

2009

森林集水區經營研討會論文集

Proceedings of Symposium on
2009 Forest Watershed Management



主辦機關：行政院農業委員會林業試驗所

協辦機關：國立中興大學

國立台灣大學

國立屏東科技大學

明道大學

2009 森林集水區經營研討會論文集

Proceedings of Symposium on 2009 Forest Watershed Management

時間：98年6月11日(星期四)

地點：台北市南海路53號

主辦機關：林業試驗所

協辦機關：國立中興大學、國立台灣大學、國立屏東科技大學、明道大學

行政院農業委員會林業試驗所編印

九十八年六月

「2009 森林集水區經營研討會」議程表

時 間	議 程	
08:30-09:00	報 到	
09:00-09:10	開 幕 致 詞 (林試所 黃裕星所長)	
時 間	講 題	主持人
09:10-09:35	台灣西部山區設計雨型歷線推估 (盧惠生、林介龍)	中興大學 水土保持學系 教授 林信輝
09:35-10:00	蓮華池集水區勢能蒸發散量與實際蒸發散量 之比較(羅紹倫、陳明杰、黃正良)	
10:00-10:25	台灣中部森林小集水區降雨-逕流關係之研究 (鄭皆達、梁珠金、謝馥揚)	
10:25-10:45	茶敘 / 交流	
10:45-11: 10	上游集水區栽植檳榔對溪流特性影響之研究 (林壯沛、盧惠生、黃良鑫)	明道大學 環境規劃與 防災學系教授 鄭皆達
11:10-11:35	台灣中部地區森林移除後對暴雨流量及其回 歸週期的影響(陸象豫、黃良鑫)	
11:35-12:00	集水區分析模式之建置與應用 (林文賜、林昭遠)	
12:00-13:10	午 餐	
13:10-13:35	陡坡茶園水土流失控制之研究 (林俐玲、張舒婷、蔡義誌)	林試所集水區 經營組研究員 黃瓊彪
13:35-14:00	內洞國家森林遊樂區溪流水水化學 (劉瓊霏、陳岫女、林雨璇、呂俊廷、王秋嫻)	
14:00-14:20	茶敘 / 交流	
14:20-14:45	應用倒傳遞類神經網路模擬崩場地之滑移特 性(許中立、黃文仁、徐弘明、戴欣怡、林廣 榮)	臺灣大學 森林環境暨 資源學系教授 陳明杰
14:45-15:10	台灣地區桂竹林根系特性與崩塌機制之研究 (林信輝、彭心燕、謝明廷)	
15:10-15:35	淺層錨釘應用於林道維護工程之探討 (黃瓊彪、林照松)	
15:35-16:00	綜合座談及討論	
		林試所集水區 經營組研究員 盧惠生

2009 森林集水區經營研討會

開幕致詞

農委會林業試驗所

所長 黃裕星

2009 年 6 月 11 日

各位貴賓、各位學者專家，大家早安！

首先歡迎各位蒞臨林業試驗所，參加「2009 森林集水區經營研討會」。一年很快的過去了，藉著每年一度的研討會，讓森林、水保界的老朋友歡聚一堂，共同討論、交流彼此的研究現況、吸收新知，實在是美事一樁！尤其感謝學界的師長，還有水保局、林務局的同仁及業界的技師朋友等，在百忙當中撥空參加，讓本人非常感動，相信對森林集水區經營未來的研究發展有莫大的助益。

台灣全島林地面積約為 210 萬公頃，佔全島總面積 58.5 %；如何讓這些森林發揮最大的功用，有賴於正確的經營管理政策。我們知道森林對淨化空氣的貢獻，也瞭解森林是生物多樣性保育的基礎。但是如果談到「森林集水區」時，涉及的研究尺度是更廣的。從水循環開始，到地表逕流的產生、啟動表土沖蝕、崩塌，以至治理層面的水土災害防治、政策面的土地利用管理探討等等，集水區經營研究的範圍真的是包羅萬象！

早期森林集水區經營著重於水質、水量方面，大多以集水區試驗及水文等研究為主。隨著時代變遷與社會環境改變，森林集水區面臨的問題及牽涉的因素日趨複雜；現階段森林集水區經營的重點，不僅需要維護自然資源的永續利用，同時也要擔負起國土保安、坡地減災的重責大任；也因此擴展了研究範疇。舉辦研討會的目的就是希望建立彼此交流、合作的機

會，讓獨立型的研究有機會合併為整合型的研究，讓研究效率更為擴大。

本次舉辦「2009 森林集水區經營研討會」，單元主題包括集水區的暴雨及颱風雨逕流特性、水土流失控制及水化學、崩塌機制及林道維護。提出論文探討的研究有：台灣西部山區設計雨型歷線推估、蓮華池集水區勢能蒸發散量與實際蒸發散量之比較、森林集水區暴雨流出量計算方法之探討、上游集水區栽植檳榔對溪流特性影響之研究、台灣中部地區森林移除後對暴雨流量及回歸週期的影響；另外有集水區分析模式建置與應用、陡坡茶園水土流失控制、內洞國家森林遊樂區溪流水化學之探討；在崩塌方面，有應用倒傳遞類神經網路模擬崩場地之滑移特性、台灣地區桂竹根系特性與崩塌機制之研究、淺層錨釘應用於林道維護工程之探討。今天的議題非常多元化，希望藉著這些研究課題拋磚引玉，引起大家對森林集水區經營更多元的研究與討論。

再次感謝各位的共襄盛舉！也預祝會議圓滿成功！與會貴賓心想事成，平安快樂。謝謝！

目 錄

台灣西部山區設計雨型歷線推估-----	1
DESIGN HYETOGRAPH ESTIMATION IN MOUNTAINOUS AREAS OF WESTERN TAIWAN	
(盧惠生 Hui-sheng Lu、林介龍 Chieh-lung Lin)	
蓮華池集水區勢能蒸發散量與實際蒸發散量之比較-----	15
A COMPARISON OF POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION AND ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION IN LIENHUACHIH WATERSHED	
(羅紹倫 Shao-lun Luo、陳明杰 Ming-chieh Chen、黃正良 Jeen-lian Hwong)	
台灣中部森林小集水區降雨-逕流關係之研究 -----	39
A STUDY ON RAINFALL-RUNOFF RELATIONSHIPS OF SMALL FOREST WATERSHEDS IN CENTRAL TAIWAN	
(鄭皆達 Jie-Dar Cheng、梁珠金 Chu-Chin Liang、謝馥揚 Fu-Young Hsieh)	
上游集水區栽植檳榔對溪流特性影響之研究 -----	53
EFFECTS OF BETEL NUT PLANTATIONS ON HYDROLOGIC CHARACTERISTICS OF UPSTREAM WATERSHEDS	
(林壯沛 Jaung-pey Lin、盧惠生 Hui-sheng Lu、黃良鑫 Liang-shin Hwang)	
台灣中部地區森林移除後對暴雨流量及其回歸週期的影響 -----	69
STORMFLOW AND FLOOD FREQUENCY RESPONSE TO FOREST COVER REMOVAL IN CENTRAL TAIWAN	
(陸象豫 Shiang-Yue Lu、黃良鑫 Liang-Shin Hwang)	
集水區分析模式之建置與應用 -----	87
MODEL ESTABLISHMENT AND APPLICATION FOR AUTOMATED WATERSHED ANALYSIS	
(林文賜 Wen-Tzu Lin、林昭遠 Chao-Yuan Lin)	

- 陡坡茶園水土流失控制之研究 -----97
THE STUDY OF SOIL AND WATER LOSSES CONTROL ON STEEP SLOPING
TEA PLANTATION
(林俐玲 Li-Ling Lin、張舒婷 Shu-Ting Chang、蔡義誌 Yi-Zhih Tsai)
- 內洞國家森林遊樂區溪流水水化學 ----- 109
STREAM WATER CHEMISTRY OF NEIDONG NATIONAL RECREATION AREA
(劉瓊霖 Chiung-Pin Liu、陳岫女 Xiu-Nyu Chen、林雨璇 Yu-Xuan Lin、
呂俊廷 Jun-Ting Lyu、王秋嫻 Chiu-hsien Wang)
- 應用倒傳遞類神經網路模擬崩塌地之滑移特性 ----- 127
DISPLACEMENT PREDICTED FOR THE BACKPROPAGATION NEURAL
NETWORK APPLYING IN SHONZONGLIAO LANDSLIDE AREA
(許中立 Chung-li Hsu、黃文仁 Wen-ren Huang、徐弘明 Hon-min Hsu、
戴欣怡 Shin-yi Dai、林廣榮 Kuang-jung Lin)
- 台灣地區桂竹林根系特性與崩塌機制之研究 ----- 137
THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE PATTERN AND ROOT
CHARACTERISTIC OF MAKINO'S BAMBOO FOREST IN TAIWAN
(林信輝 Shin-Hwei Lin、彭心燕 Hsin-Yen Peng、謝明廷 Ming-Ting Hsieh)
- 淺層錨釘應用於林道維護工程之探討 ----- 153
A STUDY OF THE APPLICATION OF SHALLOW ANCHOR ON THE
MAINTENANCE ENGINEERING OF FOREST ROAD
(黃瓊彪 Chiung-piau Huang、林照松 Chao-song Lin)

台灣西部山區設計雨型歷線推估

盧惠生¹ 林介龍²

【摘要】降雨歷線資料為上游集水區推估洪水流量歷線的重要依據，台灣上游集水區較為欠缺降雨歷線資料，無法有效應用水文模式推估流量歷線。本文探討指數型設計雨型歷線與暴雨量推估式理論分析，以台灣西部山區降雨資料進行分析，建立西部山區指數型設計雨型歷線與暴雨量推估式，予以驗證，同時舉例如何應用於計算設計雨型歷線。獲悉以理論推導的雨峰時間關係式來計算雨峰時間，相等於設計雨型歷線的雨峰時間，顯示由迴歸統計分析，建立設計雨型歷線推估式的係數值與常數值，應屬合理。同時以不同頻率年的暴雨總量乘以設計雨型歷線推估式計算的降雨強度百分比，從而獲得不同頻率年的暴雨設計雨型歷線，頗為簡便。

【關鍵詞】設計雨型歷線、暴雨量、頻率年。

DESIGN HYETOGRAPH ESTIMATION IN MOUNTAINOUS AREAS OF WESTERN TAIWAN

Hui-sheng Lu¹ Chieh-lung Lin²

【Abstract】 Hyetograph is important in estimating stormflow hydrographs of upstream watersheds. It is difficult to estimate stormflow hydrographs with hydrologic simulation models for upstream watersheds of Taiwan due to lack of input information of hyetograph. In this paper, theoretical analyses on estimating equations of design hyetograph and storm rainfall, verification and application of these type equations using recording rainfall data in western mountainous areas of Taiwan were carried out. The results showed that time to rainfall peak from calculated by theoretical equations are

1. 農業委員會林業試驗所集水區經營組研究員兼組長，通訊作者

Senior Scientist & Head, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture (Corresponding Author), E-mail: lusteve@tfri.gov.tw

2. 農業委員會林業試驗所集水區經營組助理研究員

Assistant Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture

equal to those from design hyetographs. Based on verification results, coefficients and constants of estimating equations of design hyetograph from solved by regression analyses of statistical method showed reasonable and good agreement. Therefore, it is very convenient to estimate design hyetographs of different recurrence years and durations with only rainfall amount and empirical equation of design hyetograph.

【Key words】 Design hyetograph, Storm rainfall, Recurrence year.

I、前言

水文模式推估流量歷線，並非無中生有，必須仰賴推估流量歷線地區的降雨特性及環境參數為輸入資料，依據水文模式的結構，建立物理或經驗數學式，計算流量特性，以供坡地防災及水工構造物設計的憑據。環境參數可由野外調查輔以試驗室分析獲得。降雨特性則需依靠該地區的自記雨量站紀錄，唯大多數的上游集水區位於偏遠山區，地形崎嶇，交通不便，不易設置雨量觀測站，無法獲得降雨特性數據，只好退而求其次，以鄰近地形相似地區的雨量觀測紀錄，建立降雨特性與設計雨型歷線，以供該地區推估流量歷線，成為現今極待開發的研究題材。

歐美等先進國家從事降雨特性推估之研究起步甚早，然 1958 後應用水文模式推估流量歷線，成為水資源開發規劃及坡地防災構造物設計的重要前導要項，而水文模式多需降雨歷線資料，是故展開設計雨型歷線建立之研究(Huff, 1967； Pilgrim and Cordery, 1975； Yen and Chow, 1980)。台灣每年遭受颱風豪雨侵襲時，降雨量多且降雨強度極大，降雨歷線特性與歐美大陸溫帶氣候不盡相同，導致近年來台灣亦開始從事降雨特性與設計雨型歷線方面之研究(王與鄭，1982； 台灣省水利局，1982； 余，1988； 徐與何，1992； 徐與游，1993； 張與林，1994； 盧，1999； 盧等，2001，2004，2007)，亦建立了一些地區之降雨特性及設計雨型無因次歷線。

本文乃探討指數型設計雨型歷線與暴雨量推估式理論分析，以台灣西部山區降雨資料進行分析，建立西部山區指數型設計雨型歷線與暴雨量推估式，予以驗證，同時舉例如何應用於計算設計雨型歷線。俾供台灣西部無雨量紀錄地區推估流量歷線之依據。

II、材料與方法

(I)資料來源

採用盧(1999)使用位序法建立台灣中部低山地區蓮華池之設計雨型歷線分配百分比及對數皮爾遜第三型分佈法建立不同降雨延時之頻率暴雨量、盧等(2001)使用修正位序法建立台灣中部高山地區畢祿溪之設計雨型歷線分配百分比及對數皮爾遜第三型分佈法建立不同降雨延時之頻率暴雨量、盧等(2004)使用修正位序法建立台灣南部低山地區扇平之設計雨型歷線分配百分比及對數皮爾遜第三型分佈法建立不同降雨延時之頻率暴雨量，及盧等(2007)使用修正位序法建立台灣南部低山地區福山之設計雨型歷線分配百分比及對數皮爾遜第三型分佈法建立不同降雨延時之頻率暴雨量，進行設計雨型歷線推估式分析及暴雨量推估式分析。

(II)暴雨量推估式建立

Bernard(1932)曾建立一個降雨強度－延時－頻率之經驗通式，以後雖有幾種不同型態的通式，但與 Bernard(1932)式相比較，大同小異，並沒有大幅度的差別，因而 Bernard 式(1)為基礎，建立降雨－延時－頻率推估式。

$$I_t^T = \frac{a_0 T^{a_1}}{t^{a_2}} \quad (1)$$

式(1)中的 I_t^T 為 T 頻率年 t 降雨延時之平均降雨強度(mm/h)，t 為降雨延時(h)，T 為頻率年(y)， a_0 、 a_1 、 a_2 為常數且正值。式(1)為降雨強度與頻率年及降雨延時之關係式。該式顯示降雨強度與頻率年呈正比關係，降雨強度與降雨延時呈反比關係。

今將式(1)等號兩端左右乘以降雨延時 t，等號左端 $I_t^T \times t$ 為降雨延時之平均降雨強度乘以降雨延時，故應等於降雨延時之降雨量 P_t^T 。

$$P_t^T = a_0 T^{a_1} t^{1-a_2} \quad (2)$$

式(2)的 P_t^T 為 T 頻率年 t 降雨延時之降雨量(mm)，t 為降雨延時(h)，T 為頻率年(y)， a_0 、 a_1 、 $1-a_2$ 為常數。唯 $(1-a_2)$ 必須為大於 0，令 $a_3=1-a_2$ ，因而式(2)可改為下式。

$$P_t^T = a_0 T^{a_1} t^{a_3} \quad (3)$$

式(3)中的常數項 a_0 、 a_1 、 a_3 均為正值，故式(3)可顯示降雨量與頻率年

成正比，亦與降雨延時成正比。至於 a_0 ， a_1 ， a_3 三個常數的決定，可由式(3)等兩端取 10 為底的對數。

$$\log P_t^T = \log a_0 + a_1 \log T + a_3 \log t \quad (4)$$

式(4)可由複迴歸統計分析，以 $\log T$ 及 $\log t$ 為自變數， $\log P_t^T$ 為因變數，求出式(4)的 $\log a_0$ 、 a_1 及 a_3 。

(III)設計雨型歷線推估式之建立

假設設計雨型歷線為一單峰的曲線，雨峰前上升，雨峰後下降，且降雨強度百分比大時，降雨強度百分比隨時間而變化愈大，降雨強度百分比小時，降雨強度百分比隨時間而變化愈小，故降雨強度百分比變化率隨著降雨強度百分比變化，可用微分方程表示(盧等，2007)：

$$\frac{dI}{dt} = k \cdot I \quad (5)$$

式(5)中的， I 為降雨強度百分比(%)， dt 為一極為短暫時間(T)， dI/dt 為極短暫時間的降雨強度百分比變化率(%/T)， k 為降雨強度百分比變化率係數(1/T)。

將式(5)積分，可獲得如下式：

$$I = ce^{kt} \quad (6)$$

式(6)即為指數型設計雨型歷線預測公式，由於設計雨型歷線在雨峰前是上升，降雨強度百分比變化率係數 $k(1/T)$ ，屬於增大率，為正值係數。而設計雨型歷線在雨峰後是下降，降雨強度百分比變化率係數 $k(1/T)$ ，屬於減小率，為負值係數。 c 為常數(無因次)。

因而將雨峰前後的指數型設計雨型歷線預測公式分別如下：

雨峰前的指數型設計雨型歷線預測公式

$$I_b = c_b e^{k_b t} \quad (7)$$

式(7)中， I_b 為雨峰前的降雨強度百分比(%)， k_b 為雨峰前的降雨強度百分比變化率係數(1/T)，屬增大率係數，正值。 c_b 為雨峰前的常數(無因次)。

雨峰後的指數型設計雨型歷線預測公式

$$I_a = c_a e^{k_a t} \quad (8)$$

式(8)中， I_a 為雨峰後的降雨強度百分比(%), k_a 為雨峰後的降雨強度百分比變化率係數(1/T)，屬減小率係數，負值。 c_a 為雨峰後的常數(無因次)。

由於設計雨型歷線不管由雨峰前的指數型設計雨型歷線預測公式或雨峰後的指數型設計雨型歷線預測公式計算，在雨峰時間處會匯合，即相等，故式(7)與式(8)的關係，乃在雨峰時間($t=t_p$)處，式(7)等於式(8)。

$$c_b e^{k_b t_p} = c_a \cdot e^{k_a t_p} \quad (9)$$

將式(9)整理如下：

$$t_p = \frac{\ln(c_a/c_b)}{k_b - k_a} \quad (10)$$

故式(10)可知雨峰時間可由峰前段與峰後段的指數型設計雨型歷線式的係數與常數計算得到。

設計雨型歷線分配百分比形狀呈山峰狀，峰前段為上升曲線，峰後段為下降曲線。而指數型設計雨型歷線推估式峰前段式(7)及峰後段式(8)正好符合。

將式(7)與式(8)的等號兩端取 $e(2.7183)$ 為底的自然對數，如下式：

$$\ln I_b = \ln c_b + k_b t \quad (11)$$

$$\ln I_a = \ln c_a + k_a t \quad (12)$$

式(11)與式(12)， I_b 為峰前段設計雨型歷線降雨強度百分比推估值(%), I_a 為峰後段設計雨型歷線降雨強度百分比推估值(%), 由於本文的時間 (t) 採取小時為單位，故 t 為時間(h)， c_b 為峰前段的常數(無因次)， c_a 為峰後段的常數(無因次)， k_b 為峰前段的降雨強度百分比變化率係數(1/h)，屬正值， k_a 為峰後段降雨強度百分比變化率係數(1/h)，屬負值。

式(11)與(12)即線性方程式形態，可用直線迴歸統計分析，求出式(11)的 $\ln c_b$ 與 k_b ，及式(12) 的 $\ln c_a$ 與 k_a 。唯累加設計雨型歷線降雨強度百分比應為 100%，往往直線迴歸分析定出的 c_b (或 c_a) 與 k_b (或 k_a) 值，計算設計雨型歷線降雨量百分比推估值(I_b 或 I_a)，其累加設計雨型歷線降雨量百分比推估值($\sum I_b + \sum I_a$)，不太可

能正好 100%。因而迴歸分析法所得之 c_b (或 c_a) 與 k_b (或 k_a) 值，必須再以系統搜索原理(Hooke and Jeeves, 1961)之試誤法調整，即於 c_b (或 c_a) 與 k_b (或 k_a) 值的 $\pm 10\%$ 範圍內搜索移動調整，以確定累加設計雨型歷線降雨百分比推估值 ($\sum I_b + \sum I_a$) 為 100%，且峰前段與峰後段兩式在雨峰處要能吻合，才能合理的推估設計雨型歷線。

(IV) 設計雨型歷線推估式之驗證

將獲得的設計雨型歷線推估式之 c_b 為峰前段的常數 (無因次)、 c_a 為峰後段的常數 (無因次)、 k_b 為峰前段的降雨強度百分比變化率係數 (1/h)、 k_a 為峰後段的降雨強度百分比變化率係數 (1/h)，代入式 (10) 中，計算雨峰時間 t_p ，以驗證是否由係數與常數計算的雨峰時間 t_p 等於設計雨型歷線的雨峰時間 t_p 。

(V) 設計雨型歷線推估式之應用

將不同頻率年的暴雨總量乘以設計雨型歷線推估式計算的降雨強度百分比，即可獲得不同頻率年的暴雨設計雨型歷線。

III、結果與討論

(I) 暴雨量推估式建立

茲將福山、蓮華池、畢祿溪、扇平地區暴雨量推估式列表如表 1，式(13)-(16) 的 P_t^T 為 T 頻率年 t 降雨延時之降雨量(mm)，t 為降雨延時(h)，其適用範圍 6~72 小時，T 為頻率年(y)，其適用範圍 2~100 年， R^2 相關係數達 0.95-0.97 間，相關性極高。

另將式(13)-(16)的降雨量推估式之推估值與以對數皮爾遜等 III 型分佈法(LP3) 之結果相比較如圖 2，可知本文建立的暴雨量推估式，雖未能與對數皮爾遜第 III 型分佈法的 1:1 線段完全吻合，但推估式之推估值尚可接受。

表 1. 福山、蓮華池、畢祿溪、扇平地區暴雨量推估式

Table1. Design storm rainfall estimated equations at the Fushan, Lienhuachih, Piluchi, and Shanping area of western Taiwan

地區	推估式編號	暴雨量推估式(mm)
福山	13	$P_t^T = 71 t^{0.51} T^{0.23}$, $R^2 = 0.96$, $n = 40$
蓮華池	14	$P_t^T = 76 t^{0.25} T^{0.39}$, $R^2 = 0.96$, $n = 32$

畢祿溪	15	$P_i^T = 59 t^{0.40} T^{0.28}$, $R^2 = 0.95$, $n = 40$
扇平	16	$P_i^T = 69 t^{0.47} T^{0.19}$, $R^2 = 0.97$, $n = 32$



圖 1. 福山、蓮華池、畢祿溪、扇平位置

Fig.1. Location of Fushan, Lienhuachi, Piluchi, and Shanping

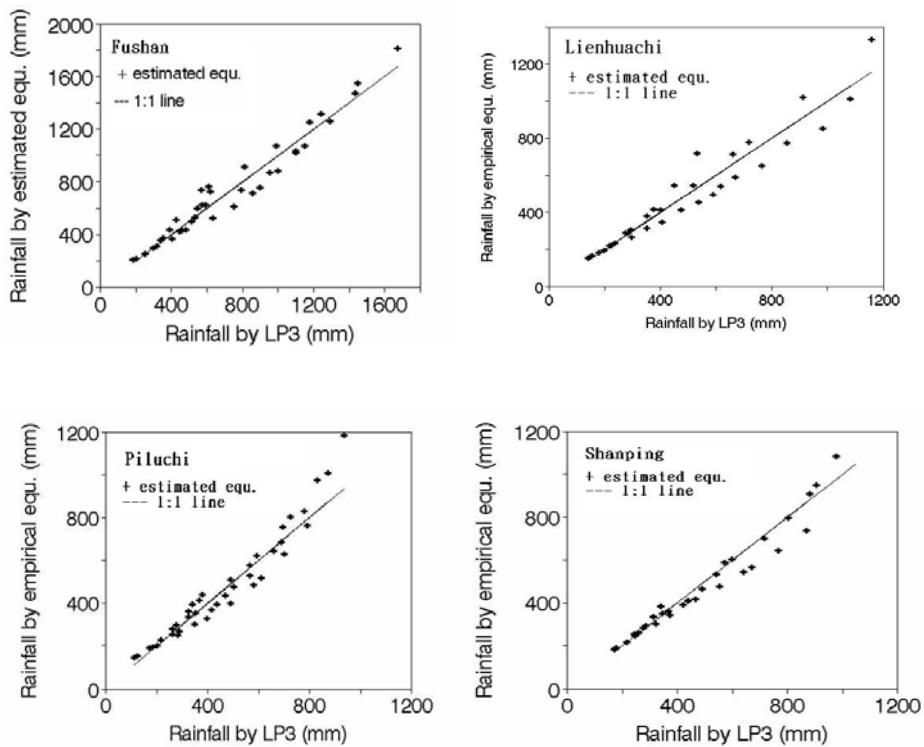


圖 2. 福山、蓮華池、畢祿溪、扇平地區採用經驗推估式(+)及對數皮爾遜第三型分佈法(—)推估降雨量之比較

Fig.2. Comparison of rainfall amount from empirical equations (+) and log-Pearson type III distribution (—) at the Fushan, Lienhuachih, Piluchi, and Shanping area of western Taiwan

(II)設計雨型歷線推估式之建立

茲將福山、蓮華池、畢祿溪、扇平地區不同降雨延時之設計雨型歷線推估式列表如表 2。由表 2 之式 (17) - (52)，計算 I_b 的推估式為峰前段指數型設計雨型歷線推估式， I_b 值為峰前段降雨強度百分比推估值(%)，計算 I_a 的推估式為峰後段指數型設計雨型歷線推估式， I_a 值為峰後段降雨強度百分比推估值(%)， t 為時間(h)。這些推估式的 r^2 相關性，均達 0.96 以上，顯示相關性極顯著。且計算峰前段 I_b 的推估式，其峰前段的降雨強度百分比變化率係數 k_b (1/h) 值，均為正值，計算峰後段 I_a 的推估式，峰後段的降雨強度百分比變化率係數 k_a (1/h) 值，均為負值，顯然均符合本文理論分析的推論。至於式 (17) - (52) 的峰前段常數 c_b 值與峰後段常數 c_a 值為無因次。再者式 (17) - (52) 之峰前段設計雨型歷線推估式的終止時間與峰後段設計雨型歷線推估式的起始時間，為雨峰時間 t_p 。

表 2. 福山、蓮華池、畢祿溪、扇平地區不同降雨延時設計雨型歷線推估式

Table 2. Design hyetograph estimated equations of different durations at the Fushan, Lienhuachih, Piluchi, and Shanping area of Taiwan

地區	降雨延時(h)	推估式編號	設計雨型歷線推估式(%)	r^2	n
福山	6	17	$I_b = 9.02 e^{0.39 t}, t \leq 3$	0.99	3
		18	$I_a = 111.76 e^{-0.449 t}, t \geq 3$	0.97	4
	12	19	$I_b = 3.598 e^{0.38 t}, t \leq 4$	0.99	4
		20	$I_a = 36.606 e^{-0.1999 t}, t \geq 4$	0.96	9
	24	21	$I_b = 1.0389 e^{0.199 t}, t \leq 12$	0.98	12
		22	$I_a = 155.25 e^{-0.2182 t}, t \geq 12$	0.97	13
	48	23	$I_b = 0.0489 e^{0.18682 t}, t \leq 28$	0.98	28
		24	$I_a = 1194.2 e^{-0.174 t}, t \geq 28$	0.98	21
72	25	$I_b = 0.0097 e^{0.1691 t}, t \leq 40$	0.98	40	
	26	$I_a = 6637 e^{-0.1668 t}, t \geq 40$	0.99	33	
蓮華池	6	27	$I_b = 4.3361 e^{0.722 t}, t \leq 3$	0.97	3
		28	$I_a = 273.97 e^{-0.66 t}, t \geq 3$	0.99	4
	12	29	$I_b = 0.5762 e^{0.758 t}, t \leq 5$	0.99	5
		30	$I_a = 159.75 e^{-0.367 t}, t \geq 5$	0.98	8

畢祿溪	24	31	$I_b = 0.154e^{0.318 t}, t \leq 15$	0.98	15
		32	$I_a = 10038 e^{-0.421 t}, t \geq 15$	0.98	10
	72	33	$I_b = 0.002207e^{0.2184 t}, t \leq 39$	0.99	39
		34	$I_a = 71460 e^{-0.225 t}, t \geq 39$	0.98	34
	6	35	$I_b = 6.2471 e^{0.38 t}, t \leq 4$	0.99	4
		36	$I_a = 179.83e^{-0.46 t}, t \geq 4$	0.99	3
	12	37	$I_b = 3.829e^{0.175 t}, t \leq 8$	0.99	8
		38	$I_a = 288.2e^{-0.365 t}, t \geq 8$	0.99	5
	24	39	$I_b = 1.226e^{0.1935 t}, t \leq 11$	0.98	11
		40	$I_a = 70.4e^{-0.1747 t}, t \geq 11$	0.99	14
扇平	48	41	$I_b = 0.119e^{0.1627 t}, t \leq 26$	0.98	26
		42	$I_a = 429.8e^{-0.153 t}, t \geq 26$	0.98	23
	72	43	$I_b = 0.037e^{0.1473 t}, t \leq 36$	0.99	36
		44	$I_a = 1650.5e^{-0.15 t}, t \geq 36$	0.99	37
	6	45	$I_b = 3.1772 e^{0.60 t}, t \leq 4$	0.97	4
		46	$I_a = 400.24e^{-0.609 t}, t \geq 4$	0.99	3
	12	47	$I_b = 2.226e^{0.379 t}, t \leq 6$	0.99	6
		48	$I_a = 262.48e^{-0.416 t}, t \geq 6$	0.96	7
	24	49	$I_b = 0.84035e^{0.1468 t}, t \leq 18$	0.98	18
		50	$I_a = 34285 e^{-0.443 t}, t \geq 18$	0.98	7
	72	51	$I_b = 0.02458e^{0.1047 t}, t \leq 55$	0.97	55
		52	$I_a = 1.3465 \times 10^8 e^{-0.303 t}, t \geq 55$	0.98	18

* I_b 為峰前段設計雨型歷線降雨強度百分比推估值(%), I_a 為峰後段設計雨型歷線降雨強度百分比推估值(%), t 為時間(h)。

(III)設計雨型歷線推估式之驗證

茲將福山、蓮華池、畢祿溪、扇平地不同降雨延時之設計雨型歷線推估式其峰前段的降雨強度百分比變化率係數 k_b 值、峰後段的降雨強度百分比變化率係數 k_a 值、峰前段的常數 c_b 值、峰後段的常數 c_a 值、雨峰時間等列表如表 3，同時以式 (10) 計算雨峰時間 t_p ，亦列表如表 3。由表 3 數據可知，以式 (10) 計算的雨峰時間 t_p 相等於設計雨型歷線的雨峰時間 t_p ，顯示由迴歸統計分析，建立設計雨型歷線推估式的係數值與常數值，應屬合理。

表 3. 福山、蓮華池、畢祿溪、扇平地不同降雨延時設計雨型歷線推估式之係數與常數計算的雨峰時間 t_p

Table 3. The time to rainfall peak calculated by coefficients and constants of design hyetograph estimated equations from different durations at the Fushan, Lienhuachih, Piluchi, and Shanping area of western Taiwan

地區	降雨延時 (h)	峰前常數 c_b	峰後常數 c_a	峰前係數 $k_b(h^{-1})$	峰後係數 $k_a(h^{-1})$	式(10)之計算雨峰時間(h)	雨型歷線的雨峰時間(h)
福山	6	9.02	111.76	0.39	-0.449	3	3
	12	3.598	36.606	0.38	-0.1999	4	4
	24	1.0389	155.25	0.199	-0.2182	12	12
	48	0.0489	1194.2	0.18682	-0.174	28	28
	72	0.0097	6637.0	0.1691	-0.1668	40	40
蓮華池	6	4.3361	273.97	0.722	-0.66	3	3
	12	0.5762	159.75	0.758	-0.367	5	5
	24	0.154	10038	0.318	-0.421	15	15
	72	0.002207	71460	0.2184	-0.225	39	39
畢祿溪	6	6.247	179.83	0.38	-0.46	4	4
	12	3.829	288.2	0.175	-0.365	8	8
	24	1.226	70.4	0.1935	-0.1747	11	11
	48	0.119	429.8	0.1627	-0.153	26	26
	72	0.037	1650.5	0.1473	-0.15	36	36
扇平	6	3.177	400.24	0.61	-0.609	4	4
	12	2.226	262.48	0.379	-0.416	6	6
	24	0.84035	34285	0.1468	-0.443	18	18
	72	0.02458	134650000	0.1047	-0.303	55	55

$$* \text{計算雨峰時間 } t_p = \frac{\ln(c_a/c_b)}{k_b - k_a}$$

(IV)設計雨型歷線推估式之應用

本文以蓮華池地區為例，如何運用不同頻率年的暴雨總量乘以設計雨型歷線推估式計算的降雨強度百分比，從而獲得不同頻率年的暴雨設計雨型歷線。關於不同頻率年的暴雨總量資料來源，比較容易獲得，可由氣象局的雨量年報或已出版的氣象水文報告查出，本文採用表 1 之蓮華池地區暴雨量推估式(14) $P_t^T = 76 t^{0.25} T^{0.39}$ ， $R^2 = 0.96$ ， $n = 32$ ，式(14)的 P_t^T 為 T 頻率年 t 降雨延時之降雨量(mm)，t 為降雨延時(h)，其適用範圍 6~72 小時。

現若欲推算 100 年頻率年 24 小時的設計雨型歷線，則先將式(14)的頻

率年 T 以 100 置換，降雨延時 t 以 24 置換，則式(14)的 100 年頻率年 24 小時降雨延時之暴雨總量 P_t^T 等於 $76 \times 24^{0.25} \times 100^{0.39} = 1014$ ，此時可知蓮華池地區 100 年頻率年 24 小時降雨延時之暴雨總量為 1014mm。

由表 2 之式(31) 蓮華池地區 24 小時峰前段指數型設計雨型歷線推估式，計算第 1-15 小時峰前段的設計雨型歷線分配比率(%)，及由表 2 之式(32) 蓮華池地區 24 小時峰後段指數型設計雨型歷線推估式，計算第 16-24 小時峰後段的設計雨型歷線分配比率(%)，結果如表 4 及圖 3。再以蓮華池地區 100 年頻率年 24 小時降雨延時之暴雨總量 1014mm 乘以峰前段與峰後段的設計雨型歷線分配比率(%)，即可獲得蓮華池地區 100 年頻率年 24 小時設計雨型歷線降雨量(mm)分配，亦如表 4 及圖 3。故使用暴雨總量與指數型設計雨型歷線降雨比率推估公式，以計算設計雨型歷線，可方便於 Microsoft excel 的試算表或自行編寫電腦程式計算設計雨型歷線。

表 4. 蓮華池地區 100 年 24 小時降雨延時設計雨型歷線比率與降雨量分配

Table 4. Ratio and rainfall of design hyetograph in 24-hour duration and 100 recurrence years at the Lienhuachi area of Taiwan

時間(hr)	降雨比率(%)	降雨量(mm)
1	0.21	2.1
2	0.29	2.9
3	0.40	4.1
4	0.55	5.6
5	0.76	7.7
6	1.04	10.5
7	1.43	14.5
8	1.96	19.9
9	2.69	27.3
10	3.70	37.6
11	5.09	51.6
12	7.00	70.9
13	9.61	97.5
14	13.21	134.0
15	18.16	184.1
16	11.92	120.9
17	7.82	79.3
18	5.14	52.1
19	3.37	34.2

20	2.21	22.4
21	1.45	14.7
22	0.95	9.7
23	0.63	6.3
24	0.41	4.2

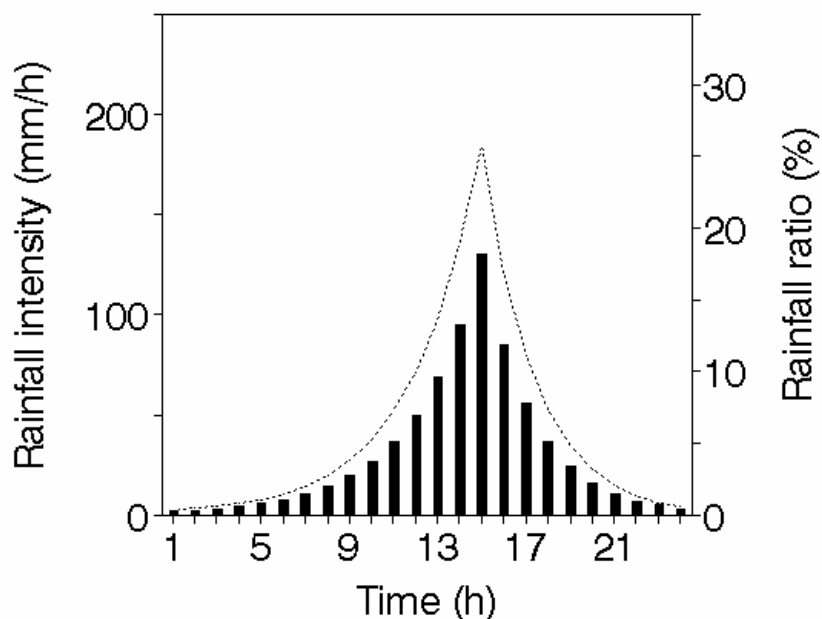


圖 3. 蓮華池地區 100 年 24 小時降雨延時設計雨型歷線降雨比率（柱狀圖■）與降雨量分配（點線圖⋯）

Fig. 3. Ratio (■) and rainfall (⋯) of design hyetograph in 24-hour duration and 100 recurrence years at the Lienhuachi area of Taiwan

IV、結論

本文進行指數型設計雨型歷線與暴雨量推估式理論分析，選擇台灣西部山區福山、蓮華池、畢祿溪及扇平地區降雨資料進行分析，建立西部山區指數型設計雨型歷線與暴雨量推估式，予以驗證，同時舉例如何應用於計算設計雨型歷線，俾供台灣西部山區無雨量紀錄地區推估流量歷線之依據。

(一) 以理論推導的雨峰時間 t_p 關係式，以計算雨峰時間 t_p ，相等於設計雨型歷線的雨峰時間 t_p ，顯示由迴歸統計分析，建立設計雨型歷線推估式的係數值與常數值，應屬合理。

(二) 以不同頻率年的暴雨總量乘以設計雨型歷線推估式計算的降雨強度百分比，以獲得不同頻率年的暴雨設計雨型歷線，可方便於 Microsoft excel 的試算表或自行編寫電腦程式計算設計雨型歷線，頗為簡便。

V、謝誌

本研究承行政院農業委員會 97 農科-7.3.1-森-G1 計畫經費提供，傅鶴翹、黃榮俊、王德華、邱之偉先生協助，謹此致謝。

VI、參考文獻

- 王如意、鄭昌奇 (1982) 烏溪國姓水庫可行性規劃(7)水文分析。台灣省水利局，143 頁。
- 台灣省水利局 (1982) 水文資料分析與電子計算機應用手冊。台灣省水利局編印，124 頁。
- 余濬 (1988) 降雨設計雨型之研究。國立台灣大學土木工程學研究碩士論文，122 頁。
- 徐享崑、何智武 (1992) 山地集水區雨型分佈及暴雨延時統計分析(II)。農委會編印，林業特刊第 40 號，80 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，141~157 頁。
- 徐享崑、游保杉 (1993) 雨量時間分佈之研究。國立成功大學水利暨海洋工程研究所刊印，101 頁。
- 張守陽、林國峰 (1994) 台灣北部降雨特性與時間分佈之研究-以二十四小時延時為例。第七屆水利工程研討會論文集，國立台灣海洋大學編印，D115~D124 頁。
- 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、胡蘇澄 (2001) 畢祿溪地區不同降雨延時之設計雨型歷線。中華林學季刊 34(2)：295-310。
- 盧惠生、周玉奇、黃良鑫、林壯沛、林介龍 (2004) 扇平地區不同降雨延時之設計雨型歷線。坡地防災學報 3(1)：39-58。
- 盧惠生、黃良鑫、林壯沛、林介龍、王秋嫻 (2007) 福山地區不同降雨延時之設計雨型歷線推估。中華水土保持學報，38(4):399-415。

- Bernard, M.M. (1932) Formulas for rainfall intensities of long durations. *ASCE* 96:592-624.
- Hooke, R. and T.A. Jeeves (1961) Direct search solutions of numerical and statistical problems. *Jour. Assoc. Comput. Mach.* 8(12):212-229.
- Huff, F.A. (1967) Time distribution of rainfall in heavy storm. *Water Resour. Res.*3(4):1007-1019.
- Pilgrim, D.J. and I. Cordery (1975) Rainfall temporal patterns for design floods. *J. Hydraul. Div., ASCE* 101 (Hy1) : 81-95.
- Yen, B.C. and V.T. Chow (1980) Design hyetographs for small drainage structure. *J. Hydraul. Div. ASCE* 106(Hy6) : 1055-1076.

蓮華池集水區勢能蒸發散量與實際蒸發散量之比較

羅紹倫¹ 陳明杰² 黃正良³

【摘要】蒸發散量的估算是瞭解森林集水區水文收支的重要條件。本研究蒐集蓮華池 2 號集水區 1996 年至 2007 年的降雨量與逕流量觀測資料，應用水平衡法計算實際蒸發散量 (AET)。並且引用蓮華池氣象站的輻射、氣溫、日照時間、溼度等氣象因子，依照不同的條件代入 Penman-Monteith、Thornthwaite、Hargreaves、Hamon、Priestley-Taylor 等五種方法估算勢能蒸發散量 (PET)，估算結果與 AET 比較，探討估算方法的適合性。

經計算結果，蓮華池 2 號集水區 1996 年~2007 年 (剔除觀測資料不正確的 2004 年) 的 AET 介於 1090.7 mm~1529.6 mm，高於氣象站之蒸發皿蒸發量。月份之 AET 受到降雨量的影響，通常，濕季期間的 AET 高於 PET，乾季期間則相反。五種 PET 估算方法中，Hargreaves、Priestley-Taylor 等兩種方法的估算結果較接近於 AET，將 11 年的資料計算結果取平均，AET 為 1268.8 mm，Hargreaves 方法估算的 PET 為 1309.1 mm，相對誤差為 3.2%；Priestley-Taylor 方法 (溼季之 α 值為 1.50、乾季為 0.64) 估算結果為 1213.7 mm，相對誤差為 -4.3%；常用之 Thornthwaite 方法 PET 估算結果為 1011.8 mm，相對誤差為 -20.3%。

【關鍵詞】蓮華池集水區、勢能蒸發散、實際蒸發散、水平衡方法。

A COMPARISON OF POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION AND ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION IN LIENHUACHIH WATERSHED

Shao-lun Luo¹ Ming-chieh Chen² Jeen-lian Hwong³

【Abstract】 Estimated evapotranspiration is key terms of understanding the characteristics of hydrologic budget of forest watershed. In this research, rainfall and

1.臺灣大學森林環境暨資源學系研究生。

Graduate student, School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University.

2.臺灣大學森林環境暨資源學系教授，通訊作者。

Professor, School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan University.

Corresponding author. E-mail: jackchen@ntu.edu.tw

3.農委會林業試驗所蓮華池研究中心主任。

Chief, Lienhuachih Research Center, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture.

discharge data of Lienhuachih experimental watershed No.2 (LHC2) from 1996 to 2007 were collected that to calculate actual evapotranspiration (AET) by water balance method. Besides, meteorological factors involving solar radiation, air temperature, daylight hours, relative humidity, etc. of Lienhuachih weather station were also collected. According to different estimated conditions, meteorological factors were separately taken into five methods of Penman-Monteith, Thornthwaite, Hargreaves, Hamon and Priestley-Taylor to estimate potential evapotranspiration (PET). Compare the results of AET and PET that to investigate the suitability of estimated methods.

From the calculated results, picking out the incorrect data of 2004, annual AET range of LHC2 from 1996 to 2007 is 1090.7 mm to 1529.6 mm that is higher than the pan evaporation of weather station. Monthly AET was affected by rainfall amount. Generally, AET is higher than PET in wet seasons, but lowers in dry seasons. From the estimated PET results, Hargreaves and Priestley-Taylor methods were relatively close to AET. Based on 11 years data, the average of AET is 1268.8 mm. The average of estimated PET by Hargreaves method is 1309.1 mm and relative error to AET is 3.2%; Priestley-Taylor method, coefficient α in wet season is 1.50 and dry season is 0.64, is 1213.7 mm and relative error is -4.3% respectively. Thornthwaite method, ordinarily used in Lienhuachih area is 1011.8 mm and relative error is -20.3%.

【 Key words 】 Actual evapotranspiration, Lienhuachih watershed, potential evapotranspiration, water balance method.

