、黃正良、鍾旭和 (1984) 濕潤情況下兩種天然闊葉樹之氣孔傳導度對環境因子的反應，台灣省林業試驗所報告 第 418 號，12 頁。
- 夏禹九、黃良鑫、王立志、黃正良 (1992) 不同森林植被之淨輻射能與日輻射能關係，林業試驗所研究報告季刊 7(4)：371-374。
- 許世宏、魏聰輝、姚榮鼎 (1994) 溪頭地區降雨與林內穿落雨的 pH 值及鹽基離子濃度，臺大實驗林研究報告 8(3)：83-97。
- 許世宏 (1995) 模擬酸雨對蓮華池森林土壤陽離子淋溶效應與鋁離子對四種闊葉樹苗效應之研究，臺大森林研究所博士論文，161 頁。
- 陳明杰、黃正良 (1986) 蓮華池地區林地土壤滲透功能之探討，中華林學季刊 19(2)：89-99。
- 陳明杰 (1987) 台灣中部森林集水區水文歷線演算方法之研究，臺大森林研究所博士論文，195 頁。
- 陳明杰、陳信雄 (1987) 台灣中部森林集水區水文歷線演算方法之研究，臺大實驗林研究報告 1(4)：55-83。
- 陳明杰 (1991) 試驗集水區基底逕流遞減特性之研究，臺大實驗林研究報告 5(4)：115-135。
- 陳明杰 (1993) 蓮華池地區不同林相土壤孔隙分佈特性之研究，中華林學季刊 26(2)：63-77。
- 陳明杰、李肇文 (1993) 森林試驗集水區退水歷線之研究，臺大實驗林研究報告 7(3)：27-52。
- 陳明杰 (1995a) 森林試驗集水區集流時間之研究，臺大實驗林研究報告 9(1)：