I. 前言

森林集水區發生降雨時，部分雨水被樹冠層截留，部分雨水則經由幹流（Stemflow）、穿落雨（Throughfall）降落在地面上，部分滯蓄在地表或經入滲作用貯存在土壤孔隙中。土壤孔隙中滲透移動的水分，則將形成逕流流出。而樹冠層截留、地表滯蓄，以及土壤孔隙貯存的水分則會經由蒸發作用，以及植物的蒸散作用輸回大氣中，完成整個水文循環。蒸發(evaporation)是指土壤及植物體表面、水體等的水分以氣態形式擴散到大氣中的過程，而蒸散(transpiration)則是植物根部吸收土壤中的水分輸送到葉部，水分從植物葉面的氣孔以氣態形式擴散到大氣中過程，兩者會受到太陽輻射、氣壓、氣溫、溼度、風速、日照長短等因

素的影響。

通常，集水區的蒸發與蒸散作用同時進行，兩者的量很難應用觀測的方法予以明確區分。因此，從水平衡的觀點，蒸發與蒸散視為集水區水分損失的部分，將兩者合稱為蒸發散(evapotranspiration)。其次，蒸發散量也可以作為估算作物需水量之基本資料，供精確估算灌溉計畫用水量，以提昇灌溉管理技術，及有效率運用農業水資源(陳獻章，2006)。蒸發散在整個水文研究上佔有重要的一環，然而在森林地區的測量以及估算方面，因各個地區的地文、植物、氣候條件等的差異，很難找到一個比較合適的方法。若從水平衡的觀點，降雨量、逕流量以及土壤中水分貯存變化等的觀測是否正確，將影響到蒸發散的估算，或每年降雨量不一致，則需長時間的觀測資料求得年平均蒸發散量。若利用經驗公式估算，每個方法所需要的參數項目不一，且引用不同地區發展出來的經驗公式有適合性的問題存在。

蒸發散又可區分為勢能蒸發散(potential evapotranspiration；PET)以及實際蒸發散(actual evapotranspiration；AET)。勢能蒸發散是指在水分充分供應下最大的蒸發散量，一般是由經驗公式來估算，應用時有其地區性的限制，相同地區不同的公式所估算出來的結果不盡相同，甚至有時需修正原公式的係數來擬合。實際蒸發散也就是指在實際的氣候狀況以及地表水分條件下的蒸發散量，可由實際的觀測資料推算得知。例如使用土壤滲漏計(Lysimeter)，或是量水堰的逕流量、降雨量觀測等，應用水平衡方法推算蒸發散量。然而，降雨量時間、空間變異的影響，地質構造條件影響逕流量觀測，以及降雨條件影響土壤水分貯存等因素，推算的實際蒸發散將產生變化。

國內勢能蒸發散量相關的研究，夏禹九、林淵霖(1981)應用 Thornthwaite 方法估算蓮華池地區的勢能蒸發散量；陳信雄等(1997)應用 Hamon 方法估算福山地區的勢能蒸發散量；夏禹九與黃正良(1999)應用 Penman、Hamon、Thornthwaite 方法估算福山地區的勢能蒸發散量；施鈞程(2003)應用 Hamon、Thornthwaite 方法估算蓮華池、畢祿溪地區的勢能蒸發散量，並與水平衡方法推算的實際蒸發散量做比較。位於台灣中部的蓮華池森林試驗集水區，有著水文及氣象之長期觀測資料，以往相關的研究主要是以 Thornthwaite 方法估算集水區的勢能蒸發散量，估算結果尚缺與集水區水文觀測資料作對照。其次，除了應用 Thornthwaite 方法外，其他幾個國際間常用的經驗公式之適合性尚缺探討。

本研究使用幾個國際間常用的方法估算蓮華池地區的勢能蒸發散量，並且與

試驗集水區降雨量、逕流量的觀測資料，應用水平衡方法推算實際蒸發散量作比較，希望藉此能尋找出適合於蓮華池地區的估算方法，以供爾後森林集水區水文研究及集水區經營的參考。

II. 研究材料與方法

(I) 研究區域概述

林業試驗所蓮華池研究中心位於南投縣魚池鄉五城村，北緯 23° 55'、東經 120° 55'，海拔高介於 576~925 m，面積 461.04 ha。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，質地為坩質粘壤土或坩質粘土 (蔣先覺等，1993)。蓮華池氣象站從 1961 年 1 月開始觀測，氣象資料月份統計結果如表 1。

表 1. 蓮華池氣象站氣象資料月份統計(1961-2007) (陸象豫等，2008)

Table 1. Statistics of monthly meteorological data of Lienhuachih weather station

	Average Rainfall (mm)	Average Rainy Day	Average Daily Temp. (°C)	Average Daily Max.temp. (°C)	Average Daily Min.temp. (°C)	Average Relative Humidity (%)	Average Wind Velocity (m/sec)	Average Radiation (MJ/m ²)	Average ET. (mm)
Jan	47.7	7.7	14.8	21.0	10.2	85.8	0.39	277.18	55.7
Feb	86.1	8.9	16.1	22.0	11.5	87.1	0.41	289.89	56.7
Mar	103.6	10.4	18.3	24.1	13.8	87.0	0.47	346.89	75.5
Apr	138.2	10.8	21.1	26.5	16.9	87.2	0.47	387.03	83.5
May	322.4	16.4	23.2	28.1	19.2	88.4	0.42	419.67	84.5
June	510.3	19.6	24.4	29.0	20.4	88.4	0.42	400.98	86.5
July	373.1	16.6	25.2	30.2	20.9	86.3	0.46	485.44	108.2
Aug	404.2	17.7	24.8	29.7	20.7	88.0	0.39	430.82	97.2
Sept	196.0	11.4	24.1	29.0	19.8	88.0	0.40	394.26	89.9
Oct	45.8	5.1	22.4	27.6	17.9	86.8	0.38	373.58	83.4
Nov	24.4	4.6	19.5	25.2	15.0	86.5	0.38	307.34	65.6
Dec	33.3	5.2	16.1	22.2	11.3	85.4	0.36	300.47	52.4
Avg.			20.8	26.2	16.5	87.1	0.41	367.8	
Total	2285	134.1							939.1

氣象站觀測的項目包括氣溫、乾濕球溫度、最高氣溫、最低氣溫、降雨量、蒸發量、日輻射、風向、風速等。年平均降雨量約 2285.0 mm，4 月至 9 月為濕季，降雨量約佔全年的 85.1%，10 月至翌年 3 月降雨水佔全年的 14.9%，其中 11 月

份降雨量最少。平均降雨天數為 134 日。年平均氣溫 20.8°C，7 月份平均氣溫 25.2°C，1 月份平均氣溫 14.8°C。年平均蒸發量為 939.1 mm，年平均相對溼度為 87.1%(陸象豫等，2008)。

從 1966 年起陸續設置 1、2、3、4、5 號等五處森林試驗集水區，其中第 2 號集水區面積最大(16.23 ha)，第 3 號面積最小(3.40 ha)，各集水區平均坡度自 40% 至 69% 不等，海拔高度介於 723~812 m 不等(表 2)。目前，五個集水區的量水堰均持續觀測流量資料，其中，2 號集水區的觀測資料為本論文的研究對象。另外，4 號與 5 號集水區為相同方位且為併對集水區，在 1978 年 11 月至隔年 3 月，4 號集水區進行皆伐後，隨即人工栽植杉木，5 號則繼續維持天然常綠闊葉混生林的原貌，以比較不同林相的森林水文特性(黃正良等，2002)。

表 2. 蓮華池試驗集水區地形因素 (整理自葛錦昭等，1978)

Table 2. Physiographic factors of Lienhuachih experimental watersheds

Item	Watershed				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Area (ha)	3.53	16.23	3.40	5.86	8.39
Circumference of watershed (m)	750	1910	780	1000	1300
Main stream length (m)	308	603	270	380	420
Average slope (%)	63	56	69	40	41
Average altitude (m)	741	812	723	763	757
Aspect	SE	NE	SE	SE	SE

(II) 植群概況

區域內有 214 ha 為人工林，樹種包括杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、台灣肖楠(*Calocedrus formosana*)、相思樹(*Acacia confuse*)、楓香(*Liquidambar formosana*)、台灣欒(*Zelkova serata*)等。天然闊葉林面積約為 269 ha，主要為樟科以及殼斗科構成的樟櫛林。五個試驗集水區植物相無明顯差異，但在 1 號及 2 號集水區則以三斗石櫟(*Pasania hancei* var. *ternaticupula*)、南投石櫟(*Pasania natoensis*)、短尾葉石櫟(*Pasania harlandii*)、苦扁桃葉石櫟(*Lithocarpus amygdalifolius*)、厚殼桂(*Cryptocarya chinensis*)、香楠(*Machilus zuihoensis*)、南投黃肉楠(*Litsea acuminata*)、台灣紅豆樹(*Ormosia formosana*)、木荷(*Schima superba*)等較為優勢。林下植物有伯拉木(*Blastus cochinchinensis*)、雞屎樹(*Lasianthus obliquinervis*)、九節木(*Psychotria rubra*)、廣葉鋸齒雙蓋蕨(*Diplazium dilatatum*)等(黃正良等，2002)。

(III) 勢能蒸發散估算方法介紹

本研究引用之勢能蒸發散估算方法分爲以 Penman (1948) 提出的公式爲基礎，經修正或是簡化的公式，包括 Penman-Monteith 方法、Priestley-Taylor 方法，以及以氣溫爲基礎的經驗公式，包括 Thornthwaite 方法、Hargreaves 方法、Hamon 方法，分別說明如下。

1. Penman-based 方法

(1) Penman-Monteith 方法

Penman (1948) 結合能量收支以及氣體動力學導出一估算公式，以淨輻射能、風速、氣溫、水蒸氣壓等資料估算開放水體表面的日勢能蒸發散量，公式的參數具有物理意義。Monteith (1965) 加入作物冠層阻抗以及氣體動力阻抗參數 (Canopy and aerodynamic resistance parameters)，修正 Penman 公式中高度 2 m 之風速函數 (E_0)，即爲 Penman-Monteith 公式。該公式經全世界 11 個乾濕地區、20 個國際著名蒸發散量經驗公式加以檢測評估後，由於結合作物冠層阻抗及空氣動力阻抗觀念，在 1990 年後獲美國土木工程學會推薦，並於 1994 年國際灌溉排水委員會頒布，同時亦是世界糧農組織 (FAO) 列爲估算勢能蒸發散的參考公式 FAO-56 PM (Allen et al., 1998)，公式中包含有提供蒸發散能量來源的輻射項，與驅動蒸發散量力量來源的空氣動力項。因爲以物理特性爲基礎，公式上所用到的參數均能與氣象、植物生理上的一些因子有相關聯繫，在解釋蒸發散現象的因果關係十分方便。FAO-56 PM 公式如下：

$$PET = \frac{\Delta \times 0.408 \times (R_n - S) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} u (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.337u)} \quad (1)$$

PET：勢能蒸發散量(mm/day)

Δ ：飽和蒸汽壓曲線梯度(kPa/°C)

γ ：乾濕計常數(kPa/°C)

u：高度 2 m 的風速(m/s)

T：高度 2 m 的日平均氣溫(°C)

e_s ：飽和水蒸汽壓(kPa)

e_a ：實際水蒸汽壓(kPa)

R_n ：淨輻射(MJ/m²/day)

S：土壤熱通量(MJ/m²/day)，估算日勢能蒸發散量時，通常假設S = 0 (Allen et al., 1998)

(2) Priestley-Taylor 方法

由於 Penman 公式是綜合空氣動力學和能量平衡原理，發展出來的估算勢能蒸發散量公式，主要應用於歐洲低海拔的濕潤地區。但由於世界各地的自然地理環境差異很大，Priestley and Taylor(1972)針對 Penman-Monteith 公式中的空氣動力學項目予以簡化，除了必須的淨輻射能項目之外，以無單位的經驗係數予以修正，並以 30 個無缺水 (water deficit) 之植物生長區域，應用水平衡方法推算出來的結果予以驗證(Stagnitti et al., 1989)。其公式如下：

$$PET = \alpha \times \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{R_n}{\lambda} \quad (2)$$

PET：日勢能蒸發散量(mm/day)

γ ：乾溼計常數(kPa/°C)

R_n ：淨輻射(MJ/m²/day)

λ ：水的蒸發潛熱(MJ/kg)， $\lambda=2.453$ MJ/kg，at 20°C

Δ ：飽和水蒸壓曲線梯度(kPa/°C)

α ：Priestley-Taylor 係數

Priestley and Taylor(1972)定 α 值為 1.26，是在測試過多種狀況之下，所決定的一個平均值。Gash and Stewart(1975)在英格蘭Norfolk的松林，在冠層乾燥時將 α 定為 0.64，溼潤時定為 1.50。De Bruin(1983)甚至認為Priestley-Taylor方法的 α 與表面阻抗(surface resistance； r_s)有關，在 $r_s = 0$ 時， $\alpha = 1.3$ ； $r_s = 60 \text{ s m}^{-1}$ 時， $\alpha = 1$ ； $r_s = 250 \text{ s m}^{-1}$ 時， $\alpha = 0.6$ 。本研究參考蓮華池地區 4 月至 9 月屬於濕潤期，將這段期間的 α 值定為 1.5；10 月至 3 月屬於乾燥期，將這段期間的 α 值定為 0.64，代入公式命為PT(1)；另外，維持原建議 α 值為 1.26，代入公式命為PT(2)，供比較何者適合於蓮華池地區。

2. Temperature-based 方法

(1) Thornthwaite 方法

Thornthwaite (1948) 利用氣象資料推導出來的勢能蒸發散量經驗公式，適用於雨量充沛地區。是指在水分供應無缺的條件下，利用氣溫資料估算月份勢能蒸發散量。公式如下：

$$PET = 16 \left(\frac{N}{30} \right) \left(\frac{10T_a}{I} \right)^a \cdot K \quad (3)$$

其中，PET：月份勢能蒸發散量(mm/month)

T_a：月平均氣溫(°C)

N：每個月的天數

I：年熱指數(annual heat index)

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_a}{5} \right)^{1.514} \quad (4)$$

a：乘冪

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.792 \times 10^{-2} I + 0.49239 \quad (5)$$

K：為校正日照時間長度的係數

本研究參考 Thornthwaite and Mather(1957)建立之 K 值與月份及緯度的關係，以內插方法推估蓮華池地區不同月份的 K 值，如表 3。

表 3. 蓮華池地區推估 Thornthwaite 方法之月份 K 值

Table 3. Estimated monthly K value of Thornthwaite 方法 for Lienhuachih area

Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
0.94	0.89	1.03	1.06	1.15	1.13	1.16	1.12	1.02	0.99	0.92	0.92

由於此公式只利用溫度當作參數來計算，而忽略了水平風速的影響，且實際輻射反應在溫度上的時間稽延未加以考慮，無方法表示輻射能量對蒸發散量的影響。但是因為溫度資料在各氣象站中的記錄最為普遍，且計算方法簡便，故在多數的地區常被使用。

(2) Hargreaves 方法

Hargreaves (1994)提出一個以最高溫度、最低溫度為條件之估算勢能蒸發散量的公式，表示如下：

$$PET = 0.0023 \cdot R_a \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + 17.8 \right) \quad (6)$$

其中，PET：日勢能蒸發散量(mm/day)

R_a：地球外輻射量 (extraterrestrial radiation) (mm/day)

$$R_a = 0.408 \frac{1440}{\pi} G_{sc} \cdot D_r \cdot (\omega_s \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s) \quad (7)$$

G_{sc}：太陽常數，G_{sc} = 0.082 MJ/m²/min

D_r ：地球與太陽相對距離（天文單位）

$$D_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right) \quad (8)$$

J ：太陽日

ω_s ：日沒的時角（rad）， $\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi + \tan \delta)$

ϕ ：緯度（rad）

δ ：太陽入輻射線與赤道面的夾角（rad）

T_{\max} ：一日的最高氣溫(°C)

T_{\min} ：一日的最低氣溫(°C)

(3) Hamon 方法

根據 Thornthwaite 公式，當平均氣溫低於 0°C 時，勢能蒸發散量會變成 0 mm(或低於 0 mm)。但 Hamon(1961)認為水分子在液體與氣體狀態之間的溫度以及壓力會影響到蒸發散的多寡，以飽和水氣密度來當作估算勢能蒸發散量的條件，提出經驗公式如下：

$$PET = 0.1397 \cdot D^2 \rho \quad (9)$$

其中，PET：日勢能蒸發散量(mm/day)

D ：以 12 hrs 為單位計算的日照時間

ρ ：飽和水汽密度(g/m³)

$$\rho = \frac{0.622 \times e_s}{R(T + 273.3)} \quad (\text{Bras, 1990}) \quad (10)$$

T ：日平均氣溫(°C)

e_s ：飽和蒸汽壓(kPa)

$$e_s = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \quad (11)$$

R ：氣體常數， $R = 2.876 \times 10^2 \text{ m}^2/\text{s}^2/\text{K}$

因此，使 ρ 值等號兩邊的單位都為g/m³，則計算公式可改寫成下式

$$\rho = \frac{21.63 \times e_s}{T + 273.3} \quad (12)$$

(IV) 估算勢能蒸發散量所需的氣象資料

本研究蒐集蓮華池氣象站 1996 年~2007 年的氣象資料，供代入上述五種方法，估算勢能蒸發散量（PET），五種方法使用的氣象資料整理如下（表 4）。

表 4. 五種 PET 估算方法所需的氣象資料

Table 4. Meteorological factors needed in five PET estimated methods.

方法	所需的氣象資料
Penman-Monteith	日平均氣溫(°C)、淨輻射(MJ/m ² /day)、溼度(%)、風速(m/s)
Priestley-Taylor	日平均氣溫(°C)、淨輻射(MJ/m ² /day)、溼度(%)
Thornthwaite	月平均氣溫(°C)
Hargreaves	一日的最高氣溫及最低氣溫(°C)
Hamon	日平均氣溫(°C)、日照時間(hr)

(V)推算實際蒸發散量

蒐集蓮華池 2 號集水區的降雨量、逕流量觀測資料，利用水平衡方法(water balance method)推算實際蒸發散量 (AET)，公式如下：

$$AET = P - Q \pm \Delta S \tag{13}$$

其中 P 為降雨量，Q 為逕流量， ΔS 是集水區內土壤水儲存的變化量；長期觀測之下， ΔS 的變化量很小時，一般都將其忽略，因此(12)式可改寫成如下：

$$AET = P - Q \tag{14}$$

上式，降雨量資料方面，蒐集蓮華池氣象站，以及設置於肖楠木屋教室旁的雨量計觀測資料，當作推算 AET 的基礎。並且，蒐集鄰近之中央氣象局日月潭氣象站的雨量資料，作為檢核的參考。逕流量資料則擷取集水區量水堰的水位記錄，利用水位流量公式計算之。蓮華池集水區量水堰堰口為三角形加上矩形之複合形堰口(圖 1)，使用之水位流量公式如下(陳明杰、陳信雄，1987)。

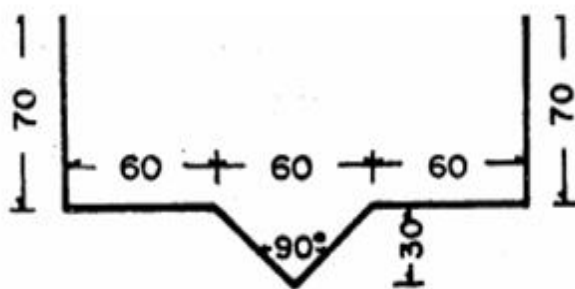


圖 1. 蓮華池 2 號集水區量水堰堰口形狀示意圖 (單位：cm)

Fig. 1. Sketching map of weir form of Lienhuachih watershed No. 2.

(1) 若水位高 $H < 0.30$ m，則採用(15)式計算流量：

$$Q = \frac{8}{15} C_1 \cdot \sqrt{2g} \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot H^{2.5} \quad (15)$$

(2) 若 $H \geq 0.30$ m，則採用(16)式計算流量：

$$Q = \frac{8}{15} C_1 \cdot \sqrt{2g} \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot H^{2.5} - \frac{8}{15} C_1 \cdot \sqrt{2g} \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot (H - h)^{2.5} + \frac{2}{3} C_2 \cdot \sqrt{2g} \cdot 2B \cdot (H - h)^{1.5} \quad (16)$$

Q：流量(m^3/sec)

C_1 、 C_2 ：修正係數，分別取 $C_1 = 0.58$ 、 $C_2 = 0.58$

α ：三角堰口的角度， $\alpha = 90^\circ$

H：總水位高(m)

h：三角堰口的水位高(m)

B：等於矩形堰口長度減去三角堰口的底部寬之後除以 2

g：重力加速度(m/s^2)

經蒐集整理 1996 年~2007 年期間的降雨量資料，以及 2 號集水區的逕流量資料，以水平衡方法推算 AET，並與五種方法估算的 PET 結果比較。以 AET 為基礎，計算五種估算方法估算結果的相對誤差，供比較五種估算方法的優劣。計算式如下：

$$RE = \frac{(P_i - O_i)}{O_i} \times 100\% \quad (17)$$

RE：相對誤差(%)

P_i ：年PET估算的數值(mm/yr)

O_i ：年AET計算的數值(mm/yr)

III. 結果與討論

(I) 降雨量資料整理

本研究蒐集設置於蓮華池肖楠木屋教室旁的雨量計，以及氣象站的雨量計觀測資料，當作水平衡方法推算實際蒸發散量的基礎。這兩個雨量計的位置直線距離不超過 300 m，且地形及周圍環境類似，因此降雨量觀測值理應差異不大。肖楠木屋教室旁的雨量計在 2001 年 8 月至 10 月，2004 年 8 月至 11 月，2006 年 5 月至 12 月等期間，因雨量計故障或其他原因，造成雨量資料遺失，因此以氣象站的資料補遺。其次，在資料整理過程發現，1996 年的 4 月、7 月，1999 年的 2

月、7月、8月，2000年的10月、11月，2001年的2月，2002年的5月，2005年的2月，2007年的7月等月份，兩個雨量計的資料出現相對誤差高於20%的情形。因此，另引用中央氣象局日月潭氣象站的雨量資料作為檢核，在相同年代月份的雨量，其中最接近日月潭氣象站的雨量者，當作研究地點的雨量。兩個雨量計除了上述之補遺與修正外，其他年代月份的雨量差異不大，則取其平均值當作研究地點的雨量。雨量資料經整理結果如表5。

表 5. 研究區域 1996 年至 2007 年修正後的月雨量資料（單位：mm）

Table 5. Adjusted monthly rainfall data of study area from 1996 to 2007. (unit: mm)

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Jan.	28.0	35.3	122.8	24.0	31.5	91.5	31.8	48.3	26.0	28.3	37.8	93.8
Feb.	41.0	114.8	408.8	0.0	211.5	0.5	2.1	11.5	82.3	186.0	5.8	27.8
Mar.	31.7	209.0	202.2	72.8	46.3	87.4	21.7	52.3	83.0	246.0	163.4	62.3
Apr.	200.0	51.8	342.3	44.7	287.0	161.0	9.1	206.3	118.3	137.8	231.6	169.0
May	668.1	353.5	339.2	318.6	177.0	277.9	203.0	142.5	252.8	433.5	309.0	222.5
Jun.	191.8	894.0	494.8	827.0	448.0	393.9	461.9	498.0	57.8	393.3	971.5	805.8
Jul.	392.0	539.5	117.9	487.2	256.7	709.0	391.0	219.3	1119.0	535.0	726.5	289.0
Aug.	853.7	338.0	391.7	530.5	330.7	139.4	197.8	252.8	686.5	635.3	101.0	695.3
Sept.	108.5	123.8	245.9	83.3	31.5	225.1	49.8	80.3	113.5	152.5	303.0	329.8
Oct.	25.0	4.4	173.4	32.5	77.0	42.8	18.5	94.3	16.0	38.3	0.0	323.0
Nov.	26.4	0.2	4.2	7.0	37.5	12.6	14.1	12.9	0.0	15.3	160.0	31.0
Dec.	7.1	13.3	53.5	68.0	70.8	9.9	86.2	0.0	74.5	13.0	50.5	3.0
Total	2573.3	2677.6	2896.7	2495.6	2005.5	2151.0	1487.0	1618.5	2629.7	2814.3	3060.1	3052.3

(II)蒸發散量與降雨量的關係

蓮華池 2 號集水區的水文資料分析結果，顯示年降雨量越高集水區的年逕流量也越高（圖 2），然而，年蒸發散量隨年降雨量增加而微幅增加，而兩者的相關性低（圖 3）。資料蒐集期間平均降雨量為 $2455.1 \text{ mm yr}^{-1}$ ，依圖 2 計算之平均流量為 $1183.6 \text{ mm yr}^{-1}$ 。在忽略土壤水儲存變化量的情況下，水平衡方法計算之平均實際蒸發散量（AET）為 $1271.5 \text{ mm yr}^{-1}$ 。對照夏禹九、林淵霖（1982）對蓮華池 2 號集水區分析的結果，1973 年至 1980 年期間的平均降雨量為 $2378.7 \text{ mm yr}^{-1}$ （3 號集水區的資料），平均流量為 $1182.1 \text{ mm yr}^{-1}$ ，平均 AET 為 $1196.5 \text{ mm yr}^{-1}$ ，本研究結果的 AET 稍高。統計蓮華池氣象站 1971 年至 1980 年的平均氣溫為 20.3°C ，而 1996 年至 2007 年的平均氣溫為 20.7°C 。通常蒸發散量隨氣溫的升高而增高，研究期間的平均氣溫較高，可能是造成推算之 AET 較高的原因。

服部（1992）整理以往森林集水區以水平衡方法推算的年蒸發散量與年降雨

量的關係（圖 4），當降水量 400~4000 mm yr⁻¹時，則蒸發散量為 300~1800 mm yr⁻¹，降雨量超過 800 mm yr⁻¹時，隨林分、氣象條件等蒸發散量的變化幅度較大。除了熱帶、亞熱帶林地區之外，其他地區之蒸發散量最大值約為 1200 mm yr⁻¹。Doley(1981)指出，熱帶、亞熱帶林地區蒸發散量往往超過 1000 mm yr⁻¹，最大值可達 1750 mm yr⁻¹。本研究以水平衡方法推算的AET大都在 1100~1300 mm yr⁻¹範圍，基本上是合理的。

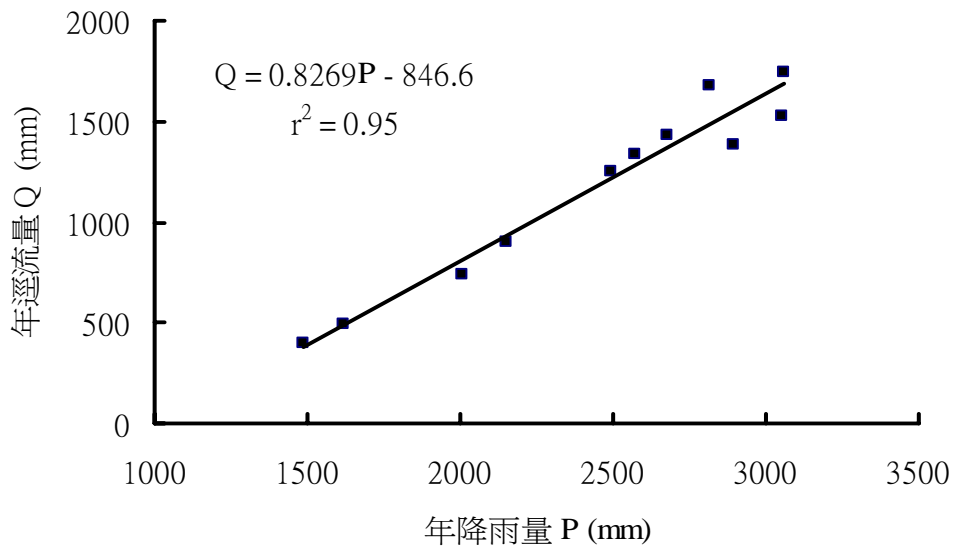


圖 2. 蓮華池 2 號集水區年逕流量與年降雨量的關係

Fig. 2. Relationship between the annual discharge and annual rainfall at Lienhuachih watershed No. 2.

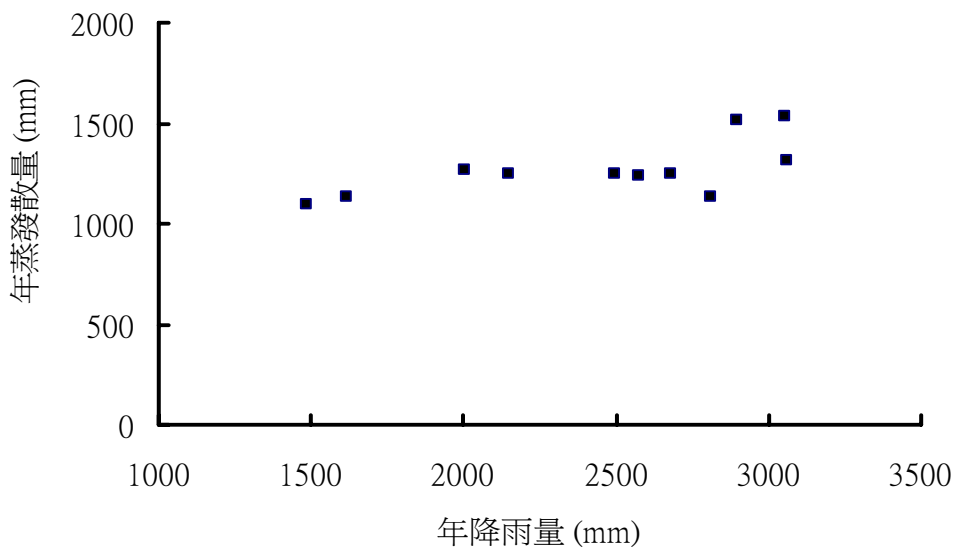


圖 3. 蓮華池 2 號集水區年蒸發散量與年降雨量的關係

Fig. 3. Relationship between the annual evapotranspiration and annual rainfall at Lienhuachih watershed No. 2.

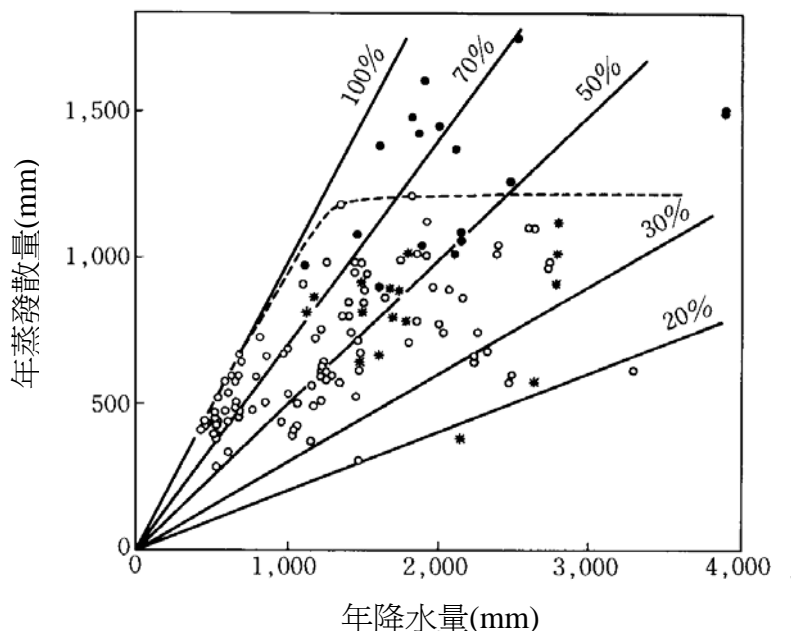


圖 4. 年蒸發散量與年降水量的關係（服部，1992）

Fig. 4. Relationship between the annual evapotranspiration and annual rainfall.

(III) 實際蒸發散量與勢能蒸發散量比較

比較 1996 年至 2007 年（剔除觀測資料不正確的 2004 年）蓮華池 2 號集水區實際蒸發散量 (AET)、估算的勢能蒸發散量 (PET)、以及氣象站的皿蒸發量 (表 6)，顯示水平衡方法計算出來的年 AET 大於氣象站的皿蒸發量，同時，亦大於日月潭氣象站的皿蒸發量，且集水區的 AET 高出氣象站的皿蒸發量甚多。另外，日月潭氣象站皿蒸發量平均為 772.7 mm，高於蓮華池氣象站的 699.6 mm，除了 2001 年之外，日月潭氣象站的皿蒸發量皆高於蓮華池。這兩個氣象站的地理位置接近，氣候條件相類似，蓮華池氣象站高程約為 670 m，年平均氣溫為 20.8°C，日月潭氣象站高程約為 1018 m，年平均氣溫為 19.2°C，因此，蓮華池氣象站的皿蒸發量理應高於日月潭氣象站。然而，日月潭氣象站四周地形遮蔽的影響較小，而蓮華池氣象站位於谷地區域，且西側及北側的地勢較高，將影響空氣的水平流動，以及減少中午過後的日照時間，此可能是造成蓮華池氣象站的皿蒸發量小於日月潭氣象站的原因。

其次，五種 PET 估算方法的估算結果，基本上，Hargreaves 方法與

Priestley-Taylor 方法估算結果較接近於 AET，以每年的資料為基礎，相對誤差的平均在 10% 以內，若以誤差的變動範圍來看，Hargreaves 方法稍優於 Priestley-Taylor 方法(表 7)。其次，將每年的估算結果取平均，與 11 年之 AET 值的平均比較，Hargreaves 方法的相對誤差為 3.2%，適合性最佳，其次是 Priestley-Taylor 方法 (α 值乾季訂為 0.64、溼季為 1.50) 的相對誤差為 -4.3%，以及 Priestley-Taylor 方法 (α 值全年為 1.26) 的相對誤差為 5.2%(表 8)。除了上述之外，其他三種方法 PET 估算的結果都低於 AET，Penman-Monteith 方法的相對誤差達-16.3%，Thornthwaite 方法的相對誤差達-20.3%。月份之 AET 受到降雨量的影響，通常溼季期間的 AET 高於 PET，而乾季期間則相反，溼季期間若降雨量低於 150mm/month，則呈現 PET 高於 AET 的情形。

表 6. 五種方法估算之 PET 與 2 號集水區 AET 以及氣象站皿蒸發量的比較 (單位: mm/year)

Table 6. Comparison between annual PET estimated by five methods, AET of watershed No.2 calculated by water balance method and pan evaporation of weather station. (unit: mm/year)

Year	PM.	PT(1)	PT(2)	Thorn.	Harg.	Ham.	PE of LHC	PE of SML	AET
1996	1050.5	1187.9	1300.4	1079.6	1231.5	1008.7	752.4	799.1	1235.5
1997	985.3	1131.9	1241.5	1014.5	1269.2	959.7	674.9	683.1	1247.1
1998	991.2	1158.9	1251.2	1032.9	1348.8	977.8	601.7	756.1	1516.5
1999	1049.1	1174.0	1286.9	985.9	1330.3	941.7	632.8	739.9	1243.5
2000	1138.5	1349.6	1455.0	978.2	1334.0	935.5	827.0	852.3	1269.8
2001	1048.8	1153.3	1305.1	1014.8	1240.0	972.9	865.4	806.6	1250.6
2002	1126.4	1286.2	1422.5	999.8	1369.0	957.0	716.0	819.6	1090.7
2003	1203.1	1395.4	1524.6	991.8	1368.9	950.1	695.1	827.2	1129.4
2005	1049.2	1234.5	1351.7	975.1	1306.2	933.6	688.8	713.6	1132.5
2006	1006.9	1159.0	1292.9	1030.7	1297.0	950.5	630.2	758.0	1311.6
2007	966.0	1119.9	1243.9	1026.4	1305.4	932.9	611.7	744.5	1529.6

Note: PM.: Penman-Monteith method; PT(1): Priestley-Taylor method with $\alpha = 1.50$ in wet season and $\alpha = 0.64$ in dry season; PT(2): Priestley-Taylor method with $\alpha = 1.26$; Thorn.: Thornthwaite method; Harg.: Hargreaves method; Ham.: Hamon method; PE of LHC: Pan evaporation of Lienhuachih weather station; PE of SML: Pan evaporation of Sun Moon Lake weather station; AET: Actual evapotranspiration of Lienhuachih watershed No. 2 calculated by water balance method.

表 7. 五種 PET 估算方法之年估算值與 AET 的相對誤差分散情形

Table 7. Dispersion of relative error of annual PET by five methods to AET

Relative error	PM.	PT(1)	PT(2)	Thorn.	Harg.	Ham.
Max. (%)	6.53	23.56	34.99	0.75	25.52	-12.26
Min. (%)	-36.85	-26.78	-18.68	-32.90	-14.66	-39.01
Avg. (%)	-15.49	-2.88	-6.77	-19.49	4.35	-23.81

表 8. 五種 PET 估算方法之估算值的平均及與 AET 的相對誤差

Table 8. Average of PET by five methods and relative error to AET

	PM.	PT(1)	PT(2)	Thorn.	Harg.	Ham.	AET
PET (mm/yr)	1054.8	1213.7	1334.2	1011.8	1309.1	956.4	1268.8
RE (%)	-16.86	-4.34	5.15	-20.26	3.18	-24.62	

Note: RE: Relative error of PET to AET

將五種 PET 估算方法依照代入氣象資料的區別，分為 Penman-based 方法組，包括：Penman-Monteith 方法、Priestley-Taylor 方法兩種方法，其中，Priestley-Taylor(1)方法之係數 α 值乾季為 0.64、溼季為 1.50，Priestley-Taylor(2)方法之係數 α 值一概為 1.26；以及 Temperature-based 方法組：包括 Thornthwaite 方法、Hargreaves 方法、Hamon 方法。歷年之 Penman-based 方法估算的 PET 與年降雨量比較，顯示兩者呈相反趨勢，當降雨量減少時 PET 會增加，降雨量增加時則反之(圖 5)，Penman-based 方法估算時，使用淨輻射量之參數項的關係，一個地區輻射量的高低與當時的天氣狀況有關，當降雨量多時反映出降雨天數較多，導致輻射量降低，進而使估算結果呈現降低的現象，以年降雨量相近的 2002 年以及 2003 年比較，2003 年無降雨天數 267 日，2002 年無降雨天數 258 日，因而出現 2003 年 PET 估算的結果高於 2002 年。其次，Penman-Monteith 方法估算的 PET 明顯地低於 AET。

Temperature-based 方法的估算結果，年 PET 與年降雨量的變化趨勢相關性不高，顯示降雨量對溫度因子的影響不大(圖 6)，Thornthwaite 方法與 Hamon 方法估算的年 PET 的變化趨勢相類似，兩者與 AET 比較，顯示估算值偏低。此外，Hargreaves 方法在 1996 年、2001 年的估算值比較小，推測可能的原因是 1996 年及 2001 年的年平均之最高溫度與最低溫度的差值較小於其他年度所導致的結果。

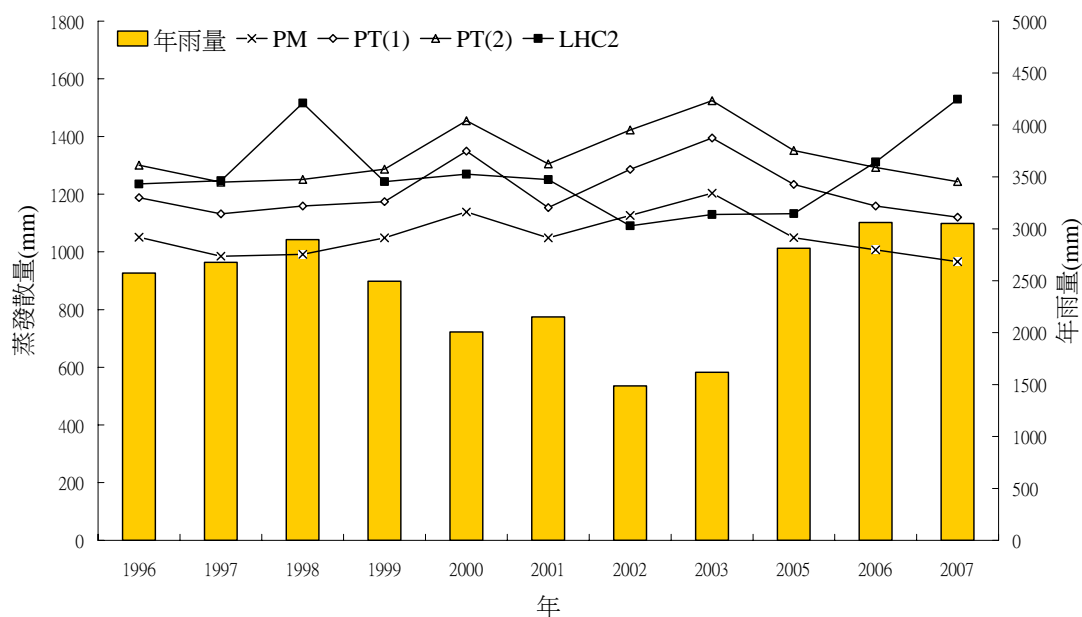


圖 5. Penman-based 方法估算之 PET 與 AET 的比較

Fig. 5. Comparison between PET by Penman-based methods and AET

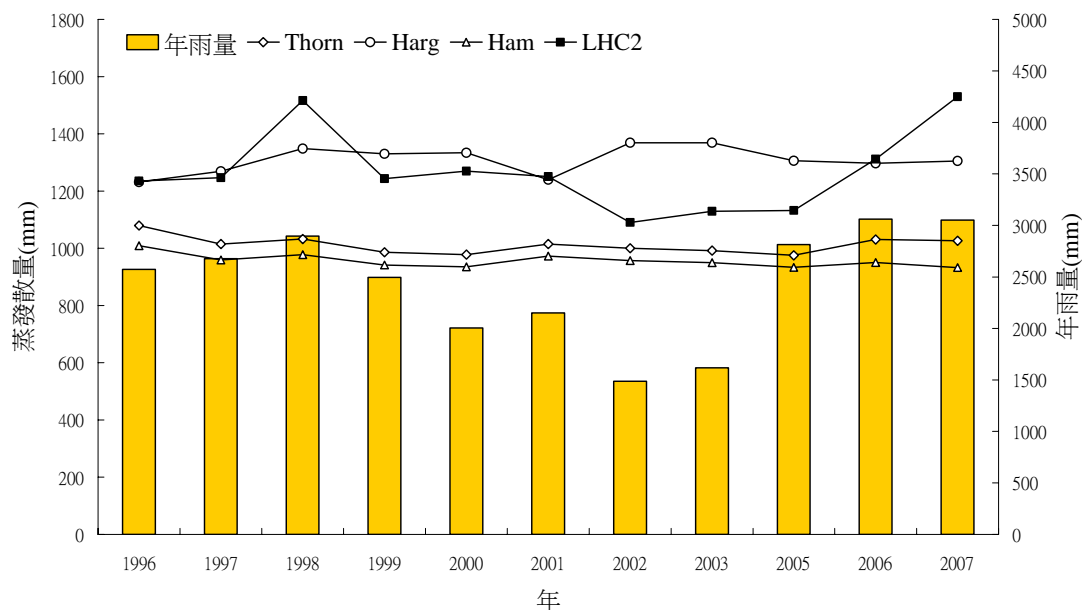


圖 6. Temperature-based 方法估算之 PET 與 AET 的比較

Fig. 6. Comparison between PET by Temperature-based methods and AET

(IV) 敏感度分析

對五種勢能蒸發散量估算方法，進行參數敏感度分析，其結果如圖 7 至圖 11。Penman-Monteith 方法 對淨輻射量的敏感度最高，其次是溫度，溼度的敏

感度較低，溼度增加則勢能蒸發散量降低，而風速的變化則幾乎無影響。Priestley-based 方法對淨輻射量的敏感度較高，對溫度的敏感度低。此兩種估算方法的比較，對於淨輻射量的敏感度相接近，然而 Penman-Monteith 方法對溫度的敏感度高於 Priestley-based 方法。因此，Penman-Monteith 方法估算 PET 主要是淨輻射量、溫度兩個參數，而 Priestley-based 方法則以淨輻射量為主。

其次，以溫度為基礎的三種估算方法，對溫度敏感度高低依序為 Thornthwaite 方法、Hamon 方法、Hargreaves 方法。Thornthwaite 方法溫度升高與溫度降低之勢能蒸發散呈非線性的變化趨勢，溫度降低的變化趨勢沒有比溫度升高來的大。另外，Hamon 方法的緯度參數對於勢能蒸發散量影響的幅度很小。

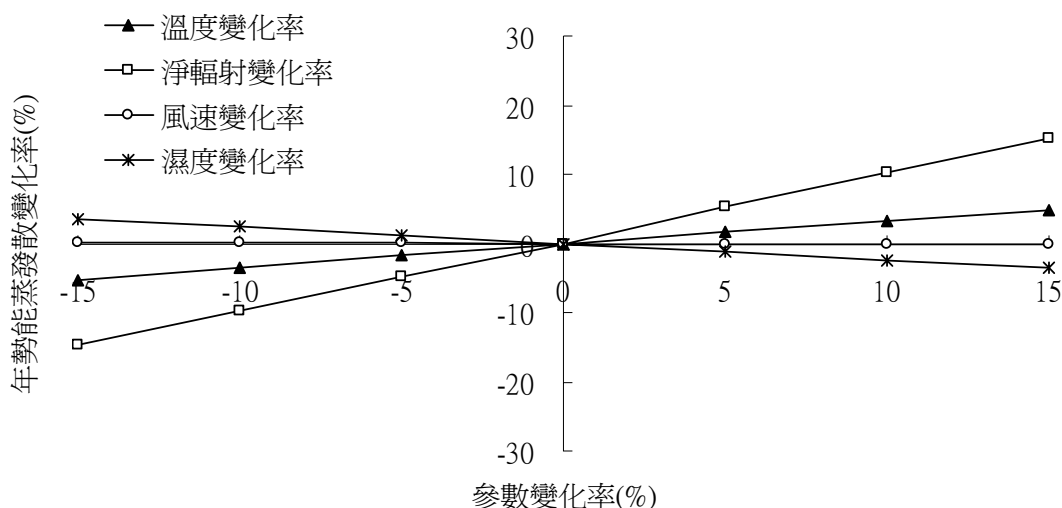


圖 7. Penman-Monteith 方法的參數敏感度分析

Fig. 7. Sensitivity analysis of parameter of Penman-Monteith method

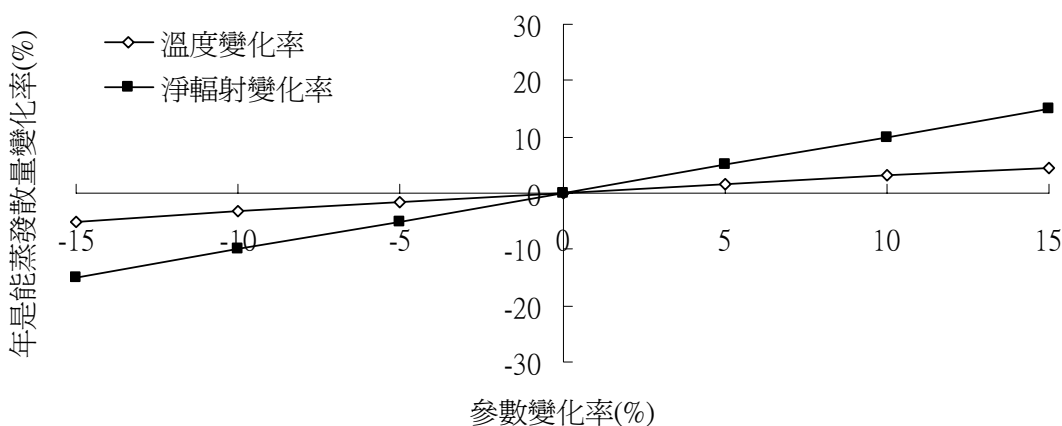


圖 8. Priestley-Taylor 方法的參數敏感度分析

Fig. 8. Sensitivity analysis of parameter of Priestley-Taylor method

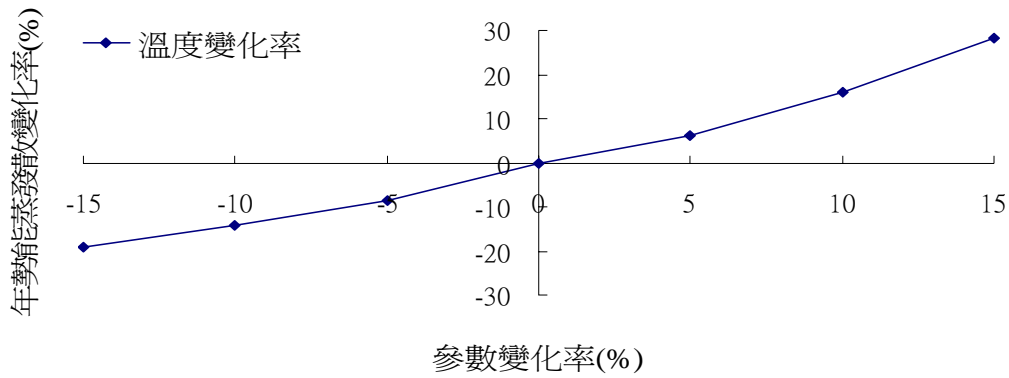


圖 9. Thornthwaite 方法的參數敏感度分析

Fig. 9. Sensitivity analysis of parameter of Thornthwaite method

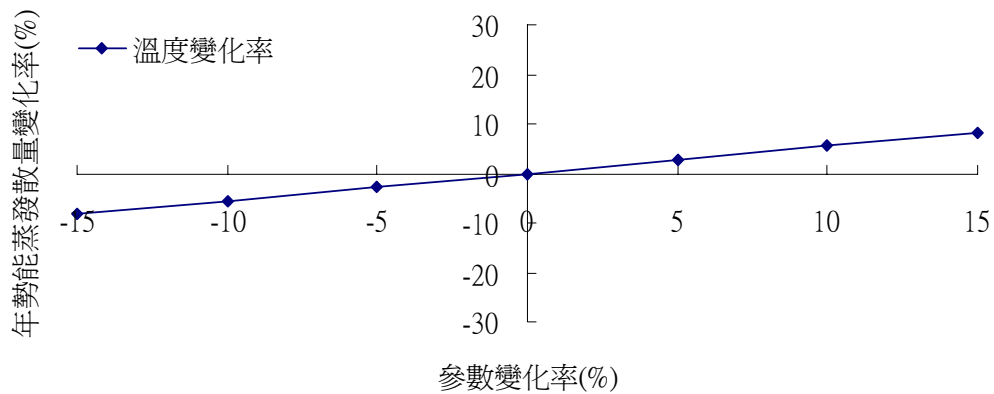


圖 10. Hargreaves 方法的參數敏感度分析

Fig. 10. Sensitivity analysis of parameter of Hargreaves method

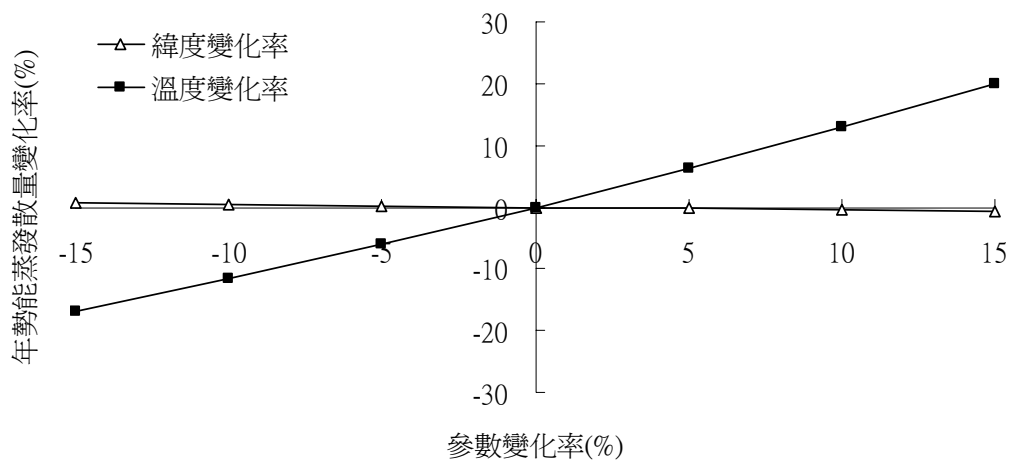


圖 11. Hamon 方法的參數敏感度分析

Fig. 11. Sensitivity analysis of parameter of Hamon method

(V) 勢能蒸發散估算方法適合度討論

在 Penman-based 組的兩種方法當中，參數項氣溫、淨輻射是兩個主要的項目。通常氣溫的觀測較容易獲得準確的資料，而在森林地區以及氣象站的淨輻射值可能不一致，蓮華池氣象站是以太陽輻射（Solar radiation）觀測為主。相當多的研究結果指出，森林地區的淨輻射與太陽輻射呈線性迴歸關係，迴歸係數介於 0.7~0.9 之間，此係數值可來估算淨輻射量（Bastable, et al., 1993；Gholz and Clark, 2002；Kumagai et al., 2004）。另外，在蓮華池 4 號集水區高 19.3 m 的鐵塔，2007 年 6 月至 12 月觀測之每日的淨輻射量，為相同期間氣象站觀測的太陽輻射量的 0.8 倍（取 214 日測定值的平均，尙未發表），因此，將氣象站觀測的太陽輻射量乘以 0.8 倍當作淨輻射量。

Penman-Monteith 方法具有完整的物理基礎，公式發展於平坦之低矮作物生長的地區，是國際間最常使用的勢能蒸發散估算公式。再者，此估算公式經過相當多的地區以及經驗公式的驗證，這也是為什麼許多研究探討拿來當作標準比較的緣故。本研究估算結果低於實際蒸發散量，估算方法使用時，森林地區的淨輻射量、溫度、溼度等參數項，自不同於低矮作物生長的地區。估算值偏低可能原因如下：（1）森林地區的淨輻射量與氣象站太陽輻射量的關係仍有待確定，（2）森林地區樹冠層以下的風速低於氣象站的風速，（3）森林地區的水蒸氣壓可能高於氣象站的水蒸氣壓，尤其是晝間蒸發散較旺盛時。

Priestley-Taylor 方法估算勢能蒸發散量時 α 值的訂定，建議乾季期間之 α 值為 0.64 且溼季期間之 α 值為 1.50 時，較接近實際蒸發散量，若採用原先建議全年之 α 值為 1.26，則估算結果稍偏高。然而，這兩種方法得到的結果平均相對誤差約在 5% 以內，顯示適合性都良好。Komatsu(2005)的研究指出，熱帶闊葉林白晝之 α 值平均為 0.83，而參照 Shuttleworth and Calder（1979）的研究，換算為全日之 α 值約為 1.00，仍低於原先建議值。未來可對 α 值的訂定再加以討論，以找出更適合的係數值。

Hargreaves 方法估算之年勢能蒸發散量隨降雨量的變化趨勢，若年降雨量越大，則越有機會接近水平衡方法推算的數值（圖 6）。Trajkovic(2007)在巴爾幹半島的研究指出，Hargreaves 方法在潮濕的氣象站會有高估的現象。台灣大致上是屬於潮濕氣候的條件，葉信富等人(2005)估算台南地區的勢能蒸發散量，發現 Hargreaves 方法也是有高估情形，而蓮華池地區估算出的年平均勢能蒸發散量亦有高估的情形，然平均相對誤差為 3.2%，顯示適合性良好。

Thornthwaite 方法只有溫度參數一項，是最容易取得的資料的公式，其勢能蒸發散估算結果，無論是在每年數值的比較或年平均值的比較，都呈現偏低的情形，年平均相對誤差為 -20.3% ，顯示適合性欠佳。其次，本研究勢能蒸發散估算的結果平均為 $1011.8 \text{ mm yr}^{-1}$ ，與夏禹九、林淵霖（1981）估算的結果平均為 $1034.9 \text{ mm yr}^{-1}$ 相當接近。此外，施鈞程(2003)認為水平衡方法推算的結果比 Thornthwaite 方法估算的結果高，認為 Thornthwaite 方法估算時還需加上截留損失。然而，在水平衡方法計算過程中，已經把截留損失包含在蒸發散損失項目內。

Hamon 方法是溫度組方法中估算勢能蒸發散量的結果最低的，平均相對誤差為 -24.6% ，相對誤差為五種方法之最大，顯示適合性欠佳。Hamon 方法與 Thornthwaite 方法的年變化趨勢相當類似(圖 6)，然而在月份趨勢分布上，Hamon 方法在冬季的推估值比 Thornthwaite 方法高，夏季則相反。

(VI)水平衡方法的討論

水平衡方法是間接推算集水區蒸發散量的簡便方法，通常假設無土壤或岩盤之深層滲漏損失，在長期間觀測時土壤水儲存變化量可視為 0，以降雨量減去逕流量當作集水區的蒸發散量。然而，每年的土壤水儲存量與每年的降雨量有關，因此，實際蒸發散量易受到降雨量影響。2 號集水區在乾季時期，依舊有流量紀錄，表示此集水區的土壤水是相當充足的。在乾季時若降雨量過大，使得土壤水分暫時儲存於土壤孔隙中，成為土壤水分儲存項，造成逕流量觀測值偏低，因而導致水平衡方法計算的實際蒸發散量有高估的現象。

其次，量水堰堰口為複合型的形式(圖 1)，在低水位時水流的收束比較好，量測到的水位也比較準確。但在暴雨時期水位急劇的增高，且從三角形堰口到矩形堰口，兩個斷面銜接處容易造成觀測上的誤差，水位逐漸升高時，水流的收束能力會變差且流速更快，造成高流量比低流量更為不穩定，造成高流量之觀測值低估，可能是此原因造成誤差，導致水平衡方法推算出來的蒸發散量高估。其中，2007 年的觀測資料即為代表的例子。

IV. 結論

蒐集 1996 年至 2007 年蓮華池 2 號集水區的降雨量、逕流量觀測資料，應用水平衡方法推算實際蒸發散量平均為 $1268.8 \text{ mm yr}^{-1}$ ，高於以往使用 Thornthwaite 方法估算的勢能蒸發散量，與相關文獻比較，推算值落在合理的範圍內。五種估算方法中，Thornthwaite 方法與 Hamon method 方法，每年之估算值的變動幅度很

小，其他三種方法於年降雨量偏低時，則呈現高估的情形，尤其以 2002 年與 2003 年的降雨量在 1500 mm 左右的情況下最為明顯。估算蓮華池集水區勢能蒸發散量，則以 Hargreaves 方法表現最佳，其次是 Priestley-Taylor 方法，兩者與實際蒸發散量的平均相對誤差在 5% 以內，顯示適合性相當良好。而其他方法估算結果比水平衡方法推算的實際蒸發散量偏低。Penman-Monteith 方法具有完整的物理基礎，公式發展於平坦之低矮作物生長的地區，是國際間常使用於與其他方法比較的基準，然使用於蓮華池森林地區估算結果偏低。以往常被使用的 Thornthwaite 方法，參數只有溫度項是最方便的選擇，但若以相同之以溫度為基礎的估算公式相比較，Hargreaves 方法優於 Thornthwaite 方法，計算上僅需增加地球外輻射量之參數項，使用上亦相當簡便。本研究以實際的水文觀測資料對照，可供決定一個地區合適的估算公式。

V. 謝誌

本研究承蒙林業試驗所集水區經營組提供蓮華池氣象站的氣象資料。1996 年至 2007 年期間的現場觀測資料蒐集，承蒙歷屆之臺大森林環境暨資源學系森林水文研究室的研究生，以及蓮華池研究中心的協助，謹此致謝。

VI. 參考文獻

- 施均程 (2003) 台灣森林集水區之蒸發散量推估。中興大學水土保持學研究所碩士論文。
- 夏禹九、林淵霖 (1981) 森林集水區水文年之選擇。林業試驗所試驗報告第 353 號。15 頁。
- 陳信雄、廖學誠、黃正良、詹進發 (1997) 應用 Hamon 公式估算福山試驗林蒸發散之研究。臺大試驗林研究報告 11(4)：21-30。
- 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。
- 陳獻章 (2006) 嘉南灌區潛勢蒸發散量與精緻農業作物需水量之研究。立德管理學院資源環境學系碩士論文。
- 陸象豫、黃良鑫、黃惠雪 (2008) 林業試驗所蓮華池研究中心氣象資料彙整 (1997-2007)。行政院農業委員會林業試驗所，林業叢刊第 183 號。
- 黃正良、廖學誠、陳明杰、金恆鏞、陸象豫 (2002) 蓮華池試驗林森林水文研究之回顧分析。臺大實驗林研究報告 16(2)：95-114。

- 葛錦昭、楊炳炎、林淵霖、楊楚淇、漆陞忠 (1978) 台灣森林集水區經營試驗初期報告。林業試驗所試驗報告 304 號。50 頁。
- 葉信富、陳進發、李振誥 (2005) 潛勢能蒸發散經驗公式之最佳化比較。中國農業工程學報 51(1) : 27-37。
- 蔣先覺、張家銘、洪富文、王明光 (1993) 蓮華池地區林地紅棕土壤中之氧化鐵。中國農業化學會誌 31 : 793-802。
- 服部重昭 (1992) 森林水文學 (塚本量則編) 第三章, 96-97 頁。文永堂出版。
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith (1998) Crop Evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrig. And Drain. Paper No. 56. FAO, Rome, Italy. 300 pp.
<http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>
- Ayman, A. S. and H. Gerrit (2007) Comparison of Priestley-Taylor and FAO-56 Penman-Monteith for daily reference evapotranspiration estimation in Georgia. J. Irrig. Drain. Eng. 133(2): 175-182.
- Bastable, H. G., W. J. Shuttleworth, R. L. G. Dalarosa, G. Fisch and C. A. Nobre (1993) Observation of climate, albedo, and surface radiation over cleared and undisturbed Amazonian forest. International Journal of Climatology 13: 783-796.
- Bras, R. L. (1990) Hydrology—an introduction to hydrologic science. Addison-Wesley Publishing Company. New York. 643 pp.
- De Bruin, H. A. R. (1983) A Model for the Priestley-Taylor Parameter α . J. Appl. Meteorol. 22(4): 572-578.
- Gash, J. H. C. and J. B. Stewart (1975) The average surface resistance of a pine forest derived from Bowen ratio measurement. Boundary-layer Meteorology 8: 453-464.
- Gholz, H. L. and K. L. Clark (2002) Energy exchange across a chronosequence of slash pine forests in Florida. Agricultural and forest meteorology 112: 87-102.
- Hamon, W. R. (1961) Estimating potential evapotranspiration. J. of Hydraul. Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers 87: 107-120.
- Hargreaves, G. H. and Z. A. Samni (1982) Estimation of potential evapotranspiration. J. of Irrig. and Drain. Division, Proceedings of the American

- Society of Civil Engineers 108: 223-230.
- Hargreaves, G. H. (1994) Defining and using reference evapotranspiration. *J. of Irrig. and Drain. Eng.* 120(6): 1132-1139.
- Komatsu, H. (2005) Forest categorization according to dry-canopy evaporation rates in a growing season: Comparison of the Priestley-Taylor coefficient values from various observation sites. *Hydrological processes* 19: 3873-3896.
- Kumagai, T., T. M. Saitoh, Y. Sato, T. Morooka, O. J. Manfroi, K. Kuraji and M. Suzuki (2004) Transpiration, canopy conductance and the decoupling coefficient of a lowland mixed dipterocarp forest in Sarawak, Borneo: dry spell effects. *Journal of Hydrology* 287: 238-252.
- Priestley, C. H. B. and R. J. Taylor (1972) On the assessment of surface heat fluxes and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100: 81-92.
- Shuttleworth, W. J. and I. R. Calder (1979) Has the Priestley-Taylor equation any relevance to forest evaporation? *J. Appl. Meteorol.* 18: 639-646.
- Stagnitti, F., J. Y. Parlange and C. W. Rose (1989) Hydrology of a small wet catchment. *Hydrological processes* 3: 137-150.
- Trajkovic, S. (2007) Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 133(1): 38-42.
- Thornthwaite, C. W. and J. R. Mather (1957) Instruction and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publications in Climatology*, Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, Centerton, New Jersey. 311 pp.

內洞國家森林遊樂區溪流水水化學

劉瓊霖¹ 陳岫女² 林雨璇³ 呂俊廷³ 王秋嫻⁴

【摘要】本試驗主要目的為針對長期遊樂行為和颱風干擾對森林生態系水質的影響及河川自淨能力進行調查研究。調查項目有林外雨和溪流水的pH值、電導度、溶氧量(DO)、無機陰離子 (F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^-)和陽離子 (Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+})、溶解性無機碳 (DIC)、溶解性有機碳(DOC)、和總氮(TN)。內洞國家森林遊樂區雨水pH值大部分於 4~5 之間，所含 SO_4^{2-} 高，但是溪水pH值皆大於 7，其中 HCO_3^- 大於 $300 \mu eq L^{-1}$ 屬於非酸沉降敏感帶。溪水中只有 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 及 Ca^{2+} 超出 $10 mg L^{-1}$ ，說明本集水區的 SO_4^{2-} 沉降濃度偏高連帶著 Ca^{2+} 與 SO_4^{2-} 形成的鹽類淋洗至溪水中的濃度也就偏高。比較內洞溪和南勢溪不同溪流水採樣點的化學物種濃度顯示，南勢溪與內洞溪會合前測點的的值大多比會合後的測點來得高，羅好水壩外測值會逐漸增加；內洞溪 3 測點則沒有太大差異。整體來說，南勢溪由於上游流域發展較內洞溪長，受遊客和颱風干擾影響較內洞溪劇烈，但溪水周遭土壤及樹冠保護完整，對於遊樂所帶來的污染皆能在河川的自淨範圍內，但也有部分資料顯示南勢溪越下游測點越容易受遊客人數多寡而起伏，相關性也越高。

【關鍵詞】內洞國家森林遊樂區、雨水、溪流水、颱風、水化學。

¹國立中興大學森林系副教授。

Associate professor, Department of Forestry, National Chung Hsin University.

²林務局新竹林區管理處育樂課技正。

Technical specialist, Conservation and Recreation Section, Hsinchu Forest District Office, Forestry Bureau.

³國立中興大學森林系大學部學生。

Undergraduate Student, Department of Forestry, National Chung Hsin University.

⁴行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組技佐，通訊作者。電子郵件: wangch@tfri.gov.tw

Junior technical specialist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan. Corresponding Author. E-mail:wangch @tfri.gov.tw

Stream Water Chemistry of Neidong National Recreation Area

Chiung-Pin Liu¹ Xiu-Nyu Chen² Yu-Xuan Lin³ Jun-Ting Lyu³

Chiu-hsien Wang⁴

【Abstract】 The purposes of this study are to concern the effects of long-term recreational behaviors and typhoon disturbance on water chemistry of forest ecosystems and to survey the buffer capacity of different source streams. We examined pH, electrical conductivity (EC), Inorganic cations (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) and anions (F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), dissolved organic carbon (DOC), dissolved inorganic carbon (DIC), and total nitrogen (TN) in the precipitation and streamwater samples. The results showed that the precipitation pH was under 5.6 during the monitoring period, from 4 to 5, indicated the Neidong National Forest Recreation Area was affected by acid rain. SO_4^{2-} accounted for the highest proportion of solute in the precipitation. However, the pH value was higher than 7 in all the sampling sites of streamwater, and the HCO_3^- concentration was higher than $300\mu\text{eq L}^{-1}$, indicating owned good capacities to acid precipitation in this area. The concentration of HCO_3^- , SO_4^{2-} , and Ca^{2+} in the streamwater sampling sites was higher than 10 mg L^{-1} , indicating the high SO_4^{2-} concentration associated with high Ca^{2+} together in the streams. On the other hand, almost all the concentration of solutes was higher in the Nansi River than in the Neidong River, especially the sampling sites after Luohao Dam. Overall, although the watershed area of Nansi River was bigger than Neidong River and under more stress from visitors, but it did not threaten to pollution. It implied that forest watershed owned capacity to maintain good water quality.

【Key words】Neidong National Recreation Area; Rainfall; Stream water; Typhoon; Water chemistry.

I、前言

隨著台灣社會經濟的成長與繁榮，國人對遊樂品質的追求形成一股生態旅遊的風潮。而佔全省面積約 59% 的森林地區也順應潮流成為國民旅遊三大重要遊樂區之一 (薛怡珍, 2003)。然而未經評估便開發成遊憩景點，人為活動一旦成形，難免對環境造成衝擊，因此國內環保團體也曾提出「生態旅遊破壞生態？」的質疑，政府相關單位也開始重視森林遊樂區遊客承載量問題。

一般認為林地之土地利用較普通已開發地區單純，污染源也較少，因此林地土壤的淨水能力也較高，使水質較佳。但如果汙染量超過河川的自淨能力與森林生態系的淨水能力，水質將會因此而改變。由於遊憩的利用，而加速土壤之沖蝕和垃圾之汙染，使得水中的養份增加形成優養化現象，水中生物的增加也應而增加了水的混濁度。降低了遊憩品質。更影響了下游居民的飲水品質。因此應該要了解河川與森林生態系自淨能力的幅度，建立一套適宜的管理制度，並以永續發展為目標。

內洞國家森林遊樂區位於烏來鄉信賢村，全區面積廣達約 1,191.34 公頃，海拔高度為 230~ 800 公尺。園區內有南勢溪及其上游支流內洞溪匯流貫串，兩側山谷中是由原始闊葉林—柳杉純林構成。其中內洞溪地形特殊流經三大瀑布，水花衝擊產生陰離子，含量全國第一。民國 93 年 11 月以來遊憩人數每日吸引二、三千人 (林務局網站)。突然增加大量觀賞瀑布的遊客是否影響了河川的生態環境，造成森林生態的負擔進而改變了對水源的淨化能力是本研究的探討核心。希望能在自然生態環境的自淨能力範圍內，發揮到最大之遊憩效果，達到永續發展之目的，並將研究成果提供給森林遊樂區做為經營與保育上的參考資料。

II、材料與方法

於內洞森林遊樂區內瀑布下的內洞溪選取 3 處取樣點，及匯入的南勢溪由上到下選取 4 處取樣點 (圖 1)，每月至少二次，分別於假日和非假日，在溪流量平穩此不下雨時，在取樣點現場量測溶氧、電導度和 pH，並以瓢勺法取 500mL 溪流水，放置於攜帶式的冰箱內，並儘速送至中興大學水化學與養分循環實驗室，以供化驗分析用。在極端的水文事件，如颱風暴雨發生時，增加取樣的頻率。另在遊客量較多的假日，亦增加取樣的頻率，以評估人為干擾對水質的影響及評估此森林生態系的容忍極限值。

本試驗另外設置雨水收集裝置，由 3 個直徑 20 cm 的漏斗收集，再由漏斗經由塑膠管流入塑膠製的收集桶，因為雨水收集為露天開口式，故所收集到之樣品應包括此場降雨的濕沉降及前次下雨後進入收集瓶的部分乾沉降，統稱為混沉降。降雨樣品是以場雨 (event) 為單位。於每場雨後量測每個集水桶收集到的水樣量。所收集水樣亦儘速攜回實驗室分析。

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^{+})、陰離子(F^{-} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{-} 、 NO_3^{-} 、 HCO_3^{-}) 等，分析方法依照 APHA(American Public Health Association, 1995)及金恆鏞與劉瓊霏 (1996)。

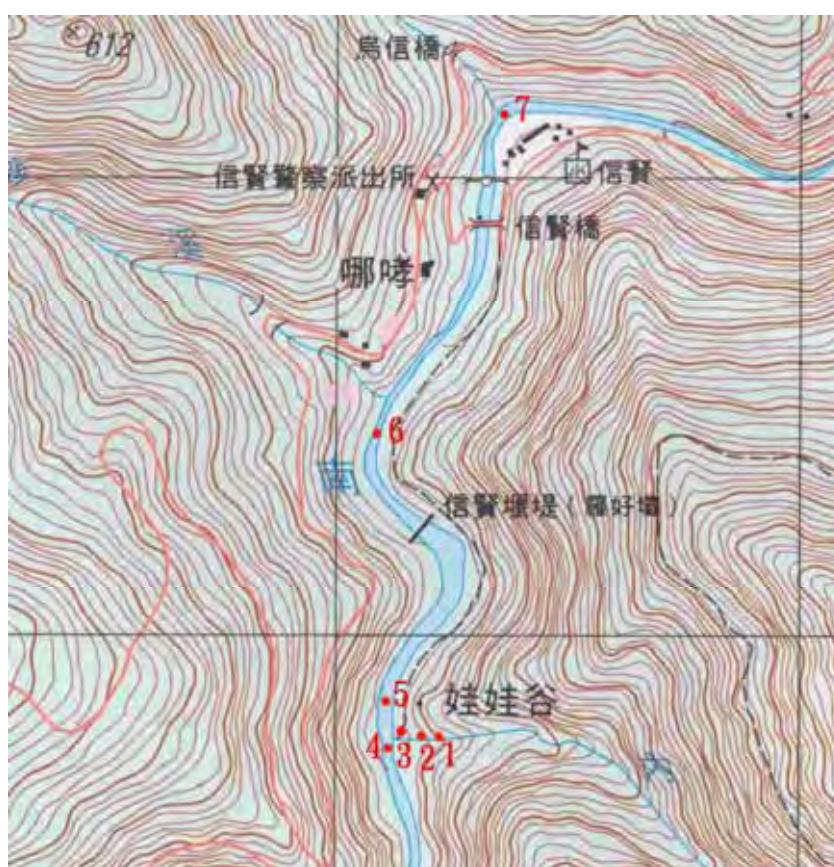


圖 1. 內洞溪和南勢溪各取樣點位置

III、結果與討論

(I) 林外雨

降水 (含乾濕沉降, bulk precipitation) 常常是陸地生態系養分輸入的一重要途徑, 特別是無法由岩石 (crustal rocks) 得到的元素成分, 例如, 若一生態系內缺乏生物性氮固定物種, 降水也許就是此生態系內氮輸入的主要來源

(Fahey *et al.*, 1985)，此外，若森林處於受酸雨的威脅之下，也會經由降水接收到大部分的硫及金屬離子 (Lindberg and Harriss, 1981)。

大氣中含有微溶水的CO₂，因此正常降落至地面的雨水pH約為 5.6。若低於 5.6 就屬於酸性，高於 5.6 就屬於鹼性 (Barrett and Brodin, 1955)。而雨水酸化是全球性的問題，在高度工業化的地區，因污染量較高，而使得雨水pH較低。但因為污染物長程輸送的結果，有些遠離人為污染的地區 (如森林區域)，雨水一樣有酸化的現象。如本試驗的內洞國家森林遊樂區，在試驗期間是籠罩在酸沉降的威脅之下，雨水的pH值於 4~5 之間 (表 1)。

自然源及人為污染源所排放的SO₂及NO_x，在適當氧化劑作用下，轉化生成如H₂SO₄及HNO₃之類的酸性物質，其後拌隨降水沉降至地表，此為雨水酸化的主因。因此，在本試驗期間雨水中亦監測到高濃度的SO₄²⁻和NO₃⁻。既然此森林遊樂區位於無工業的森林區域，致酸物來源應是來自長程輸送的結果。

另雨水中的NH₄⁺明顯比福山植物園和臺灣中部山區高，NH₄⁺屬於非點源污染，到底來源是農業、林地、遊憩、養雞場或另有其他因素，尚待更長期的監測追蹤。此不同之差異，主要是因為氮的流動隨地理環境及森林生態系的不同，變動甚大，例如Mitchell等(1997)研究日本幾處試驗地之結果，顯示大氣中NH₄⁺之年平均濃度由郊區高海拔Ryuoh集水區的 1.9 mol L⁻¹至靠近都會區 24.0 mol L⁻¹之差異；且因其含量的多寡，在森林生產力的影響上扮演非常重要的角色，因此氮在臺灣森林集水區的生物地質化學循環上，實有待收集更多資料以分析之。

表 1. 內洞國家森林遊樂區內雨水的水化學

電導度 μS cm ⁻¹	pH	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ⁺	Ca ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻
μeq L ⁻¹													
25.13	4.51	91.51	6.24	3.94	55.82	60.17	0.64	84.19	51.92	2.90	0.09	73.47	24.28
(10.4)	(0.45)	(77.5)	(14.9)	(2.8)	(185.4)	(170)	(1.08)	(65.6)	(55.29)	(10.2)	(0.3)	(149.9)	(29.4)

* 括弧部分為標準偏差

(II) 森林淨化水質的功能評估

影響森林集水區內的生物地質化學循環(biogeochemistry cycle)的因子很多，諸如礦質化作用、土壤和水文特性、植群、氣候、生物過程、自然和人為的干擾等 (Beaulac and Reckhow, 1982; Likens and Bormann, 1995; Hornbeck *et al.*, 1997; Alexander *et al.*, 2000; Rhodes *et al.*, 2001; Tsujimura *et al.*, 2001; Baker,

2003)。這些變動和干擾都會影響到集水區溪流水化學，因此溪流水化學可提供森林經營結果的指標。

在過去的數十年中，國際間皆相當努力限制硫的釋放以保護陸生和水生的環境(Holdren *et al.*, 1993)。而我國地處亞洲大陸與太平洋邊緣，屬大陸性物質輸出的下風區，因此亞洲(尤其是中國)污染問題惡化，將對臺灣自然資源與森林生態系造成相當的衝擊。依據亞洲酸雨研究群(RAINS-ASIA)的估算，公元2020年時亞洲SO₂排放將為1990年的3倍，硫酸根沈降亦將為1990年的3倍。此種硫酸根沈降的迅速增加，將影響森林生態系的性質及流經森林生態系的水質。

在過去20年間，科學家們發現森林集水區內因湖泊及溪流水有逐漸酸化的趨勢，而造成水生生態系的改變，遂開始重視大氣酸沈降對於森林集水區內溪流水化學的影響。大部分早期的研究是針對酸沈降有高度敏感性的湖泊(Almer *et al.*, 1974)，至於酸沈降對於森林集水區內溪流的影響，近年來也逐漸受到重視(Hornbeck, 1992; Likens and Bormann, 1995; Hornbeck *et al.*, 1997; Aber *et al.*, 2003; Eimers *et al.*, 2004; Burns *et al.*, 2006)。內洞國家森林遊樂區內的林外雨監測資料已發現此森林生態系已受酸雨威脅。圖2為試驗期間，此森林集水區的林外雨、內洞溪3取樣點、和南勢溪4取樣點溪流水離子組成及pH的空間變異。相較於林外雨，溪流水的pH值明顯提高了，而且愈往下遊愈明顯，此結果是否因酸沈降的輸入此生態系，而加速鹽基陽離子的交換量，使養分加速由此生態系中經溪流水大量流失，而對此森林生態系生產力產生負面的影響？相反地，如長期在酸雨的威脅下，土粒中之鹽基陽離子被酸性沈降之H⁺離子大量交換出的結果，導致土壤酸化，降低土壤粒子結合鹽基陽離子的能力，而減少土壤中可交換性之陽離子濃度，使藉由離子交換供給溪流水的離子釋放速率是否會因而降低(Lee *et al.*, 1995)？此種相反的推論，依目前資料尚不足以解釋，仍待往後的長期觀察，以累積更多數據以分析之。

另在離子濃度，大部分溪流水的離子濃度也比林外雨明顯地提高，尤其是流經流域最大的下游，其原因除森林中植群水分蒸發散所產生的濃縮效應外，更可推測此生態系林分內部代謝過程及土壤中的生物活動及化學風化作用極強，因此經由溪流水中流失大量的養分，尤其是Ca²⁺、Na⁺及Mg²⁺等。

紐約州的环境保護部(New York State Departmental of Environmental Conservation, 1984)和Sharpe等(1984)都曾定義地面水的HCO₃⁻濃度若小於200

μqeL^{-1} 為酸沉降敏感的區域，但本試驗區的測點皆大於 $300 \mu\text{qeL}^{-1}$ ，且溪流水 pH 值皆大於 7，因此推斷此地區的土壤和地質一定有其特殊之處以中和酸沉降，可能是有很強的鹽基離子交換作用。溪流水的 SO_4^{2-} 主要來自大氣沉降， Ca^{2+} 卻來自於土壤的釋出(Hornbeck *et al.* 1997; Tsujimura *et al.*, 2001)，如表 2 的比較，本試驗區的溪水與雨水所含 SO_4^{2-} 皆比過去資料高很多，可以證明與溪水中的 SO_4^{2-} 與雨水成份有關，且內洞溪與畢祿溪的溪水中所含的 SO_4^{2-} 的濃度接近，南勢溪卻大於兩者許多，推測因南勢溪上游 SO_4^{2-} 之沉降累積至較下游的溪水中所形成的差距。而本試驗區的雨水中的 Ca^{2+} 與畢祿溪相類似，但溪水中所含的 Ca^{2+} 卻明顯有差距，應此證實 Ca^{2+} 與雨水的相關性較低，應是大部分來自土壤風化作用的結果。

一般而言，未經干擾的溪流水的背景濃度不會太高，酸鹼度(pH)介於 6~8 之間，無機離子的濃度應該低於 10 ppm，本試驗期間， SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 與 Ca^{2+} 都超於此範圍， SO_4^{2-} 主要來源是大氣沉降，為酸雨的主要組成分之一，另一重要來源可能是含硫化鐵岩石風化作用所產生，或如 Houle 和 Carignan (1995) 所提出， SO_4^{2-} 是來自土壤有機硫貯積的釋出，在垂直流經森林生態系的過程中，常與 Ca^{2+} 以硫酸鈣鹽流到溪流中，因此也提高 Ca^{2+} 在溪水中濃度。也間接證明森林集水區對酸沉降的緩衝效能。

另在森林集水區土壤的風化過程中亦會產生大量的 HCO_3^- ，觀察此些溪流水測點溪流環境，水中植物活動並不旺盛，因此高濃度的 HCO_3^- 應非受呼吸作用所排出的 CO_2 影響。屬於內洞溪的第 1、2、3 點的 HCO_3^- 濃度比位在南勢溪的第 4、5、6、7 點濃度還要低，可證明南勢溪上測點流經的流域較大，此流域的礦物，風化作用極強，易因而分解產生 HCO_3^- (Baron, 1991)。如上所述， HCO_3^- 能做為溪流水的酸中和能力和地區性土壤礦物風化程度的指標，能顯現出一集水區的土壤狀況及溪流水和酸沉降作用的關係 (Binkley *et al.*, 1989; Neal *et al.*, 1990; Robson *et al.*, 1993)。

陽離子除了鈣離子以外，其他離子在各點的差異不大； NH_4^+ 較林外雨低，其濃度減少大部分是因植物吸收的結果，也有可能被具負電荷之土壤顆粒與腐植質所吸附，證明此森林生態系仍保有無機氮，尚未呈現氮飽合現象。另同為單價陽離子之 Na^+ 及 K^+ ，在溪流水的濃度即有顯著的差異， Na^+ 明顯高於林外雨，而 K^+ 只有小幅增加，此應證了因 K^+ 對土壤膠體粒子的鍵結能力較強，較不易由土層中析出 (Lee *et al.*, 1995)。

陰離子方面 NO_3^- 與 Cl^- 在各點間無顯著差異， SO_4^{2-} 與 HCO_3^- 均在屬於內洞溪的第1、2、3點有些許上升；南勢溪在與內洞溪會合前的第4點，為所有取樣點中平均濃度最高，會合後的第5點濃度明顯下降，應是離子濃度較低的內洞溪匯入所形成的稀釋效果，而在往下游的第6、7點濃度皆比第4、5點高；而 Ca^{2+} 也有相同的趨勢，應是碳酸根離子與硫酸根離子會與其形成鹽類共同匯入河川的結果，此結果也影響了電導度的測定結果。另總體來看，河川的TOC與pH值的變化不大，皆維持中性，表示當地的河川污染還未超過河川本身的自淨能力。

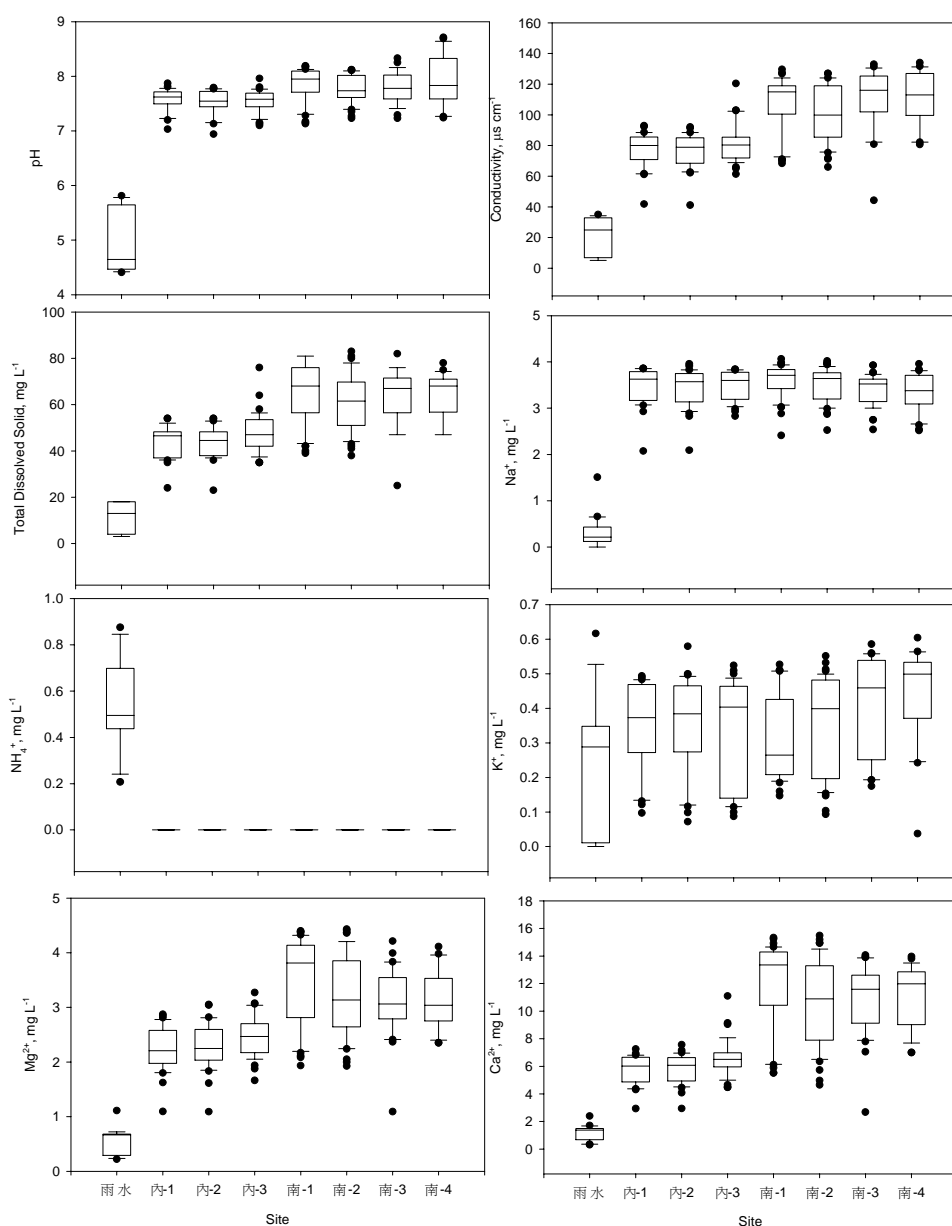


圖 2. 試驗期間的雨水和溪流水的水化學

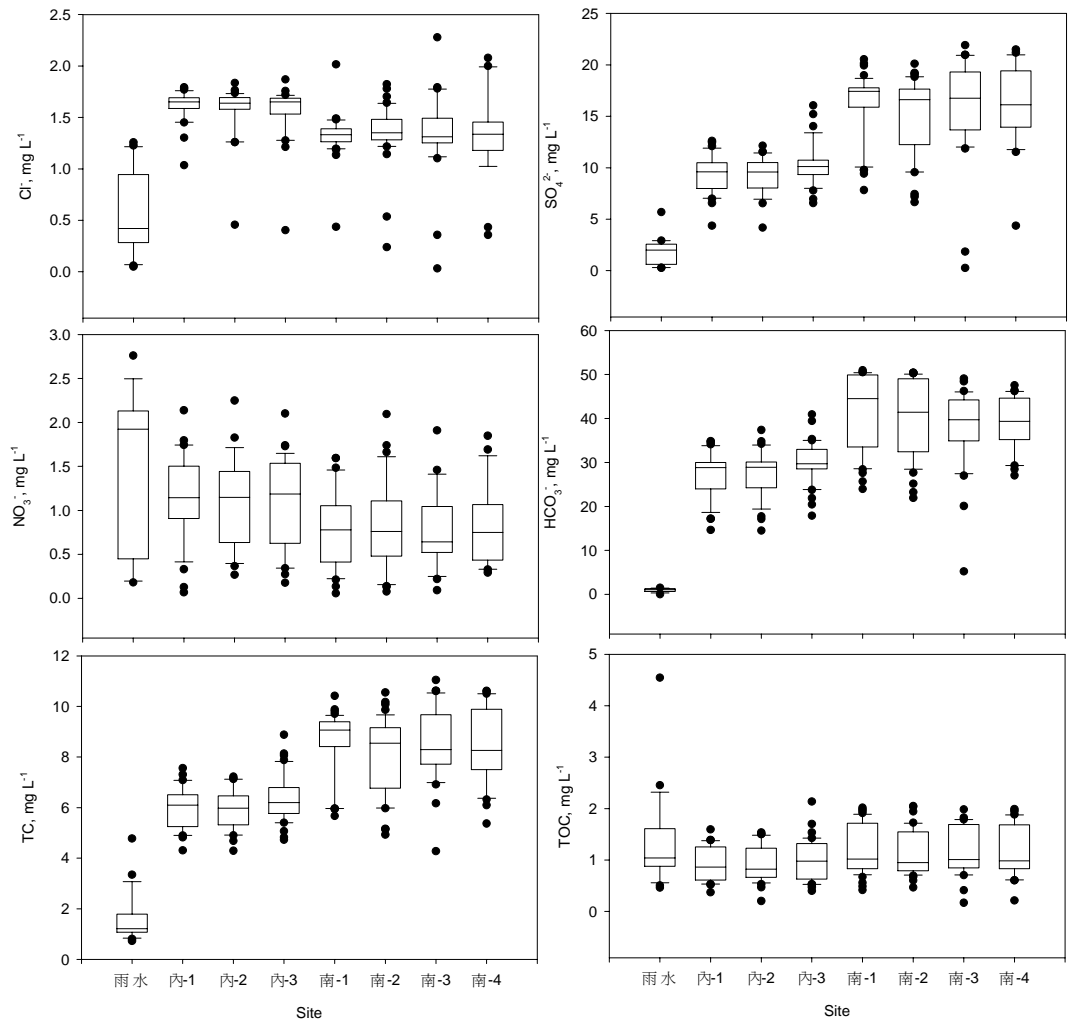


圖 2. (Continued)

(III)遊樂行為對森林生態系水質的影響

森林內空氣清新、水質優良，所以能提供森林浴及礦泉水之利用。因為森林裡不僅生物多樣性豐富，各種地形、地質的成因、水的來源和影響因子，均是科學研究與教育之最佳材料，所以環境教育自然就是能夠帶給民眾深度旅遊的必備主題，也是森林遊樂可永續的絕對必要條件。內洞溪地形特殊流經三大瀑布，水花衝擊產生陰離子，含量全國第一。民國 93 年 11 月以來遊憩人數每日吸引二、三千人。突然增加大量觀賞瀑布的遊客是否影響了河川的生態環境，造成森林生態的負擔進而改變了對森林對水源的淨化能力亦是本計畫的探討重點。

圖 3 表示內洞溪 3 取樣點和南勢溪 4 取樣點在試驗期間所分析各項水化學在假日與非假日數值的差異。水中溶氧量(O_2)在假日有比非假日低的驅勢，尤其是停留遊客人數較多的內洞溪和南勢溪下游較明顯。相反地，水中總無機碳(TIC)在假日有較高的趨勢，但變化不明顯，總有機碳(TOC) 則在非假日有較高的區現象。此些初步現象顯示，隨著假日遊客人數的增加確實會對溪流水質造成影響，但此國家森林遊樂區似乎仍有很大空間的遊客承載量，但承載上限到底在那裡?仍有待長期監測，收集更多資料以分析評估。

Na^+ 和 Mg^{2+} 離子在南勢溪的取樣點，非假日水樣的離子濃度皆比假日的低，而在內洞溪匯入南勢溪的取樣點卻有相反的現象，證明內洞溪的匯入會降低南勢溪的離子濃度。而內洞溪在假日與非假日水中離子濃度沒有明顯差異，而 K^+ 離子則是假日濃度低於非假日濃度；在陰離子方面， Cl^- 也有相同於 Na^+ 、 Mg^{2+} 離子的現象。

將各取樣點所分析的水化學參數和遊客人數做相關性分析後發現(表 2)，內洞溪各項水化學參數與入園人數相關性明顯低於南勢溪各取樣點；證明南勢溪所受遊客的影響大於內洞溪，其中陽離子 K^+ 與 Mg^{2+} 的相關性最高，但此兩種離子輸入的主要來源應為林木和土壤的淋溶輸入。Sayre和Fahey (1999)研究結果顯示酸雨中的pH值對 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在冠層的淋溶有顯著的影響。Lovett等(1996)在野外的雨水試驗結果發現酸雨對K及Na的相關性小，因此推測應有其他因素造成此現象，而非空氣污染所形成的酸雨所致。而在此森林遊樂區內，是何種原因造成遊客人數和此二種離子濃度相關性較高，依目前所收集到的資料尚無法做明確的論斷，有待後續的持續監測追蹤。

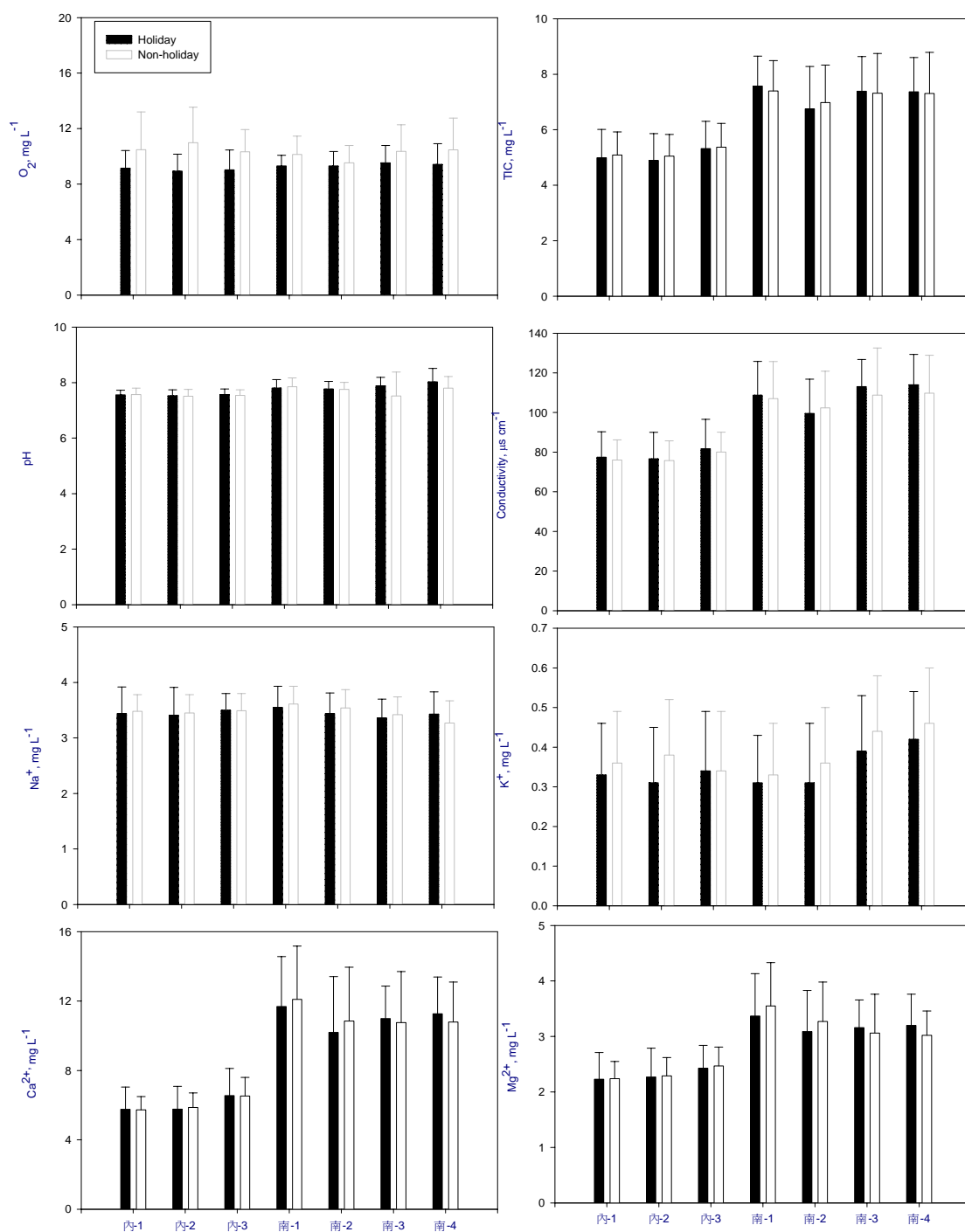


圖 3. 假日和非假日溪流水水化學的比較

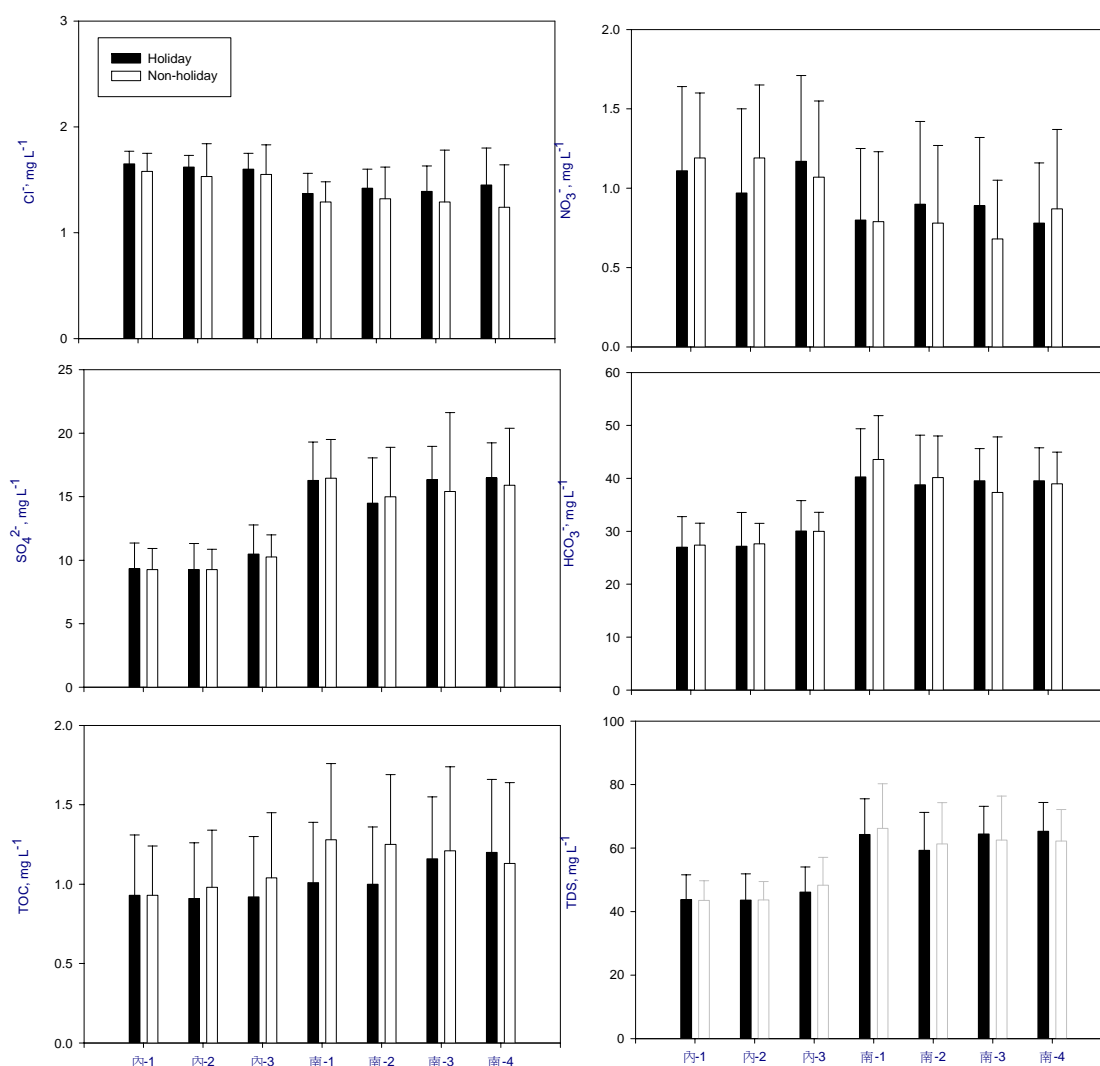


圖 3. (Continued)