1-17。

陳明杰 (1995b) 合理化公式推算洪峰流量相關條件之研究，臺大實驗林研究報告 9(4)：25-39。

陳明杰、何正品 (1996a) 蓮華池地區林地土壤水貯留變化之研究，臺大實驗林研究報告 10(1)：67-85。

陳明杰、何正品 (1996b) 蓮華池試驗集水區坡面土壤水分變化之研究，中華林學季刊 29(2)：15-33。

陳明杰、何學哲 (2001) 福山試驗林降雨對坡面土壤水份勢能變化影響之研究，中華林學季刊 34(1)：49-61。

陳明杰、黃禱慧 (2006) 張力滲透計應用於蓮華池五號集水區土壤水力傳導度測定分析，中華林學季刊 39(2)：207-220。

陳明杰、洪志遠 (2007) 蓮華池四號集水區土壤物理性質與水力傳導度的特性，臺大實驗林研究報告 21(4)：293-306。

陳青香 (2006) 蓮華池天然闊葉林與人工杉木林葉面積指數時空變動之研究，彰化師範大學地理系碩士論文。

陳佳慧 (2000) 關刀溪不同林分枯落物及土壤養分含量之動態變化。國立中興大學森林學系碩士論文。

陳信雄 (1978) 應用電阻片測定不同覆蓋坡面土壤水份移動之研究(一)，臺大農學院實驗林研究報告 第 122 號，77-109 頁。

陳信雄 (1984) 森林在水資源涵養效益評估之研究(一)，臺大實驗林研究報告 151 號，1-16 頁。

陳信雄、陳明杰 (1989) 森林對防洪與水資源保育效益之初步研究，臺大實驗林研究報告 3(1)：95-102。

陳萱蓉、夏禹九 (2000) 農業非點源污染模式應用於河川保護帶配置上之探討。中華水土保持學報 31(1)：1-12。

陳毓禎 (2001) 天然闊葉林與人工柳杉林林下植物生物量、多樣性、枯枝落葉層生物量及土壤之比較。國立彰化師範大學地理系碩士論文。

陳增壽 (1975) 複式堰口之試驗研究，台灣水利 23(1)：50-55。

陳樹群、黃兆章 (1998) 運動波理論建立台灣森林集水區集流時間之研究，中華水

土保持學報 29(1)：11-22。

康敏捷 (1992) 模擬酸雨對蓮華池森林土壤陽離子之淋溶作用，臺大農業化學研究所碩士論文，103 頁。

康敏捷、金恆鏞、王明光 (1996) 模擬酸雨對蓮華池森林土壤陽離子之淋溶作用，中國農業化學會誌 34(1)：41-53。

范明光、楊楚淇 (1979) 蓮華池一號試驗集水區地質構造與地下水相關之研究，台灣省林業試驗所報告 第 319 號，8 頁。

陸象豫、漆陞忠 (1988) 蓮華池地區天然闊葉林枯枝落葉層特性之研究，中華水土保持學報 19(1)：71-79。

陸象豫、漆陞忠、盧惠生 (1988) 不同林相枯枝落葉層物理及水文特性之研究，林業試驗所研究報告季刊 3(1)：363-377。

陸象豫、唐凱軍 (1995) 台灣中部地區天然闊葉林降雨截留量之探討，林業試驗所研究報告季刊 10(4)：447-457。

陸象豫 (1997) 應用 PHIM 模式推估蓮華池三號試驗集水區流量歷線，台灣林業科學 12(2)：189-201。

陸象豫、黃良鑫、傅鶴翹 (1999) 檳榔園水文特性之研究，台灣林業科學 14(2)：211-221。

郭孟斯 (1998) 關刀溪森林生態系三種林分之土壤理化性質及土壤水化學成分，國立中興大學森林學系碩士論文。

郭芯穎 (2003) 森林集水區退水係數與降雨延時相關性之研究，國立臺灣大學森林學研究所碩士論文，pp.31-33。

黃仁足 (1994) 台灣森林土壤之硫酸根吸附與脫附行為之探討，臺大農業化學研究所碩士論文，138 頁。

黃仁足、金恆鏞、王明光 (1998a) 台灣森林土壤之硫酸根吸附與脫附行為(I)：土壤性質與硫酸根吸附量之關係及其吸附機制，中國農業化學會誌 36(3)：239-255。

黃仁足、金恆鏞、王明光 (1998b) 台灣森林土壤之硫酸根吸附與脫附行為(II)：模擬酸雨對硫酸根之吸附與脫附之影響，中國農業化學會誌 36(3)：256-271。

黃正良 (1986) 台灣森林試驗集水區最大逕流量推算式之初步研究，臺大森林研究

所碩士論文，73 頁。

- 黃正良、陳信雄 (1987) 台灣森林試驗集水區最大逕流量推算之初步研究，中華水土保持學報 18(1)：36-48。
- 黃正良、夏禹九、盧惠生、漆陞忠、陸象豫、陳財輝、林壯沛 (1990) 上游集水區林道泥沙生產特性及邊坡植生穩定效果研究 (二)，行政院農委會林業特刊第 26 號，145-155 頁。
- 黃正良、林登秋、黃良鑫、夏禹九、漆陞忠 (1994) 林道沖蝕特性與簡易水土保持工程之效益評估，林業試驗所研究報告季刊 9(4)：355-362。
- 黃正良、廖學誠、金恆鏞、孫正春 (2003) 蓮華池人工林及天然林集水區土壤水力傳導度之比較 (一) —Guelph 滲透計法。中華林學季刊 36(2)：187-198。
- 黃正良、金恆鏞、廖學誠、李福明 (2003) 2001 年桃芝颱風蓮華池人工林及天然林集水區溪流水化學之比較，生態系經營-永久樣區理論與實務研討會論文集，行政院農業委員會林務局，219-239 頁。
- 黃正良、廖學誠、金恆鏞、陳明杰、李福明 (2007) 2001 年桃芝颱風蓮華池人工林及天然林集水區溪流水化學之比較，臺大實驗林研究報告 21(1)：53-63。
- 黃兆章 (1997) 集水區集流時間之研究與應用，中興大學水土保持研究所碩士論文。
- 黃裕星 (2002) 台灣人工林經營之重要性，柳杉人工林經營研討會論文集，中華林學會出版，4-8 頁。
- 黃獻文 (1984) 日月潭鄰近地區植群生態之研究，國立臺灣大學森林學研究所樹木學組碩士論文，76 頁。
- 游漢明 (2000) 竹東林區天然闊葉林與人工疏伐林分更新之研究，國立中興大學森林學系博士論文。
- 張振生、王志豪、劉維、廖禎茹、陳信雄 (2004) 921 地震後溪頭水文分佈特性與土石流防災相關之研究，中華林學季刊 37(3)：283-292。
- 楊居成 (1976) 蓮華池集水區植物蒸散率之測定，中華水土保持學報 7：115-123。
- 楊居成 (1979a) 集水區植物蒸發散率之測定，中華水土保持學報 10(1)：93-113。
- 楊居成 (1979b) 蓮華池集水區蒸發蒸散率之測定，理工學報 16：241-258。
- 楊居成 (1980) 提高台灣地區集水區有效水源之研究—集水區植物蒸發散率之研