一般認為交通工具帶來的污染會產生大量NO₃⁻及SO₄²⁻，但本試驗結果顯示，溪水中的NO₃⁻及SO₄²⁻與遊客人數並無太大的相關性，可能影響原因為 1) 輸入SO₄²⁻的濃度雖高，但因地質與樹冠的地區特性加強了此區河川的SO₄²⁻背景值使得受人為影響不明顯；2) 溪水的硝化作用(Cooper, 1990; Hill, 1991)使得NO₃⁻變化不明顯；3) 樹冠層結構完整，截留及離子交換或微生物吸收 (Cronan and Reiners, 1983)等作用明顯。

另遊憩活動對自然環境造成衝擊，涉及了植物、動物、地質、土壤、水、空氣等方面的改變，而且這些改變相互之間亦會影響，另亦受到氣候的影響，為一複雜的網狀反應，難以在短時間內觀測種種的變化，而瞭解影響某些變化的原因，宜長期紀錄及觀測有關資料。

表 2. 水化學與入園人數的相關性分析

	Cond	TDS	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TOC
第 1 點	0.28	0.44	0.20	0.37	0.25	0.40	0.36	0.22	0.06	0.28	0.33	0.00
第 2 點	0.23	0.40	0.26	0.32	0.44	0.40	0.31	0.20	0.11	0.27	0.34	0.09
第 3 點	0.03	0.12	0.40	0.45	0.64	0.19	0.00	0.36	0.09	0.01	0.10	0.13
第 4 點	0.45	0.58	0.36	0.50	0.30	0.60	0.62	0.11	0.05	0.39	0.41	0.02
第 5 點	0.05	0.25	0.26	0.41	0.61	0.57	0.42	0.04	0.09	0.17	0.38	0.09

(IV) 颱風干擾對森林生態系水質的影響

溪流水中主要陽離子包括Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺、NH₄⁺，主要陰離子包括F⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻及NO₃⁻(劉瓊霏，2000)，部份離子濃度有明顯的季節性變化，主要受到流量多寡的影響，其中電導度、pH、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻及HCO₃⁻等離子濃度與流量成負相關，隨著流量增加而減少；但懸浮質及全氮量則與流量成正相關，隨著流量增加而增加，其他離子如K⁺、F⁻、Cl⁻、NH₄⁺及NO₃⁻等濃度並無顯著的季節性變化(廖學誠、黃正良，2001)，但是隨著環境的不同相關性也跟著改變。離子濃度與流量的關係可歸納為三種趨勢(Salmon et al., 2001) (1) 稀釋作用，離子濃度隨流量增加減少；(2) 增加水文接近作用，離子濃度隨流量增加而增加；(3) 水文恆定，離子濃度不隨流量變化。颱風對森林集水區水化學的影響也可依此三方面來加以討論之。

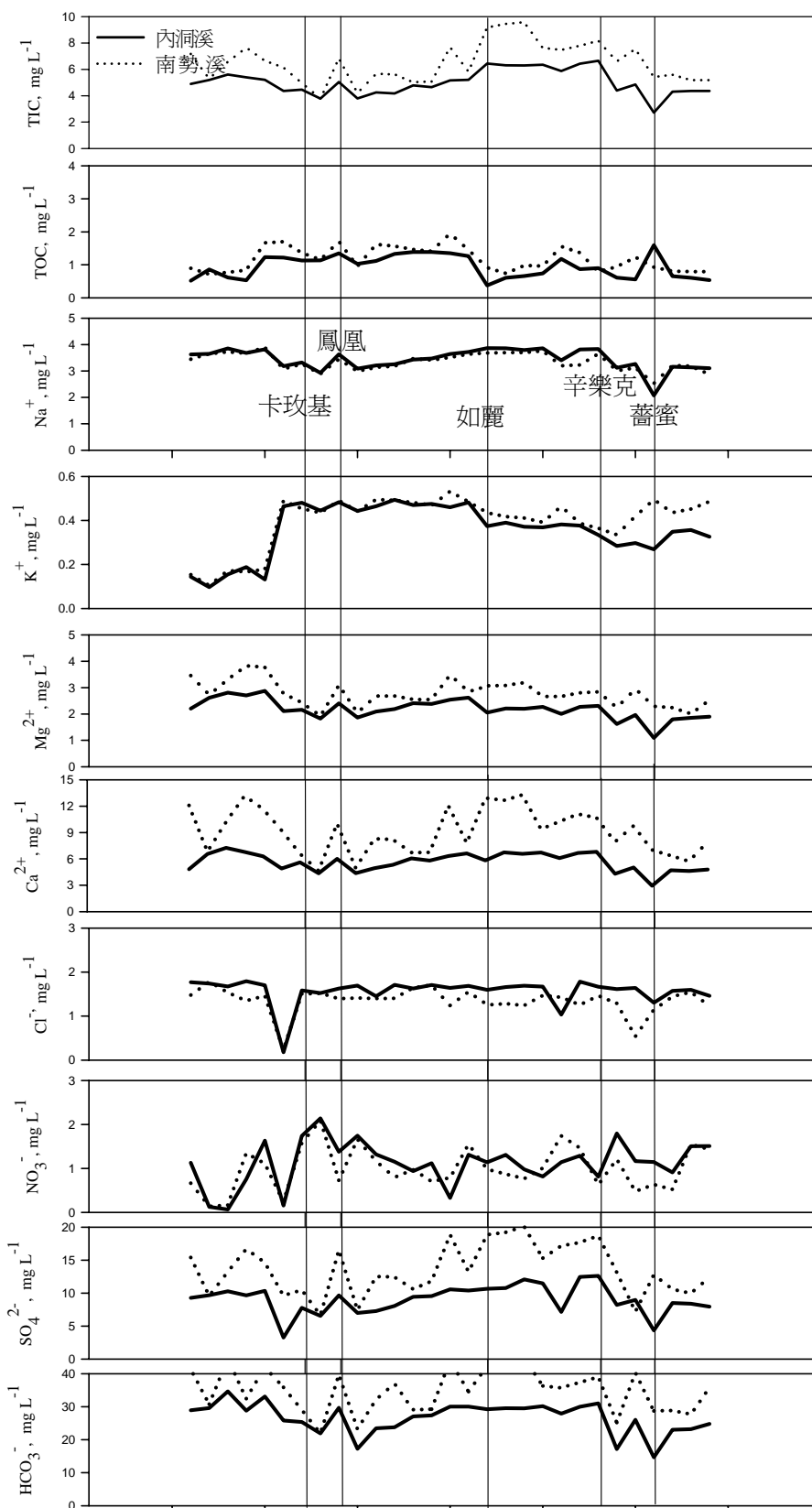


圖 3. 內洞溪和南勢溪在觀測期間水化學的變化情形

圖 3 為內洞溪和南勢溪在觀測期間水化學的變化情形，颱風過後，內洞溪和南勢溪溪水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等呈現濃度降低現象，此些溶質在森林集水區多來自深層岩石或土壤，顯示颱風的新水加入會造成溪水的稀釋作用。相反地，內洞溪和南勢溪溪水中懸浮質、 K^+ 、 NO_3^- 等呈現濃度升高現象，此類溶質多分布於森林集水區的地表或枝葉層中，顯示颱風時近地表水所造成的地表淋洗或沖蝕帶動現象。整體而言，大部分的溶質在颱風期間被稀釋大概需要二個禮拜才會漸漸回復，少部分會因颱風的降雨將地表的物質經由地表徑流流入溪流中造成濃度上升但是依但物質沖刷完畢濃度就會在度下降，在九月底經歷連續 3 個颱風後受到更大的影響，所有的離子都降低，因受到較大的擾動，恢復所需的時間也相對延長。

臺灣每年約四次的颱風事件，雖然給許多地區帶來不少山崩及土石流等地質災害事件，但是每次在大量的雨水沖刷後，卻也同時將台灣島內土壤及植生作物所包含含碳比例給降低了下來。Hilton 等 (2008) 認為大氣中的二氧化碳被帶至深海沉積的過程中，颱風扮演了相當重要的角色。彼等比較了近數十年來台灣島的侵蝕速率，他們推斷有 80~90%的有機碳是在颱風造成山崩、土石流的事件中，被大量水流從上游的山體運送到下游的海洋中。這個發現，也說明了颱風的頻率及強度會影響陸地上有機碳被帶至海洋中的速率。颱風期間，大量雨水會將高濃度的沉積物直接注入深海中，在台灣島四周的海洋便會形成長期碳掩埋的機制，相對大自然界是一項減碳作用，也就是目前科學界最熱門探討的”碳封存”(Carbon Sequestration)系統。雖然這種全球性碳封存的重要性仍被評估中，但颱風與碳循環的關係將會高度的影響台灣未來的颱風頻率與強度。未來可應用此項研究成果，由溪流水中持續分析各項水化學，以科學化的數據分析，除可說明森林涵養水源和淨化水質功能外，亦強調森林的固碳能力。

IV、謝誌

本研究承行政院農業委員會林務局新竹林管處提供樣區和經費補助，謹此致謝。

V、參考文獻

- 薛怡珍 (2003) 森林遊憩資源之永續利用—以地景生態學觀點實踐永續森林生態旅遊。林業研究專訊 10(5): 7-8。
- 廖學誠、黃正良 (2001) 森林集水區溪流水離子濃度季節性變化之研究。國立台北師範學院學報 14: 441-458。
- 金恆鏞、劉瓊霏 (1996) 離子層析儀應用在水質分析的技術探討。林業試驗所林業叢刊 68 號。
- 劉瓊霏 (2000) 雨水流經關刀溪三種林分水化學之變化。國立中興大學森林系博士論文。
- Aber, J.D., C.L. Goodale, S.V. Ollinger, M-L. Smith, A.H. Magill, M.E. Martin, R.A. Hallett, and J.L. Stoddard, (2003) Is Nitrogen deposition altering the nitrogen status of northeastern forests? *Bioscience* 23(4):375-390.
- Alexander, R.B., R.A. Smith, and G.E. Schwarz, (2000) Effect of stream channel size on the delivery of nitrogen to the gulf of Mexico. *Nature* 403:758-761.
- Almer, B.W., C. Dickson, C. Ekstrom, and E. Hornstrom (1978) Sulfur pollution and aquatic ecosystem. In Nriagu JO. *Sulfur in the Environment : Part II : Ecological impacts.*, John Wiley & Sons, Inc., 271-311.
- APHA (1995) Standard methods for the examination of water and wastewater. A.D. Eaton, L. S. Clesceri, and A. E. Greenberg, eds. 19th edition. United Book Press, Baltimore, MD.
- Baker, A. (2003) Land Use and Water Quality. *Hydrological Processes*. 17:2499-2501.
- Band, L.E., C. Tague, P. Groffman, and K. Belt, (2001) Forest ecosystem processes at the watershed scale: hydrological and ecological controls of nitrogen export. *Hydrological Processes* 15:2013-2028.
- Barrett, E. and G. Brodin (1955) The acidity of Scandinavian precipitation. *Tellus* 7: 251-257.
- Beaulac, M.N. and K.H. Reckhow (1982) An examination of land use – nutrient export relationships. *Water Resources Bulletin* 18:1013-1024.
- Binkley D, D. Valentine, D. Wells, and U. Valentine (1989) An empirical analysis of the factors contributing to 20-year decrease in soil pH in an old-field

- plantation of loblolly pine. *Biogeochemistry* 8: 39-54.
- Burns, DA, M.R. McHale, C.T. Driscoll and K.M. Roy (2006) Response of surface water chemistry to reduced levels of acid precipitation: comparison of trends in two regions of New York, U.S.A. *Hydrological Processes* 20:1611–1627.
- Cronan, C.S. and W.A.Reiners (1983) Canopy processing of acidic precipitation by coniferous and hardwood forests in New England. *Oecologia* (Berlin) 59:216-23.
- Eimers, M.C., P.J. Dillon, and S.L. Schiff (2004) Sulphate flux from an upland forested catchment in south-central Ontario, Canada. *Water, Air, and Soil Pollution* 152:3-21.
- Hilton, R.G., A. Galy, N. Hovius, M.C. Chen, M.J. Horng and H. Chen (2008) Tropical-cyclone-driven erosion of the terrestrial biosphere from mountains *Nature Geoscience* 1: 759 – 762.
- Holdren, Jr, G. R., T.C. Strickland, P.W. Shaffer, P.F. Ryan, P.L.Ringold. and R.S. Turner (1993) Sensitivity of critical load estimates for surface waters to model selection and regionalization schemes. *Journal of Environmental Quality* 22: 279–289.
- Hornbeck, J.W. and W.T. Swank (1992) Watershed ecosystem analysis as a basis for multiple use management of eastern forests. *Ecological Applications* 2: 238–247
- Hornbeck, J.W., S.W. Bailey, D.C. Buso, J.B. Shanley (1997) Streamwater chemistry and nutrient budgets for forested watersheds in New England: variability and management implications. *Forest Ecology and Management* 93:73-89.
- Lee, T. and P. Cornillon (1995) Temporal variation of meandering intensity and domain-wide lateral oscillations of the Gulf Stream. *Journal of Geophysical Research* 100: 1360~13613.
- Likens, G.E. and F.H. Bormann (1995) *Biogeochemistry of a Forest Ecosystem*. Springer- Verlag, New York.
- Lindberg, S.E. and R.C. Harriss (1981) The role of atmospheric deposition in an eastern U.S. deciduous forest. *Water Air Soil Pollut.* 16: 13-31.

- Mitchell, M.J., G. Iwatsubo, K. Ohroi, and Y. Nakagawa (1997) Nitrogen saturation in Japanese forests: an evaluation. *Forest Ecology and Management* 97: 39-51.
- Neal, C., J. Mulder, N. Christophersen, M. Neal, D. Waters, R.C. Ferrier, R. Harriman and R. McMahon (1990) Limitations to the understanding of ion-exchange and solubility controls for acidic Welsh, Scottish and Norwegian sites. *Journal of Hydrology* 116: 11-23.
- New York State Department of Environmental Conservation (1984) A Policy for New York State to Reduce sulfur Dioxide Emissions. Draft Environmental impact Statement, Albany New York.
- Rhodes, A. L., M. N. Robert, and A. Pufall (2001) Influences of Land Use on Water Quality of a Diverse New England Watershed. *Environmental Science & Technology*. 35:3640-3645.
- Robson, A.J., C. Neal, S. Hill and C.J. Smith (1993) Linking variations in short- and medium-term stream chemistry to rainfall inputs - some observations at Plynlimon, Mid-Wales. *Journal of Hydrology* 144: 291-310.
- Sharpe, W.E., D.R.DeWalle, R.T. Liebfried, R.S. Dinicola, W.G. Kimmel and L.S. Sherwin (1984) Causes of Acidification of Four Streams on Laurel Hill in Southwestern Pennsylvania. *Journal of Environmental Quality* 13: 619-31.
- Tsujimura, M., Y. Onda and J. Ito (2001) Stream water chemistry in a steep headwater basin with high relief. *Hydrological Processes* 15:1848-1858.

上游集水區栽植檳榔對溪流特性影響之研究

林壯沛¹ 盧惠生² 黃良鑫³

【摘要】本研究探討台灣中部林業試驗所蓮華池分所範圍內，三個不同檳榔園比例集水區的流量特性，其中火培坑溪檳榔園佔19%、蛟龍溪5%、合坑溪13%。雨季期間(5月~10月)，火培坑溪及合坑溪之溪流量大於蛟龍溪，總量多28%及14%。旱季期間(11月~次年4月)，火培坑溪及合坑溪之溪流量小於蛟龍溪，總量少25%及3%，暴雨流量為蛟龍溪2.32倍及1.36倍，洪峰流量與基流量比值，火培坑溪與合坑溪比較龍溪大。顯示森林能調節流量，檳榔園比率多之集水區流出量會增加。

低水流量發生在11~12月，且低於0.01 cms/km²，最大與最低流量比值約50~370，有時會超過400。第95日豐水流量為0.041~0.775 cms/km²，火培坑溪>合坑溪>蛟龍溪，第185日平水流量為0.014~0.029 cms/km²，第275日低水流量為0.006~0.021 cms/km²及第355日枯水流量為0.001~0.016 cms/km²，均以蛟龍溪>合坑溪>火培坑溪，顯示坡地栽植檳榔面積比率影響集水區的流況，證實森林可以涵蓄水源，但是森林也會消耗一些水源。

【關鍵詞】檳榔、水文特性。

Effects of betel nut plantations on hydrologic characteristics of upstream watersheds

Jaung-pey Lin¹ Hui-sheng Lu² Liang-shin Hwang³

【Abstract】 In the Lianhauchi area, the Houpeikenchi creek, Jaulongchi creek and Hokenchi creek respectively had 19%, 5% and 13% of watershed area covered by betel nut plantations. During typhoon rainfall season from May to October, streamflows of

¹行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組副研究員，通訊作者。電子郵件:jplin@tfri.gov.tw
Associate Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan. Corresponding Author. E-mail: jplin@tfri.gov.tw

²行政院農業委員會林業試驗所集水區經營系研究員。
Senior Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan. Corresponding Author.

³行政院農業委員會林業試驗所集水區經營系助理研究員。
Assistant Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

Houpeikenchi creek and Herkenchi creek were found to be about 28% and 14% larger than that of Jaulongchi creek respectively. During dry season from December to April, streamflows of Houpeikenchi creek and Herkenchi creek were about 25% and 2% less than that of Jaulongchi respectively. Stormflows of Houpeikenchi and Herkenchi creeks were 2.32 and 1.36 times that of Jaulongchi creek. Peak flow and baseflow ratios of Houpeikenchi creek and Herkenchi creek were larger than those of Jaulongchi creek. The study results suggested that watershed streamflow regulation capability was better at forest land than betel nut plantation. Water yield productivity was higher at betel nut plantation than forest land.

Low flows were usually less than $0.01\text{cms}/\text{km}^2$ at these three watersheds from November to December. Maximum and minimum streamflow ratios were about 50~370 and sometimes over 400. Abundant streamflow at the 95th day of year was $0.041\sim 0.054\text{cms}/\text{km}^2$, and its order was as follows: Houpeikenchi creek > Herkenchi creek > Jaulongchi creek. Average streamflow at the 185th day of year was $0.014\sim 0.029\text{cms}/\text{km}^2$, and low streamflow at the 275th day of year was $0.006\sim 0.021\text{cms}/\text{km}^2$, and dried streamflow at the 355th day was $0.001\sim 0.016\text{cms}/\text{km}^2$ and their orders were as follows: Jaulongchi creek > Houpeikenchi creek > Herkenchi creek. The results indicate that watersheds with high ratios of total areas covered by betel nut plantations would significantly affect streamflow characteristics of watersheds. These results showed that forests not only regulate water resources but also consume water yield.

【Key word】 batel nut, hydrologic characteristics.

I、前言

臺灣的河川坡陡溪流短促，水流湍急，水資源保存不易，易發生洪氾水災；地質脆弱，地形陡峻，多高山少平原，沖蝕嚴重，易產生泥沙災害。遇到颱風豪雨來襲，動輒造成洪水氾濫及土石流為危害成災，乾旱缺雨則溪流枯竭供水不足，越來越趨嚴重，影響民生至鉅。各界質疑山坡地開發，破壞自然環境，引起水文變異，造成大地反撲，擴大災害效應，土地利用不當是主要原因。臺灣的土地利用型態種類繁多，改變快速，大都以生產為目的，以經濟為導向，常為了生產與經濟利益，提高品質與產量，忽視水土資源保育之重要性。一旦社會上的經濟環境改變，這些土地利用型態跟著改變。在暴利誘惑下，山坡地爭相開發，隨著橫貫公路的開闢，森林濫伐、濫墾在公路兩旁蔓延，栽植檳榔、高山茶、高冷蔬菜、山葵、溫帶果樹，以及超限土利用，破壞原始林相，改變水文環境。

根據臺灣農業年報(1998)，在 1971 年檳榔栽植面積為 1,607 ha，至 1997 年增加為 56,542 ha，短短幾年檳榔栽植面積增加 35 倍，顯示檳榔栽植面積快速增加，四處蔓延的問題。1997 年檳榔年產值超過 133 億元，相當 4 億美元，佔所有農業產值的 4.2 %，已成為中南部的主要經濟作物。檳榔市場需求量大，回收成本快，利潤好，農民種植意願高，已有許多農民放棄坡地果樹經營而改變栽植檳榔，甚至在公有地違法栽植檳榔，致延伸出許多水土流失問題(吳輝龍，1998；林壯沛，1992)。

過去集水區經營多著重於林地伐木、造林撫育、崩塌地處理的森林經營，已不能適合目前多變化、多目標的集水區經營現況，類似這樣的土地利用型態，砍伐森林，超限土地利用栽植檳榔，破壞森林結構，取代森林，擾動植被，是否降低集水區理水功能？對水土資源保育產生衝擊？成為各界關心與討論的焦點(鄭皆達，1995，2000；黃國輝，1997；謝豪榮，1998)。有必要深入探討坡地栽植檳榔與集水區水文特性的關係，所得成果應用在今後綜合性集水區經營與規劃具有參考價值與意義。

II、材料與方法

(I)基本資料調查分析

收集臺灣中部中低海拔水里溪上游火培坑溪、合坑溪、蛟龍溪集水區地理位置、地質情形、土壤條件、土地利用狀況、地文因子等，做詳細分析與說明，以

做為研判上游集水區栽植檳榔對溪流特性影響之參考。

(II) 水文觀測與資料收集

1995 年於蛟龍溪、火培坑溪、合坑溪集水區之溪流河道，利用橋孔與河道之固定斷面，設置水文觀測站，安裝觀測水位尺、自記雨量計、壓力式水位計與 Data logger，長期觀測溪流水位與雨量關係變化。觀測資料採每 10 分鐘收集一筆觀測資料，以 Data logger 紀錄觀測資料；配合溪流水位高低變化，量測橫斷面，測定溪流流速，計算流量，共觀測得到 24 組水位流量資料，進行水位流量率定曲線之檢測分析 (林壯沛，2001)，以做為水位轉換流量之公式，所用率定公式如下：

$$\text{合坑溪：} \quad Q=7.620H^{1.5}$$

$$\text{火培坑溪：} \quad Q=4.089H^{1.5}$$

$$\text{蛟龍溪：} \quad Q=1.840H^{1.5}$$

(III) 資料整理與分析

收集 1998 年 1 月至 2001 年 12 月，中低海拔合坑溪、蛟龍溪、火培坑溪集水區之長期水位觀測資料，統計分析合坑溪等三個觀測站之流量變化，包括年降雨量與年流量統計分析、月降雨量與月流量變化分析、雨季(5 月~10 月)與旱季(11 月~次年 4 月)之溪流量變化分析、暴雨與暴雨流量特性分析、洪峰流量與基流量分析、低水流量與流況解析、高流量與低流量、森林集水區流況特性分析。

III、結果與討論

(I) 研究地區特性說明

中低海拔之合坑溪(Herkenchi)集水區(856 ha)如圖 1，包含蛟龍溪(Jaulonchi)(370 ha)、火培坑溪(Houpeikenchi)兩集水區(357 ha)，位於本省中部南投縣魚池鄉，日月潭北部之丘陵地，海拔高度介於 500 至 1,000 m 之間，為水里溪上游之集水區。此地區土壤為趨紅化作用之黃壤，表土為褐色砂質壤土或黏質壤土，底土為棕黃色、黏質夾有岩石碎塊，質地疏鬆易碎，屬大鞍系玢質黏土。土壤厚度介於 20~40 cm，平均為 60~90 cm，集水區上游土壤深度較淺，約 20~60 cm。地質屬中新世之白冷層，有擬斷層沿蛟龍溪與火培坑溪床而上，岩層由砂岩、頁岩組成，粗粒砂岩呈黃色或白色，顆粒之圓磨度為次圓形，淘選度不佳，膠結差，成鬆散狀，細粒砂岩呈白色或灰色，顆粒圓磨度以次圓形或次棱角狀，質地緻密而堅硬。頁岩有二

種，緻密薄層狀或含碳質疏鬆狀者，色灰或灰黑，薄層常有小的節理，量多接近地面構成破碎面，後者成灰色，疏鬆成泥狀（葛錦昭等，1978）。

土地利用方面，蛟龍溪集水區大部份為公有地之人工林或天然闊葉林，佔該集水區面積之 88%，檳榔園佔 5%，其他土地利用 7%，土地利用單純；火培坑溪集水區一半為公有地，人工林及天然闊葉林佔 69%，一半為私有地包括花圃、茶園、蔬菜園、果園、農地、房舍佔該集水區面積 12%，檳榔園佔 19%，土地利用較複雜；合坑溪集水區包含蛟龍溪與火培坑溪集水區，其土地利用為兩者之綜合，人工林或天然闊葉林約佔該集水區面積 79%，檳榔園佔 13%，其他土地利用佔 8%，顯示此三集水區土地利用不同，差別在於檳榔栽植面積比率，如圖 2。

地文特性分析，如表 1，火培坑溪、蛟龍溪與合坑溪之形狀係數與密集度小，顯示集水區形狀接近矩形或長條形；三者集水區之平均坡度均大於 55%，為典型山區集水區；集水區面積、周長、溪流長度、平均寬度、海拔高度、方位都有相似之處。無論相鄰兩集水區的地緣關係，或是上下游兩集水區的關係，兩兩都適合做駢對集水區水文試驗，以探討坡地不同

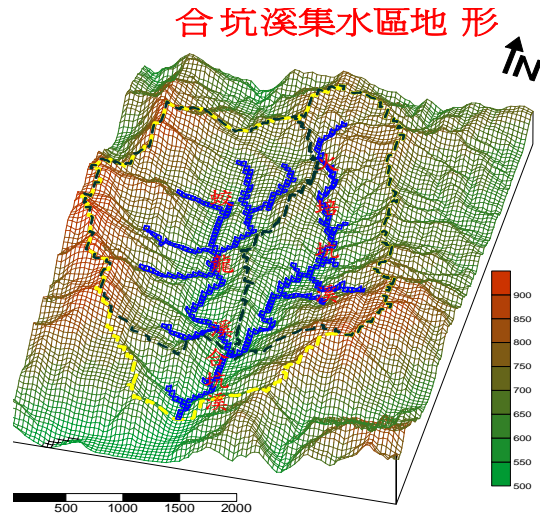


圖 1.合坑溪、火培坑溪、蛟龍溪集水區地形
Fig.1.Topography map of Herkenchi, Houpeikenchi and Jaulongchi watersheds

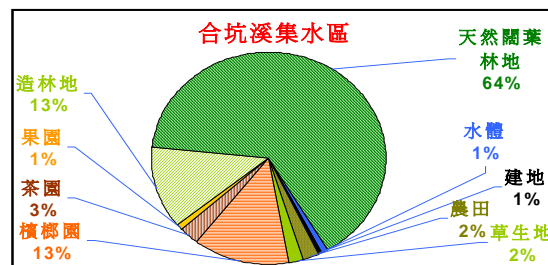
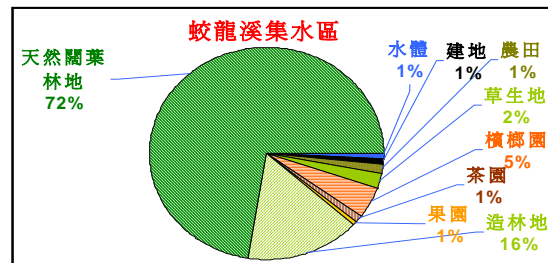
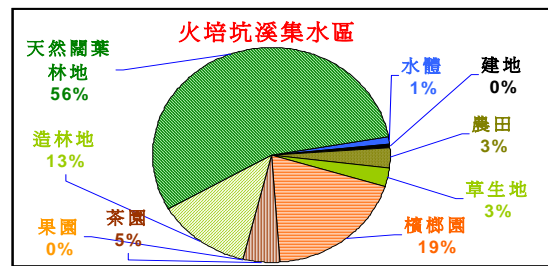


圖 2.合坑溪、火培坑溪、蛟龍溪集水區之土地利用

Fig.2. Ratios of different landuses of Herkenchi, Jaulongchi and Houpeikenchi watersheds

檳榔栽植面積比率對集水區水文特性的影響。

表 1. 蛟龍溪、火培坑溪、合坑溪之地文特性

Table 1. Quantitative geomorphologic characteristics of Jaulonchi, Houpeikenchi and Herkenchi watersheds

分析項目		蛟龍溪集水區	火培坑溪集水區	合坑溪集水區
面積(ha)	A	370	357	856
周長(m)	C	8,846	10,385	13,154
溪流長(m)	L	3,492	4,186	5,202
平均寬度(m)	A/L	1,060	853	1,646
形狀係數	A/L^2	0.30	0.20	0.32
密集度	$2\sqrt{\pi A}/C$	0.77	0.65	0.79
平均坡度(%)	S	57.5	55.6	58.1
最高海拔高(m)		958.2	883	958
最低海拔高(m)		552	552	527
方位		SES	SWS	S

(II) 不同檳榔園比率集水區之溪流量特性

1. 年雨量、流量與逕流率統計分析

整理合坑溪等三個水文站觀測資料(1998~2001)，得年雨量及各集水區年流量如表 2，該集水區之年雨量為 1,927.5~3,105.5mm，平均為 2,428.1mm，其中 2000 年雨量偏少，僅為 1,927.5 mm，小於蓮華池地區(1961~1996)之年平均雨量 2,181.3 mm，其他年份之年雨量則都比歷年之年平均雨量為高。三處集水區之年流量都以火培坑溪最大，合坑溪次之，蛟龍溪最小。林壯沛(2002)以 Thornthwaite 推算潛在蒸發散量，分析蓮華池地區水平衡結果，得知蒸發散量為 955.4 mm，剩水量 1,225.9 mm，剩水量與年雨量之比值為 56.2%，相當於年逕流率。比較合坑溪等三水文站觀測資料，在相同的降雨量條件下，依比率原則，調整火培坑溪年流量為 1,276.8~1,391.0 mm，平均為 1,313.7 mm，比水平衡分析之剩水量 1,225.9 mm 多出 87.8 mm；蛟龍溪年流量調整為 1,148.8~1,207.6 mm，平均為 1,179.0 mm，則少 46.9 mm；合坑溪年流量調整為 1,253.0~1,380.0 mm，平均為 1,294.0 mm，則多 68.1 mm。Bosch 與 Hewlett(1982)綜合 94 個試驗集水區資料，獲得粗略的植生覆蓋率與流量增減之關係：針葉樹林每減少 10%之面積，流量增加 40mm；落葉闊葉樹林每減少 10%之面積，流量增加 25 mm；灌叢林或草生地每減少 10%之面積，流量增加 10mm；此外，森林減少面

積過小，受到邊緣效應(Edge effect)之影響，流量增加之可能性不顯著。若針闊葉林每減少 10 %之面積，流量增加為 32.5 mm(針闊葉林各半)，根據前文火培坑溪集水區森林佔 69%，合坑溪集水區森林佔 79%，蛟龍溪集水區森林 88%，則火培坑溪應比水平衡分析之剩水量1,225.9 mm 要多出 97.5 mm，合坑溪要多 65.0 mm，此與本文觀測結果大致相符，惟蛟龍溪應多 39.0 mm，而實際少 46.9 mm，可能是邊緣效應影響。年雨量、流量統計分析之結果，顯示集水區栽植檳榔面積比率增加，會使集水區年溪流量增加。

表 2. 火培坑溪、蛟龍溪、合坑溪集水區年雨量與流量

Table2. Annual rainfall and streamflow amounts of Houpeikencui, Jaulongchi and Herkenchi watersheds

年份	雨量 (mm)	火培坑溪			蛟龍溪			合坑溪		
		流量 (mm)	損失量 (mm)	逕流率 %	流量 (mm)	損失量 (mm)	逕流率 %	流量 (mm)	損失量 (mm)	逕流率 %
1998	3105.5	1817.7	1287.8	59%	1654.8	1450.7	53%	1813.9	1291.6	58%
1999	2497.5	1592.6	904.9	64%	1315.3	1182.2	53%	1434.6	1062.9	57%
2000	1927.5	1153.2	774.3	60%	1057.9	869.6	55%	1219.4	708.1	63%
2001	2182.0	1282.5	899.5	59%	1208.0	974.0	55%	1269.4	912.6	58%
平均	2428.1	1461.5	966.6	61%	1309.0	1119.1	54%	1434.3	993.8	59%

2. 雨季與旱季之溪流量特性

蓮華池地區雨季自五月開始至十月止，雨量豐沛，為流量高峰期，土壤很快達到飽和，多餘水量形成漫地流或由地中水滲流，增加溪流水量，流量隨雨量增減而升高或降低；過了十月，雨量漸減，流量明顯跟著降低；十一月至次年四月為旱季之枯水量期，降雨量減少，溪流水量來自土壤水份的釋出及地下水緩慢滲流的水量，有時流量會大於降雨量。年末或年初，降雨量稀少，土壤乾燥，溪流水量降至最低，發生供水不足，偶而降雨，雨量都不大，大部分為土壤吸收。春雨增加土壤水份，或補助消耗的地下水量，提高土壤水調節量，使溪流水量逐漸上升恢復。通常三月~八月為蓮華池地區之土壤水份與地下水補充期，九月至翼年二月為消耗期，二月底至三月初的土壤水份與地下水之消耗累積量最大，土壤水份涵蓄調節量為 269~423 mm，地下水涵蓄調節量為 13~35 mm (楊炳炎等, 1978)。

整理 1998~2001 年蓮華池地區火培坑溪、蛟龍溪、合坑溪集水區之月雨量與溪流量如圖 3，月流量大致隨月雨量變化而變化。統計雨季(5 月~10 月)與旱季(11

月~次年4月)期間之溪流量，如表3，火培坑溪、蛟龍溪、合坑溪集水區在雨季與旱季之溪流量各有不同。雨季期間，三集水區之溪流量有顯著差異，火培坑溪 > 合坑溪 > 蛟龍溪，火培坑溪與合坑溪之溪流量比較龍溪多 28% 及 14%；旱季期間無顯著差異，但是資料顯示 1999 年蛟龍溪之溪

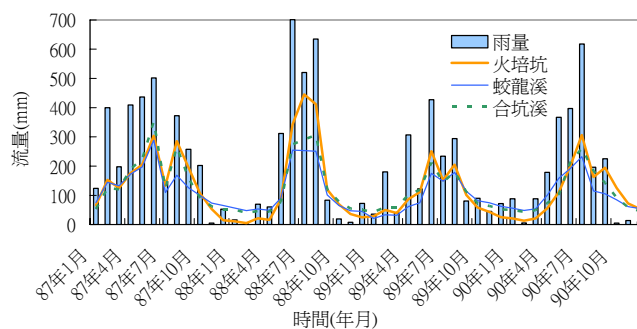


圖 3.火培坑溪、蛟龍溪、合坑溪集水區之月雨量與月流量(1998~2001)

Fig.3 Monthly rainfall and streamflows of Houpeikenchi, Jaulongchi and Herkenchi watersheds (1998~2001)

流量有偏低現象，可能與當年鄉公所在蓮華池拓寬道路工程之施工有關，溪流量大抵為火培坑溪 < 合坑溪 < 蛟龍溪，火培坑溪與合坑溪之溪流量比較龍溪分別少 25 % 及 2 %；檳榔園面積比率小的集水區如蛟龍溪，比檳榔園面積比率大的集水區如火培坑溪、合坑溪，較能調節雨季與旱季的溪流量。

表 3.火培坑溪、蛟龍溪、合坑溪集水區之雨季與旱季溪流量

Table3. Streamflows of Houpeikenchi, Jaulongchi and Herkenchi during rainfall and dry seasons

觀測年	雨季(5月~10月)				旱季(11月~次年4月)			
	雨量 (mm)	火培坑 溪(mm)	蛟龍溪 (mm)	合坑溪 (mm)	雨量 (mm)	火培坑 溪(mm)	蛟龍溪 (mm)	合坑溪 (mm)
1998	1918	1230.3	990.7	1212.7	205	121.8	345.5	293.5
1999	2270	1477.6	1016.3	1148.4	643	266.0	240.6	367.9
2000	1248	879.4	772.8	840.6	477	179.4	395.6	332.5
2001	1809	1099.6	887.7	993.7	1154	645.6	641.6	594.1
平均值	1811	1171.7	916.9	1048.8	620	303.2	405.8	397.0
比值%		1.28	1.00	1.14		0.75	1.00	0.98

3. 暴雨與暴雨流出量特性

鋒面或颱風所帶來的豪雨，其量均相當大，依降雨總量、延時、強度不同影響集水區流量的變化。駢對或主流支流關係集水區試驗，能消除降雨因素，瞭解土地利用改變對集水區流出量的影響。坡地栽植檳榔改變水循環各項因子的水文特性，對水資源涵養有不利影響，以有駢對或主流支流關係的火培坑溪、蛟龍溪、

合坑溪集水區為對象，瞭解不同栽植檳榔面積比率集水區之暴雨與暴雨流出量特性。

選出火培坑溪、蛟龍溪、合坑溪流水量有降雨與流量變化者計190組，依Hewlett (1967) 建議基流分離採固定斜率 $0.0005466 \text{ cms/hr/km}^2$ (英制單位為 0.05 cfs/hr/mi^2)，做暴雨流量(stormflow)與基流量(baseflow)分離，降雨量介於1~354.5mm，火培坑溪、蛟龍溪、合坑溪之逕流量分別為 $0.003\sim 125.732 \text{ mm}$ 、 $0.002\sim 40.672 \text{ mm}$ 、 $0.006\sim 83.904 \text{ mm}$ ，顯示三集水區之檳榔栽植面積比率不同，影響各集水區之暴雨流出量，造成各集水區之暴雨流量的差異，火培坑溪 > 合坑溪 > 蛟龍溪。統計火培坑溪、蛟龍溪、合坑溪集水區之平均暴雨流量分別為5.4、2.3、3.2 mm，火培坑溪及合坑溪之總暴雨流量為蛟龍溪之2.3及1.4倍。再分別以暴雨流量對降雨量做直線迴歸統計分析，結果如圖4.所示，均有極顯著的相關係數，顯示各集水區的暴雨與暴雨流量有線性關係。

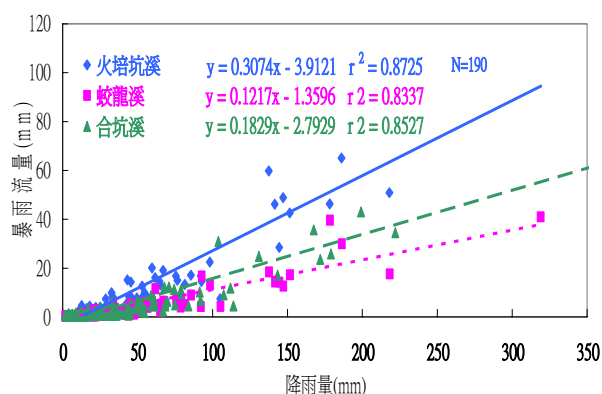


圖 4.蛟龍溪、火培坑溪、合坑溪集水區之暴雨與流量關係(1999~2001 年)

Fig.4.Relationship between rainfall and stormflow on Houpei, Jaulongchi, and Herkenchi watersheds during 1999~2001

。每增加1 mm微小雨量的增量，產生微小暴雨流量之增量分別為0.3074、0.1217、0.1829，以火培坑溪最大，蛟龍溪最小。

高暴雨流量都是在暴雨總量達300 mm以上發生，降雨強度有時會超過50 mm/h，產生的高暴雨洪峰流量與暴雨流量歷線的減退速度，依該次暴雨對集水區水份儲藏量補注的程度而異 (Cheng, 1978)，對暴雨流量都有很大的影響。例如畢祿溪、石門、蓮華池各集水區的水文反應比(Hydrologic response ratio)，亦即流出量和雨量之比，顯示集水區的地域、覆蓋情形、土壤狀況、地質條件及降雨因素不同，呈現不同的集水區流量特性。(鄭皆達、夏禹九，1990)

4. 洪峰流量與基流量特性

坡地栽植檳榔，改變集水區原有水循環及各項水文因子的特性，對集水區洪峰流量與低水流量有某種程度的影響。根據本文在蓮華池地區火培坑溪、蛟龍溪、合坑溪集水區的觀測，分析 2000 年及 2001 年碧利斯、西馬龍、潭美、桃芝、納莉、

利奇馬等颱風之流量歷線(hydrograph)。由於颱風行經路徑不一樣，對集水區的影響輕重不一，降雨量介於 17~336 mm，最大雨量強度為 7~92 mm/hr，都有很大的差異，並不影響各集水區洪峰流量與基流量之分析，結果如表 4，火培坑溪之洪峰流量為 0.035~3.961 cms/km²，蛟龍溪為 0.067~2.107 cms/km²，合坑溪為 0.051~3.067 cms/km²，顯然火培坑溪之洪峰流量最大，蛟龍溪最小。其中西馬隆颱風(5/13~14)，降雨量為 31 mm，因長期乾旱，消耗水量，土壤乾燥，基流量降低，火培坑溪與合坑溪之基流量小於蛟龍溪，降下的雨量都被土壤吸收，故火培坑溪與合坑溪之洪峰流量比較龍溪小。2001 年之桃芝颱風(7/29~31)，降雨量為 336 mm，土壤水與地下水獲得補充，明顯集水區的基流量比西馬隆時的基流量大許多，由於最大降雨強度達到 92 mm/hr，大於檳榔園滲透能 8.4 mm/hr，多餘的水量成為逕流快速流出，火培坑溪與合坑溪之洪峰流量比較龍溪大。

表 4. 火培坑溪、蛟龍溪、合坑溪集水區之逕流比、洪峰流量與基流量比

Table4. Ratios of peak flow and baseflow, and runoff for Hpupeikenchi, Jaulogchi and Herkenchi watersheds

颱風別	雨量 mm	P ₆₀ mm	火培坑溪集水區			蛟龍溪集水區			合坑溪集水區		
			洪峰流 量s/km ²	基流量 cms/km ²	Q _p /Q _b	洪峰流 量s/km ²	基流量 cms/km ²	Q _p /Q _b	洪峰流 量s/km ²	基流量 cms/km ²	Q _p /Q _b
碧利斯 (8/22~25)	75	7	0.118	0.026	4.5	0.088	0.052	1.7	0.087	0.038	2.3
西馬隆 (5/13~14)	31	26	0.035	0.019	1.8	0.067	0.037	1.8	0.051	0.030	1.7
潭美 (7/09~10)	17	8	0.245	0.037	6.6	0.170	0.076	2.2	0.129	0.049	2.6
桃芝 (7/29~31)	336	92	3.961	0.055	72.0	2.107	0.094	22.4	3.067	0.075	40.9
納莉 (9/16~20)	57	11	0.203	0.091	2.2	0.132	0.094	1.4	0.116	0.058	2.0
利奇馬 (9/27~30)	68	11	0.287	0.091	3.2	0.152	0.094	1.6	0.157	0.050	3.1

基流量都是來自地下水滲流而出之水量，土壤水儲蓄與地下水補注量影響基流量的大小，通常雨季基流比旱季大，集水區涵蓄水源能力好，基流量也會比較高；根據六次颱風的暴雨流量歷線分析，火培坑溪、蛟龍溪、合坑溪集水區之基流量分別為 0.019~0.091 cms/km²、0.037~0.094 cms/km²、0.030~0.075 cms/km²，以蛟龍溪集水區之基流量最大，火培坑溪最小，顯示蛟龍溪比火培坑溪與合坑溪較能涵蓄水源。若以洪峰流量Q_p與基流量Q_b的比值做為暴雨時期集水區調節流量的指標，

Q_p/Q_b 比值大時，表示洪峰流量大或基流量小，比值小則洪峰流量小或基流量大，比值大對流量調節與水源涵養不利。火培坑溪、蛟龍溪、合坑溪之 Q_p/Q_b 比值分別為 1.8~72.0、1.4~22.4、1.7~40.9，以火培坑溪最大，蛟龍溪最小，顯示檳榔栽植面積比率大的集水區，在暴雨時期調節流量與水源涵養不如檳榔栽植面積比率小的集水區。

5. 低水流量與流況特性

台灣的河川、溪流，高流量和洪峰流量都發生在每年 5 至 10 月的颱風季節，因暴雨的總量、強度、延時而異，降下雨量，一部份在土壤中儲蓄，或補注地下水層，一部份成為溪流量最大的瞬時洪峰流量可達 7 cms/km^2 或 10.4 cms/km^2 (鄭皆達、夏禹九, 1990)。過了過了 10 月隨著降雨量減少，溪流量減低，消耗土壤中飽和水層和來自地下水層的滲流水，到 11 月和 12 月溪流量最低，有時流量會低於 0.01 cms/km^2 。每年最大與最低流量的比值有時會超過 500，在連續長時間乾旱不下雨的情況，最大與最小瞬間流量的比值，甚至會超過 1000，這種最高與最低流量的比值在日本被稱為河況係數。最大與最低流量的比值火培坑溪為 204.6(53.1~367)、蛟龍溪為 15.9(10.9~22.6)、火培坑溪為 25.2(15.7~42.2)，顯示蛟龍溪集水區每年最大與最低流量的比值變化較小，溪水流量變化較穩定，而合坑溪與火培坑溪集水區最大與最低流量的比值較大，溪水流量變化較不穩定，此與土地利用複雜，集水區栽種檳榔面積比率較多有關。

根據不同檳榔栽植面積比率合坑溪、蛟龍溪、火培坑溪集水區，(1999~2001) 年之溪流量資料，計算日平均流量與排序，年流況曲線劃分四期為豐水期(第 1~95 日)、平水期(第 96~185 日)、低水期(第 186~275 日)、枯水期(第 275~355 日)，訂第 95 日、第 185 日、第 275 日、第 355 日之日平均流量為豐水流量、平水流量、低水流量、枯水流量(如表 5.)。

合坑溪、蛟龍溪、火培坑溪集水區之年流況趨勢分析，排序第 1~95 日為豐水期，日平均流量範圍為 $0.041\sim 0.775 \text{ cms/km}^2$ ，流況曲線由大至小快速遞減之後，遞減速度漸趨減緩，遞減速度受颱風豪雨之暴雨流出量大小影響而減緩。集水區間流況曲線之變化則因土地利用不同，日平均流量有高與低，流況曲線遞減速度有快與慢的區別，火培坑溪之流況曲線高於合坑溪與蛟龍溪，遞減速度以火培坑溪最小，蛟龍溪最快，平均火培坑溪、合坑溪、蛟龍溪三年第 95 日之日平均流量分別為 0.050 、 0.046 、 0.050 cms/km^2 ，火培坑溪 > 合坑溪 > 蛟龍溪；排序第 96~185 日

之平水期為 0.014~0.029 cms/km²，平水期溪流量來自地中快速流及地下水之滲流量，受土壤飽和水層與地中水滲流影響，流況曲線遞減速度趨於平緩，平均三年第 185 日之日平均流量分別為 0.020、0.026、0.026 cms/km²，蛟龍溪>合坑溪>火培坑溪；排序第 186~275 日為低水期 0.006~0.021 cms/km²，溪流量都為地中水滲流，流量平穩，流況曲線遞減速度極為微小，流況曲線漸近於一直線，平均三年第 275 日之日平均流量分別為 0.009、0.020、0.019 cms/km²，蛟龍溪>合坑溪>火培坑溪；排序第 276~355 日為枯水期 0.001~0.016 cms/km²，日平均流量趨於定值，平均三年第 355 日之日平均流量分別為 0.004、0.013、0.016 cms/km²；蛟龍溪>合坑溪>火培坑溪。

表 5.火培坑溪、蛟龍溪及合坑溪集水區流況

Table5. Streamflows of Herpeikenchi, Jaulongchi and Hokenchi watersheds

集水區別	觀測年	豐水流量 (CMS/Km ²)			平水流量 (CMS/Km ²)			枯水流量 (CMS/Km ²)		平均流量 (CMS/Km ²)
		大水量 第50日	豐水量 第95日	高水量 第140日	平水量 第185日	中水量 第230日	低水量 第275日	小水量 第320日	枯水量 第355日	
火培坑集水區	1999	0.138	0.054	0.025	0.014	0.010	0.006	0.003	0.001	0.051
	2000	0.072	0.049	0.031	0.021	0.015	0.012	0.009	0.007	0.037
	2001	0.070	0.048	0.033	0.023	0.018	0.010	0.005	0.004	0.038
蛟龍溪集水區	1999	0.090	0.049	0.028	0.022	0.021	0.019	0.018	0.016	0.042
	2000	0.060	0.049	0.034	0.027	0.021	0.019	0.018	0.016	0.034
	2001	0.058	0.041	0.035	0.029	0.025	0.021	0.019	0.016	0.038
合坑溪集水區	1999	0.096	0.051	0.028	0.021	0.019	0.017	0.016	0.016	0.046
	2000	0.065	0.051	0.036	0.029	0.024	0.020	0.016	0.015	0.039
	2001	0.073	0.049	0.038	0.026	0.022	0.018	0.017	0.016	0.042
日本安家川*	1950	0.055	0.034	0.024	0.018	0.015	0.012	0.010	0.008	0.029
	1960	0.049	0.032	0.024	0.020	0.017	0.014	0.011	0.009	0.031
	1970	0.058	0.035	0.025	0.019	0.015	0.012	0.010	0.008	0.032
	1984	0.051	0.032	0.023	0.019	0.015	0.012	0.010	0.009	0.030

*資料來源：日本元村測水所

引用石井正典(1997)之元村測水所資料，安家川為日本之森林集水區，面積為 142km²，其流況列於表 5，蓮華池地區日平均流量都大於安家川森林集水區，顯示蓮華池比日本安家川有較多之水資源。若是以平水流量為基準，豐水流量與平水

流量之比值，視為溪流豐盈的指標，比值大，豐水流量與平水流量之差異大，溪流調節功效不好。合坑溪之溪流豐盈指標平均值為 2.03(1.8~2.4)，蛟龍溪為 1.83(1.4~2.2)，火培坑溪為 2.76(2.1~3.9)，日本安家川為 1.75(1.6~1.9)，顯示日本安家川森林集水區溪流量穩定，蓮華池地區雨量與日本相仿，蛟龍溪大部份為森林覆蓋，森林面積佔 88%，檳榔面積佔 5%，溪流豐盈指標與日本接近，比檳榔佔 13% 之合坑溪與檳榔佔 19% 之火培坑溪小，溪流調節功效蛟龍溪較好。若以平水流量與枯水流量之比值，視為溪流涵蓄的指標，比值小時枯水流量小，枯水流量來自地下水之滲流量，故比值小的集水區水源涵蓄不好。日本安家川為 0.45(0.45~0.48)，合坑溪之溪流涵蓄指標為 0.64(0.52~0.75)，蛟龍溪為 0.62(0.55~0.73)，火培坑溪為 0.19(0.18~0.33)，涵蓄指標均小於 1，且低於 0.5，顯示枯水期流量容易缺水。就臺灣上游高、低海拔森林集水區之比較，大抵低海拔集水區是比高海拔森林集水區好，檳榔栽植面積比率小，森林覆蓋面積比率大之集水區，枯水時期涵蓄溪流量好。

IV、結論

1. 年雨量、流量與逕流率統計分析

比較合坑溪等三水文站觀測資料，在相同的平均年降雨量條件下，依比率原則，調整火培坑溪年流量為 1,276.8~1,391.0 mm，平均為 1,313.7 mm，比水平衡分析之剩水量 1,225.9 mm 多出 87.8 mm；蛟龍溪年流量調整為 1,148.8~1,207.6 mm，平均為 1,179.0 mm，則少 46.9 mm；合坑溪年流量調整為 1,253.0~1,380.0 mm，平均為 1,294.0 mm，則多 68.1 mm。年雨量、流量統計分析之結果，顯示集水區栽植檳榔面積比率增加，會使集水區年溪流量增加。

2. 雨季與旱季的流量特性

月流量之長期趨勢分析，月流量隨月雨量增減而升降；雨季期間(5~10 月)，火培坑溪及合坑溪比較蛟龍溪之總流量多 28 % 及 14 %；旱季期間(11~翌年 4 月)，則有相反的趨勢，火培坑溪及合坑溪比較蛟龍溪之總流量少 25 % 及 2 %。原因為蛟龍溪土地利用單純，森林地面積佔 88 %，檳榔園面積佔 5 %；火培坑溪土地利用複雜，森林地面積佔 69 %，檳榔園面積佔 19 %，比較蛟龍溪少 19 % 之森林地面積，多 14 % 之檳榔園面積；合坑溪之森林面積佔 77 %，檳榔園面積佔 13 %，比較蛟龍溪少

11 %之森林地面積，多 8 %之檳榔園面積，顯示土地利用的影響，蛟龍溪集水區較能調節流量。

3. 建立暴雨量與暴雨流量的關係

分析(1998~2001)蓮華池地區合坑溪等集水區之暴雨流出量 190 組，火培坑溪及合坑溪之暴雨流量為蛟龍溪 2.32 及 1.39 倍；洪峰流量與基流量比值，火培坑溪及合坑溪均比蛟龍溪大；暴雨流出量(SF)與暴雨量(PS)等之迴歸分析，相關係數達 0.9 以上，達極相關，關係式如下：

$$SF_{火}=0.3074 \times PS - 3.912 \quad (n=190, r^2=0.873)$$

$$SF_{蛟}=0.1217 \times PS - 1.360 \quad (n=190, r^2=0.834)$$

$$SF_{合}=0.1829 \times PS - 2.793 \quad (n=190, r^2=0.853)$$

式中PS表暴雨量(mm)， $SF_{火}$ 、 $SF_{蛟}$ 、 $SF_{合}$ 表火培坑溪、蛟龍溪及合坑溪集水區之暴雨流量(mm)。火培坑溪斜率大，暴雨流量較大，蛟龍溪斜率最小，暴雨流量亦較小。顯示森林能調節流量，檳榔栽植面積比率大時，不利水源涵養。

4. 洪峰流量與基流量特性

洪峰流量 Q_p 與基流量 Q_b 的比值做為暴雨時期集水區調節流量的指標， Q_p/Q_b 比值大時，表示洪峰流量大或基流量小，比值小則洪峰流量小或基流量大，比值大對流量調節與水源涵養不利。火培坑溪、蛟龍溪、合坑溪之 Q_p/Q_b 比值分別為 1.8~72.0、1.4~22.4、1.7~40.9，以火培坑溪最大，蛟龍溪最小，顯示檳榔栽植面積比率大的集水區，在暴雨時期調節流量與水源涵養不如檳榔栽植面積比率小的集水區。

5. 集水區最低流量與流況特性

每年低水流量都發生在 11~12 月，有時流量會低於 0.01 cms/km^2 ，最大與最低流量比值約 50~370，有時會超過 400。豐水期流量來自地表逕流及地表下逕流，第 95 日豐水流量為 $0.054\sim 0.041 \text{ cms/km}^2$ ，火培坑溪>合坑溪>蛟龍溪；平水期流量為地表下逕流量與地下水流量，第 185 日平水流量為 $0.014\sim 0.029 \text{ cms/km}^2$ ，低水期流量大部份來自地下水流量，第 275 日低水流量為 $0.006\sim 0.021 \text{ cms/km}^2$ ，枯水期流量則全部為地下水流量，第 355 日枯水流量為 $0.001\sim 0.016 \text{ cms/km}^2$ ，均以蛟龍溪較大，且蛟龍溪>合坑溪>火培坑溪；高水流量與平水流量之比值，火培坑溪>合坑溪>蛟龍溪，枯水流量與平水流量之比值，蛟龍溪>合坑溪>火培坑溪，顯示坡地栽植檳榔面積比率影響集水區的流況。高海拔森林集水區除了枯水流量較低外，豐水流

量、平水流量、低水流量均較高，證實森林能涵蓄水源，但是森林也消耗水源，在一定的條件下，森林對水源涵養是有利。

V、致謝

感謝林業試驗所薦送進修，國科會與農委會的經費支助，集水區經營組及蓮華池研究中心同仁在試驗工作上的協助。

VI、參考文獻

- 石井正典(1997) 闊葉樹から針葉樹への林種轉換は水枯れの原因。林業技術。No.663：23-26。
- 吳輝龍(1998) 山坡地栽植檳榔對水土保持之影響。國立中興大學水土保持學研究所博士論文。
- 林壯沛(1992) 山坡地栽植檳榔之水土流失問題探討。「高爾夫球場與檳榔園對水土保持之衝擊」專題研討會論文集。p.56-p.66。
- 林壯沛、盧惠生(1995) 坡地栽植檳榔對水土流失之探討。臺灣省林業試驗所簡訊2(3)：11-13。
- 林壯沛(2001) 臺灣中部合坑溪集水區水文網站之規劃設置。水土保持學報。33(2)：123-134。
- 林壯沛(2002) 坡地種植檳榔對臺灣中部山區集水區水文特性影響之研究。國立中興大學水土保持研究所博士論文。P194。
- 臺灣農業年報(1998) 臺灣省政府農林廳。
- 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。林試所試驗報告。No. 316：1~12。
- 鄭皆達、夏禹九(1990) 臺灣上游集水區水文特性之探討。土壤沖蝕及河川沖淤研討會論文集。P.213~227。
- 鄭皆達(1995) 慎思明辯 探討森林的水土保持功能—由種樹救水源談起。林業試驗所矮年週年慶學術研討會論文集。Pp.123-136。
- 鄭皆達、蘇瑞榮、葉正霖(2000) 森林和森林經營對溪流量特性的影響。林業試驗所林業叢刊。No.126：143~165。
- 黃國輝(1997) 阿里山地區國有林地不同作物之種植對水文環境影響之研究。國立

中興大學水土保持學研究所碩士論文。

謝豪榮、陳鴻烈、黃國輝、陳德天、李正義、許中立(1998) 林地超限利用對坡地環境影響之研究(三)。農委會 86 年度森林經營與林業經濟研究成果報告彙編。P.5-1~5-19。

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。林試所試驗報告。No. 304：p.50。

Bosch JM and Hewlett JD (1982) A review of catchment experiments to determine the effects of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Hydrology* 55:3-23

Cheng JD. (1989) Streamflow Changes after Clear-cut Logging of a Pine Beetleinfested Watershed in Southern British Columbia, Canada. *Water Resource. Res.* 25(3): 449-56.

Hewlett JD. and Hibbert AR. (1967) Factors affecting response of small watersheds to precipitation in humid areas. In *Forest Hydrology*. p.275-290. New York: Pergamon Press.

台灣中部地區森林移除後對暴雨流量及其回歸週期的影響

陸象豫¹ 黃良鑫²

【摘要】由於無法直接量測砍伐森林後對集水區洪水水量的影響，因此森林的防洪功能曾經是爭論不休的課題。極端降雨所造成洪水的水量通常需借助於頻率分析，以間接推導不同回歸週期的洪水量。本研究將 PHIM 模式的 UPLAND 子模式修改後模擬蓮華池三號集水區森林移除後集水區流量的變化情形，由 47 年的降雨記錄所推估的結果顯示，台灣上游天然闊葉林小集水區的每年最大流量並未因林木砍伐而有顯著的改變；然而對小於 2 年回歸週期的洪水水量則有顯著的差異。此外，推估砍伐後的年平均流量則增加約 12%，並達到顯著水準，顯示森林對集水區水量仍有所影響。由於對回歸期較大的洪水並未因森林砍伐而有顯著的改變，因而可推論有無森林對大洪水水量的影響有限。

STORMFLOW AND FLOOD FREQUENCY RESPONSE TO FOREST COVER REMOVAL IN CENTRAL TAIWAN

Shiang-Yue Lu¹ Liang-Shin Hwang²

【Abstract】 The effect of forest harvesting on flooding has been a subject of controversy. Determining such effects is constrained by the inability to measure directly how forest harvesting affects stormflow response to extreme events. Rainfall and snowmelt events that represent extreme events must be analyzed to adequately describe a frequency curve. In this study, the modified Peatland Hydrologic Impact Model (PHIM) was used in simulating forested and clearcut conditions in an upland-peatland first order watershed in central Taiwan. The results of simulations

¹行政院農業委員會林業試驗所集水區經營系研究員，通訊作者。電子郵件: shiang@tfri.gov.tw
Senior Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan. Corresponding Author.

²行政院農業委員會林業試驗所集水區經營系助理研究員。
Assistant Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

using 47 years of precipitation records indicated that overall the annual daily average discharges were significantly affected by clearing of upland forests in such watersheds. However, there appeared to be more of an effect on events with smaller recurrence intervals. Frequency analysis shown that quantiles of discharge for events of small recurrence interval approximately the 2 years after removal of forest cover appeared to have significant different from that of the pre-forest conditions. No significant changes were detected in the timing of peak flows that resulted from rainfall alone. In addition, the annual water yield increased nearly 12 percent, a difference that is statistically significant. Since frequency curves before and after forest removal showed only small differences for events having large recurrence interval, the effects of forest cover on large floods in central Taiwan is considered negligible.

【Key words】 forest harvest effects, extreme events, PHIM, frequency curves.

I、前言

長久以來未受干擾的天然林一直被視為水土資源保育最佳的土地利用方式，且森林覆蓋能舒緩降雨或融雪所造成的洪水 (Lee, 1980; Cheng et al., 2001; 陸象豫, 1996)。然而有許多研究者對此論調持懷疑的態度，因為森林減緩洪水的程度仍多不確定且森林遲滯 (detention) 集水區水量的功能亦因地而異；因而砍伐森林對溪流水量的影響在世界上許多地區仍受關注。

定量的分析森林覆蓋與洪水間的關係是相當困難的，其中若干原因在 Bosch and Hewlett (1982) 的研究論述中已詳細討論過。對大多數人而言，當溪流水位高於警戒線並對當地居民構成生命財產的威脅時即為洪水。而水文學研究者，則借每年最大流量等記錄 (maximum annual peak discharge) 以頻率分析方式試圖推估各回歸週期的洪水水量，亦即推估某一期間內流量超過某特定值的洪水發生機率。一般而言，多數水利單位均將 1.5 年回歸週期的洪水水位線視為高水位線，而具有 5 至 10 年回歸週期的溪流流量及定為洪水，然而此等小洪水造成的危害通常甚輕微。

林木伐除後後導致於蒸發散量降低，因此集水區溪流的流量通常會增加，此種現象業經由集水區經營研究而獲得證實 (陸象豫, 2001)。溪流流量因砍伐林木的增加量仍然與降雨量、優勢樹種以及伐木面積佔集水區總面積的百分比而有密切的關係 (Bosch and Hewlett, 1982; Whitehead and Robinson 1993; 陸象豫, 1996;

Cheng et al., 2001)。大多數的研究指出砍伐會增加集水區的洪峰流量 (Hewlett and Helvey, 1970; Swanson and Hillman, 1977; Harr et al., 1975; Harr, 1976; Verry et al., 1983; Troendle and King, 1987; Jones and Grant, 1996; Thomas and Megahan, 1998)，然而在美國 Oregon 州亦有若干研究顯示若砍伐所造成的擾動程度不大時，洪峰流量並未因伐木而有顯著的變化 (Rothacher, 1973; Harris, 1973; Harr et al., 1975; Hornbeck et al., 1993)。Harr 等作出結論，認為洪峰流量受砍伐林木而改變的大小因集水區水文系統受擾動的程度而異，達到顯著水準的差異多係因為大規模地表破壞的結果。當砍伐區有較多的土壤水留存在土壤孔隙內，則此時僅有少部分的降雨可蓄存於土壤層，因此就容易產生逕流，洪峰流量增加情形則較為顯著。因此當集水區內的土壤水接近飽和時，植生存在與否對集水區洪峰流量的影響即不亦達顯著水準 (Hess, 1984)。

此外，林木砍伐後集水區洪峰流量到達時間亦受影響 (Hewlett and Helvey, 1970; Harr and McCorison, 1979; Troendle and King, 1985; Troendle and King, 1987; Cheng et al., 1975; Cheng, 1989)。受改變的程度因氣候因子、集水區形狀特性以及砍伐擾動的規模而異，通常與改變集水區水流的路徑與 routing 有關。砍伐改變與融雪有關的洪峰流量到達時間則與積雪的空間分布及能量收支有關，因而難有一至性的結果；伐木後融雪所導致洪峰流量到達時間可能提前亦可能延後，端視砍伐區是否能獲得額外的能量。

前面已闡述洪峰流量與總流出量會因林木砍伐後而有所改變，但卻甚少研究報告論及砍伐後不同回歸週期洪峰流量改變的情形。大多數探討植生覆蓋改變對集水區流量影響的研究多於試驗集水區進行，處理前先進行若干年的檢定分析 (calibration analysis)，隨後進行處理 (如皆伐等)，並借處理後實測流量與由檢定期相關性推估的流量相比較，以判定影響程度。此等研究對年流量改變情形或可獲得可信的結果，雖然有若干配對試驗集水區仍持續監測林木變更後的流量變化，但受限於觀測資料年限，對較大回歸週期洪水的影響仍難以確切判定改變情形，因此對洪水頻率的影響則難有說服力。

利用水文模式模擬流量，為探討地表變更後對集水區流量長期影響的一種可行的方式。水文模式簡化水文系統，藉著適當的輸入參數，得以推估集水區水文運作與反應，因而可作為分析長期流量變化的工具。美國明尼蘇達大學為推估泥煤區上游一級小集水區開發之 PHIM (Peatland Hydrologic Impact Model) 模式，可適用推估林木變更後集水區流量的變化。本研究將其 UPLAND 子模式稍作修改，並以蓮華三號集水區歷年降雨紀錄為輸入值，借改變地表覆蓋與入滲速率等參數

數值，推估該集水區地表覆蓋剷除後長期的流量變化情形。林木變更前後每年極端值流量的頻率分析則採用 Log Pearson Type III 分佈曲線分析。然而由於觀測資料期距有限，以及植生會隨時間增長而恢復，此種方法推估伐木後長期的流量變化仍有其缺點存在。

II、材料與方法

(I) 模式簡介

本研究將 PHIM 之 UPLAND 子模式修改後再進行推估。PHIM 為集塊參數 (lumped parameter)、定律式 (deterministic)、實質性 (physical based) 之連續模擬 (continuous simulation) 之水文模式；由 University of Minnesota Department of Forest Resources, USDA Forest Service North Central Forest Experimental Station 與 Minnesota Department of Natural Resources division of Minerals 共同研發而成。模式包括 UPLAND、PEAT、MINED PEATLAND、CHANNEL ROUTING 與 RESERVOIR ROUTING 等子模式，各子模式可獨立作業或合併數個子模式共同執行。在執行程式時，需先將集水區依地形、地貌特性劃分成與上述子模式對應的水文單元 (hydrologic uni)，再由最上游的水文單元循序推演流量及相關之水文因子。PHIM 4.0 最大的特色為完全為白箱作業 (white box)，再模擬過程中所有的參數均可監控與輸出，並具有繪製水文麗線的功能 (Lu et al., 1994)。

PHIM UPLAND 子模式將坡面依周界分割成若干性質相同之流量監控區 (control volume)，監控區下游端之寬度為 1.0 m，上端則接集水區邊界；合併所有流量監控區之流出量則為及水區流量。每一監控區之土壤面劃分為三層，分別為 Shallow Surface Flow Layer (SSFL)、Lower Root Zone (LRZ)、Lower Boundary Control Volume (LBCV)，如 Fig.1 所示。SSFL 與 LRZ 間以泥煤區常見之 h 層 (為高度分解之有機質聚集層) 加以區隔，LRZ 則係由 h 層延伸至根系所到達之深度。流量推估係以水文收支為主要依據，由上而下逐一計算至 LBCV 層。與模式相關之參數計有：降水量 (PPT)、勢蒸發散量 (PET)、實際蒸發散量 (AET)、上層林冠截留量 (UI)、灌木層截留量 (UI)、淨雨量 (NRAIN)、雪水當量 (SWE)、溶雪量 (MELT)、地表逕流量 (QS)、地中逕流量 (Q)、土壤水量 (θ) 等如 Fig. 2 所示。

鑒於台灣多數上游森林集水區多為狹長型，若將之以下游端 1.0m 劃分成流量監控區，則因每一監控區過於狹長而難以模擬實際的水分流動狀況，故本研究將集水區由最上端依長 2m 與寬 1m 化分監控區，將集水區劃分成 M*N 陣列

(M = 集水區長度/2, N =最大寬度)。流量模擬仍依 SSFL、LRZ 及 LBCV 三層循序演算，惟累計流量則由矩陣的最上層循序累加，直至集水區出口。

UPLAND 子模式中各相關水文因子之推估請參考 Lu et al, 1994 及 陸象豫 1997。

(II)集水區概況

本研究以林業試驗所蓮華池研究中心三號試驗集水區為對象。蓮華池三號試驗集水區位於南投縣魚池鄉，介於東經 $120^{\circ}54'3''$ 至 $120^{\circ}55'0''$ ，北緯 $23^{\circ}55'30''$ 至 $23^{\circ}56'00''$ 之間。試區全年降雨量約為 2250mm，年平均氣溫約 20.8°C ，年平均蒸發量約為 1020.0mm，年平均相對溼度為 85.6%，詳細的氣象資料如 Table 1。三號試驗集水區面積約 4.10ha，主流長度 142m，海拔高度介於 659m 至 810m 之間，平均坡度為 57.5%，平均寬度 289m，集水區形狀係數為 2.03，密集度為 0.58，方位為東向 (葛錦昭等 1978、Lu et al., 2009)。地質為砂頁岩互層，土壤屬於趨紅化之黃壤，表層為灰褐色砂質黏壤土，底土為棕黃色黏土並夾有岩石碎塊與團狀構造物，土層深厚，部分地區可達 1.5m。

本集水區林木鬱閉完整，大致上可分上、中、下三層，唯層次結構不甚明顯。上層林木為高達 5m 以上之喬木，樹高超過 15m 者甚為普遍，計有 48 種，分屬 22 科 39 屬。中層林木介於 3 至 5m 之間，以小葉赤楠、香桂為優勢種。下層屬更新木及灌木類，皆為極耐陰之樹種，證實本試區鬱閉完整。就本試區之組成分子及更新林木種類而言，均以殼斗科及樟科植物站大部分，顯示本區已形成以樟科、殼斗科為骨幹之極群植物社會 (陸象豫 1997)。

(III)水文氣象紀錄整理及建立集水區地形資料檔

本研究選取蓮華池三號集水區 1961 至 2007 年之日總降雨量及日平均最高與最低溫度為模式的輸入項目，單位分別為 cms 與 $^{\circ}\text{C}$ 。PHIM UPLAND 子模式所需輸入之參數包括地形、土壤含水量、截留等大項目，此等資料可由地形圖、GIS 資料求得，或由以往研究文獻與實際野外量測而獲得 (葛錦昭等, 1978; Rawls et al., 1982; 陸象豫與唐凱軍, 1995)。為驗證輸入資料的有效性，本研究將 1970 至 1975 年的日流量記錄與實際推估結果做為參數驗證之用，驗證後輸入資料的項目與數值如 Table 2。

(IV) 模擬砍伐後的集水區流量

在 UPLAND 子模式中與林木砍伐有關的參數計有 10 個，將其數值依照砍伐的情況進行調整，然後再以更改後的數值輸入模式中，以模擬林地變更後的集水區流量。此等參數計有：上層林木覆蓋百分比 (overstory canopy cover percentage, OSC)、高灌木叢覆蓋百分比 (tall shrub cover percentage, TSC)、低矮灌木叢覆蓋百分比 (lower shrub canopy cover percentage, LSC)、草本植物覆蓋百分比 (herbaceous cover percentage, HERBC)、根系最大深度 (maximum depth of rooting, YROOT)、根系分布係數 (rooting distribution coefficient, BETA)、融雪速率 (snowmelt rate, SMRATE)、植物蒸散量受阻時之土壤含水量 (volumetric water content when the supply of water for ET is limiting, VWCL)、蒸發散量為 0 時之土壤含水量 (the volumetric water content when AET goes to 0, VWCZ)、平均入滲速率 (average infiltration capacity, INFAV)。其中融雪速率集土壤含水量因蓮華池地區不會發生或欠缺實際量測紀錄，本研究假定其數值不受砍伐影響。

森林集水區遭砍伐後，變化最大且最明顯者為林冠覆蓋百分比，本研究假定砍伐後僅保留 10% 之上層林冠覆蓋率。蓮華池三號集水區林木根系最大深度約為 2m，而蒸發散量可影響土壤含水量的深度估計約為 0.6m。實際蒸發散量 (actual evapotranspiration) 與勢能蒸發散量 (potential evapotranspiration) 的比值隨土壤含水量及林木種類而異。本研究採用 Leaf 與 Brief 1975 之研究，將林地與砍伐跡地蒸發散量受阻時之土壤含水量設定為 $\theta_{FC} / 2$ 與 θ_{FC} (θ_{FC} 為田間容水量)；而實際蒸發散量為 0 時之土壤含水量，林地與砍伐跡地分別為 θ_{WP} (WP: wilt point) and $\theta_{FC} / 1.33$ 。此外，本研究並忽略砍伐時對土壤的擾動與壓實作用 (compaction)，因而入滲速率並未受到改變。Table 3 為蓮華池三號集水區模擬砍伐前後之 PHIM UPLAND 輸入之參數值。

(V) 頻率分析

每日最高及最低氣溫、日降雨量為 PHIM 模式模擬日流量必須的輸入資料。本研究採用蓮華池氣象站 1961 年至 2007 年的日最高、最低溫度與降雨量作為基本的輸入資料，共計可獲得 47 比流量紀錄，在以此等資料進行頻率分析。模擬的起始狀況 (initial condition, including: snow water equivalent, soil water content, water table elevation)，則由上一年模擬的數值帶入。經由 PHIM 模擬的結果，分別求得砍伐前後的年平均流量，並挑選出砍伐前後的每年連續 3 天之最大總流量，分別建立砍伐前與砍伐後的每年流量序列。

本研究採用 log-Pearson Type III (LP3) 作為洪水頻率分佈模式作為頻率分析的依據，LP3 為美國水資源署 Water Resources Council (USWRC, 1981) 推薦之洪水頻率分析分佈曲線，廣泛地應用於推估美國各河川不同回歸週期的洪水量。

而如何決定由所收集之取樣紀錄來推算不同回歸週期的洪水量，則須借助於可信區間來評估其可信度。可信區間的大小與所選取的信賴水準 (confidence level, β) 有密切之關係。本研究採用 95% 信賴水準，顯著水準 (significance level, α) 則為 $(1-0.95)/2 = 0.025$ ，或 2.5%。

對 LP3 分佈而言，某一回歸週期的上下界可信區間可由下式推估而得，

$$U_{T,\alpha} = \bar{Y} + S K_{T,\alpha}^U$$

及

$$L_{T,\alpha} = \bar{Y} - S K_{T,\alpha}^L$$

其中 $K_{T,\alpha}^U$ 與 $K_{T,\alpha}^L$ 分別為上下可信區間因子 (upper and lower confidence limit factor)，並且可由下式求得 (USWRC, 1981):

$$K_{T,\alpha}^U = \frac{K_T + (K_T^2 - ab)^{1/2}}{a}$$

$$K_{T,\alpha}^L = \frac{K_T - (K_T^2 - ab)^{1/2}}{a}$$

其中

$$a = 1 - \frac{Z_\alpha^2}{2(N-1)}$$

$$b = K_T^2 - Z_\alpha^2/N$$

而 Z_α 為 the standard normal variable with exceedence probability α 。對 95% 信心水準而言， Z_α 的數值為 1.960。

III、結果與討論

(I) LP3 機率分佈模式對年流量適合性

蓮華池 3 號集水區年水流量對 Log-Pearson Type III 機率分佈函數的適合性分析係由 chi-square (χ^2) 分析來檢驗，結果於 Table 4。顯示 χ^2 值於砍伐前及砍伐後均小於 95% 信心水準之數值 (18.31)，顯示年流量對 LP3 分佈曲線具有相當高的可信度。因此本研究所有的結果均建立於 LP3 機率分布的假定上。

(II) 流量頻率分析

經由 47 年的氣象紀錄模擬而得到的流量如 Table 5，平均日流量較砍伐前增加 0.0018 cms (12.2%)，而每年最大連續 3 日總流量則增加 3.35 mm (2.40%)。雖然模擬結果，所有的砍伐後流量均大於砍伐前的流量，然而在 t-test 檢驗下，砍伐前後的平均日流量與最大 3 日總流量其差異均為達顯著水準 (日流量與最大連續 3 日總流量之 t-tests 值 分別為 1.2678 and 0.7002)。證實若地表為受嚴重的干擾，集水區的最大流量受地表植物覆蓋的影響相當有限。

經由 LP3 推估不同回歸週期的平均日流量與最大連續 3 日總流量列於 Table 6 與 Table 7。可以看出相關的頻率分析因子在砍伐後均有所增加，砍伐後平均日流量增加 0.0018 cms，標準偏差 (standard deviation) 則降低 0.035，而偏離係數 (skew coefficient) 則由 -0.0155 增至 0.2298 之改變；每年最大連續 3 日總流量亦有類似之改變。砍伐前後各回歸週期的洪水量約在 2 年回歸週期時即漸趨一致，亦即 2 年以上回歸期的洪水量差異不顯著。事實上，由推估所得的日最大流量與最大連續 3 日流量，在大於 2 年回歸週期時，砍伐前後的流量在 95% 信心水準下差異即不顯著，顯示林木的有無對小洪水水量方有所影響。

IV、參考文獻

- 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 1996 森林在水土資源保育上之功能。臺灣林業科學 11(3):333-347。
- 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 2001 森林與水 林業試驗所林業叢刊第 133 號。102p。
- 葛錦昭、楊柄炎、林淵霖、楊楚淇、漆陞忠 1978 台灣森林集水區經營試驗初步報告。林業試驗所研究報告第 304 號。

- Bosch, JM and JD Hewlett. 1982. A review of catchment experiments to determine the effects of vegetative changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55:3-23.
- Cheng, JD, TA Black, J De Vries, RP Willington, and BC Goodell. 1975. The evaluation of initial changes in peak streamflow following logging of a watershed on the west coast of Canada, *International Association Scientific Hydrology Publication*, 117, 475-486.
- Cheng, JD 1989. Streamflow changes after clear-cut Logging of a pine beetle-infested watershed in southern British Columbia, Canada. *Water Resources Research* 25(3):449-456.
- Cheng JD, LL Lin, and HS Lu. 2001 Influence of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan. *Forest Ecology and Management* 165:11-28.
- Gale, MR and DF Grigal. 1987. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status. *Canadian Journal for Forest Research* 17:829-834.
- Harr, RD, WC Harper, and JT Krygier. 1975. Changes in storm hydrographs after road building and clear-cutting in the Oregon Coast Range. *Water Resources Research* 11(3):436-444.
- Harr, RD 1976. Forest practices and streamflow in Western Oregon. USDA Forest Service, General Technique Report PNW-49. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Portland, Oregon, 22p.
- Harr, RD and FM McCorison. 1979. Initial effects of clearcut logging on size and timing of peak flows in a small watershed in western Oregon. *Water Resources Research* 15(1):90-94.
- Harris, DD 1973. Hydrologic changes after clear-cut logging in a small Oregon coastal watershed. *Journal of Research, U.S. Geologic Survey* 1(4):487-491.
- Hewlett, JD and JD Helvey. 1970. Effects of forest clearfelling on the storm hydrograph. *Water Resources Research* 6(3):768-782.
- Hornbeck, JW, MB Adams, ES Corbett, ES Verry, and JA Lynch. 1993. Long-term impacts of forest treatments on water yield: a summary for northern USA. *Journal of Hydrology* (150):323-344.
- Lu SY, TVW McAdams, KN Brooks. 1994. User manual of Peatland Hydrologic Impact Model. Department of Forest Resources, University of Minnesota, st.

- Paul, Minnesota, 250pp.
- Lu SY, Hsieh HC, Chen CH, Hwanh LS. 2009. The revised physiological factors for experimental watersheds of Taiwan Forestry Research institute. *Journal of Forest Science* (in published).
- Rothacher, JS 1973. Does harvest in west slope douglas-fir increase peak flow in small forest stream? U.S.D.A. Forest Service, Research Paper PNW-163, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Portland, Oregon, 13 pp.
- Rawls WL, DL Breakensiek, KE Saxton. 1982. Estimation of soil water properties. *Transaction ASAE* 1316-1320,1328.
- Swanson, RH and GR Hillman. 1977. Predicted increased water yield after clearcutting verified in West-Central Alberta. Northern Forest Research Center Information Report NOR-X-198, Edmonton, Alberta, 40 pp.
- Thomas, RB and WF Megahan. 1998. Oak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon: a second opinion. *Water Resources Research* 34(12):3393-3403.
- Troendle, CA and RM King. 1985. The effect of timber harvest on the Fool Creek watershed 30 years later. *Water Resources Research* (21):1915-1922.
- Verry, ES, JR Lewis, and KN Brooks. 1983. Aspen clearcutting increases snowmelt and storm flow peaks in Northern Central Minnesota. *Water Resources Bulletin* 19(1):59-67.
- Wheathead PG and Robinson M. 1993. Experimental basin studies- an international and historical perspective of forest impacts. *Journal of Hydrology* 145:217-230.
- U. S. Water Resource Council. 1981. Guidelines for determining flood flow frequency. Bulletin 17B. 2120 L Street, N.W. Washington, D.C. 20037.

Table 1. Climatic conditions for the Lienhuachih area (from Jan. 1961 to Dec. 2007)

	Total rainfall (mm)	Average ¹⁾ daily temp. (°C)	Average daily max.temp. (°C)	Average daily min.temp. (°C)	Average ¹⁾ relative humidity (%)	Total ²⁾ ET (mm)	Average wind velocity (m/sec)	Average Radiation (MJ/m ²)
Jan	49.2	14.7	20.7	10.0	84.4	62.6	0.36	275.22
Feb	85.5	16.0	21.8	11.6	85.8	60.6	0.39	307.66
Mar	104.7	18.3	23.7	13.4	86.3	83.7	0.43	356.37
Apr	137.0	21.1	26.1	16.6	86.2	90.7	0.41	389.52
May	316.5	23.2	27.8	19.1	86.5	89.9	0.42	446.93
June	491.9	24.4	28.8	20.3	87.1	91.9	0.40	399.62
July	369.1	25.1	29.8	21.0	84.8	116.2	0.45	507.43
Aug	412.0	24.7	29.3	20.7	86.3	104.7	0.42	450.76
Sept	181.6	24.1	28.8	19.8	86.2	100.8	0.40	402.76
Oct	46.0	22.4	27.4	17.9	85.0	91.4	0.39	398.45
Nov	24.0	19.5	25.0	14.8	84.7	70.7	0.34	307.71
Dec	33.0	16.1	22.1	11.2	84.1	56.9	0.32	304.33
Avg.		20.8	25.9	16.4	85.6		0.39	378.90
Total	2250.5					1020.1		

1) Average of daily 09:00, 14:00, and 21:00 records before 1993.

2) Measured by evaporative pan with a diameter of 120 cm.

Table 2. The format of UPLAND submodel and site description data for the hydrologic unit of the Lienhuachih #3 watershed.

Characterization data			Description
WS-L3 UPLAND DATA SET			Description of data file
95.0	3.30		Overstory cover % and max. interception capacity (mm)
80.0	1.20		Tall shrub cover % and max. interception capacity (mm)
40.0	1.00		Low shrub cover % and max. interception capacity (mm)
90.0	1.00		Herbaceous cover % and max. interception capacity (mm)
1	1		Month and day of the beginning of growing season
1	1		Month and day for the maturity of foliage
12	31		Month and day for ending of growing season length
0.0			Rain-freeze threshold temperature (°C)
0.0			Snow water equivalent (cm)
0.150	0.0		Melt rate coefficient and base temperature (°C)
30.0	200.0		Depth to the base of SSFL and LRZ (cm)
150.0			The maximum of depth of rooting (cm)
0.9750			Beta value for Gale's vertical root distribution
0.4810	0.2050	0.0510	θ_s , θ_{fc} and θ_{wp} for SSFL
0.4080	0.3300	0.1200	θ_s , θ_{fc} and θ_{wp} for LRZ
0.1030	0.0510		Soil water content when water supply limits ET and ET goes to zero
0.1650	0.1200		for SSFL and LRZ, respectively
0.060	0.197		Initial water content for SSFL and LRZ, respectively
3.350	8.340		Cambell's b value for SSFL and LRZ, respectively
17.280	0.2300	0.230	K_{sat} for SSFL, Impede horizon, and LRZ (cm/hour)
0.390			Drainable porosity
0.80			Infiltration capacity (cm/h)
3.43			Area of hydrologic unit (ha)
780.6			Discharge perimeter (m)
69.0			Average land slope (%)

Note: Column positions are free and variables within a row are separated by 1 or more blanks.

Table 3. Values of parameters before and after parameter changes to reflect the effects of forest cover removal on streamflow for the Lienhuachih No. 3 watershed

Name of Parameters	Forest Cover Removal		Unit	Reference
	Before	After		
OSC	95.0	0.0	%	
TSC	80.0	0.0	%	
LSC	40.0	0.0	%	
HERBC	90.0	10.0	%	
YROOT	150.0	50.0	cm	Barten, 1988; Lee, 1980
BETA	0.975	0.993	---	Gale and Grigal, 1987
SMRATE	0.0	0.0	cm/°C-day	Barten, 1988
VWCL1	0.103	0.205	cm ³ /cm ³	Leaf and Brink, 1975
VWCZ1	0.051	0.154	cm ³ /cm ³	" "
VWCL2	0.165	0.33	cm ³ /cm ³	" "
VWCZ2	0.12	0.248	cm ³ /cm ³	" "
INFAV	0.8	0.8	cm/hour	

OSC: Overstory (> 3m) cover percentage

TSC: Tall shrub (1-3m) cover percentage

LSC: Low shrub (< 1m) cover percentage

HERBC: Herbaceous cover percentage

YROOT: The maximum depth of rooting or soil water depletion depth

BETA: Mean roots distribution coefficient

SMRATE: Melt rate coefficient for temperature index snowmelt equation

VWCL1: Volumetric water content when water supply limits ET in Zone 1

VWCZ1: Volumetric water content when AET goes to zero in Zone 1

VWCL2: Volumetric water content when water supply limits ET in Zone 2

VWCZ2: Volumetric water content when AET goes to zero in Zone 2

INFAV: Infiltration capacity.

Table 4. Results of chi-square goodness of fit test

Item	Before Cutting	After Cutting
Max. Daily Rainfall		
Discharge	10.316	9.526
Max. 3-Day Rainfall		
Runoff Volume	3.736	3.211

Note: All statistics have a 10 degree of freedom.

The critical value at 0.05 level of significance is 18.307

at 10 degree of freedom.

Table 5. Summary simulated results (47 years) for the Lienhuachih No. 3 watershed before and after removal of forest cover

Item	Before			After			Average Increases
	Ave.	Std.	Skew	Ave.	Std.	Skew	
Annual Precip. (mm)	2200.13	165.65	---	2200.13	165.65	---	---
Annual Water Yield (mm)	946.10	59.50	---	1059.63	56.07	---	13.53
Avg. Daily Discharge (cms)	0.0098	0.0177	2.324	0.0110	0.0176	2.300	0.0018
Max. 3-Day Discharge (mm) Volume	138.17	1831.93	1.144	141.52	1761.70	1.188	3.35

Table 6. The estimated annual average daily rainfall discharges under different return years for the Lienhuachih No. 3 watershed

Return Year	Before ----- (m ³ /sec) -----	After -----	Increase	Percent of Increase (%)
1.11	0.00763	0.00970	0.00206	27.05
1.43	0.01283	0.01492	0.00209	16.28
2.0	0.01832	0.02031	0.00199	10.85
3.33	0.02611	0.02787	0.00177	6.77
5.0	0.03230	0.03389	0.00159	4.92
10.0	0.04331	0.04465	0.00134	3.09
20.0	0.05511	0.05632	0.00121	2.19
25.0	0.05911	0.06031	0.00120	2.03
40.0	0.06785	0.06911	0.00126	1.85
50.0	0.07217	0.07349	0.00132	1.83
100.0	0.08630	0.08800	0.00170	1.97

Frequency components for LP3 distribution:

Before forest removal:

mean = -1.73907

SD = 0.29415

Cs = -0.01548

Cw = -0.04278

After forest removal:

mean = -1.68589

SD = 0.25902

Cs = 0.22984

Cw = 0.14701

Table 7. The estimated maximum three-day rainfall runoff volume under different return years for the Lienhuachih No. 3 watershed

Return Year	Before -----	After (mm) -----	Increase	Percent of Increase (%)
1.11	130.17	156.41	26.42	20.16
1.43	204.62	228.09	23.48	11.47
2.0	274.39	293.82	19.43	7.08
3.33	362.19	376.10	13.91	3.84
5.0	425.21	435.33	10.12	2.38
10.0	499.20	503.94	4.74	0.95
20.0	618.01	619.49	1.48	0.24
25.0	731.11	731.91	0.80	0.11
40.0	766.93	767.47	0.54	0.07
50.0	841.32	841.66	0.34	0.04
100.0	875.81	876.08	0.27	0.03

Frequency components for LP3 distribution:

Before forest removal:

mean = 3.47820
SD = 0.23768
Cs = -0.31604
Cw = -0.28154

After forest removal:

mean = 3.51536
SD = 0.20745
Cs = -0.14624
Cw = -0.14923

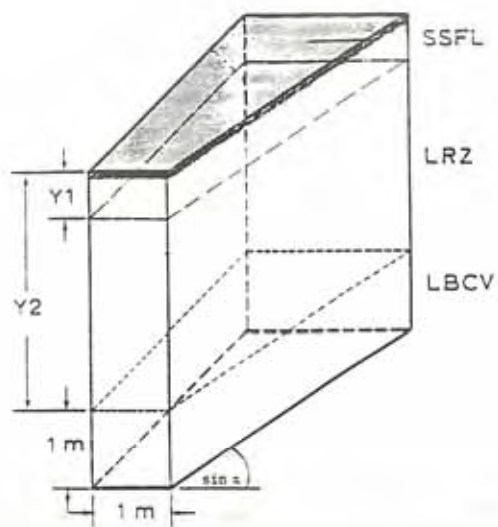


Fig. 1. Control volume and soil zones for water budgets in UPLAND submodel.
(From Lu et al., 1994)

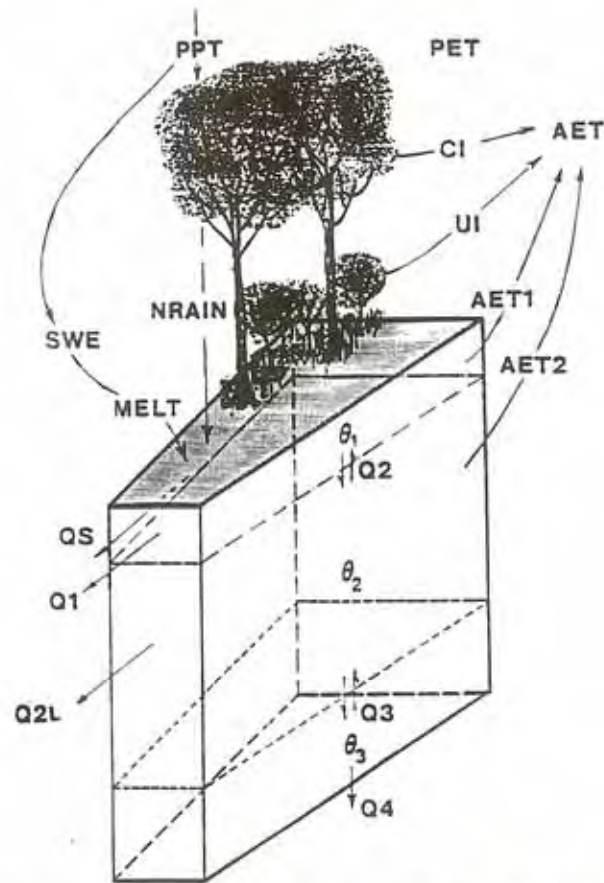


Fig. 2. Water budget components represented by the UPLAND submodel.
(From Lu et al., 1994)

集水區分析模式之建置與應用

林文賜¹ 林昭遠²

【摘要】本研究係以集水區分析為基礎，藉由數值高程資料(Digital Elevation Model, DEM)結合模糊演算法及空間分析理論，解決集水區劃分時排水流向計算之盲點，並提出多重出口理論配合多種集水區劃分模式包括動態出口、河川級序及管理分區等劃分模式，改善門檻值劃分集水區之問題，以劃分更符學理定義之集水區，以及發展源頭追蹤法之多重門檻值理論，改善門檻值萃取水系網之問題，以萃取符合地形之水系網。而集水區分析模式之應用有二：(1)將集水區模式結合土壤沖蝕公式及遞移率概念，推估坡面泥砂產量；(2)將集水區模式導入合理化公式，建立集水區洪峰流量計算模式，可應用於颱風暴雨之即時洪峰流量推估。

【關鍵詞】集水區分析、坡面泥砂產量、洪峰流量推估。

MODEL ESTABLISHMENT AND APPLICATION FOR AUTOMATED WATERSHED ANALYSIS

Wen-Tzu Lin¹ Chao-Yuan Lin²

【Abstract】 Watershed has been regarded as the basic unit in the operation and management of soil and water conservation. In this study, fuzzy theory coupled with GIS-based spatial analysis and digital elevation model were used to solve the drawbacks of drainage flow calculation. In addition, outlet-tracing and headwater-tracing algorithms were proposed for flexibly delineating a variety of watersheds, including the user-specified outlets, the stream-order and the management requirement watersheds and extracting realistic drainage networks for the references of watershed management. Combined with erosion loss equation and rational formula, the developed models can be

1.明道大學綠環境設計學系副教授，通訊作者。電子郵件: aiken@mdu.edu.tw

Associate Professor, Department of Design for Sustainable Environment, Ming Dao University, Taiwan.

Corresponding Author. E-mail: aiken@mdu.edu.tw

2.國立中興大學水土保持學系教授。

Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taiwan.

applied to (1) predicting sediment yields on slopeland and (2) calculating rainfall and runoff analysis in a watershed.

【Key words】 Watershed analysis, Sediment yields on slopeland, Peak flow estimation.