- 究，中華水土保持學報 11(1)：31-40。
- 楊炳炎、盧惠生、漆陞忠 (1978) 蓮華池試驗集水區水平衡初步研究，林業試驗所試驗報告 第 316 號，12 頁。
- 楊應塘 (1971) 台灣省林業試驗所森林集水區經營試驗蓮華池分所第三號集水區之地下水研究，1-4 頁。
- 鄒天練、鄭皆達 (1996) Guelph 土壤水份傳導與滲透計之操作原理及應用，水土保持學報 27(2)：95-103。
- 葉正霖、鄭皆達、林壯沛、曹舜評 (2000) 使用 Slug 試驗對上游森林集水區水力傳導係數估算之研究，水土保持學報 32(1)：51-58。
- 廖學誠、盛志澄、黃正良 (1998) 蓮華池森林及皆伐跡地於諾瑞斯颱風暴雨時水文反應之研究，台灣林業科學 13(3)：237-241。
- 廖學誠、黃正良、夏禹九 (2001) 福山及扇平森林集水區飽和土壤水力傳導度之比較，師大地理研究報告 35：1-20。
- 廖學誠、金恆鏞、黃正良、劉瓊靄 (2002a) 1999-2000 年台灣南部六龜森林集水區溪流水離子濃度與流量關係之研究，師大地理研究報告 37：95-112。
- 廖學誠、金恆鏞、黃正良、劉瓊靄 (2002b) 台灣杉造林地溪流水化學之研究，中華水土保持學報 33(1)：23-30。
- 廖學誠 (2005) 六龜試驗林的水文特性，地理研究叢書，159 頁。
- 廖學誠 (2005) 森林集水區水文歷程之研究 (3/3)，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，1-8 頁。
- 劉明芬 (1989) 降雨量和相對逕流量關係之研究，臺大森林研究所碩士論文，79 頁。
- 劉明芬、陳信雄 (1992) 森林小集水區逕流特性之研究，臺大實驗林研究報告 6(3)：87-106。
- 劉明芬、陳信雄 (1993) 臨前濕潤條件對降雨量與逕流量關係之研究，臺大實驗林研究報告 7(3)：73-97。
- 劉明芬 (1994) 台灣中部小集水區降雨量與逕流量關係之研究，臺大森林研究所博士論文，107 頁。
- 劉棠瑞、蘇鴻傑 (1983) 森林植物生態學（初版），台灣商務印書館。