I、前言

集水區為水流匯集之完整地形單元，集水區內之非點源污染物、地表逕流等皆透過水流攜帶至出口而排出。集水區為水文演算之基本單元，為降水匯流至指定出口之封閉區域，而區外之地表水或地下水皆不會流入該區域內。然學理所稱之集水區範圍大都以山嶺線為界，為一封閉區域，而國外在實務上常因行政分區或區域地形特性之考量，亦有以某段河流之分區做為集水區，與學理所定義之集水區略有不同。

不論是水土保持設計規劃、環境生態保育、水利防洪演算、坡地災害評估及非點源污染防治(Young et al., 1989; Lin et al, 2002; Li et al., 2006)，集水區之空間資訊如集水區與水系網分布、地文水文因子資訊等，皆為規劃時不可或缺之空間資料。而集水區之劃定，由早期人工劃定發展至目前之電腦自動劃定，乃藉由數值高程模型資料及地理資訊系統(Geographic Information Systems, GIS)方法，依地形之空間特徵及高度起伏變化，進而劃定所需之集水區範圍、水系網分布，並可配合現地資料推求集水區特性之空間資訊。

本研究係以集水區分析為基礎，藉由 DEM 資料結合模糊演算法及空間分析理論，解決集水區劃分時排水流向計算之盲點，並提出多重出口理論配合多種集水區劃分模式包括動態出口集水區劃分、河序集水區劃分及管理分區集水區劃分，改善門檻值劃分集水區之問題，以劃分更符學理定義之集水區，以及發展多重門檻值理論如源頭追蹤法、源頭集水區法，改善門檻值萃取水系網之問題，以萃取符合地形之水系網。而集水區分析模式之應用有二：(1)將集水區模式結合土壤沖蝕公式及遞移率概念，推估坡面泥砂產量；(2)將集水區模式導入合理化公式，建立集水區洪峰流量計算模式，可應用於颱風暴雨之即時洪峰流量推估，以評估本研究理論模式之準確性及實用性。

II、材料與方法

(I)集水區分析模式

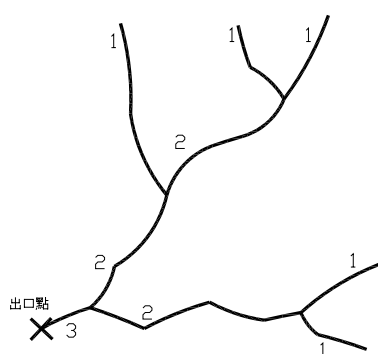
窪地(Depression)或坑點(Pit)為一種天然地形，為流向分析時常見盲點之一，傳統處理方式為窪地填高或高程平滑化處理(Jenson and Domingue, 1988; Martz and Garbrecht, 1999)，然而改變高程會影響後續之集水區模式分析。本研究提出窪地集水區法結合模糊理論，量化計算最佳化之窪地出口，其理論可參閱 Lin et al. (2008)。而集水區劃分模式分為動態出口、河川級序及管理分區等，水系網以源頭追蹤法進行萃取，茲說明如下：

1. 動態出口集水區劃分

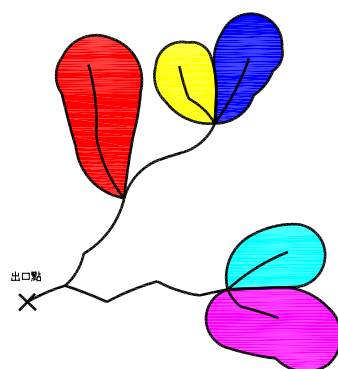
所謂集水區動態分析即由使用者指定子集水區之出口點，依流向萃取出口點上游之集水區；此一動態分析方式萃取出水區，係用以彌補靜態集水區(門檻值劃分)不具彈性或不合理之處。

2. 河川級序集水區劃分

河川級序之定義為 Horton 先提出，後有 Strahler 及 Shreve 對於河川級序提出不同定義。本研究係以 Strahler 之河序劃分為主，Strahler 對於河川級序之定義為在地形圖上不分歧最原始之溪流列為一級河川；凡兩支一級河川匯流而下之河段稱為二級河川；同理，三級河川如上述一樣，其定義如下圖 1。而河序集水區係藉由河川級序之分類，以河序河段之最下游出口向上游劃定集水區，各級河序之劃分如圖 1。



Strahler 河川級序示意圖



一級河序集水區

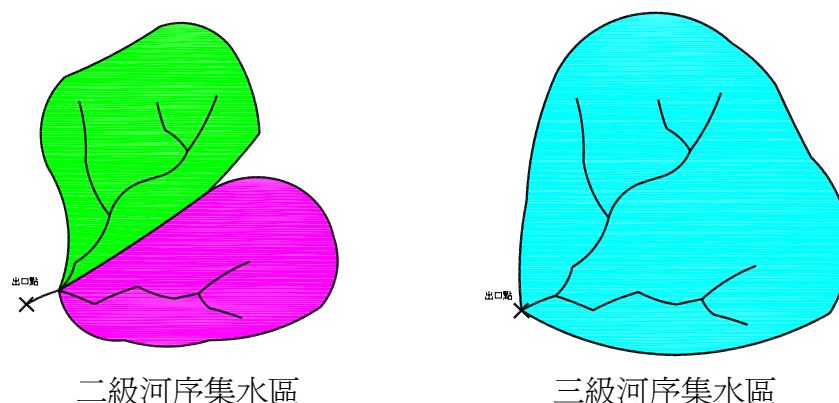


圖 1. 各級河序集水區示意圖

Fig. 1. Illustration of delineating stream-order sub-watersheds

3. 管理分區集水區劃分

管理分區集水區劃分係依照管理者之使用需求，提供擬劃分之集水區數量，系統結合門檻值及二分法反覆劃分集水區，直到指定集水區數量為止。

4. 源頭追蹤法萃取水系網

由於集水區之水系網源頭之起始門檻值受地形、地質、土壤及氣候等環境特性之影響，單一門檻值萃取水系網無法代表真實水系分布情形，其水系網對集水區之地文水文分析影響甚大，故本研究提出多重門檻值以萃取水系網，可模擬真實水系網之空間分布。藉由現場實測或以 1/5000 像片基本圖、1/25000 地形圖等電子圖檔結合地理資訊系統軟體數化等方式，取得水系源頭之點位座標，並由上述理論之排水流向由源頭追跡至下游建立符合真實地形之水系網。

(II) 坡面泥砂產量推估

土壤沖蝕模式可分為經驗模式(Empirical Model)與理論模式(Physical Model)兩種，目前應用最廣的 USLE 即為經驗公式(Wischmeier and Smith, 1958)，其土壤沖蝕過程係由一系列因子量化和概算，在美國應用相當成功，與理論模式(如 WEPP)不相同無法適用於任何地區，故在台灣地區使用此一公式評估土壤沖蝕量時，需對沖蝕參數做適當之修正，使其配合台灣之自然環境條件。早期土壤流失量評估係以小試驗樣區為對象，其因子取得大都來自於現場量測，隨著電腦科技之進步，土壤沖蝕模式結合 GIS 及 RS 技術已廣泛應用於大面積集水區之評估，目前評估方式仍以整個集水區或子集水區為評估單元，其因子之代表性較為粗略，若將上述模式結合 GIS、RS 技術與 DEM 資料之網格特性，及利用集水區排水流向概念，則能有效地建立沖蝕因子資料庫及集水區泥砂災害之敏感區位(Lin et al., 2002)。

1. 土壤流失公式

依據水土保持技術規範(2000)之規定，山坡地土壤流失量之估算，得採用通用土壤流失公式(Wischmeier and Smith, 1958)，其公式如下：

$$A_m = R_m K_m LSCP$$

式中：

A_m ：單位面積土壤流失量(tons/ha/yr)

R_m ：降雨沖蝕指數(Mj-mm/ha-hr-yr)

K_m ：土壤沖蝕指數(tons-ha-hr-yr/Mj-mm-ha-yr)

L：波長因子

S：坡度因子

C：覆蓋與管理因子

P：水土保持處理因子

2. 泥砂遞移率

本研究之泥砂遞移率計算係採用網格分析方式，為簡易計算坡面泥砂之遞移率，假設坡面泥砂主要係由坡面地表水所帶動，運移至渠道而流失。依此一假設及泥砂遞移率之定義，泥砂遞移率可視為某格點對最接近渠道格點之泥砂貢獻量，若將泥砂貢獻量用網格上游流入面積表示，則網格上游流入面積愈大，其產生的逕流量亦愈大，愈能將泥砂帶至河道。因此集水區坡面上任一格點之泥砂遞移率，可視為該格點上游流入面積(A_{grid})與該格點流至最接近渠道之上游流入面積(A_{total})之比值。意即濱水區愈靠近渠道之格點，其坡面沖蝕之泥砂愈容易進入渠道，而增加河道之泥砂產量，故泥砂遞移率愈高，集水區之坡面泥砂產量(Y_s)可由集水區坡面土壤流失量(A_m)與坡面泥砂遞移率(SDR)之乘積($Y_s = A_m * SDR$)來推算，藉由網格之排水流向可計算每個網格之泥砂遞移率及泥砂量(Lin et al., 2002)。

(III)降雨－逕流模式

本研究之降雨－逕流模式係以等集流時間之概念，修正合理化公式(降雨時間需大於或等於集流時間)之限制，計算河道各點之逕流歷線，配合即時降雨資料可動態推估洪峰流量。對山區而言，由於漫地流之長度甚短，故漫地流時間可忽略不計。本計算以渠道流時間作為集水區集流時間之依據。利用集水區之排水流向資料，計算渠道任意點之渠道流時間，藉此可分析渠道任意點至集水區出口之集流時間差，並追蹤上游流入之區域，可建立集水區之集流時間差分布圖(圖 2)。



圖 2. 集水區集流時間差分布圖

Fig.2. Spatial distribution of difference of time of concentration in a watershed

集流時間均分為每時間單位後，將集水區內具有相同匯流(至出口)時間之點連接，則每一集流時間線可畫分集水區為許多區域，假設區域內為均勻降雨，每塊區域之集流時間均相等。若以小時為單位，即每一集流時間線的時間間隔為 1 小時，則每小時產生的逕流量如下：

$$\begin{aligned}
 t = 1, & \quad Q_1 = C_1 I_1 A_1 \\
 t = 2, & \quad Q_2 = C_2 I_1 A_2 + C_1 I_2 A_1 \\
 t = 3, & \quad Q_3 = C_3 I_1 A_3 + C_2 I_2 A_2 + C_1 I_3 A_1 \\
 & \quad \vdots \\
 t = n, & \quad Q_n = \sum_{i=1}^n C_i I_{n-i+1} A_i
 \end{aligned}$$

式中，t 為每一時間間隔；Q 為逕流量；C 為逕流係數；I 為降雨強度；A 為每一集流時間線內之集水區面積。

逕流係數的定義為逕流量與降雨量之比值，集水區逕流係數往昔多以集塊(lumped)系統之觀念求算，此與實際情形不符合。為求準確之集水區逕流係數，需掌握集水區每一網格單元之空間特性，本計畫採分佈(distributed)系統求算集水區逕流係數之空間變化，計算每一網格之初始 C 值，配合降雨時間，建立逕流係數 C 值於暴雨時期之變動模式。逕流係數實際上與空間時間之變動有關可由下式得：

$$C = \frac{R}{P} = \frac{(P - I')/t}{P/t} = \frac{I - f}{I} = F(I, f)$$

式中，R 為逕流量；P 為降雨量；I' 為入滲量；t 為降雨延時；I 為降雨強度；f 入滲率。逕流係數 C 值與降雨強度和入滲率有關，影響入滲之因子繁多且彼此互

為因果，無法於現地逐一量測。若以常態化差異植生指標(NDVI)建置集水區逕流係數之動態模式，一方面因 NDVI 量測的植生生長狀況可間接反應集水區內入滲量的變化；另一方面影像資料獲得的快速簡便有利於即時監測系統洪峰流量推估。

本計畫沿用合理化公式的基本觀念，以等集流時間線之觀念，克服合理化公式之集水區面積須小於 1000 公頃之基本假設，因此將降雨強度分布、初始逕流係數分布與等集流時間線觀念下之集水區面積，配合隨時間變化之變動模式，代入合理化公式-流量歷線修正式，即可動態推算洪峰流量。

III、結果與討論

(I)集水區分析模式

以德基水庫集水區為樣區，採用之數值高程資料為 40x40 公尺網格(圖 3)，以無窪地流向分析結果如圖 4，而以多種集水區劃分模式之結果如圖 5~7、源頭萃取水系網之結果如圖 8。

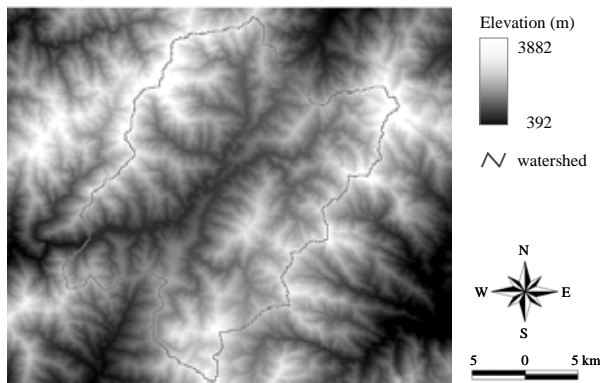


圖 3. 德基水庫集水區之高程圖

Fig.3. Elevation of Techí Reservoir Watershed

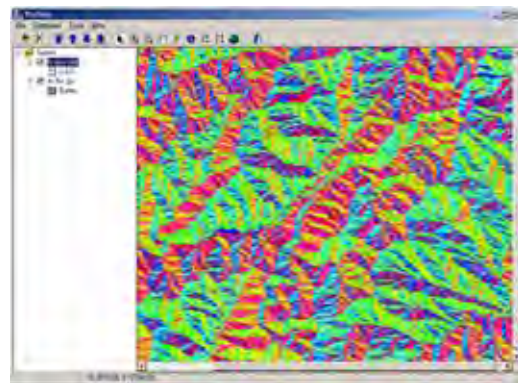


圖 4. 德基水庫集水區之流向圖

Fig.4. Flow directions of Techí Reservoir Watershed

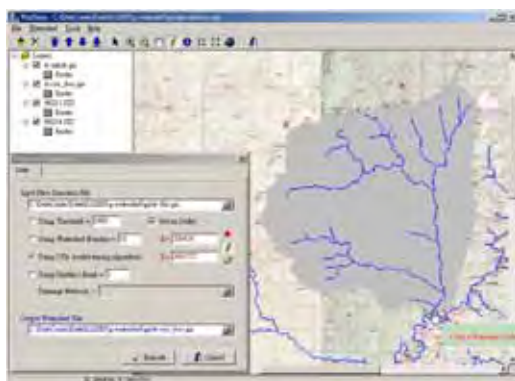


圖 5. 動態出口集水區劃分之結果

Fig.5. Watershed delineation using user- specified outlet



圖 6. 河序集水區劃分之結果

Fig.6. Watershed delineation using stream order



圖 7. 管理分區集水區劃分之結果

Fig.7. Watershed delineation using management requirement

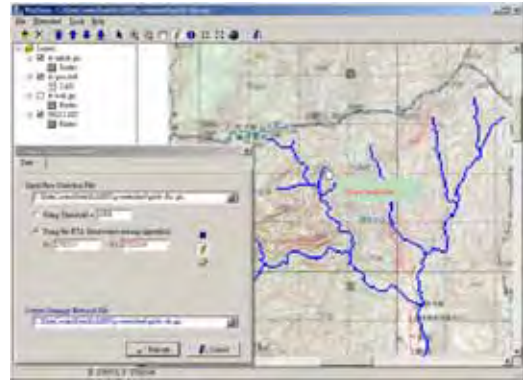


圖 8. 源頭萃取水系網結果

Fig.8. Stream network extraction using headwaters

(II) 坡面泥砂產量推估

德基水庫集水區之泥砂產量分布如圖 9，集水區之坡面泥砂來源，集中在濱水區兩側之農耕地及上游之崩塌地部分，泥砂產量大於 50 tons/ha/yr 之面積為 2331.68ha，約佔全區之 4.45%。將集水區出口泥砂產量除以集水區面積，可得集水區之年平均沖蝕深度。以 89 年衛星影像推估德基水庫集水區之泥砂產量為 1793742 tons/yr、年平均沖蝕深度為 2.45mm；德基水庫集水區自 71 年起即開始回收造林，此後集水區土地利用無明顯變化，實測泥砂淤積量採用 81 年至 87 年之平均值，其沖蝕深度為 0.84mm(台灣電力公司電源勘測隊，1998)。

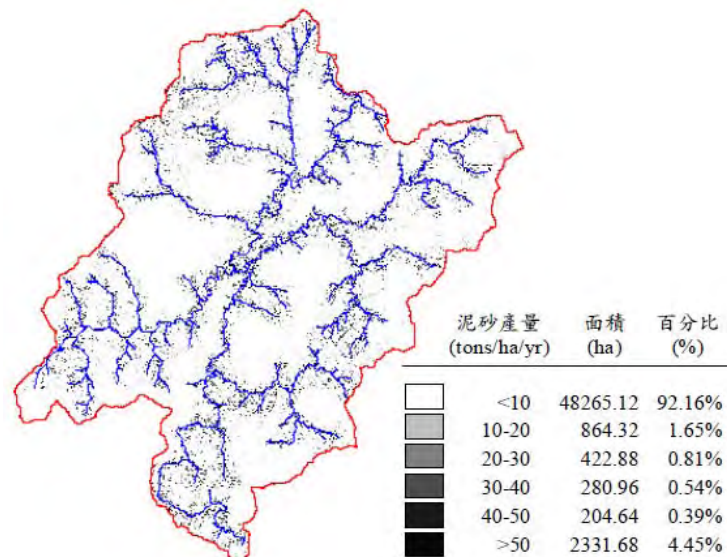


圖 9. 德基水庫集水區坡面泥砂產量分布圖

Fig. 9. Spatial distribution of sediment yields on slopeland for Techu reservoir watershed

(III)集水區洪峰流量推估

本研究以基隆河之南湖大橋上游集水區為範圍，並以五堵站之雨量及流量資料進行模擬及驗證。篩選近十年之水文事件進行推估，計有 85 年賀伯颱風、86 年溫妮颱風、87 年瑞伯颱風、芭比絲颱風等四場颱風，為造成高洪峰流量之水文事件。茲以合理化公式-流量歷線修正式配合二校正係數(α 、 β)及退水修正式(R)建置降雨-逕流模式，針對基隆河流域歷史颱風暴雨事件之雨量及水文監測站之流量資料，進行流量歷線推估及修正，並以效率係數(Coefficient Efficiency；CE)檢驗模式模擬結果之優劣。

四場颱風暴雨事件模擬結果，各場次暴雨流量歷線之校正參數如表 1。結果顯示模式對於單峰型暴雨的模擬較佳，模式效率係數介於 0.81 至 0.98 之間；但雙峰型暴雨卻有洪峰流量愈低，CE 愈低，模擬狀況愈不佳的趨勢；多峰型暴雨此種狀況越趨明顯，高洪峰流量暴雨的模擬準確度較高，甚至不需退水曲線之校正，如芭比絲颱風等。

表 1. 暴雨流量歷線之校正係數

Table 1. Calibrated coefficients of rainfall-runoff model

颱風名稱 (日期)	賀伯 (85.07.30)	溫妮 (86.08.17)	瑞伯 (87.10.15)	芭比絲 (87.10.21)
α 校正	0.65	0.7	0.45	0.5
β 校正	1.4	1.11	1.21	1.83
洪峰流量(cms)	1090	1040	1050	1050
最大雨量(mm/hr)	31	28	49	40
累積雨量(mm)	262	298	598	776
最大 24 小時累積雨量	229	282	506	316
頻率年	<5	<5	9	<5
效率係數 CE	0.98	0.88	0.92	0.85

註：五堵站頻率年計算採鄰近之五堵雨量站資料

IV、結論

本研究係以集水區為評估單元，利用集水區自動劃分理論為基礎，結合 GIS 及 RS 技術研發集水區分析模式，包括集水區自動劃分、泥砂產量推估及洪峰流量計算等，用以評估集水區坡地災害。藉由實例驗證結果顯示，分析模式可應用於集水區坡地災害因子之自動萃取，未來若能整合類神經網路、多目標決策分析理論，將有助於集水區坡地災害模擬、防治及決策之用。

V、參考文獻

行政院農業委員會 (2000) 水土保持技術規範。

Jenson, S.K. and J.O., Domingue (1988) Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54: 1593-1600.

Li, A., A. Wang, S. Liang and W. Zhou (2006) Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS – A case study in the upper reaches of Minjiang River, China. *Ecol. Model.*, 192: 175–187.

Lin, C.Y., W.T. Lin and W.C. Chou (2002) Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience. *Soil Till. Res.*, 68: 143–152.

Lin, W.T., W.C. Chou, C.Y. Lin, P.H. Huang and J.S. Tsai (2008) WinBasin: Using improved algorithms and the GIS technique for automated watershed modelling analysis from digital elevation models, *International Journal of Geographical Information Science*, 22(1): 47–69.

Martz, L.W. and J. Garbrecht (1999) An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM. *Computer and Geosciences*, 25: 835-844.

Wischmeier, W.H. and D.D. Smith (1958) Rainfall Energy and Its Relationship to Soil Loss, *Transaction America Geophysics Union*, 39: 258-291.

Young, R.A., C.A. Onstad, D.D. Bosch and W.P. Anderson (1989) Agricultural nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watersheds, *J. Soil Water Conserv.*, 44: 168–173.

陡坡茶園水土流失控制之研究

林俐玲¹ 張舒婷² 蔡義誌³

【摘要】本研究選定南投縣魚池鄉貓欄山東南方之試區，鄰近日月潭，隸屬於行政院農業委員會茶業改良場魚池分場；採用六種不同水土保持處理方法，分別為平台階段植生覆蓋、平台階段草生栽培、平台階段枯草敷蓋、平台階段台面淨耕、山邊溝三角栽植與裸露對照區，以觀察陡坡茶園不同水土保持處理下之水土流失情形和土壤之理化性質，試驗期間每場降雨的逕流量與土壤流失量加以分析比較，以選擇最佳的茶園水土流失控制方法，同時分析不同處理下，土壤物理性質之變化。研究結果顯示平台階段植生覆蓋能有效的控制陡坡茶園之水土流失，其年平均逕流率僅 0.021，為裸露對照區之 5%；而年平均土壤流失量為 0.263ton/ha，僅為裸露對照區之千分之五。不同的水土保持處理方法亦影響土壤之理化性質，平台階段植生覆蓋能明顯的提高土壤有機質含量，幾何平均粒徑和飽和水力傳導度。

【關鍵詞】茶園、平台階段、覆蓋、敷蓋、水土流失。

THE STUDY OF SOIL AND WATER LOSSES CONTROL ON STEEP SLOPING TEA PLANTATION

Li-Ling Lin¹ Shu-Ting Chang² Yi-Zhih Tsai³

【Abstract】 Six different conservation practices were assigned on steep sloping tea plantation to study the effect of soil and water control and soil properties. The practices are bench terrace with bahia grass cover, bench terrace with vegetative cover, bench terrace with straw mulch, bench terrace with clean tillage, hillside ditch with

1.國立中興大學水土保持系教授。

Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

2.國立中興大學水土保持系博士研究生，通訊作者。電子郵件: D9642001@mial.nchu.edu.tw

Ph.D. student, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C. Corresponding Author. E-mail: D9642001@mial.nchu.edu.tw

3.國立中興大學水土保持學系博士後研究員。

Postdoctoral Researcher, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

vegetative cover, and bare control plot. The results indicated that bench terrace with bahia grass cover can control soil and water losses on steep sloping tea plantation effectively. The annual soil losses under bench terrace with bahia grass cover is only 0.263 ton/ha, which is about 0.5 % of the bare control plot. The runoff rate is 0.021, which is only 5% of the bare control plot. The soil properties would be also affected by different conservation practices on tea plantation. The organic matter content, geometric aggregate mean diameter, and saturated hydraulic conductivity were highest found in the practice of bench terrace with bahia grass cover.

【Key words】 Tea plantation, Bench terrace, Cover, Mulch, Soil and water losses.

I、前言

茶為本省高經濟作物之一，目前台灣地區茶園面積約 21,000 公頃，集中於台北、桃園、新竹、苗栗、南投、嘉義、雲林、宜蘭、花蓮及台東等海拔數百公尺至 1,500 公尺間的丘陵地、緩坡地及高山等，年產量約 22,000 公噸。南投、嘉義、雲林等茶區，因出產高品質的茶葉，普受好評，因此該等地區之茶園面積有逐年增加的趨勢，惟這些茶區主要分布於山坡地與高山台地，對水土保持有不利之影響，因此茶園之水土保持問題很早便受到重視。早期研究（朱惠民，1970；徐吳祥與吳陣鐸，1968；林復等，1969；高銘俊，1969）指出茶樹在幼木期因植株覆蓋地表比例偏低，容易造成較大的水土流失，成木時如配合茶園常使用之簡單階段，可減少水土流失，如再配合台壁植草和全園敷蓋則可更大幅度的降低水土流失。覆蓋與敷蓋為農地水土保持最有效的方法。百喜草覆蓋處理可使水土流失量減至最少（簡宣裕、莊作權，1978）；覆蓋與敷蓋能改良土壤之物理性質，諸如降低土壤的總體密度，促進土壤團粒構造，提高團粒穩定度（Mazurak and Chesnin, 1977；Milton and Smith, 1958）；百喜草覆蓋與敷蓋處理之土壤其飽和水力傳導度較裸露之土壤高（黃國禎、萬鑫森，1996），此乃因植生覆蓋處理下，植物根系之生長與腐爛，以致改變土壤理化性質（陳慶雄，1981；黃國禎、萬鑫森，1991），進而促使土壤滲透性之改善（萬鑫森，1969；盧惠生、楊炳炎，1979；蔡俊明、林木連，1997），同時植體本身可阻截降雨及地表逕流，提高地表的粗糙度，進而增加土壤入滲能力。敷蓋處理可增加土壤有機質，微生物與小型地下動物數量，這些有助於土壤結構發育及水分入滲，減少地表逕流。坡度為影響土壤流失之重要因子之一，當坡度增加時，土壤沖蝕量會隨著增加（Wischmeier and

Smith, 1978；Mclool et al., 1987），但此關係僅適用於坡度介於 3%到 18%的緩坡地，吳嘉俊（1998）指出當坡地坡度上升至 30%左右時，土壤沖蝕量增加的速度急速減緩，甚至有持平的現象，但當坡度達到 53%左右時，土壤沖蝕量增加的速度急速上升。

台灣茶園目前大部分種植於坡度陡峭的山坡地，種植之初如果沒有適當的水土保持措施，將導致嚴重的水流失，而造成下游地區重的災害；如何選擇有效的水土保持方法以保育茶園的水土資源乃當務之急，本研究收集陡坡茶園不同水土保持處理下，試驗期間每場降雨的逕流量與土壤流失量加以分析比較，以選擇最佳的茶園水土流失控制方法，同時分析不同處理下，土壤物理性質之變化，從物理觀點了解水土保持處理之機制。

II、材料與方法

(I) 試區介紹

1. 地理位置及地形概況

日本政府於西元 1926 年將印度阿薩姆茶種引進台灣，於平鎮茶試所及南投魚池地方試種成功，並於同年設立「魚池紅茶試驗支所」，專事育苗栽培試驗與改進紅茶產製技術以謀發展紅茶，開拓國際新市場，魚池遂成為台灣阿薩姆紅茶生產中心。本試區位於南投縣魚池鄉貓欄山東南方，鄰近日月潭，隸屬於行政院農業委員會茶業改良場魚池分場；地理位置為北緯 23 度 52 分，東經 120 度 54 分，海拔高度為 850 公尺（圖 1），試驗地的平均坡度為 52%。



圖 1. 研究試區地理位置圖

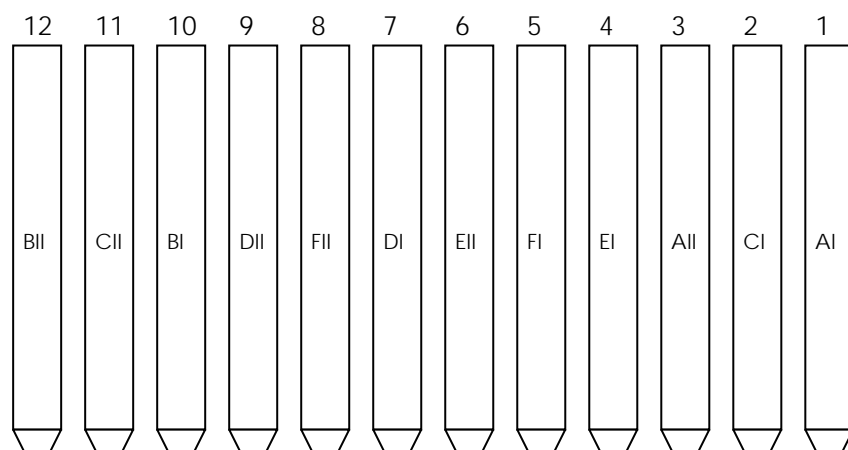
Fig. 1. The location of research area.

2. 氣候及土壤概況

本試區屬於中海拔地形，全年溫度變化為 5.6°C - 31.5°C ，年平均溫度 19.9°C ；年雨量介於 2000-2500 公釐，且大多集中在 5-9 月。日月潭魚池茶改場之土壤為日月潭系灰化紅黃粘壤土，酸性，中等到粗顆粒構造，適合茶樹生長。

3. 試區配置及處理

試區共分為 12 樣區（圖 2），每個樣區的處理是採完全逢機試驗設計構築而成的，試區於 1994 年 2 月客土、整地，3 月 28 日種植一年生之大葉阿薩姆紅茶。各樣區長 12.43 公尺，寬 2 公尺，面積為 24.86 平方公尺，平均坡度為 52%。而試區的處理方法有六種，採二重複，六種處理為(1)平台階段植生覆蓋，(2)平台階段草生栽植，(3)平台階段台面淨耕(4)平台階段枯草敷蓋(5)山邊溝三角栽植(6)裸露對照區。平台階段處理為每平方公尺種植 0.69 株茶樹，株距為 60cm；山邊溝處理為每平方公尺種植 0.98 株，採等高三角栽植法；裸露對照區則無種植茶樹。



- A：平台階段植生覆蓋區(1、3)
- B：平台階段枯草敷蓋區(10、12)
- C：平台階段草生栽培區(2、11)
- D：山邊溝三角栽植區(7、9)
- E：平台階段台面淨耕區(4、6)
- F：裸露對照區(5、8)

圖 2. 試區配置圖

Fig. 2. The layout of the experimental plots.

(II)、研究方法

本研究之研究流程及項目如圖 3 所示，研究項目分為三大部份，茲簡述如下：

1. 室內土壤理化性質測定

- (1) 土壤質地：用比重計法分析。
- (2) 土壤有機質含量：採重鉻酸鉀氧化滴定法。
- (3) 土壤團粒穩定分析：採用 Gardner(1956)之多重濕篩法，求出土壤團粒之幾何平均粒徑。

(4) 土壤總體密度：金屬管法。

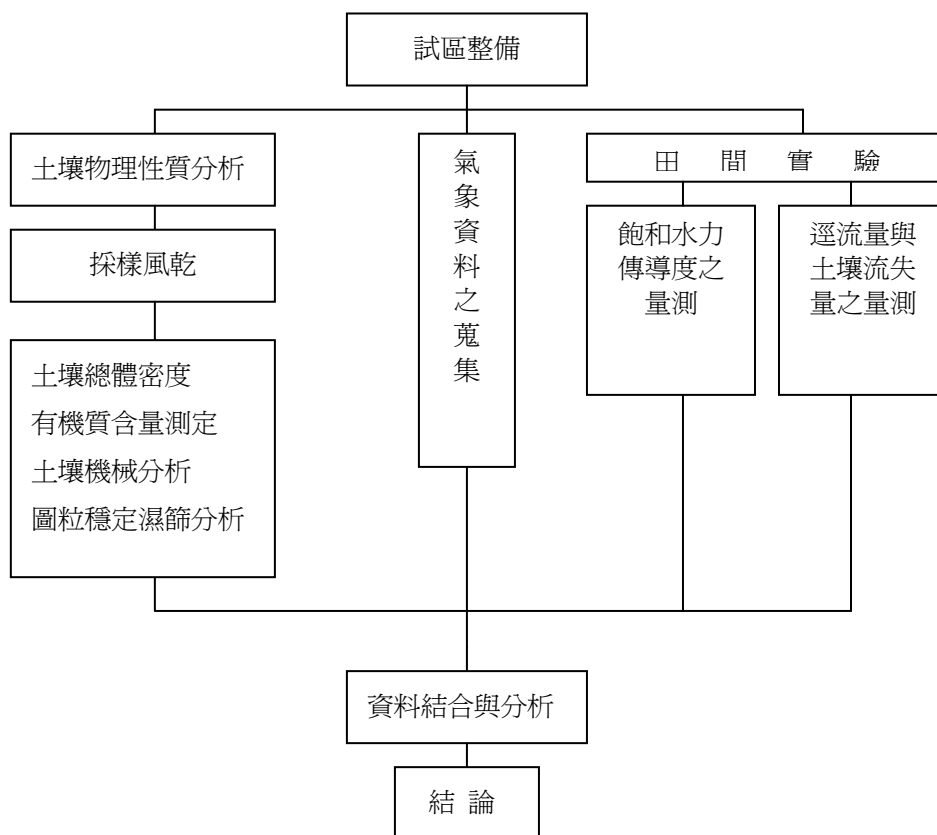


圖 3. 研究方法流程圖

Fig. 3. Flow chart of the research method.

2. 氣象資料之蒐集

試驗地附近有中央氣象局日月潭氣象站及行政院農業委員會茶業改良場魚池分場農業站。試驗期間之日雨量、氣溫、濕度、輻射量、風速和地溫等資料可由此兩氣象站取得。

3. 飽和水力傳導度之量測

- (1) 利用單筒滲漏計與 Guelph 滲漏計 (Elrick *et al.*, 1987) 現地量測。
- (2) 採樣回實驗室，過篩重填，利用達西公式原理量測與計算。

4. 逕流量與土壤流失量測定

土壤沖蝕量觀測池可分為內外兩池，平常降雨所產生之逕流水經由內池蒐集，如水量超過內池容量時，就通過十分之一之分水裝置，將過多之水量導入外池。在觀測期間如有暴雨時就必須進行逕流水水深量測及採樣，將採樣之樣品帶

回實驗室進行烘乾，經過換算之後得到單場降雨之逕流量及土壤沖蝕量。

III、結果與討論

本研究累積自 1996 年至 2000 年 5 年完整之觀測資料，試區的土壤隨著不同處理有明顯的變化，植生覆蓋與敷蓋能提供大量的有機質而使土壤的有機質增加（林俐玲、楊長壽，1998），有機質亦能改變土壤之結構進而影響到土壤的滲透速率（林俐玲，1998），茲將研究之結果分述如下：

(I) 試區土壤物理性質

不同處理的土壤性質如表 1 所示，結果顯示，裸露對照區因表土被嚴重的沖蝕，而所分析的土壤為粘粒含量較高的心土，所以土壤的質地由壤土改變為粘土，使土壤質地變細。總體密度偏小乃因本試區重新客土，又未種植任何作物和無水土保持處理，土壤未經夯實之故。又裸露對照區沒有作物殘株的加入，使得土壤的有機質含量明顯的偏低。而平台階段植生覆蓋能改良土壤的結構，大幅提昇土壤團粒之幾何平均粒徑，此有助於提高土壤的穩定性和抗蝕性。

表 1. 試驗區土壤物理性質分析表

Table 1. Soil properties of different treatments

處理區	總體密度 kg/m ³	顆粒密度 kg/m ³	有機質含量 %	pH	平均粒徑 10 ⁻³ m	土壤質地
平台階段 植生覆蓋	1340 ^a	2460 ^a	2.69 ^a	5.34 ^a	3.86 ^a	砂質粘壤土
平台階段 枯草敷蓋	1270 ^a	2280 ^b	2.37 ^b	5.77 ^a	3.66 ^b	粘壤土
平台階段 草生栽培	1260 ^a	2460 ^a	2.13 ^{bc}	5.55 ^a	3.31 ^c	粘壤土
山邊溝 三角栽植	1240 ^a	2460 ^a	2.01 ^c	5.14 ^a	2.67 ^d	粘壤土
平台階段 台面淨耕	1210 ^{ab}	2510 ^a	2.32 ^b	4.74 ^a	1.26 ^e	粘壤土
裸露對照區	1090 ^b	2440 ^a	1.51 ^d	5.39 ^a	0.57 ^f	粘土

註：註腳英文字母相同者代表處理未達 5% 顯著水準

(II) 試區土壤飽和水力傳導度

經過幾年的觀測，發現平台階段配合植生覆蓋及敷蓋對於茶園的水土流失控制有明顯的成效，所以選取此兩種不同水土保持處理的試區並和裸露對照區比較，進行現地量測與採樣回實驗室測定土壤飽和水力傳導度，其結果如圖 4 所示。土壤的質地、構造與有機質含量會影響土壤水力傳導度。土壤總孔隙度減少並非水力傳導度變小之真正原因，而土壤的大孔隙才是其決定因素，所以非毛細孔隙（Non-capillary pores）亦即大孔隙之數量決定飽和水分移動之速度，非毛細孔隙愈少，則水力傳導度愈低（萬鑫森，1968）。結果顯示，裸露對照區之土壤因質地較細、團粒幾何平均粒徑小，有機質含量低，雖其土壤之孔隙率較高，但非毛細孔隙少，導致其飽和水力傳導度較低。植生覆蓋和枯草敷蓋均能增加土壤的有機質，增加土壤大孔隙，所以其水力傳導度較高。不同方法所測定的飽和水力傳導度其值變化很大，尤其在現地所測之值其變化區間很大；而室內重填土壤後所測之值變化較小，此乃因現地土壤摻雜有機質和石礫所致。

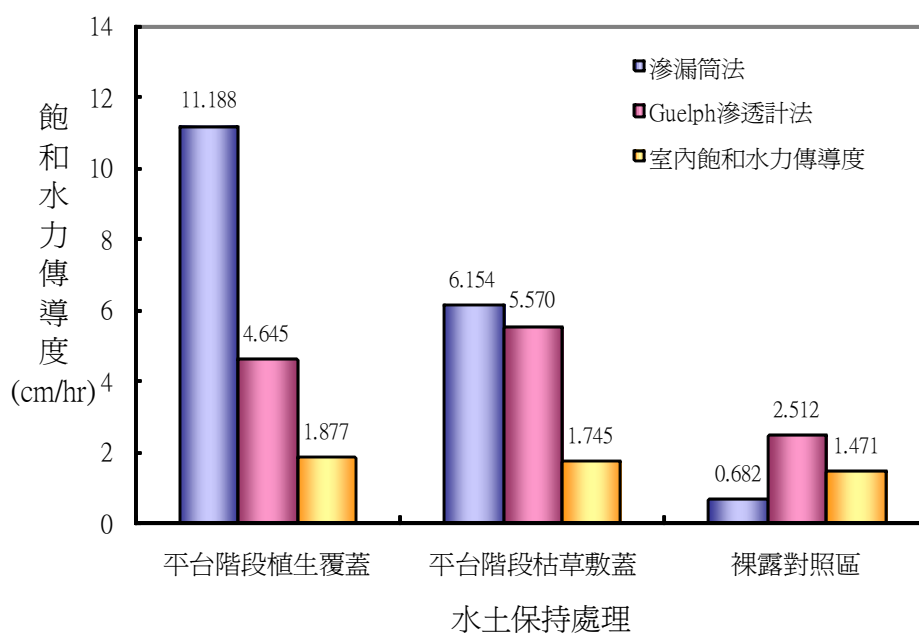


圖 4. 不同水土保持處理下之飽和水力傳導度

Fig. 4. Saturated hydraulic conductivity for different soil conservation treatments

(III) 各處理之逕流量與土壤流失量

研究期間收集 1996 年 1 月起至 2000 年 9 月止之降雨資料（圖 5），並量測各處理區於研究期間所產生的逕流量（表 2）與土壤流失量（表 3）。由於在 1996

年重新整理試區，1997 年試區重新客土，所以在這兩年均有較高的逕流量和土壤流失量，往後幾年，土壤結構趨於穩定，再加上不同的水土保持處理，促使逕流量和土壤流失量有逐年下降的趨勢；5 年不同處理區之平均土壤流失量與逕流量如圖 6 所示。結果顯示，歷年來裸露對照區之逕流量和土壤流失量均為最高，而配合水土保持措施的試區均有較少的逕流量和土壤流失量，其中平台階段植生覆蓋之年平均土壤流失量為 0.263ton/ha，僅為裸露對照區之千分之五，而年平均逕流量僅 0.021，為裸露對照區之 5%。所以，平台階段配合敷蓋與覆蓋處理能有效的控制茶園之水土流失。

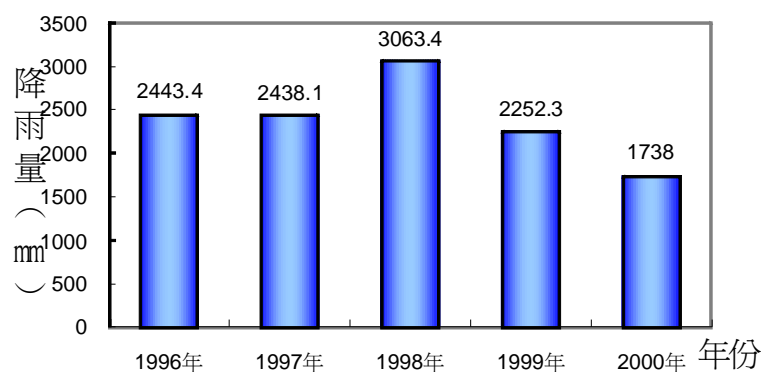


圖 5. 研究期間試區之年降雨量

Fig. 5. Annual rainfall during the experimental period.

表 2. 茶園不同水土保持處理之逕流量(單位： $m^3/25m^2$)

Table 2. The runoff of tea plantation with different treatments.

處理區	1996 年	1997 年	1998 年	1999 年	2000 年	年平均逕流量
平台階段植生覆蓋	1.068	1.679	0.700	1.463	1.066	0.021 ^b
平台階段枯草敷蓋	1.534	1.976	1.122	1.489	1.129	0.025 ^b
平台階段草生栽培	1.588	2.227	1.084	1.536	0.988	0.025 ^b
山邊溝三角栽植	6.250	2.325	1.126	2.172	1.231	0.045 ^b
平台階段台面淨耕	9.747	3.742	1.07	1.087	1.457	0.057 ^b
裸露對照區	16.685	38.211	16.28	32.453	12.866	0.399 ^a

註：註腳英文字母相同者代表處理未達 5%顯著水準

表 3. 茶園不同水土保持處理之土壤流失量(單位：ton/ha)

Table 3. The soil erosion of tea plantation with different treatments.

處理區	1996 年	1997 年	1998 年	1999 年	2000 年	年平均土壤流失量
平台階段植生覆蓋	0.222	0.725	0.067	0.171	0.132	0.263 ^b
平台階段枯草敷蓋	1.946	0.209	0.056	0.072	0.068	0.470 ^b
平台階段草生栽培	0.348	0.343	0.067	0.14	0.089	0.197 ^b
山邊溝三角栽植	11.719	0.843	0.084	0.382	0.127	2.631 ^b
平台階段台面淨耕	17.475	2.243	0.085	0.117	0.222	4.028 ^b
裸露對照區	31.344	44.589	40.775	92.789	33.588	48.617 ^a

註：註腳英文字母相同者代表處理未達 5% 顯著水準

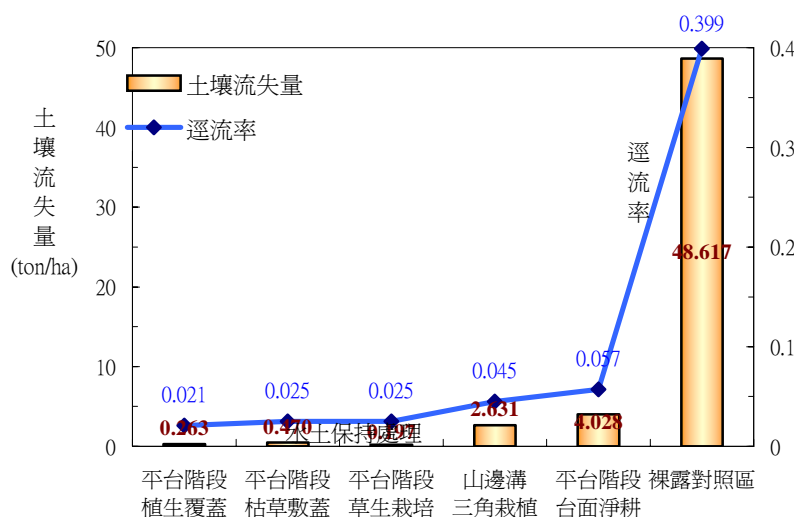


圖 6. 不同處理之年平均土壤流失量與逕流率

Fig. 6. The average annual soil erosion and runoff ratio during different treatments.

IV、結論

不同水土保持處理下，茶園土壤性質分析的結果顯示，裸露對照區因表土被嚴重的沖蝕，而所分析的土壤為粘粒含量較高的心土，所以土壤的質地較其它處理區細，又因沒有作物殘株的加入，其有機質含量明顯的偏低，土壤團粒穩定度亦偏低。平台階段配合植生覆蓋能提高土壤的有機質含量，團粒穩定度和飽和水力傳導度，進而有效的控制茶園的水土流失量。不同處理區的飽和水力傳導度有

明顯的差異。影響土壤飽和水力傳導度除了土壤本身的性質外，地表的處理亦是重要的因子。敷蓋與覆蓋能改變土壤物理特性，進而增加土壤的保水能力和有效水分，減少表面逕流。

本研究試區經實際觀測結果顯示，在茶園的管理上，以平台階段配合覆蓋或敷蓋可增加茶園土壤之滲透能力，進而減少其逕流量與土壤流失量。

平台階段配合覆蓋與敷蓋之所以能有效的控制水土流失乃因覆蓋與敷蓋能改變土壤性質，增加土壤之抗蝕能力，另一方面能阻截雨滴直接打擊表土；又平台階段為陡坡地上最有效的水土保持措施，陡坡地之茶園配合平台階段與植生覆蓋或敷蓋處理，應能有效的控制水土流失。

V、謝誌

本研究之完成承蒙行政院農業委員會經費補助和茶業改良場魚池分場提供試驗場地，得以順利完成，謹此致謝。

VI、參考文獻

- 朱惠民（1970）洪積層坡地茶園水土保持處理效果之研究。台灣水土保持試驗研究報告彙刊 2：165-191。
- 吳嘉俊（1998）陡坡地坡度坡長利用上限之研究（五）。農委會林業特刊 52：39-50。
- 林俐玲（1999）田間飽和水力傳導度量測方法之比較。中華水土保持學報 30(3)：235-240。
- 林俐玲、楊長壽（1998）茶園不同水土保持處理下土壤水分含量之量測與作物需水量之推估。中華水土保持學報 29(4)：339-349。
- 林復、邱宜鐘、陳永盛（1969）阿薩姆紅茶水土保持觀測試驗。台灣水土保持試驗研究報告彙刊 1：165-169。
- 徐吳祥、吳振鐸（1969）覆蓋對幼木茶樹生長收量及製茶品質以及土壤溫濕度的影響。台灣水土保持試驗研究報告彙刊 1：153-163。
- 高銘俊（1969）茶園水土保持觀測試驗。台灣水土保持試驗研究報告彙刊 1：171-177。

- 陳慶雄 (1981) 覆蓋與敷蓋對東台坡地土壤理化性質之影響。中華水土保持學報 12: 7-17。
- 黃國禎、萬鑫森 (1996) 坡地植生及敷蓋下土壤水分入滲特性。國立屏東技術學院學報 5(1): 45-57。
- 黃國禎、萬鑫森 (1991) 農地小集水區水土保持處理對土壤理化性質之效應。中華水土保持學報 22(1): 29-40。
- 萬鑫森 (1968) 土壤水份及其移動。水土保持學報 1: 19-25。
- 萬鑫森 (1969) 植生及覆蓋對坡地土壤滲性之影響。台灣水土保持試驗研究彙刊 1: 421-428。
- 蔡俊明、林木連 (1997) 坡面覆蓋對坡地成木茶園生長之影響。農委會林業特刊 51: 103-112。
- 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): 111-120。
- 簡宣裕、莊作權 (1978) 百喜草覆蓋與敷蓋對坡地土壤物理性及水土流失之影響。中華農學會報新 105: 57-66。
- Elrick, D. E., W. D. Reynolds, N. Baumgartner, K. A. Tan and K. L. Bradshaw (1987) In-situ measure ments of hydraulic properties of soils using Guelph Permeameter and the Guelph Infiltrometer. Proc. 3rd Ind. Symposium on land drainage, Ohio State University, Columbus, OH, G13-23.
- Gardner, W. R. (1956), Representation of soil aggregate size distribution by a logarithmic-normal distribution. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 20:151-153.
- Mazurak, A. P. and L. Chesnin (1977), Effect of beef cattle manure on water-stability of soil aggregates. Soil Sci. Soc. Amer. J. 41:131-137.
- McCool, D. K., Brown, L. C. Foster, C. K., Mutchler, C. K., Meyer, L. D. (1987), Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. Transactions of the ASAE 30(5):1387-1396.
- Miltion, S. and J. B. Smith (1958), Restoration of soil structure with redtop and other sod crops. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 22:320-322.
- Wischmeier, W. H., and D. D. Smith (1978), Predicting Rainfall Erosion Losses-a guide to conseruation planning. Agriculture Handbook N0.537. pp.12-16. Washington D. C., USDA, Government Printing Office.

內洞國家森林遊樂區溪流水水化學

劉瓊霖¹ 陳岫女² 林雨璇³ 呂俊廷³ 王秋嫻⁴

【摘要】本試驗主要目的為針對長期遊樂行為和颱風干擾對森林生態系水質的影響及河川自淨能力進行調查研究。調查項目有林外雨和溪流水的pH值、電導度、溶氧量(DO)、無機陰離子 (F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^-)和陽離子 (Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+})、溶解性無機碳 (DIC)、溶解性有機碳(DOC)、和總氮(TN)。內洞國家森林遊樂區雨水pH值大部分於 4~5 之間，所含 SO_4^{2-} 高，但是溪水pH值皆大於 7，其中 HCO_3^- 大於 $300 \mu eq L^{-1}$ 屬於非酸沉降敏感帶。溪水中只有 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 及 Ca^{2+} 超出 $10 mg L^{-1}$ ，說明本集水區的 SO_4^{2-} 沉降濃度偏高連帶著 Ca^{2+} 與 SO_4^{2-} 形成的鹽類淋洗至溪水中的濃度也就偏高。比較內洞溪和南勢溪不同溪流水採樣點的化學物種濃度顯示，南勢溪與內洞溪會合前測點的的值大多比會合後的測點來得高，羅好水壩外測值會逐漸增加；內洞溪 3 測點則沒有太大差異。整體來說，南勢溪由於上游流域發展較內洞溪長，受遊客和颱風干擾影響較內洞溪劇烈，但溪水周遭土壤及樹冠保護完整，對於遊樂所帶來的污染皆能在河川的自淨範圍內，但也有部分資料顯示南勢溪越下游測點越容易受遊客人數多寡而起伏，相關性也越高。

【關鍵詞】內洞國家森林遊樂區、雨水、溪流水、颱風、水化學。

¹國立中興大學森林系副教授。

Associate professor, Department of Forestry, National Chung Hsin University.