- 劉靜榆 (2003) 臺灣中西部氣候區森林植群分類系統之研究，國立臺灣大學森林學研究所博士論文，228 頁。
- 劉靜榆、蘇鴻傑、曾彥學 (2006) 台灣中西部氣候區楠櫛林帶植群分類系統之研究，特有生物研究 8(2)：53-85。
- 劉瓊霖、夏禹九、金恆鑣、黃正良、孫正春、漆陞忠 (1995) 人工林與天然林集水區溪流水化學之差異，林業特刊 第 48 號，327-332 頁。
- 劉瓊霖、夏禹九、金恆鑣、黃正良、孫正春、漆陞忠 (1996) 人工林與天然林集水區溪流水化學之差異 (三)，八十四年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，pp.347-354。
- 劉瓊霖、許博行 (1998) 關刀溪森林集水區降水及溪水水化學，中興大學實驗林研究彙刊 20(2)：71-78。
- 劉瓊霖 (2000) 雨水流經關刀溪三種林分水化學的變化，中興大學森林學研究所博士論文，131 頁。
- 鄭皆達、夏禹九 (1989) 上游森林集水區暴雨流出的產生與其在集水區經營、工程設計上的應用，生態原則下的森林經營研討會論文集，pp.231-244。
- 鄭皆達、夏禹九 (1990) 台灣上游集水區水文特性之研究，土壤沖蝕及河川泥砂研討會論文集，213-227 頁。
- 鄭皆達、林莉利 (1992) 台灣上游集水區洪峰流量的產生和計算方法之研究，中華水土保持學報 23(2)：29-39。
- 鄭皆達、夏禹九、蘇瑞忠 (1994) 台灣上游集水區洪峰流量計算法之評估、推導與應用—不同洪峰流量計算方法在台灣上游集水區之應用，行政院農委會林業特刊 第 46 號，436-444 頁。
- 鄭皆達 (1996) 台灣上游集水區溪流流量的產生機制對洪峰流量估算的影響，中華水土保持學報 28(3)：18-31。
- 鄭皆達、葉正霖、林壯沛、曹舜評 (2000) 應用單井回復試驗推求水力傳導係數之探討，水土保持學報 32(2)：87-96。
- 鄭皆達、顏川舜、葉正霖 (2001) 森林集水區低水流量與貯蓄量關係之探討，台灣林業科學 16(3)：161-173。
- 葛錦昭、楊炳炎、林淵霖、楊楚淇、漆陞忠 (1978) 臺灣森林集水區經營試驗初步

- 報告，林業試驗所試驗報告 第 304 號，50 頁。
- 潘家聲 (1964) 杉木林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗，台灣省林業試驗所報告 第 94 號，15 頁。
- 潘家聲 (1965) 臺灣檫木林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗，台灣省林業試驗所報告 第 256 號，11 頁。
- 潘家聲 (1966) 天然闊葉樹林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗，台灣省林業試驗所報告 第 131 號，20 頁。
- 潘家聲 (1974a) 大葉桉林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗，台灣省林業試驗所報告 第 253 號，8 頁。
- 潘家聲 (1974b) 杉木不同疏伐度林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗，台灣省林業試驗所報告 第 255 號，12 頁。
- 潘家聲 (1974c) 肖楠不同株行距林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗，台灣省林業試驗所報告 第 256 號，11 頁。
- 潘家聲 (1976) 肖楠不同修枝度林分樹冠對於降雨截留量之關係試驗，台灣省林業試驗所報告 第 274 號，11 頁。
- 盧光輝、胡蘇澄 (1997) 水里溪集水區土壤流失量之推估，八十五年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，pp.459-479。
- 盧昭堯、吳益裕、胡蘇澄、陳台芳、蘇志強 (1998) 台灣中部蓮華池地區降雨沖蝕性與土壤可蝕性之研究，第一屆海峽兩岸山地災害與環境保育學術研討會論文集，pp.354-360。
- 盧惠生、楊炳炎 (1979) 不同覆蓋坡地土壤滲透之探討，中華水土保持學報 10(2)：111-119。
- 盧惠生 (1983) 台灣中部低海拔天然闊葉樹林集水區皆伐對第一年暴雨水文歷線之影響，中華水土保持學報 14(1,2)：59-69。
- 盧惠生、林壯沛、陸象豫 (1987) 集水區不同土地利用逕流與沖蝕之研究，中華水土保持學報 18(2)：112-121。
- 盧惠生、林壯沛、陸象豫、黃良鑫 (1990) 上游集水區逕流特性之研究，中華水土保持學報 21(1)：1-11。
- 盧惠生、胡蘇澄 (1993) 應用 Philip 入滲模式推估台灣中部山地土壤入滲，林業試