²林務局新竹林區管理處育樂課技正。

Technical specialist, Conservation and Recreation Section, Hsinchu Forest District Office, Forestry Bureau.

³國立中興大學森林系大學部學生。

Undergraduate Student, Department of Forestry, National Chung Hsin University.

⁴行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組技佐，通訊作者。電子郵件: wangch@tfri.gov.tw

Junior technical specialist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan. Corresponding Author. E-mail:wangch @tfri.gov.tw

Stream Water Chemistry of Neidong National Recreation Area

Chiung-Pin Liu¹ Xiu-Nyu Chen² Yu-Xuan Lin³ Jun-Ting Lyu³

Chiu-hsien Wang⁴

【Abstract】 The purposes of this study are to concern the effects of long-term recreational behaviors and typhoon disturbance on water chemistry of forest ecosystems and to survey the buffer capacity of different source streams. We examined pH, electrical conductivity (EC), Inorganic cations (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) and anions (F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), dissolved organic carbon (DOC), dissolved inorganic carbon (DIC), and total nitrogen (TN) in the precipitation and streamwater samples. The results showed that the precipitation pH was under 5.6 during the monitoring period, from 4 to 5, indicated the Neidong National Forest Recreation Area was affected by acid rain. SO_4^{2-} accounted for the highest proportion of solute in the precipitation. However, the pH value was higher than 7 in all the sampling sites of streamwater, and the HCO_3^- concentration was higher than $300\mu\text{eq L}^{-1}$, indicating owned good capacities to acid precipitation in this area. The concentration of HCO_3^- , SO_4^{2-} , and Ca^{2+} in the streamwater sampling sites was higher than 10 mg L^{-1} , indicating the high SO_4^{2-} concentration associated with high Ca^{2+} together in the streams. On the other hand, almost all the concentration of solutes was higher in the Nansi River than in the Neidong River, especially the sampling sites after Luohao Dam. Overall, although the watershed area of Nansi River was bigger than Neidong River and under more stress from visitors, but it did not threaten to pollution. It implied that forest watershed owned capacity to maintain good water quality.

【Key words】Neidong National Recreation Area; Rainfall; Stream water; Typhoon; Water chemistry.

I、前言

隨著台灣社會經濟的成長與繁榮，國人對遊樂品質的追求形成一股生態旅遊的風潮。而佔全省面積約 59% 的森林地區也順應潮流成為國民旅遊三大重要遊樂區之一 (薛怡珍, 2003)。然而未經評估便開發成遊憩景點，人為活動一旦成形，難免對環境造成衝擊，因此國內環保團體也曾提出「生態旅遊破壞生態？」的質疑，政府相關單位也開始重視森林遊樂區遊客承載量問題。

一般認為林地之土地利用較普通已開發地區單純，污染源也較少，因此林地土壤的淨水能力也較高，使水質較佳。但如果汙染量超過河川的自淨能力與森林生態系的淨水能力，水質將會因此而改變。由於遊憩的利用，而加速土壤之沖蝕和垃圾之汙染，使得水中的養份增加形成優養化現象，水中生物的增加也應而增加了水的混濁度。降低了遊憩品質。更影響了下游居民的飲水品質。因此應該要了解河川與森林生態系自淨能力的幅度，建立一套適宜的管理制度，並以永續發展為目標。

內洞國家森林遊樂區位於烏來鄉信賢村，全區面積廣達約 1,191.34 公頃，海拔高度為 230~ 800 公尺。園區內有南勢溪及其上游支流內洞溪匯流貫串，兩側山谷中是由原始闊葉林—柳杉純林構成。其中內洞溪地形特殊流經三大瀑布，水花衝擊產生陰離子，含量全國第一。民國 93 年 11 月以來遊憩人數每日吸引二、三千人 (林務局網站)。突然增加大量觀賞瀑布的遊客是否影響了河川的生態環境，造成森林生態的負擔進而改變了對水源的淨化能力是本研究的探討核心。希望能在自然生態環境的自淨能力範圍內，發揮到最大之遊憩效果，達到永續發展之目的，並將研究成果提供給森林遊樂區做為經營與保育上的參考資料。

II、材料與方法

於內洞森林遊樂區內瀑布下的內洞溪選取 3 處取樣點，及匯入的南勢溪由上到下選取 4 處取樣點 (圖 1)，每月至少二次，分別於假日和非假日，在溪流量平穩此不下雨時，在取樣點現場量測溶氧、電導度和 pH，並以瓢勺法取 500mL 溪流水，放置於攜帶式的冰箱內，並儘速送至中興大學水化學與養分循環實驗室，以供化驗分析用。在極端的水文事件，如颱風暴雨發生時，增加取樣的頻率。另在遊客量較多的假日，亦增加取樣的頻率，以評估人為干擾對水質的影響及評估此森林生態系的容忍極限值。

本試驗另外設置雨水收集裝置，由 3 個直徑 20 cm 的漏斗收集，再由漏斗經由塑膠管流入塑膠製的收集桶，因為雨水收集為露天開口式，故所收集到之樣品應包括此場降雨的濕沉降及前次下雨後進入收集瓶的部分乾沉降，統稱為混沉降。降雨樣品是以場雨 (event) 為單位。於每場雨後量測每個集水桶收集到的水樣量。所收集水樣亦儘速攜回實驗室分析。

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^{+})、陰離子(F^{-} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{-} 、 NO_3^{-} 、 HCO_3^{-}) 等，分析方法依照 APHA(American Public Health Association, 1995)及金恆鏞與劉瓊霏 (1996)。



圖 1. 內洞溪和南勢溪各取樣點位置

III、結果與討論

(I) 林外雨

降水 (含乾濕沉降, bulk precipitation) 常常是陸地生態系養分輸入的一重要途徑, 特別是無法由岩石 (crustal rocks) 得到的元素成分, 例如, 若一生態系內缺乏生物性氮固定物種, 降水也許就是此生態系內氮輸入的主要來源

(Fahey *et al.*, 1985)，此外，若森林處於受酸雨的威脅之下，也會經由降水接收到大部分的硫及金屬離子 (Lindberg and Harriss, 1981)。

大氣中含有微溶水的CO₂，因此正常降落至地面的雨水pH約為 5.6。若低於 5.6 就屬於酸性，高於 5.6 就屬於鹼性 (Barrett and Brodin, 1955)。而雨水酸化是全球性的問題，在高度工業化的地區，因污染量較高，而使得雨水pH較低。但因為污染物長程輸送的結果，有些遠離人為污染的地區 (如森林區域)，雨水一樣有酸化的現象。如本試驗的內洞國家森林遊樂區，在試驗期間是籠罩在酸沉降的威脅之下，雨水的pH值於 4~5 之間 (表 1)。

自然源及人為污染源所排放的SO₂及NO_x，在適當氧化劑作用下，轉化生成如H₂SO₄及HNO₃之類的酸性物質，其後拌隨降水沉降至地表，此為雨水酸化的主因。因此，在本試驗期間雨水中亦監測到高濃度的SO₄²⁻和NO₃⁻。既然此森林遊樂區位於無工業的森林區域，致酸物來源應是來自長程輸送的結果。

另雨水中的NH₄⁺明顯比福山植物園和臺灣中部山區高，NH₄⁺屬於非點源污染，到底來源是農業、林地、遊憩、養雞場或另有其他因素，尚待更長期的監測追蹤。此不同之差異，主要是因為氮的流動隨地理環境及森林生態系的不同，變動甚大，例如Mitchell等(1997)研究日本幾處試驗地之結果，顯示大氣中NH₄⁺之年平均濃度由郊區高海拔Ryuoh集水區的 1.9 mol L⁻¹至靠近都會區 24.0 mol L⁻¹之差異；且因其含量的多寡，在森林生產力的影響上扮演非常重要的角色，因此氮在臺灣森林集水區的生物地質化學循環上，實有待收集更多資料以分析之。

表 1. 內洞國家森林遊樂區內雨水的水化學

電導度 μS cm ⁻¹	pH	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ⁺	Ca ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻
μeq L ⁻¹													
25.13	4.51	91.51	6.24	3.94	55.82	60.17	0.64	84.19	51.92	2.90	0.09	73.47	24.28
(10.4)	(0.45)	(77.5)	(14.9)	(2.8)	(185.4)	(170)	(1.08)	(65.6)	(55.29)	(10.2)	(0.3)	(149.9)	(29.4)

* 括弧部分為標準偏差

(II) 森林淨化水質的功能評估

影響森林集水區內的生物地質化學循環(biogeochemistry cycle)的因子很多，諸如礦質化作用、土壤和水文特性、植群、氣候、生物過程、自然和人為的干擾等 (Beaulac and Reckhow, 1982; Likens and Bormann, 1995; Hornbeck *et al.*, 1997; Alexander *et al.*, 2000; Rhodes *et al.*, 2001; Tsujimura *et al.*, 2001; Baker,

2003)。這些變動和干擾都會影響到集水區溪流水化學，因此溪流水化學可提供森林經營結果的指標。

在過去的數十年中，國際間皆相當努力限制硫的釋放以保護陸生和水生的環境(Holdren *et al.*, 1993)。而我國地處亞洲大陸與太平洋邊緣，屬大陸性物質輸出的下風區，因此亞洲(尤其是中國)污染問題惡化，將對臺灣自然資源與森林生態系造成相當的衝擊。依據亞洲酸雨研究群(RAINS-ASIA)的估算，公元2020年時亞洲SO₂排放將為1990年的3倍，硫酸根沈降亦將為1990年的3倍。此種硫酸根沈降的迅速增加，將影響森林生態系的性質及流經森林生態系的水質。

在過去20年間，科學家們發現森林集水區內因湖泊及溪流水有逐漸酸化的趨勢，而造成水生生態系的改變，遂開始重視大氣酸沈降對於森林集水區內溪流水化學的影響。大部分早期的研究是針對酸沈降有高度敏感性的湖泊(Almer *et al.*, 1974)，至於酸沈降對於森林集水區內溪流的影響，近年來也逐漸受到重視(Hornbeck, 1992; Likens and Bormann, 1995; Hornbeck *et al.*, 1997; Aber *et al.*, 2003; Eimers *et al.*, 2004; Burns *et al.*, 2006)。內洞國家森林遊樂區內的林外雨監測資料已發現此森林生態系已受酸雨威脅。圖2為試驗期間，此森林集水區的林外雨、內洞溪3取樣點、和南勢溪4取樣點溪流水離子組成及pH的空間變異。相較於林外雨，溪流水的pH值明顯提高了，而且愈往下遊愈明顯，此結果是否因酸沈降的輸入此生態系，而加速鹽基陽離子的交換量，使養分加速由此生態系中經溪流水大量流失，而對此森林生態系生產力產生負面的影響？相反地，如長期在酸雨的威脅下，土粒中之鹽基陽離子被酸性沈降之H⁺離子大量交換出的結果，導致土壤酸化，降低土壤粒子結合鹽基陽離子的能力，而減少土壤中可交換性之陽離子濃度，使藉由離子交換供給溪流水的離子釋放速率是否會因而降低(Lee *et al.*, 1995)？此種相反的推論，依目前資料尚不足以解釋，仍待往後的長期觀察，以累積更多數據以分析之。

另在離子濃度，大部分溪流水的離子濃度也比林外雨明顯地提高，尤其是流經流域最大的下游，其原因除森林中植群水分蒸發散所產生的濃縮效應外，更可推測此生態系林分內部代謝過程及土壤中的生物活動及化學風化作用極強，因此經由溪流水中流失大量的養分，尤其是Ca²⁺、Na⁺及Mg²⁺等。

紐約州的环境保護部(New York State Departmental of Environmental Conservation, 1984)和Sharpe等(1984)都曾定義地面水的HCO₃⁻濃度若小於200

μqeL^{-1} 為酸沉降敏感的區域，但本試驗區的測點皆大於 $300 \mu\text{qeL}^{-1}$ ，且溪流水 pH 值皆大於 7，因此推斷此地區的土壤和地質一定有其特殊之處以中和酸沉降，可能是有很強的鹽基離子交換作用。溪流水的 SO_4^{2-} 主要來自大氣沉降， Ca^{2+} 卻來自於土壤的釋出(Hornbeck *et al.* 1997; Tsujimura *et al.*, 2001)，如表 2 的比較，本試驗區的溪水與雨水所含 SO_4^{2-} 皆比過去資料高很多，可以證明與溪水中的 SO_4^{2-} 與雨水成份有關，且內洞溪與畢祿溪的溪水中所含的 SO_4^{2-} 的濃度接近，南勢溪卻大於兩者許多，推測因南勢溪上游 SO_4^{2-} 之沉降累積至較下游的溪水中所形成的差距。而本試驗區的雨水中的 Ca^{2+} 與畢祿溪相類似，但溪水中所含的 Ca^{2+} 卻明顯有差距，應此證實 Ca^{2+} 與雨水的相關性較低，應是大部分來自土壤風化作用的結果。

一般而言，未經干擾的溪流水的背景濃度不會太高，酸鹼度(pH)介於 6~8 之間，無機離子的濃度應該低於 10 ppm，本試驗期間， SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 與 Ca^{2+} 都超於此範圍， SO_4^{2-} 主要來源是大氣沉降，為酸雨的主要組成分之一，另一重要來源可能是含硫化鐵岩石風化作用所產生，或如 Houle 和 Carignan (1995) 所提出， SO_4^{2-} 是來自土壤有機硫貯積的釋出，在垂直流經森林生態系的過程中，常與 Ca^{2+} 以硫酸鈣鹽流到溪流中，因此也提高 Ca^{2+} 在溪水中濃度。也間接證明森林集水區對酸沉降的緩衝效能。

另在森林集水區土壤的風化過程中亦會產生大量的 HCO_3^- ，觀察此些溪流水測點溪流環境，水中植物活動並不旺盛，因此高濃度的 HCO_3^- 應非受呼吸作用所排出的 CO_2 影響。屬於內洞溪的第 1、2、3 點的 HCO_3^- 濃度比位在南勢溪的第 4、5、6、7 點濃度還要低，可證明南勢溪上測點流經的流域較大，此流域的礦物，風化作用極強，易因而分解產生 HCO_3^- (Baron, 1991)。如上所述， HCO_3^- 能做為溪流水的酸中和能力和地區性土壤礦物風化程度的指標，能顯現出一集水區的土壤狀況及溪流水和酸沉降作用的關係 (Binkley *et al.*, 1989; Neal *et al.*, 1990; Robson *et al.*, 1993)。

陽離子除了鈣離子以外，其他離子在各點的差異不大； NH_4^+ 較林外雨低，其濃度減少大部分是因植物吸收的結果，也有可能被具負電荷之土壤顆粒與腐植質所吸附，證明此森林生態系仍保有無機氮，尚未呈現氮飽合現象。另同為單價陽離子之 Na^+ 及 K^+ ，在溪流水的濃度即有顯著的差異， Na^+ 明顯高於林外雨，而 K^+ 只有小幅增加，此應證了因 K^+ 對土壤膠體粒子的鍵結能力較強，較不易由土層中析出 (Lee *et al.*, 1995)。

陰離子方面 NO_3^- 與 Cl^- 在各點間無顯著差異， SO_4^{2-} 與 HCO_3^- 均在屬於內洞溪的第1、2、3點有些許上升；南勢溪在與內洞溪會合前的第4點，為所有取樣點中平均濃度最高，會合後的第5點濃度明顯下降，應是離子濃度較低的內洞溪匯入所形成的稀釋效果，而在往下游的第6、7點濃度皆比第4、5點高；而 Ca^{2+} 也有相同的趨勢，應是碳酸根離子與硫酸根離子會與其形成鹽類共同匯入河川的結果，此結果也影響了電導度的測定結果。另總體來看，河川的TOC與pH值的變化不大，皆維持中性，表示當地的河川污染還未超過河川本身的自淨能力。

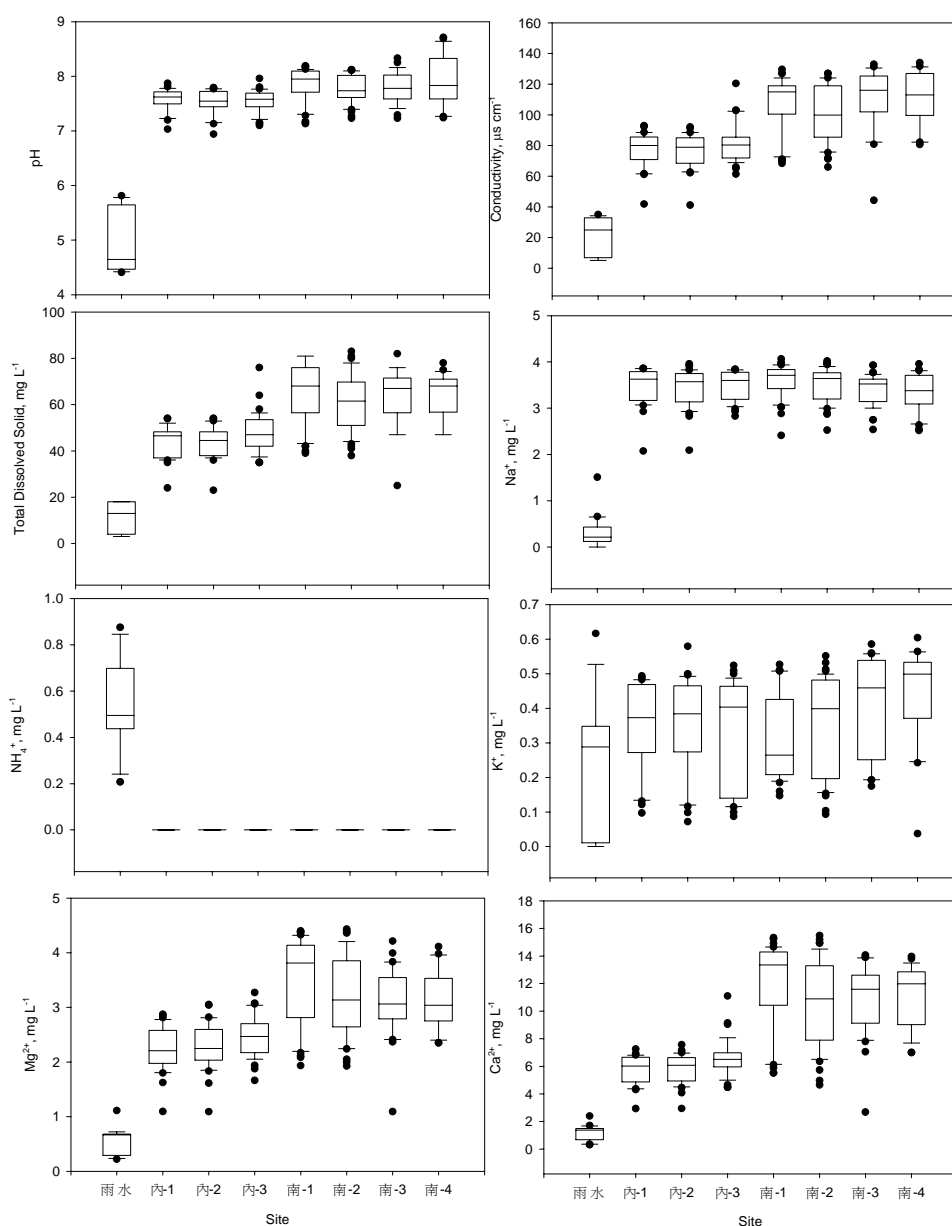


圖 2. 試驗期間的雨水和溪流水的水化學

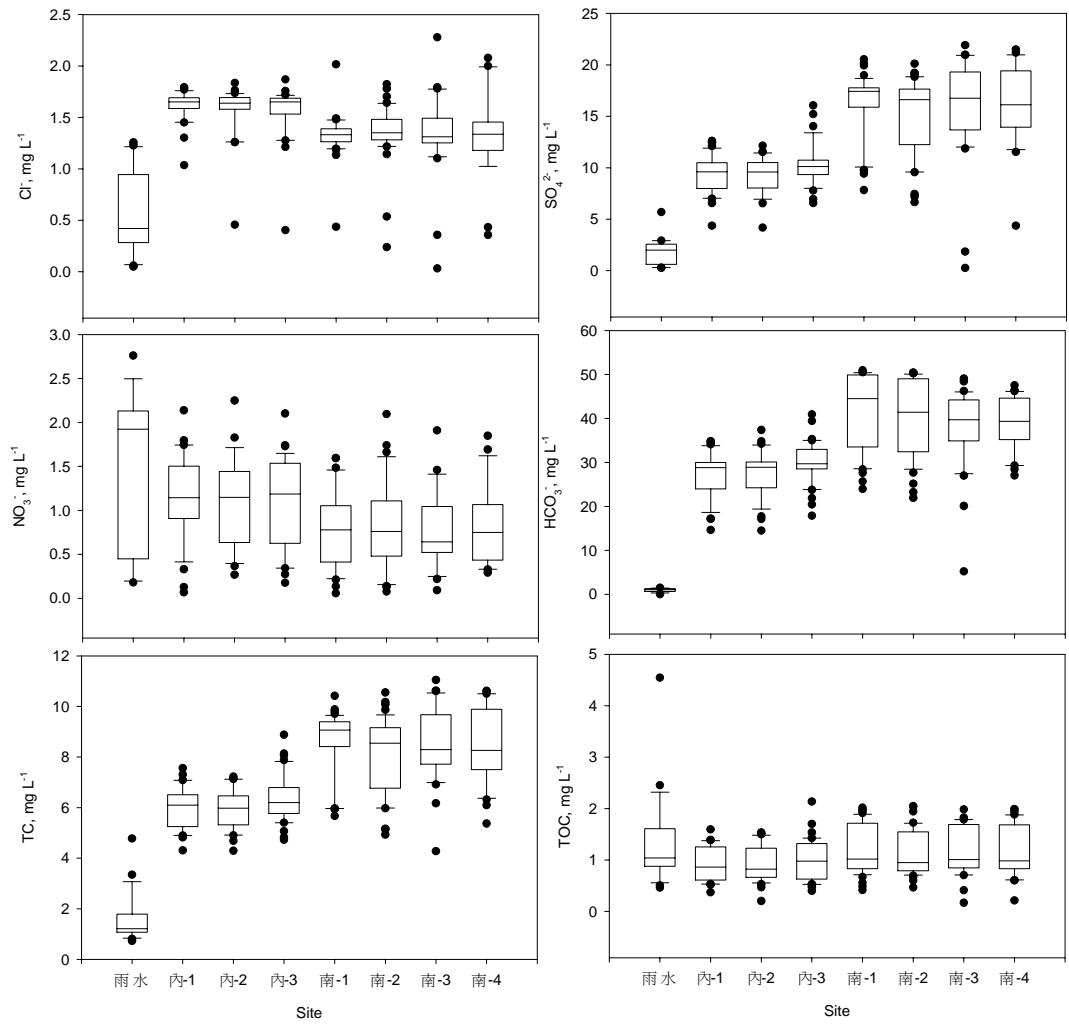


圖 2. (Continued)

(III)遊樂行為對森林生態系水質的影響

森林內空氣清新、水質優良，所以能提供森林浴及礦泉水之利用。因為森林裡不僅生物多樣性豐富，各種地形、地質的成因、水的來源和影響因子，均是科學研究與教育之最佳材料，所以環境教育自然就是能夠帶給民眾深度旅遊的必備主題，也是森林遊樂可永續的絕對必要條件。內洞溪地形特殊流經三大瀑布，水花衝擊產生陰離子，含量全國第一。民國 93 年 11 月以來遊憩人數每日吸引二、三千人。突然增加大量觀賞瀑布的遊客是否影響了河川的生態環境，造成森林生態的負擔進而改變了對森林對水源的淨化能力亦是本計畫的探討重點。

圖 3 表示內洞溪 3 取樣點和南勢溪 4 取樣點在試驗期間所分析各項水化學在假日與非假日數值的差異。水中溶氧量(O_2)在假日有比非假日低的驅勢，尤其是停留遊客人數較多的內洞溪和南勢溪下游較明顯。相反地，水中總無機碳(TIC)在假日有較高的趨勢，但變化不明顯，總有機碳(TOC) 則在非假日有較高的區現象。此些初步現象顯示，隨著假日遊客人數的增加確實會對溪流水質造成影響，但此國家森林遊樂區似乎仍有很大空間的遊客承載量，但承載上限到底在那裡?仍有待長期監測，收集更多資料以分析評估。

Na^+ 和 Mg^{2+} 離子在南勢溪的取樣點，非假日水樣的離子濃度皆比假日的低，而在內洞溪匯入南勢溪的取樣點卻有相反的現象，證明內洞溪的匯入會降低南勢溪的離子濃度。而內洞溪在假日與非假日水中離子濃度沒有明顯差異，而 K^+ 離子則是假日濃度低於非假日濃度；在陰離子方面， Cl^- 也有相同於 Na^+ 、 Mg^{2+} 離子的現象。

將各取樣點所分析的水化學參數和遊客人數做相關性分析後發現(表 2)，內洞溪各項水化學參數與入園人數相關性明顯低於南勢溪各取樣點；證明南勢溪所受遊客的影響大於內洞溪，其中陽離子 K^+ 與 Mg^{2+} 的相關性最高，但此兩種離子輸入的主要來源應為林木和土壤的淋溶輸入。Sayre和Fahey (1999)研究結果顯示酸雨中的pH值對 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在冠層的淋溶有顯著的影響。Lovett等(1996)在野外的雨水試驗結果發現酸雨對K及Na的相關性小，因此推測應有其他因素造成此現象，而非空氣污染所形成的酸雨所致。而在此森林遊樂區內，是何種原因造成遊客人數和此二種離子濃度相關性較高，依目前所收集到的資料尚無法做明確的論斷，有待後續的持續監測追蹤。

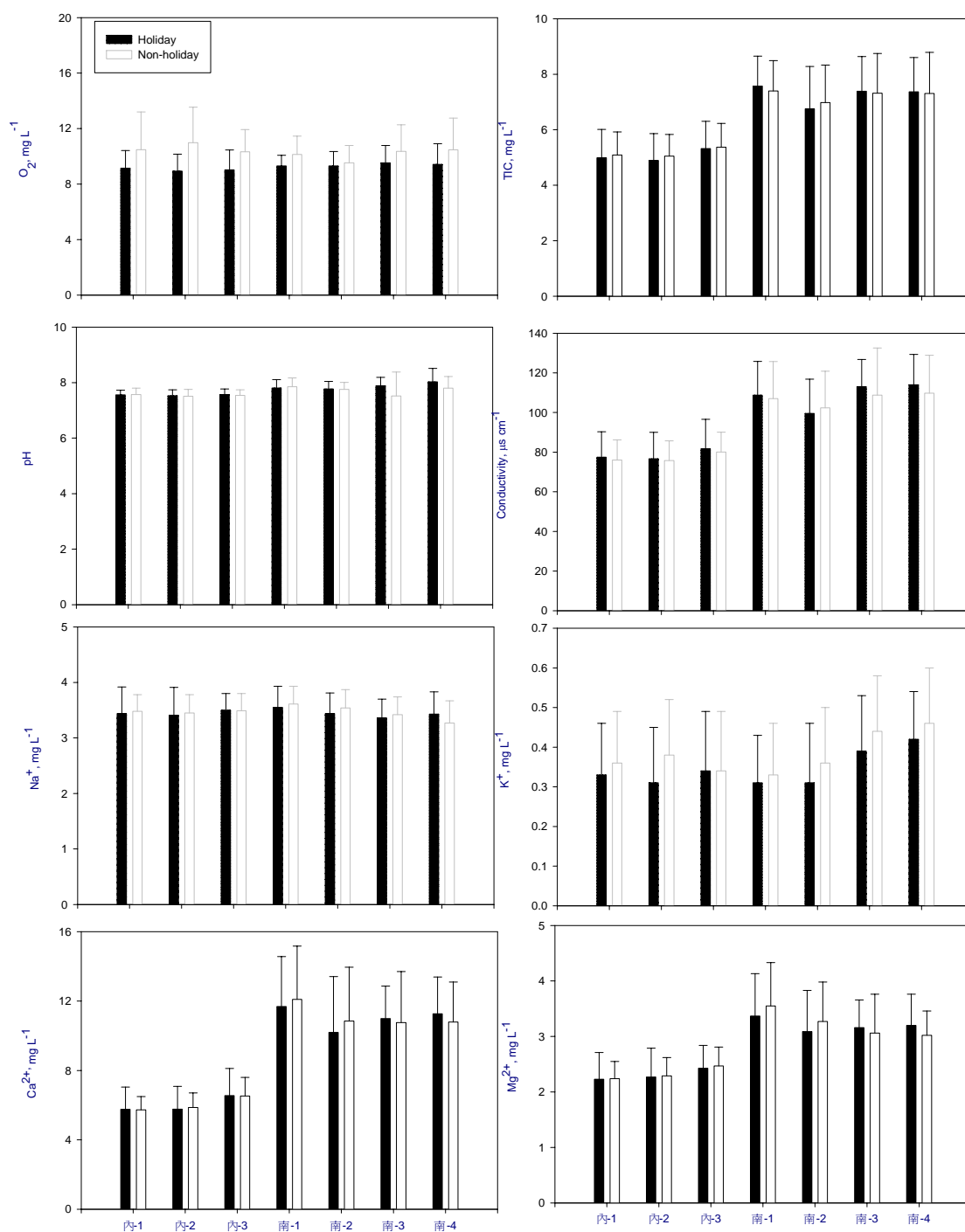


圖 3. 假日和非假日溪流水水化學的比較

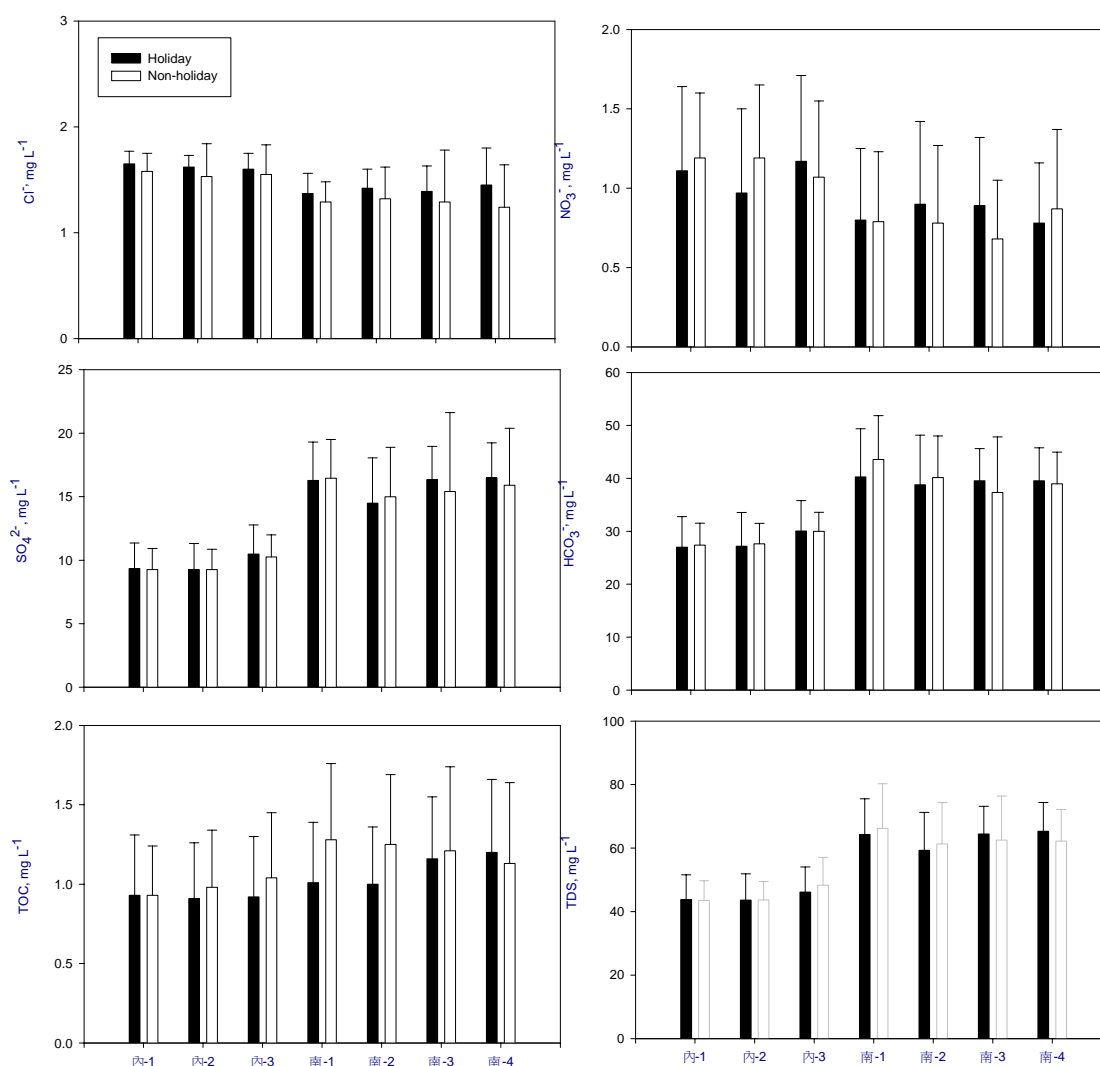


圖 3. (Continued)

一般認為交通工具帶來的污染會產生大量NO₃⁻及SO₄²⁻，但本試驗結果顯示，溪水中的NO₃⁻及SO₄²⁻與遊客人數並無太大的相關性，可能影響原因為 1) 輸入SO₄²⁻的濃度雖高，但因地質與樹冠的地區特性加強了此區河川的SO₄²⁻背景值使得受人為影響不明顯；2) 溪水的硝化作用(Cooper, 1990; Hill, 1991)使得NO₃⁻變化不明顯；3) 樹冠層結構完整，截留及離子交換或微生物吸收 (Cronan and Reiners, 1983)等作用明顯。

另遊憩活動對自然環境造成衝擊，涉及了植物、動物、地質、土壤、水、空氣等方面的改變，而且這些改變相互之間亦會影響，另亦受到氣候的影響，為一複雜的網狀反應，難以在短時間內觀測種種的變化，而瞭解影響某些變化的原因，宜長期紀錄及觀測有關資料。

表 2. 水化學與入園人數的相關性分析

	Cond	TDS	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TOC
第 1 點	0.28	0.44	0.20	0.37	0.25	0.40	0.36	0.22	0.06	0.28	0.33	0.00
第 2 點	0.23	0.40	0.26	0.32	0.44	0.40	0.31	0.20	0.11	0.27	0.34	0.09
第 3 點	0.03	0.12	0.40	0.45	0.64	0.19	0.00	0.36	0.09	0.01	0.10	0.13
第 4 點	0.45	0.58	0.36	0.50	0.30	0.60	0.62	0.11	0.05	0.39	0.41	0.02
第 5 點	0.05	0.25	0.26	0.41	0.61	0.57	0.42	0.04	0.09	0.17	0.38	0.09

(IV) 颱風干擾對森林生態系水質的影響

溪流水中主要陽離子包括Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺、NH₄⁺，主要陰離子包括F⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻及NO₃⁻(劉瓊霏，2000)，部份離子濃度有明顯的季節性變化，主要受到流量多寡的影響，其中電導度、pH、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻及HCO₃⁻等離子濃度與流量成負相關，隨著流量增加而減少；但懸浮質及全氮量則與流量成正相關，隨著流量增加而增加，其他離子如K⁺、F⁻、Cl⁻、NH₄⁺及NO₃⁻等濃度並無顯著的季節性變化(廖學誠、黃正良，2001)，但是隨著環境的不同相關性也跟著改變。離子濃度與流量的關係可歸納為三種趨勢(Salmon et al., 2001) (1) 稀釋作用，離子濃度隨流量增加減少；(2) 增加水文接近作用，離子濃度隨流量增加而增加；(3) 水文恆定，離子濃度不隨流量變化。颱風對森林集水區水化學的影響也可依此三方面來加以討論之。

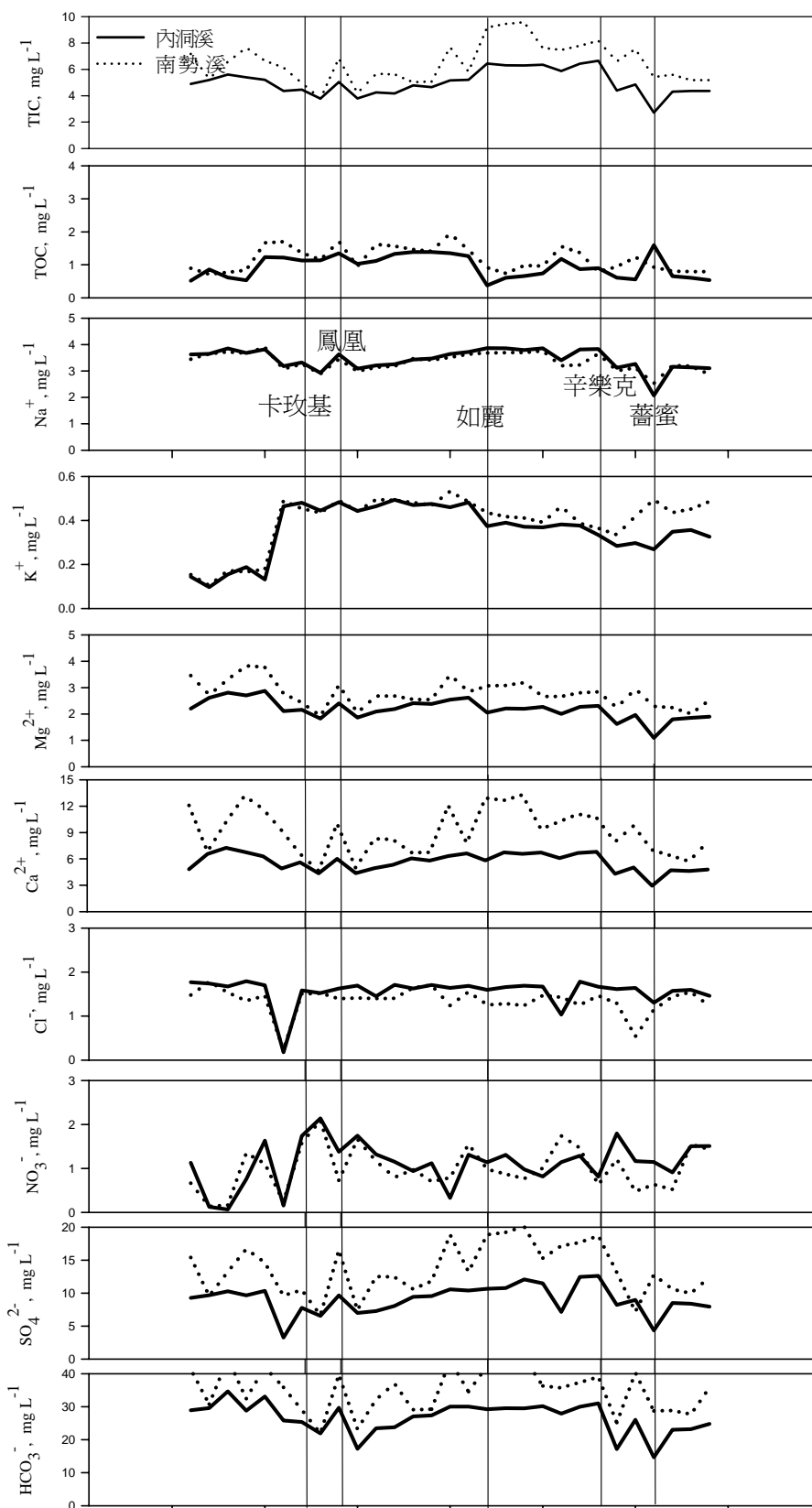


圖 3. 內洞溪和南勢溪在觀測期間水化學的變化情形

圖 3 為內洞溪和南勢溪在觀測期間水化學的變化情形，颱風過後，內洞溪和南勢溪溪水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等呈現濃度降低現象，此些溶質在森林集水區多來自深層岩石或土壤，顯示颱風的新水加入會造成溪水的稀釋作用。相反地，內洞溪和南勢溪溪水中懸浮質、 K^+ 、 NO_3^- 等呈現濃度升高現象，此類溶質多分布於森林集水區的地表或枝葉層中，顯示颱風時近地表水所造成的地表淋洗或沖蝕帶動現象。整體而言，大部分的溶質在颱風期間被稀釋大概需要二個禮拜才會漸漸回復，少部分會因颱風的降雨將地表的物質經由地表徑流流入溪流中造成濃度上升但是依但物質沖刷完畢濃度就會在度下降，在九月底經歷連續 3 個颱風後受到更大的影響，所有的離子都降低，因受到較大的擾動，恢復所需的時間也相對延長。

臺灣每年約四次的颱風事件，雖然給許多地區帶來不少山崩及土石流等地質災害事件，但是每次在大量的雨水沖刷後，卻也同時將台灣島內土壤及植生作物所包含含碳比例給降低了下來。Hilton 等 (2008) 認為大氣中的二氧化碳被帶至深海沉積的過程中，颱風扮演了相當重要的角色。彼等比較了近數十年來台灣島的侵蝕速率，他們推斷有 80~90% 的有機碳是在颱風造成山崩、土石流的事件中，被大量水流從上游的山體運送到下游的海洋中。這個發現，也說明了颱風的頻率及強度會影響陸地上有機碳被帶至海洋中的速率。颱風期間，大量雨水會將高濃度的沉積物直接注入深海中，在台灣島四周的海洋便會形成長期碳掩埋的機制，相對大自然界是一項減碳作用，也就是目前科學界最熱門探討的“碳封存” (Carbon Sequestration) 系統。雖然這種全球性碳封存的重要性仍被評估中，但颱風與碳循環的關係將會高度的影響台灣未來的颱風頻率與強度。未來可應用此項研究成果，由溪流水中持續分析各項水化學，以科學化的數據分析，除可說明森林涵養水源和淨化水質功能外，亦強調森林的固碳能力。

IV、謝誌

本研究承行政院農業委員會林務局新竹林管處提供樣區和經費補助，謹此致謝。

V、參考文獻

- 薛怡珍 (2003) 森林遊憩資源之永續利用—以地景生態學觀點實踐永續森林生態旅遊。林業研究專訊 10(5): 7-8。
- 廖學誠、黃正良 (2001) 森林集水區溪流水離子濃度季節性變化之研究。國立台北師範學院學報 14: 441-458。
- 金恆鏞、劉瓊霏 (1996) 離子層析儀應用在水質分析的技術探討。林業試驗所林業叢刊 68 號。
- 劉瓊霏 (2000) 雨水流經關刀溪三種林分水化學之變化。國立中興大學森林系博士論文。
- Aber, J.D., C.L. Goodale, S.V. Ollinger, M-L. Smith, A.H. Magill, M.E. Martin, R.A. Hallett, and J.L. Stoddard, (2003) Is Nitrogen deposition altering the nitrogen status of northeastern forests? *Bioscience* 23(4):375-390.
- Alexander, R.B., R.A. Smith, and G.E. Schwarz, (2000) Effect of stream channel size on the delivery of nitrogen to the gulf of Mexico. *Nature* 403:758-761.
- Almer, B.W., C. Dickson, C. Ekstrom, and E. Hornstrom (1978) Sulfur pollution and aquatic ecosystem. In Nriagu JO. *Sulfur in the Environment : Part II : Ecological impacts.*, John Wiley & Sons, Inc., 271-311.
- APHA (1995) Standard methods for the examination of water and wastewater. A.D. Eaton, L. S. Clesceri, and A. E. Greenberg, eds. 19th edition. United Book Press, Baltimore, MD.
- Baker, A. (2003) Land Use and Water Quality. *Hydrological Processes*. 17:2499-2501.
- Band, L.E., C. Tague, P. Groffman, and K. Belt, (2001) Forest ecosystem processes at the watershed scale: hydrological and ecological controls of nitrogen export. *Hydrological Processes* 15:2013-2028.
- Barrett, E. and G. Brodin (1955) The acidity of Scandinavian precipitation. *Tellus* 7: 251-257.
- Beaulac, M.N. and K.H. Reckhow (1982) An examination of land use – nutrient export relationships. *Water Resources Bulletin* 18:1013-1024.
- Binkley D, D. Valentine, D. Wells, and U. Valentine (1989) An empirical analysis of the factors contributing to 20-year decrease in soil pH in an old-field

- plantation of loblolly pine. *Biogeochemistry* 8: 39-54.
- Burns, DA, M.R. McHale, C.T. Driscoll and K.M. Roy (2006) Response of surface water chemistry to reduced levels of acid precipitation: comparison of trends in two regions of New York, U.S.A. *Hydrological Processes* 20:1611–1627.
- Cronan, C.S. and W.A.Reiners (1983) Canopy processing of acidic precipitation by coniferous and hardwood forests in New England. *Oecologia* (Berlin) 59:216-23.
- Eimers, M.C., P.J. Dillon, and S.L. Schiff (2004) Sulphate flux from an upland forested catchment in south-central Ontario, Canada. *Water, Air, and Soil Pollution* 152:3-21.
- Hilton, R.G., A. Galy, N. Hovius, M.C. Chen, M.J. Horng and H. Chen (2008) Tropical-cyclone-driven erosion of the terrestrial biosphere from mountains *Nature Geoscience* 1: 759 – 762.
- Holdren, Jr, G. R., T.C. Strickland, P.W. Shaffer, P.F. Ryan, P.L.Ringold. and R.S. Turner (1993) Sensitivity of critical load estimates for surface waters to model selection and regionalization schemes. *Journal of Environmental Quality* 22: 279–289.
- Hornbeck, J.W. and W.T. Swank (1992) Watershed ecosystem analysis as a basis for multiple use management of eastern forests. *Ecological Applications* 2: 238–247
- Hornbeck, J.W., S.W. Bailey, D.C. Buso, J.B. Shanley (1997) Streamwater chemistry and nutrient budgets for forested watersheds in New England: variability and management implications. *Forest Ecology and Management* 93:73-89.
- Lee, T. and P. Cornillon (1995) Temporal variation of meandering intensity and domain-wide lateral oscillations of the Gulf Stream. *Journal of Geophysical Research* 100: 1360~13613.
- Likens, G.E. and F.H. Bormann (1995) *Biogeochemistry of a Forest Ecosystem*. Springer- Verlag, New York.
- Lindberg, S.E. and R.C. Harriss (1981) The role of atmospheric deposition in an eastern U.S. deciduous forest. *Water Air Soil Pollut.* 16: 13-31.

- Mitchell, M.J., G. Iwatsubo, K. Ohroi, and Y. Nakagawa (1997) Nitrogen saturation in Japanese forests: an evaluation. *Forest Ecology and Management* 97: 39-51.
- Neal, C., J. Mulder, N. Christophersen, M. Neal, D. Waters, R.C. Ferrier, R. Harriman and R. McMahon (1990) Limitations to the understanding of ion-exchange and solubility controls for acidic Welsh, Scottish and Norwegian sites. *Journal of Hydrology* 116: 11-23.
- New York State Department of Environmental Conservation (1984) A Policy for New York State to Reduce sulfur Dioxide Emissions. Draft Environmental impact Statement, Albany New York.
- Rhodes, A. L., M. N. Robert, and A. Pufall (2001) Influences of Land Use on Water Quality of a Diverse New England Watershed. *Environmental Science & Technology*. 35:3640-3645.
- Robson, A.J., C. Neal, S. Hill and C.J. Smith (1993) Linking variations in short- and medium-term stream chemistry to rainfall inputs - some observations at Plynlimon, Mid-Wales. *Journal of Hydrology* 144: 291-310.
- Sharpe, W.E., D.R.DeWalle, R.T. Liebfried, R.S. Dinicola, W.G. Kimmel and L.S. Sherwin (1984) Causes of Acidification of Four Streams on Laurel Hill in Southwestern Pennsylvania. *Journal of Environmental Quality* 13: 619-31.
- Tsujimura, M., Y. Onda and J. Ito (2001) Stream water chemistry in a steep headwater basin with high relief. *Hydrological Processes* 15:1848-1858.