驗所研究報告季刊 8(4)：259-270。

盧惠生、陸象豫 (1995) 應用臨前降雨指數模式推估台灣中部地區蓮華池三號試驗集水區暴雨流量歷線，林業試驗所研究報告季刊 10(4)：493-500。

盧惠生、胡蘇澄、林壯沛 (1996) 蓮華池坡地檳榔園土壤入滲模式之研究，台灣林業科學 11(4)：409-420。

盧惠生 (1997) 蓮華池地區 24 小時降雨型態特性及設計雨型歷線，台灣林業科學 12(4)：481-489。

盧惠生 (1999) 蓮華池地區降雨-延時-頻率關係及不同降雨延時之設計雨型歷線，台灣林業科學 14(1)：63-76。

盧惠生、林壯沛、黃良鑫 (2000) 蓮華池地區天然闊葉林不同土壤深度的溫度日週期變化，中華水土保持學報 31(4)：267-278。

謝政道 (1984) 森林土壤對於水資源涵養機能之探討，中興大學水土保持研究所碩士論文。

謝豪榮、謝政道 (1985) 台灣中部低海拔不同植物被覆蓋貯水功能之研究，中華水土保持學報 16(1)：78-86。

鍾廣吉、蔡金郎 (1975) 蓮華池分所第三號集水區之地質與地下水賦存狀態調查報告，成大地球科學系地球科學 5：17-29。

蔣先覺、張家銘、洪富文、王明光 (1993) 蓮華池地區林地紅棕土壤之氧化鐵，中國農業化學會誌 31(6)：793-802。

蔣先覺、陳尊賢、林光清、洪富文 (1994) 臺灣高山森林土壤形態、性質與分類，林業試驗所出版，391 頁。

蔣先覺、許正一、陳尊賢、胡弘道 (1996) 台灣中部極育土中鐵結核的生成，台灣林業科學 11(4)：385-391。

顏川舜 (1999) 森林集水區低水流量與貯蓄量關係之探討，中興大學水土保持研究所碩士論文。

蕭泓泯 (2006) 蓮華池試驗林天然林與人工林營養元輸入與輸出之比較研究，彰化師範大學地理系碩士論文。

羅士福 (2006) 溪頭實驗林 2005 年泰利颱風期間雨水與溪水化學變化，台大森林研究所碩士論文。

- 蘇鴻傑 (1986) 植群生態多變數分析法之研究 I 原始資料檔案之編製，中華林學季刊 19(4)：87-103.
- APHA (1995) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th ed., American Public Health Association. USA.
- Babarello, V., & Provenzano, G. (1996) Factors affecting field and laboratory measurement of saturated hydraulic conductivity, *Am. Soc. Agri. Eng.*, 39(1): 153-159.
- Battaglia, M.A., Mou, P., Palik, B., Mitchell, R.J. (2002) The effect of spatially variable overstory on the understory light environment of an open-canopied longleaf pine forest. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 1984-1991.
- Beaudet, M., Messier, C. (2002) Variation in canopy openness and light transmission following selection cutting in northern hardwood stands: an assessment based on hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology* 110: 217-228.
- Benson, C.H., Gunter, J.A., Boutwell, G.P., Trautwein, S.J., & Berzanskis, P.H. (1997) Comparison of four methods to assess hydraulic conductivity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(10): 929-937.
- Beven, K. and P. Germann (1982) Macropores and waterflow in soil. *Water Resour. Res.* 18: 1311-1325.
- Beven, K.J. (1984) Infiltration into a class of vertically nonuniform soils, *Hydrological Sciences Journal*, 29(4): 425-434.
- Breshears, D.D., Nyhan, J.W., Heil, C.E., Wilcox, B.P. (1998) Effects of woody plants on microclimate in a semiarid woodland: soil temperature and evaporation in canopy and intercanopy patches. *International Journal of Plant Science* 153: 425-433.
- Brooks, K. N., P.F. Ffolliott, H. M. Gregersen and L. F. DeBano (2003) *Hydrology and the management of watersheds*. 3rd ed. Iowa State Press, Ames. USA., 90-92.
- Buttle, J.M. & House D.A. (1997) Spatial variability of saturated hydraulic conductivity in shallow macroporous soils in a forested basin, *J. of Hydrol.*, 203: 127-142.
- Canham, C.D., Denslow, J.S., Platt, W.J., Runkle, J.R., Spies, T.A., White, P.S. (1990) Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests. *Canadian Journal of Forest Research* 20: 620-631.

- Cheng, J. D., Y. C. Huang, H. L. Wu, J. L. Yeh and C. H. Chang (2005) Hydrometeorological and landuse attributes of debris flows and debris floods during typhoon Toraji, July 29–30, 2001 in central Taiwan. *J. Hydrol.* 306:161-173.
- Cirino, C. P. and McDonnell (1997) Linking the Hydrologic and Biogeochemical Controls of Nitrogen Transport in near-stream Zones of Temperate-forested Catchments : a Review, *Journal of Hydrology*, 199: 88-120.
- Cosby, B.J., Hornberger, G.M. Clapp, R.B. & Ginn T.R. (1984) A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils, *Water Res. Res.*, 20(6): 682-690.
- Daniel, D.E. (1989) In situ hydraulic conductivity tests for compacted clay, *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(9): 1205-1226.
- Dietz, J., Hölscher, D., Leuschner, C., Hendrayanto. (2006) Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia. *Forest Ecology and Management* 237: 170-178.
- Dignan, P., Bren, L. (2003) A study of the effect of logging on the understory light environment in riparian buffer strips in a south-east Australian forest. *Forest Ecology and Management* 172: 161-172.
- Fares, A. Alva, A.K. Nkedi-Kizza, P. & Elrashidi, M.A. (2000) Estimation of soil hydraulic properties of a sandy soil using capacitance probes and Guelph permeameter, *Soil Science*, 165(10): 768-777.
- Gauch, H. G., Jr. (1982) *Multivariate analysis in community ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Govindaraju, R.S. Koelliker, J.K. Banks, M.K. & Schwab, A.P. (1996) Comparison of spatial variability of infiltration properties at two sites in Konza Prairie of East-Central Kansas, *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(3): 131-138.
- Hale, S.E. (2001) Light regime beneath Sitka spruce plantations in northern Britain: preliminary results. *Forest Ecology and Management* 151(1-3): 61-66.
- Hale, S.E. (2003) The effect of thinning intensity on the below-canopy light environment in a Sitka spruce plantation. *Forest Ecology and Management* 179: 341-349.
- Hornbeck, J. W., S. W. Bailey, D. C. Buso and J. B. Shanley (1997) *Streamwater*

- Chemistry and Nutrient Budgets for Forested Watershed in New England: Variability and Management Implications. *Forest Ecology and Management*, 93: 73-89.
- Hoshino, D., Nishimura, N., Yamamoto, S. (2003) Effects of canopy conditions on the regeneration of major tree species in an old-growth *Chamaecyparis obtusa* forest in central Japan. *Forest Ecology and Management* 175: 141-152.
- Hsia, Y. J. and C.C. Koh. (1983) Water yield resulting from clearcutting a small hardwood basin in central Taiwan. *Hydrology of Humid Tropical Regions with Particular Reference to the Hydrological Effects of Agriculture and Forestry Practice*(Proceedings of the Hamburg Symposium, August 1983). IAHS Publ. No.140.
- Hsia, Y. J. (1987) Changes in storm hydrographs after clearcutting at a small hardwood-forested watershed in central Taiwan. *Forest Ecol. Manage*, 20: 117-133.
- Hsiao, H. M., T. C. Lin, J. L. Hwong, C. C. Hwong and N. H. Lin (2007) Precipitation chemistry at Lienhuachi Experimental Forest in central Taiwan. *Taiwan Journal of Forest Science*, 22(1): 1-13.
- King, HB, JK Torrance, LH Bowen, and C Wang (1990) Iron concretions in a typical Dystrochrept in Taiwan. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 462-468.
- King, H. B., Y. J. Hsia, C. B. Liou, T. C. Lin, L. J. Wang, and J. L. Hwong (1994) Chemistry of precipitation, throughfall, stemflow and streamwater of six forest sites in Taiwan. *Biodiversity and Terrestrial Ecosystems*, Institute of Botany, Academia Sinica Monograph Series No. 14, pp.355-362.
- Jr, R.P., Zweede, J., Asner, G.P., Keller, M. (2002) Forest canopy damage and recovery in reduced-impact and conventional selective logging in eastern Para, Brazil. *Forest Ecology and Management* 168: 77-89.
- Kasai, M. T. Marutani and G. Brierley (2004) Channel bed adjustment following major aggradation in a steep headwater setting: findings from Oyabu Creek, Kyushu, Japan, *Geomorphology* 62:199-215.
- Lehane, B. M., P. S.Giller, J. O'Halloran, C. Smith and J. Murphy (2002), Experimental provision of large woody debris in streams as a trout management technique,

- Aquatic Conserv.: Freshw. Ecosyst. 12:289-311.
- Lepori, F., D. Palm and B Malmqvist (2005) Effects of stream restoration on ecosystem functioning: detritus retentiveness and decomposition, *J. Appl. Ecol.* 42:228-238.
- Likens, G. E. and F. H. Bormann (1995) *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem 2nd* , Springer-Verlag, New York.
- Lin, K. C., S. P. Hamburg, S. Tang, Y. J. Hsia, T. C. Lin (2003) Typhoon effects on litterfall in a subtropical forest, *Can. J. Forest Res.* 33(11):2184-2192.
- Lu, S. Y., K. J. Tang, H. Y. Ku and H. H. Huang (2000) Climatic Conditions of Forested Lands of Taiwan Forest Research Institute, *Taiwan Journal Forest Science*, 15(3): 429-440.
- McCune, B., and M. J. Mefford. (1999) *PC-ORD Multivariate Analysis of Ecological Data. Version 4.0.* MjM Software Design, Gleneden Beach, Oregon, USA.
- Mitchell, J.E., Popovich, S.J. 1997. Effectiveness of basal area for estimating canopy cover of ponderosa pine. *Forest Ecology and Management* 95: 45-51.
- Numata, S., Yasuda, M., Okuda, T., Kach, N., and Nur Supard, M.N. (2006) Canopy gap dynamics of two different forest stands in a Malaysian lowland rain forest. *Journal of Tropical Forest Science* 18(2): 109-116.
- Ohruai, K. and M. J. Mitchell (1996) Elemental Dynamics of a Japanese Watershed with Sugi (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki (*Chamaecyparis obtuse*) Plantations , *Canadian Journal of Forest Research*, 26: 2160-2169.
- Ohruai, K. and M. J. Mitchell (1997) Nitrogen Sturation in Japanese Forested Watersheds, *Ecological Applications*,7(2): 391-401.
- Ohruai, K. and M. J. Mitchell (1999) Hydrological Flow Paths Controlling Stream Chemistry in Japanese Forested Watersheds, *Hydrological Prdcess*, 13: 877-888.
- Shields, F. D., S. S. Knight and J. M. Stofleth (2006) Large wood addition for aquatic habitat rehabilitation in an incised, sand-bed stream, Little Topashaw Creek, Mississippi, *River Res, Applic.* 22:803-817.
- Pages J.P., Pache G., Joud D., Magnan N., Michalet R. (2003) Direct and indirect effects of shade on four forest tree seedlings in the French alps. *Ecology* 84: 2741-2750.
- Poulsen, T.G., Moldrup, P., Yamaguchi, T & Jacobsen, O.H. (1999) Predicting saturated and unsaturated hydraulic conductivity in undisturbed soils from soil

- water characteristics, *Soil Science*, 164(12): 877-887.
- Ragab, R. & Cooper, J.D. (1993) Variability of unsaturated zone water transport parameters : implications for hydrological modelling. 1. In situ measurements, *Journal of Hydrology*, 148: 109-131.
- Reynolds, W.D. & Elrick D.E. (1985) In situ measurements of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph permeameter, *Soil Sci.*, 140: 292-302.
- Reynolds, W.D. & Zebchuk, W.D. (1996) Hydraulic conductivity in a clay soil : two measurement techniques and spatial characterization, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60: 1679-1685.
- Rheenen, H.V., Boot, R.G.A., Werger, M.J.A., Ulloa, M.U. (2004) Regeneration of timber trees in a logged tropical forest in North Bolivia. *Forest Ecology and Management* 200: 39-48.
- Rich, P.M., Clark, D.B., Clark, D.A., Oberbuaer, S.F. (1993) Long-term study of solar radiation regimes in a tropical wet forest using quantum sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 65: 107-127.
- Rich, P.M. (1990) Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing Review* 5: 13-29.
- Salmon, C. D., M. T. Walter, L. O. Hedin and M. G. Brown (2001) Hydrological Controls on Chemical Export from an Undisturbed Oldgrowth Chilean Forest, *Journal of Hydrology*, 253: 69-80.
- Soilmoisture Corp. (1986) 2800K1 operating instructions, California, USA. Trichon, V., N. Walter, J.M., Laumonier, Y. (1998) Identifying spatial patterns in the tropical rain forest structure using hemispherical photographs. *Plant Ecology* 137: 227-244.
- Tsai, C. J., T. C. Lin, J. L. Hwong, N. H. Lin, C. P. Wang and S. Hamburg (2009) Typhoon impacts on stream water chemistry in a plantation and an adjacent natural forest in central Taiwan, *J. Hydrol.* 378(3-4):290-298.
- Valverde, T, Silvertown, J. (1997) Canopy closure rate and forest structure. *Ecology* 78: 1555-1562.
- Vitousek, P. M. (1977) The Regulation of Element Concentration in the Northeastern

- United States, *Ecological Monographs*, 47(1): 65-87.
- Wang, L. J. (1994) *Hydrogeochemical Cycle and Storm Solute Transport in the Subtropical Fushan Experimental Forest, NE Taiwan*, University of Washington. Forest Resources Ph. D. thesis, pp. 23-50.
- Wang, L. J., Y. J. Hsia, H. B. King, J. L. Hwong, C. B. Liou, and T. C. Lin (1996) Storm Solute Changes in the Fushan Forested Watershed NE Taiwan, *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 27(2): 98-104.
- Wang, L.J., H. B. King, Y. J. Hsia, R. B. Harrison, T. C. Lin, J. L. Hwong, and C. B. Liou (1997) Changes in Chemistry in Hydrological Processes of the Fushan Experimental Forest, *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 30(2): 203-215.
- Watson, K. W. and R. J. Luxmoore (1986) Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 578-582.
- Wissmar, R.C., D. N. Swanston, M. Bryant, K. McGee (1997) Factors Influencing Stream Chemistry in Catchments on Prince of Wales Island, Alaska, *Freshwater Biology*, 38: 301-314.
- Zhuang, J., Nakayama, K. Yu, G.R. & Miyazaki, T. (2000) Scaling of saturated hydraulic conductivity: a comparison of models, *Soil Science*, 165(9): 718-727.
- hang, Z., T. Fukushima, Y. Onda, T. Gomi, T. Fukuuama, R. Sidle, K. kosugi and K. Matsushigr (2007) Nutrient runoff from forested watersheds in central Japan during typhoon storms: implications for understanding runoff mechanisms during storm events. *Hydrol. Process.* 21:1167-1178.