應用倒傳遞類神經網路模擬崩場地之滑移特性

許中立¹ 黃文仁² 徐弘明² 戴欣怡² 林廣榮³

【摘要】崩場地為山坡地最具破壞之災害型態之一，藉由實施現場之監測與分析評估，可以協助管理機關擬訂適當的防災策略。本研究以台東縣池上鄉山棕寮崩場地為例，利用倒傳遞類神經網路分析法，建構具高複雜且非線性之關係模式，並用以預測坡面位移變化。網路輸入係以直接關係位移之物理因子為變數，建構最佳之 4 層網路，其中一層為輸入層，採用前期降雨量、入滲係數、降雨強度、地形坡度、地下水位、土壤凝聚力與土壤內摩擦角等 7 個因子為輸入變數，另有二層隱藏層及一層輸出層。試驗分析結果顯示所建構之倒傳遞類神經網路分析法其對於本崩場地坡面滑移具有良好之預測精度，應可提供作為山坡地防災與保育管理之參考。

【關鍵詞】崩塌、倒傳類神經網路、預測。

DISPLACEMENT PREDICTED FOR THE BACKPROPAGATION NEURAL NETWORK APPLYING IN SHONZONGLIAO LANDSLIDE AREA

Chung-li Hsu¹ Wen-ren Huang² Hon-min Hsu² Shin-yi Dai² Kuang-jung Lin³

【Abstract】 Landslides has become one disaster type of the most serious destroy on the slope lands. The way to monitoring and assessment for landslide area can help government agencies to select suitable management and plan mitigation in unstable landslide areas. This research presents a case study of landslide monitoring and assessment at Shanzongliao landslide area in Taitung County, attempt to predict slope

¹屏東科技大學水土保持系副教授，通訊作者。電子郵件: clhsu@mail.npust.edu.tw

Associate Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung, Taiwan, R.O.C. Corresponding Author. E-mail: clhsu@mail.npust.edu.tw

²屏東科技大學坡地防災及水資源工程研究所博士生。

Graduate Institute of Disaster Prevention on Hillslopes and Water Resources Engineering, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung, Taiwan, R.O.C.

³屏東科技大學森林系碩士。

Master, Department of Forestry, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung, Taiwan, R.O.C.

movements using back propagation neural network (BPNN), as well as use powerful tools to model and investigate various complex and non-linear phenomena. The BPNN can perform calculation to use MATLAB program with the Levenberg-Marquardt algorithm. The data from the case study are used to train and test the developed model to enable prediction of the magnitude of the ground movements with the help of input variables that have direct physical significance. An infiltration coefficient is introduced in the network architecture apart from antecedent rainfall, rainfall intensity, slope profile, groundwater level and shear strength of soil. A four-layered back propagation neural network with an input layer, two hidden layers and one output layer is found optimal. The developed BPNN mode demonstrate a promising result, and have good potential accurately for predicting the slope movement, and can offer the reference of disaster prevention and utilizing management at the steep slope.

【Key words】 Landslide, Back propagation neural network, Prediction.

I、前言

在崩場地內利用現場觀測調查之方法以掌握及研判影響因子，但要作出精準預測確是相當困難的。然對於大部份之崩塌邊坡滑移趨勢，都希望能利用適當方法作出預測(prediction)，而為增進預測之可靠度(reliability)，建構滑動體之基本監測數據資料是必要的。近來應用類神經網路(artificial neural network, ANN)探討降雨量與地下水位變動關係已有文獻探討，尤其是利用 ANN 仿神經元的自我訓練回想及模擬性能，可以自動適應非線性系統環境，補助現地人工或自動觀測之缺陷。

影響崩場地邊坡滑移之因子眾多，其預測位移之方法目前尚無法根據其物理特性建立基本數學模式。意即對於預測位移研究建模程序之內部機構過於複雜，或者其中存在一些未知與不確定參數，而造成失敗或實用價值甚低。因此必須另以經驗模式(empirical model)建立數學模式，將研究程序機構視為黑盒子(black box)，而僅憑藉程序之輸入與輸出數據，透過數學技巧來決定程序之模式。此數學技巧指的是迴歸分析(regression analysis)，即對所取得數據作曲線擬合(curve fitting)。類神經網路理論即是一種黑盒子理論，它就是經驗建模之工具，的確是以曲線擬合方式進行。

本研究以台東縣池上鄉山棕寮崩場地為例，利用具有建構高複雜且非線性關

係模式「倒傳遞類神經網路(back propagation neural network, BPNN)」預測邊坡塊體位移變化。所發展之 BPNN 分析係應用 MATLAB 程式之 Levenberg-Marquardt 演算法求解。網路輸入係以直接關係位移物理因子為變數，建構 4 層網路，其中一層輸入層採用前期降雨量、入滲係數、降雨強度、地形坡度、地下水位、土壤凝聚力、土壤內摩擦角等 7 個因子為輸入變數，另有 2 層隱藏層及 1 層輸出層。嘗試發展建構 BPNN 預測崩場地邊坡位移。

II、材料與方法

(I)前人研究

類神經網路(ANN)嘗試模擬人類大腦，它是一種黑盒分析，由於 ANN 可以處理非線性多變量問題。因此可以成功應用在大地工程問題。Ni et al.(1995)應用模糊與類神經網路模式，可以鑑別推估邊坡崩塌潛勢。Juang and Chen(1999)應用鑽探貫入試驗(CPT)，評估土壤液化潛能，並證明其評估精確度較優於僅有利用 Olsen 與 Robertson 二種方法。Juang et al.(2000)提及 BPNN 是目前對於關連訓練使用最廣泛之演算法，它已成為 ANN 相關方法中快速受到工程界重視原因。倒傳遞類神經網路(BPNN)已經成功地應用在水文、生物、地理與地工的繪圖及預測研究上。Agrawal et al.(1994)研究結論指出 ANN 能夠在資料當中推測適當數學函數作為統計分析，它與一般統計分析最大不同是，它不用依照輸入與輸出資料去擬合猜測函數。

(II)試驗地概況

本研究之試驗地係位於台東縣池上鄉富興村山棕寮崩場地，地理位置座標 N2551493、E272725，全區面積 60 ha，平均海拔高度在 490m，全區平均坡度 12.4°(22%)，多為西北向坡面。其地形及其觀測佈置情形如圖 1 所示。

地質生成主要是屬新生代第三紀火成安山岩層，為短時間瞭解地層水文地質。根據資料顯示全區覆土層在 0~2m 間，其下為未固結安岩塊崩積層在 2~27m 間，其下為利吉混同層。其區域地質分布如圖 2。

試驗地全區觀測佈置沿滑動測線(moving peg line)共計人工水位計 14 孔，自動記錄雨量計 1 座，地中傾度管 6 孔。觀測期間起自民國 92 年 2 月至 94 年 12 月，期間共歷經蘇迪勒、莫拉克、科羅旺、杜鵑、康森、敏督利、艾莉、海馬、米雷、

珊瑚、丹瑞等 12 次颱風豪雨事件，測得可觀資料。



圖 1. 試驗地地形圖及其現地觀測佈置圖

Fig.1. Topography and observed instrument establishment in the experimental site

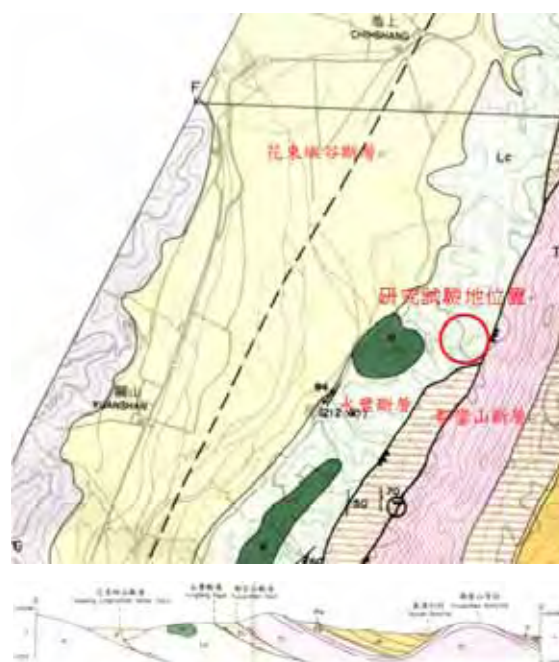


圖 2. 區域地質分布圖

Fig.2. Local geology distribution around the experimental site

(III)研究方法

本研究係採BPNN建構經驗模式，進而預測地滑地位移。所建構之網路除自變數輸入層 1 層，因變數輸出層 1 層，另加隱藏層 2 層之網路模式，它是屬於前饋式多層網路(multiple-layer of feed forward network)，如圖 3 所示；一個網路能夠

具有許多層，輸入變數向量層為 p ，二個隱藏層各有權重值矩陣 w_1 、 w_2 ，偏權值矩陣 b_1 ， b_2 ，及一個輸出值向量 a 。根據 1976 至 1998 年間每年最大 6、12、24、48 與 72 小時降雨歷線分析之。

有關網路演算迭代遞迴之門檻值及其權重值如流程圖所控制，隱藏層之權重更新值如下式：

$$W_{j,n} = W_{j,o} + \Delta W_j$$

其中 $W_{j,o}$ ：舊權值

$W_{j,n}$ ：新權值

$\Delta W_j = -\mu \partial E / \partial W_j$ ：網路學習效率

而網路之輸出值與目標值之誤差控制函數式為：

$$E = 0.5(t-o)^2$$

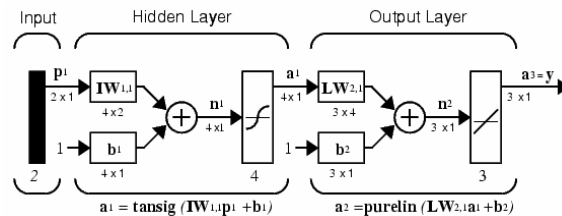


圖 3. 多層神經元網路架構圖

Fig.3. Structure of multiple-layer of feed forward network

以上 BPNN 演算採用 MATLAB 數值分析程式之 Levenberg-Marquardt 演算法求解。其適應性學習函數選取具有動量梯度下降法(LEARNGDM)，性能函數採取均方誤差法(MSE)。

輸入層自變數因子根據前人文獻探討，選擇與邊坡滑移較有直接物理意義之因子，分別為前期降雨量、降雨強度、入滲係數、地下水位、坡度、土壤凝聚力、內摩擦角等七個因子作為自變數輸入。鑑於崩塌地之監測時間費時，各項觀測工程耗費昂貴，可用資料取得不易，本研究試驗地觀測雖歷經 4 年，亦僅取得 12 筆可用資料。因此，研究重點在考慮如何應用有限發生降雨事件預測最可能發生地滑位移。為此，本研究將 12 場颱風豪雨監測所得數據，分為 6、8、10 批次網路訓練對應模擬測試 3 種模式研究並討論其結果。其中節錄 10 批次網路訓練對應模擬測試資料分別如表 1 與表 2 所示。

Tsparas et al.(2002)研究指出坡地在土壤滲透係數 K_{sat} 較小時，降雨大多成為逕流， K_{sat} 較大時前期降雨對於坡地土壤入滲之影響不大。然而適度之土壤滲透係數

K_{sat} ，則對於坡地在土壤滲透係數之影響是有意義的。本研究現地入滲試驗所得覆土層平均土壤滲透係數 $k=1.19*10^{-4}$ (cm/sec)，而土壤飽和單位重為 $19KN/m^2$ 。Das.et al.(2003)提出由於地層滑動面之不擾動黏土不易取得；因此，要真正取得滑動面之 c 、 ϕ 值有其困難。一般係利用鑽探岩心取樣之SPT試驗所得N值，再利用經驗公式換算成 c 值。

表1. No.1測線之模擬基本資料

Table1. Simulation base data of No.1 moving observed line(May-July 2007)

Antecedent Rainfall (mm)	Rainfall Intensity (mm/h)	Infiltration Coefficient (m/s) * 10^{-6}	Groundwater Surface (m)	Cohesion of soil (kg/cm ²)	Internal friction of soil (°)	Slope gradient (°)	Slope movement (cm)
92.0	12.8	1.19	-3.53	0.75	17.5	12.4	1.06
389.5	53.2	1.19	-4.02	0.75	17.5	12.4	3.05
173.5	20.5	1.19	-4.35	0.75	17.5	12.4	1.48
504.0	14.0	1.19	-4.88	0.75	17.5	12.4	1.51
159.5	31.4	1.19	-4.66	0.75	17.5	12.4	1.59
74.5	6.8	1.19	-5.83	0.75	17.5	12.4	0.85
474.5	35.7	1.19	-6.73	0.75	17.5	12.4	3.48
79.5	11.4	1.19	-5.79	0.75	17.5	12.4	0.64
172.5	20.7	1.19	-5.44	0.75	17.5	12.4	3.42
91.0	19.7	1.19	-5.75	0.75	17.5	12.4	1.23

表2. No.2測線之模擬基本資料

Table2. Simulation base data of No.2 moving observed line(August2003-September2005)

Antecedent Rainfall (mm)	Rainfall Intensity (mm/h)	Infiltration Coefficient (m/s) * 10^{-6}	Groundwater Surface (m)	Cohesion of soil (kg/cm ²)	Internal friction of soil (°)	Slope gradient (°)	Slope movement (cm)
173.5	20.5	1.19	-4.35	0.75	17.5	12.4	1.48
504.0	14.0	1.19	-4.88	0.75	17.5	12.4	1.51
159.5	31.4	1.19	-4.66	0.75	17.5	12.4	1.59
74.5	6.8	1.19	-5.83	0.75	17.5	12.4	0.85
474.5	35.7	1.19	-6.73	0.75	17.5	12.4	3.48
79.5	11.4	1.19	-5.79	0.75	17.5	12.4	0.64
172.5	20.7	1.19	-5.44	0.75	17.5	12.4	3.42
91.0	19.7	1.19	-5.75	0.75	17.5	12.4	1.23
418.5	36.0	1.19	-6.50	0.75	17.5	12.4	3.86
317.5	28.7	1.19	-6.10	0.75	17.5	12.4	3.63

III、結果與討論

本研究結果建構最佳網路為 4 層網路，其中輸入層自變數 7 個，隱藏層第 I 層採用 6 個神經元，隱藏層第 II 層採用 5 個神經元。網路訓練過程中之 6 批次、8 批次、10 批次網路訓練最後收斂參數分別是迭代循環均為 12,000 次，最小性能梯度均為 $1*e-10$ ，動量初始值分別為 0.0012、0.001、0.001，訓練後收斂性能梯度分別為 $5.17787e-17$ 、 $2.44419e-16$ 、 $6.95039e-16$ 。

網路訓練後響應分析係以網路輸出向量與目標向量間進行線性迴歸分析，分析結果相關係數 6、8、10 批次均為 $R=1.0$ ，顯示網路訓練線性適配良好，其迴歸分析散布如圖 4 所示。

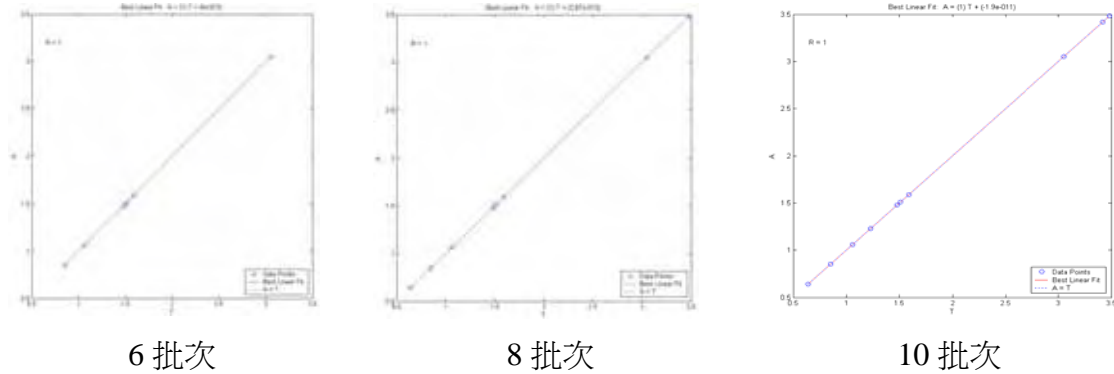


圖 4. 網路訓練結果

Fig.4. Network training result

網路訓練後模擬驗證另一組測線數據進行坡面位移預測，驗證結果將網路輸出向量對目標向量進行線性迴歸，其結果得到線性相關係數 6 批次 $R=0.955$ 、8 批次 $R=0.987$ 、10 批次 $R=0.991$ 。其網路模擬結果如圖 5 所示。

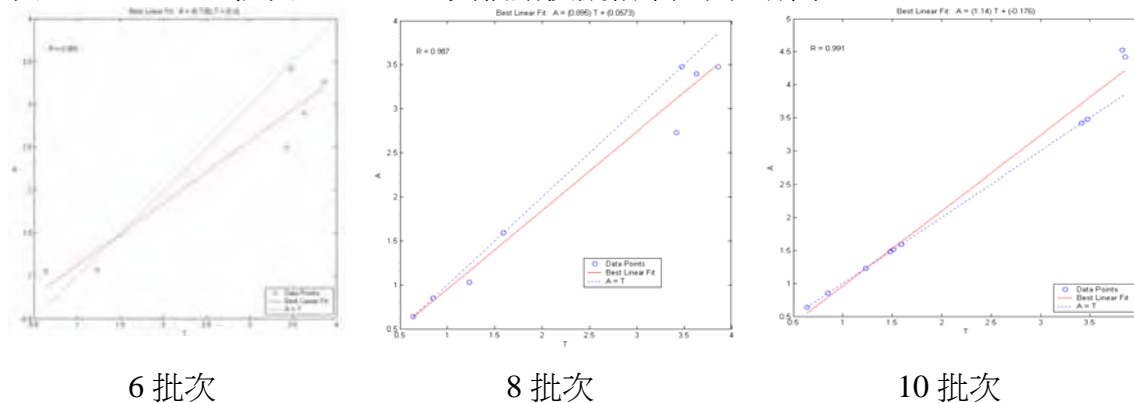


圖 5. 網路模擬結果

Fig.5. Network simulation result

又網路預測邊坡滑移及對應實際監測誤差分析結果，6 批次預測誤差 24%、8 批次預測誤差 13.1%、10 批次預測誤差 12.7%。顯示建構之 BPNN 分析結果對於作為中危害度崩塌地邊坡滑移監測要求，以使用監測颱風豪雨事件次數至少 8 次者，即有良好之預測精度（準確度達 85% 以上）。節錄 8 批次網路預測位移對應實際監測誤差分析結果如表 3 所示。

本研究得到最佳網路結構之 2 個隱藏層權重值矩陣 w_1 、 w_2 ，偏權值矩陣 b_1 ， b_2 ，及輸出層偏權值矩陣 b_3 ，節錄 MATLAB 程式輸出結果如表 4 與 5 所示。

表 3. 8 批次之網路預測位移誤差

Table3. The network predication error by 8 batch moving data

事件\項目	預測位移(cm)	實際位移(cm)	誤差(%)
豪雨	1.59	1.59	—
康森	0.85	0.85	—
敏督利	3.48	3.48	—
艾利	0.64	0.64	—
海馬	2.73	3.42	-20.2
米雷	1.03	1.23	-16.3
珊瑚	3.48	3.86	- 9.8
丹瑞	3.40	3.63	- 6.3
總合平均誤差			13.1
總合相關係數			R=0.987

表4. 最佳網路結構第1隱藏層權重值與偏權值

Table4. The first hide layer weighting value and lean right value of best network structure

Hidden(I)	Weight(u_{ij})							Bias
	Input(i=1)	Input(i=2)	Input(i=3)	Input(i=4)	Input(i=5)	Input(i=6)	Input(i=7)	
Hidden neuron(j=1)	- 0.306330	0.14142	0.039594	- 1.17110	0.024954	0.58227	0.41258	- 9.1479
Hidden neuron(j=2)	- 0.278370	0.61752	0.032197	- 0.61355	0.020292	0.47348	0.33549	- 0.4262
Hidden neuron(j=3)	0.130470	- 0.57507	- 0.013370	0.85032	- 0.008426	- 0.19661	- 0.13931	7.1264
Hidden neuron(j=4)	0.000690	- 0.07371	0.006622	0.16020	0.004173	0.09738	0.06900	- 0.2651
Hidden neuron(j=5)	0.127850	- 0.51330	- 0.015420	0.67435	- 0.097184	- 0.22676	- 0.31606	5.0622
Hidden neuron(j=6)	0.082316	- 0.63096	- 0.029800	1.44250	- 0.018783	- 0.43826	- 0.31054	11.0729

表5. 最佳網路結構第2隱藏層權重值與偏權值

Table5. The second hide layer weighting value and lean right value of best network structure

Hidden(II)	Weight(u_{jk})						Bias
	Hidden layer(I)						
	Hidden(j=1)	Hidden(j=2)	Hidden(j=3)	Hidden(j=4)	Hidden(j=5)	Hidden(j=6)	
Hidden neuron(k=1)	- 0.15028	0.51675	1.4284	-1.3332	0.49531	0.32936	0.53768
Hidden neuron(k=2)	0.43623	0.47781	1.5790	-1.3332	0.42318	0.32936	1.00680
Hidden neuron(k=3)	1.20320	0.12636	2.9383	-1.3332	0.22783	0.32936	0.71406
Hidden neuron(k=4)	0.00630	0.53753	1.3481	-1.3332	0.53379	0.32936	0.75691
Hidden neuron(k=5)	- 0.17921	0.49432	1.5152	-1.3332	0.32936	0.32936	0.44110

IV、結論

(I)結論

1.本研究應用 MATLAB 程式進行倒傳遞類神經網路(BPNN)訓練結果顯示，網路訓練參數採用迭代循環 12,000 次，最小性能梯度 1×10^{-10} ，動量初始值 0.001~0.0012，即可達到網路訓練收斂，且其響應分析之網路輸出向量與目標向量線性迴歸分析相關係數可達 $R=1.0$ ，獲得最佳線性適配。

- 2.本研究試驗地應用 BPNN 預測崩場地滑移情形，其誤差精度可作為中危害度以上崩場地執行後續監測管理值之參考者，所需監測颱風豪雨事件至少 8 次，即可達到 13.1%預測誤差。

(II)建議

- 1.崩場地邊坡滑移與影響因子之關係尚模糊不明，其中有直接物理意義之因子並非只有本研究中所列之 7 項因子，因此可以再蒐集相關文獻資料或現地監測參數，並先應用統計鑑別分析方法(discriminate analysis method)，篩選更具權重關係之影響因子，以作為 BPNN 之輸入自變數使用。
- 2.本研究結果建構最佳網路為 4 層網路，其中輸入層自變數 7 個，隱藏層第 I 層採用 6 個神經元，隱藏層第 II 層採用 5 個神經元。有關網路隱藏層各層之神經元究竟需要多少個數才合理，則應端視網路擬合非線性函數之複雜程度而定。
- 3.BPNN 於崩場地之應用研究較少建議可針對不同課題進行預測研究，又其網路結構設計參數最佳化卻亦屬另一不錯研究題目。

VI、參考文獻

- 林廣榮（2008）應用倒傳遞類神經網路模擬山棕寮地滑地滑移特性。國立屏東科技大學森林系碩士論文。66 頁。
- 羅華強（2005）類神經網路－MATLAB 的應用。高立圖書有限公司。
- Agrawal, G., J. D. Frost and J. L. A. Chameau, (1994) Data analysis and modeling using artificial neural network. XIII. International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Oxford and IBH Publishing, New Delhi. 1441-1444.
- Baum, E. B., D. Haussler (1989) What size net gives valid generalization Neural Computation 1. 151-160 (MIT).
- Hagan. M. T., H. B. Demuth and M. Beale (1996) Neural Network Design. Boston: PWS, ISBN 0-534-94332-2.
- Juang, C. H. and C. J. Chen (1999) CPT-based liquefaction evaluation using Artificial Neural Networks. Journal of Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering. 14:221- 229.
- Juang, C. H., C. J. Chen, W. H. Tang and D. V. Rosowsky (2000) CPT based

liquefaction analysis: Part I Determined limit statefunction. *Geotechnique*. 50(5):583– 592.

Levenberg, K. A. (1944) Method for the solution of certain problem in least squares. *Quart Appl Math*. 2:166–8.

Marquardt, D. (1963) An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SSAM J Appl Math*. 11:431–41.

Ni, S. H., P. C. Lu and C. H. Juang (1995) A fuzzy neural network approach to evaluation of slope failure potential. *Journal of Microcomputers in Civil Engineering*. 11:59–66.

Neupane, K. M. and S. H. Achet (2004) Use back propagation neural network for landslide monitoring: a case study in the higher Himalaya. *Journal of Engineering Geology*. 74:213-216.

Tsaparas, I., H. Rahardjo, D. G. Toll and E. C. Leong (2002) Control ling parameters for rainfall-induced landslides. *Computers and Geotechnics*. 29:1– 27.

台灣地區桂竹林根系特性與崩塌機制之研究

林信輝¹ 彭心燕² 謝明廷³

【摘要】植物根系對邊坡具有防止崩塌之機能，主要來自根系本身的機械補強作用，及根與土壤之緊縛摩擦力。台灣地區桂竹林蓄積量為現存主要應用竹材種類中最多，目前因竹材利用價值低，大部分呈荒廢狀況。以往有關桂竹之研究多偏重桂竹生長與發育特性以及分布與利用之調查研究，對桂竹林根系型態與其對崩塌之影響未有深入之探討。本研究為探討桂竹之根系特性，選定石門水庫集水區與寶山第二水庫集水區進行根段拉力與植株引拔試驗等試驗資料加以整理(與其他崩場地優勢植物比較)，初步對桂竹根系特性進行探討。並就台灣地區桂竹林所引發之崩塌機制加以研究，以利提出對於桂竹林崩場地之保育對策。

【關鍵詞】桂竹林根系、根段拉力、引拔試驗、崩塌機制。

THE INVESTIGATION OF LANDSLIDE PATTERN AND ROOT CHARACTERISTIC OF MAKINO'S BAMBOO FOREST IN TAIWAN

Shin-Hwei Lin¹ Hsin-Yen Peng² Ming-Ting Hsieh³

【Abstract】The Makino's Bamboo is the most predominant among the several main species of Bamboo in Taiwan. In the past, the relevant study of Makino's Bamboo forest were concentrated on the surveys of growth characteristic, district distribution, and its utilization. The disadvantage and effect of the Makino's Bamboo forest on the slope land of high landslide potential area have not been identified yet. Therefore, this study collected and tested the root distribution, root strength, pulling resistance of Makino's Bamboo within Shih-Men Reservoir and Bau-Sang Reservoir watershed, discussed the

1.國立中興大學水土保持學系教授，通訊作者。電子郵件：shlin@dragon.nchu.edu.tw

Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University. Corresponding Author.

E-mail: shlin@dragon.nchu.edu.tw

2.國立中興大學水土保持學系博士生。

Ph.D Student, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University.

3.國立中興大學水土保持學系碩士生。

Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University.

landslide pattern, root characteristics and to bring up landslide mechanism and conservation measures of Makino's Bamboo forest.

【Key Words】 Makino's Bamboo root system, Root segment resistance, Pulling resistance, Landslide mechanism.

I、前言

桂竹 (*Phyllostachys makinoi* Hayata) 林過去為主要的造林及生物材料樹種，於中部山區一帶極為常見，在 1960~1980 年代左右由於桂竹竹材用途廣泛，栽植經濟之效益良好，農民樂於種植，桂竹林分布面積占竹類總面積之 78.78%，其蓄積量在台灣主要竹類中系屬最多，桂竹林資源占有極重要的地位(林務局，1979) 在當時的農發會或之前之農復會主導下，曾積極推動竹類研究及輔導各地公私有竹林之改良經營技術，並設置竹筍生產專業區等，可說是台灣竹類研究、技術推廣及竹產業之黃金時代。

但近年來由於竹材多被塑膠製品取代，造成經濟價值下降，使得竹材伐採量降低，到處可見缺乏管理的荒廢竹林。目前台灣因為地震與颱風之影響造成水庫集水區的崩塌機率甚高，其中桂竹林發生崩塌之地點極多，雖然竹林地崩塌與降雨量過度集中、地形陡峭等關係複雜，但竹林地荒廢仍會引起地下莖老化、固土機能降低之疑慮。

因此有關桂竹根系特性及崩塌機制之相關研究有其必要性，本研究藉由蒐集桂竹之根段試驗、引拔試驗、剖面試驗結果綜合探討並歸納出桂竹根系特性與崩塌機制，冀望藉由本研究之整理歸納，能對往後桂竹林根系特性與崩塌機制能有進一步的瞭解。

II、材料與方法

(I)試驗地點概述

1.石門水庫集水區試驗區

現地根系拉拔試驗區位於桃園縣復興鄉高坡地區大溪 167 林班，屬於石門水庫集水區之範圍。試驗區選定於桃園縣復興鄉北橫公路 27 k 處，此試驗樣區位於北橫公路旁，儀器搬運方便且試區平均坡度 20°，易於儀器之架設。

桂竹根系剖面試驗區位於桃園縣復興鄉桃 119 線 8 k 處，屬於石門水庫集水區之範圍，試區鄰近桃 119 線，平均坡度約 20°，利於試驗之進行。

2.寶山第二水庫集水區試驗區

桂竹根系剖面試驗之另一試區位於新竹縣寶山鄉寶山第二水庫環庫道路 4.5 k 處，屬於寶山第二水庫集水區之範圍，試區鄰近環庫道路，平均坡度約 20°，利於試驗之進行。

(II)試驗植物材料

本研究以桂竹(*phyllostachys makinoi hayata*)為試驗材料，桂竹為台灣固有種，分類上屬竹亞科(Subfamily Bambusoideae)之孟宗竹屬(*phyllostachys*)，地下莖呈橫走側出單稈散生型，在台灣中部(南投、嘉義)及北部(新竹、苗栗)分布較多(林維治，1961)，且多為純林狀態分布，分布海拔為 10~1,550m(林維治，1976；戴廣耀，1973)。

桂竹地下莖大部份實心。稈高達 10 m，徑 3~10 cm，壁厚約 5 mm 節有二明顯環，上環起較高，表皮堅硬。籜密佈暗褐色斑塊，生有柔毛；籜耳不顯著；籜舌短小；籜葉披針形，先端略尖。葉 2~5 片成簇，批針形，基部楔形，長 6~15 cm 有毛，邊緣具針狀鋸齒；葉耳顯著，叢生鬚毛，成熟時脫落；葉舌凸出，舌狀，膜質；葉鞘長 3~6 cm。主要以地下莖繁殖，稈不具形成層，在發筍後數個月之內，即完成竹稈的成長，之後不再繼續肥大生長，此種以地下莖貯存養分，供地上竹稈快速地完成生長之特徵，與一般林木的生育形式不同，較類似於草本植物。但竹類亦為多年生之灌木或喬木，稈多為直立且為木質化，其林冠部構成大型的植物，在生態上歸類為林木(沼田，1962)，因此沼田、岩瀨(1975)認為竹類既不為草本植物，亦不為木本植物，而係界於草本及木本植物兩者中間之獨特性狀的植物。

(III)試驗項目與內容

1.根段拉力強度試驗

本研究蒐集了各學者對於桂竹、刺竹、檳榔、山水柳、山鹽菁、臺灣衫及臺灣赤楊等不同植物進行根段拉力強度試驗，欲藉由不同種類之植物瞭解桂竹之根段拉力強度之大小與其對於土壤補強作用之影響。

試驗方法為隨機挖取 30 根(含以上)試驗植物完整根系，置入封口袋中並加以

冷藏，以保持其溼度和新鮮度，並在三日內完成根段拉張試驗。根段拉力實驗採用萬能材料試驗機 HT-9012，試驗速率為 10 mm/min，試驗時保持破壞點在中央區域，紀錄破壞時之拉力強度，並以游標尺量測破壞處之根徑直徑且紀錄。再利用所得之拉力強度與根段直徑進行迴歸分析，探討其相關性。

2.根系引拔抗力試驗

爲了瞭解桂竹根系力學特性與其他植物之差異，有研究以植物根系拉拔抗力作用評價法來探討根系對坡面的補強作用。過程中須以拉拔儀器對樣本進行拉拔破壞，但一旦完成模式的建立，便可以非破壞性的調查對根力進行評估。故選取試驗樣株後，量測試驗植株及其生長環境之相關基本資料，包括基徑、地上部重、地下部重、土壤水分等；待根力拉拔試驗完成後，再將根系生長處之土樣以及植株攜回實驗室進行分析，以求取土壤含水量與植株地上部、地下部(含地下莖及鬚根)。所得數據將進行統計分析，以推估引拔根力與各項變數之關係模式。

引拔抗力實驗主要是採用一個可拆式三腳架、定速率拉拔系統、日製(5 ton)荷重計(load cells)、日製 SMD-10A 引拔荷重紀錄器以及電腦進行施測。定速率拉拔系統選用速率為 4.992 mm/min，引拔方向需與坡面成垂直，實驗進行前需量取試驗植物之胸高直徑、地上部重及土壤水分含量，實驗完成後則需量取植株之地下部重與斷根數。

本研究蒐集了山芙蓉、九芎、構樹、山鹽菁、山黃麻與桂竹之引拔抗力與基徑大小之迴歸方程式，探討不同樹種之引拔抗力強度之差異。



圖 1. 引拔抗力試驗儀器示意圖

Fig.1. The diagram of pulling resistance instrument.

3.桂竹根系剖面試驗

爲了瞭解桂竹根系特性，本研究蒐集於石門水庫集水區與寶山第二水庫集水區之桂竹剖面試驗成果，試驗樣區大小皆約爲 10 m × 10 m，再各選出 5 株桂竹爲試驗樣本以剖面法(wall profile methods)挖掘土層(長 100 cm × 寬 100 cm × 深 60 cm)，並以相機拍攝下桂竹根系剖面圖，帶回實驗室以 Definiens Professional 軟體進行數化，此外並進行現地之桂竹殘根(鬚根)引拔，紀錄其鬚根之引拔抗力數據，並將引拔抗力與鬚根根徑進行迴歸分析。

		<p><u>固定夾(fixed folder)：</u> 固定鬚根試體之固定夾具，後方連結荷重計與引拔荷重紀錄器。</p>
		<p><u>拉壓型荷重計(load cells)：</u> 連結試體與引拔系統之間，最大荷重約爲 200 公斤。</p>
		<p><u>拉拔荷重紀錄器(SMD-10A)：</u> 藉由拉壓型荷重計測得之數據由此紀錄器讀出，再作爲紀錄分析之用。</p>
<p>圖 2. 現地殘根(鬚根)引拔儀器示意圖 Fig.2. The diagram of sinker roots pulling resistance instrument.</p>		

III、結果與討論

(I)根段拉力強度試驗

桂竹、刺竹、檳榔、山水柳、山鹽菁、臺灣杉及台灣赤楊，推估不同根徑與根段強度之關係進行迴歸分析，結果根段拉力強度對直徑呈指數關係如下。

表 1. 桂竹與各植物根段拉力推估方程式之比較

Table1. Compare a plant root a segment anti- to pull the equation with Makino's bamboo.

供試植物	推估方程式 D、X:根段直徑(mm) Y:根段拉力強度	推估式範圍 (mm)	根段直徑 3(mm)之值	推估者
桂竹	$Y=1.85X^{2.03}$	13.5~23.6	—	宋煦辰
刺竹	$Y=2.774D^{1.515}$	0.3~3.1	14.65	高齊治
檳榔	$Y=EXP(1.55324+0.226707X)$	2.1~12.9	9.33	張敬昌
山水柳	$Y=2.497*EXP(0.493X)$	0.5~7.8	10.96	林信輝
山鹽菁	$Y=0.911*EXP(0.526X)$	0.5~10.5	4.41	張俊斌
臺灣杉	$Y=3.532D^{1.3868}$	0.2~14.1	15.38	吳正雄
台灣赤楊	$Y=1.6112D^{1.4068}$	0.2~14.9	7.56	吳正雄

資料來源：高齊治(1998)

由上表所知，刺竹於 3 mm 之根段拉力強度僅小於台灣杉，顯示其根系韌性強，對於土壤補強作用擁有較大之功能；桂竹因根徑過大無法與其比較，但數據上顯示出平均根段拉力為 253.3 kg，也可看出其韌性強大。



HT-9012 型萬能試驗機(試驗速率 10mm/min)

地下根莖抗拉強度試驗破壞後

圖 3. 實驗室單根拉拔試驗

Fig.3. Root segment resistance in laboratory.

(II)根系引拔試驗

引拔抗力試驗經實際測量後發現其影響因子甚多，如土壤含水量與土壤硬度關連性頗高，樹冠面積與分蘗數亦有關係。經多元迴歸分析篩選後，發現胸高直

徑與引拔抗力值關連最為顯著，且此結果能供未來以非破壞模式推估引拔抗力之參考。而模式之標準，是依北村嘉一與難波宣士(1981)、林信輝與張俊斌(1995)、高齊治(1996)、黃士洋等(2007)等學者之研究，引拔抗力與胸高直徑之關係大致呈現指數分佈之情形。故經多元迴分析篩選因子之後，以單因子迴歸方法進行拉拔抗力最大值與基徑之指數迴歸，迴歸結果綜合如下：

表 2. 供試植物引拔抗力推估方程式比較

Table.2. Provide to try a plant root a segment anti- to pull the comparison of the equation.

供試植物	推估方程式	D 範圍(cm)	取 D=7 代入
山芙蓉	$P=5.10D^{1.49}$	$7 \leq D \leq 18$	113.53
九芎	$P=2.82D^{1.96}$	$7 \leq D \leq 13.5$	127.83
構樹	$P=11.75D^{0.74}$	$1 \leq D \leq 9$	55.18
山鹽菁	$P=12.56D^{1.32}$	$2.2 \leq D \leq 8$	195.73
山黃麻	$P=8.52D^{1.18}$	$2.5 \leq D \leq 13.5$	99.22
桂竹	$P=87.08D^{1.02}$	$3.3 \leq D \leq 7$	633.75

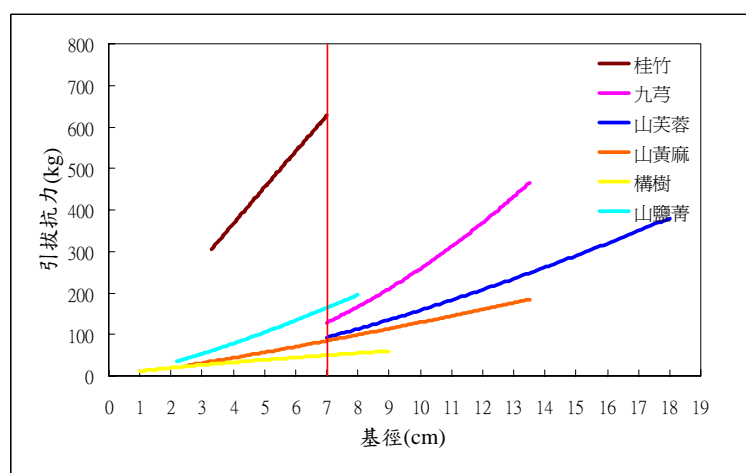


圖 4. 植株基徑與引拔抗力迴歸關係圖(黃士洋等，2007)

Fig.4. Plant and pull out the resistance regression relation digram.

固定基徑 $D = 7 \text{ cm}$ ，以桂竹 633.75 kg 最大，山鹽菁次之，構樹最小。而此六種植物中，以桂竹之生長速度最快，在邊坡復育初期階段，若以桂竹導入穩定邊坡、改善立地環境，進而以造林樹種導入，則可使植物生態系產生多元化。但桂

竹成林密度高，使得其它樹種入侵較為困難，因此在實際效益上，則需進一步探討。

由於桂竹之主根(地下莖)交錯生長、上下交疊如網狀般的分布於土層之中，判斷桂竹對於土壤固結能力佳；和另六種植物之獨立根系比較起來，桂竹故能提供較大之引拔抗力，這也說明一般植物在崩塌過程中往往單株崩落，但桂竹由於根系相互糾結，導致崩塌時常呈現片狀崩塌。

(III)桂竹根系剖面試驗

根據根系剖面調查結果，桂竹雖無垂直主根，但根系生長快速，根徑雖小，但其鬚根數量多且分布土層深度最深可達 70~100 cm，雖主根(地下莖)分布較淺，但其鬚根數量較多且分布深，根系藉由表層覆蓋延遲雨水沖蝕作用，增加根系穿入土層機會，且根與根之間在破壞面形成非常密集網狀固結特性，抵抗力因此較大。下表為剖面試驗之基本資料。

表 3. 石門水庫試區試驗結果資料

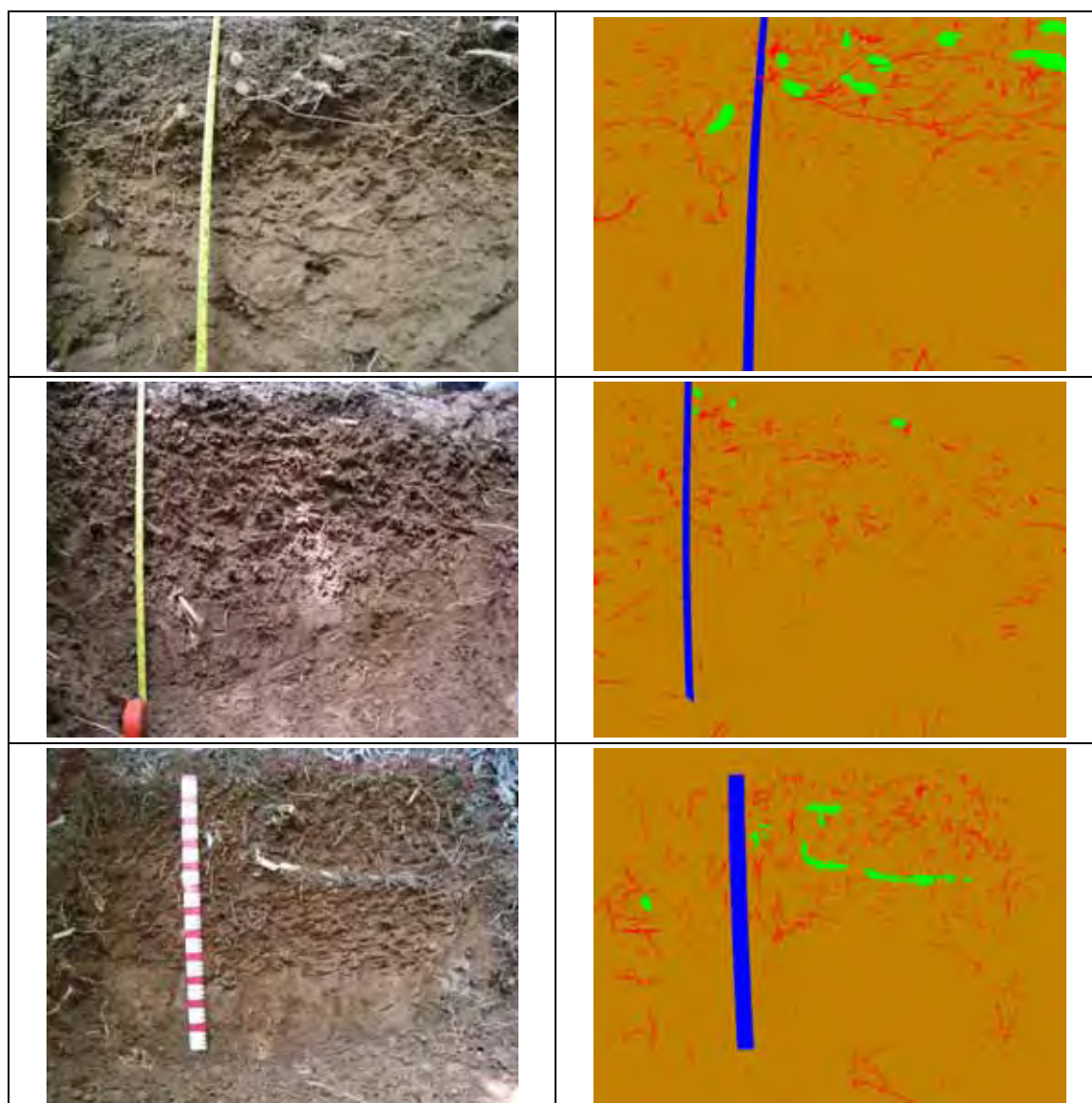
Table3. The experimental zone data in Shih-Men Reservoir.

項目 樣株	株齡 Yr(年)	胸高直 徑 D(mm)	地上部 重 (kg)	挖掘深 度 H(cm)	主根(地 下莖)數 N	剖面距樣 株距(cm)	坡度 (%)	含水量 W(%)
S1	4	4.5	4.6	60	1	20	14.4	8.3
S2	3	5	5.6	60	3	25	12.7	7
S3	3	5.5	6.6	45	4	30	13	5.3
S4	3	5	3.8	50	3	24	15	6.7
S5	3	4	2.8	60	4	27	19	4.6

表 4. 寶山第二水庫試區試驗結果資料

Table4. The experimental zone data in Bau-Sang Reservoir.

項目 樣株	株齡 Yr(年)	胸高直徑 D(mm)	上部重 (kg)	挖掘深度 H(cm)	剖面距樣 株距(cm)	坡度 (%)
B1	1	3	3.8	50	22	18.6
B2	3	3	3.8	60	20	16.1
B3(側向)	3	3.5	5	60	15	2.8
B4	3	2.6	1.8	60	15	19.6
B5	3	2.2	0.9	60	24	24



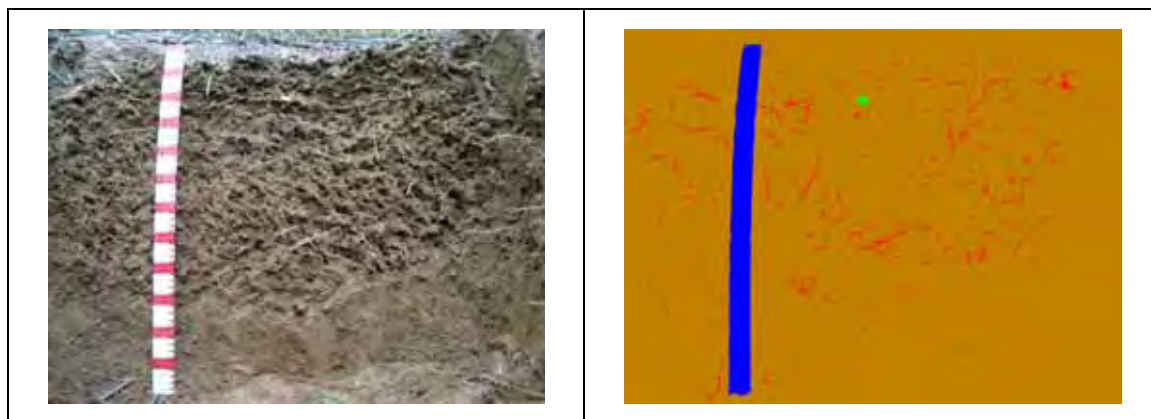


圖 5. 影像數化成果(寶山第二水庫)

Fig.5. The results of image processing.(Bau-Snag Reservoir.)

(備註：深藍色-比例尺；紅色-鬚根；青綠色-主根；土黃色-土壤)

(Blue-Scale, Red-Sinker roots, Green-Tap roots, Yellowish brown-Soil)

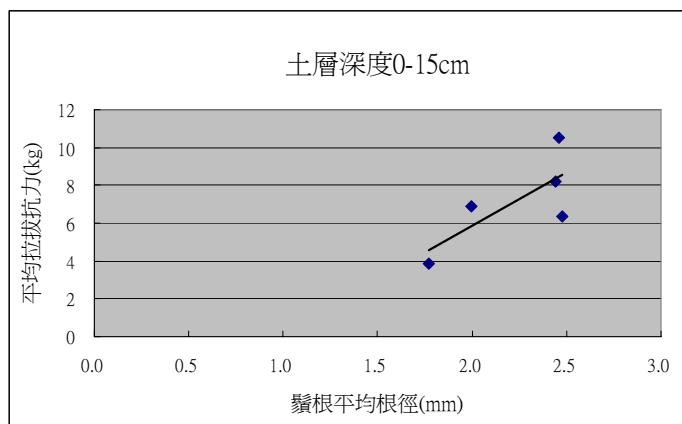
根系剖面(長 100 cm × 寬 100 cm × 深 60 cm)，深度會因土壤過硬或以無根系分布而降低，比例尺以 5cm 為一個單位(全長 60 cm)，數化過程中將剖面簡單分成土壤(土黃色、比例尺(深藍色)、主根(匍匐莖)(青綠色)以及鬚根(紅色)四種顏色；經現場調查顯示，桂竹根量以土層深度 0-20 cm 最為密集，20-60 cm 之根量則較少於前者，鬚根直徑約在 0.1-0.3cm 之間。

桂竹根系基本型態主要是以匍匐於土層中之水平主根為主，並無垂直主根型態，而鬚根皆由地下莖長出並向外擴散遍佈地表層，鬚根多且密集，並隨土層深度增加而遞減。因桂竹鬚根於土層深度 0-20 cm 分布密集，判斷桂竹對於固結土壤能力與抵抗地表沖蝕能力佳。

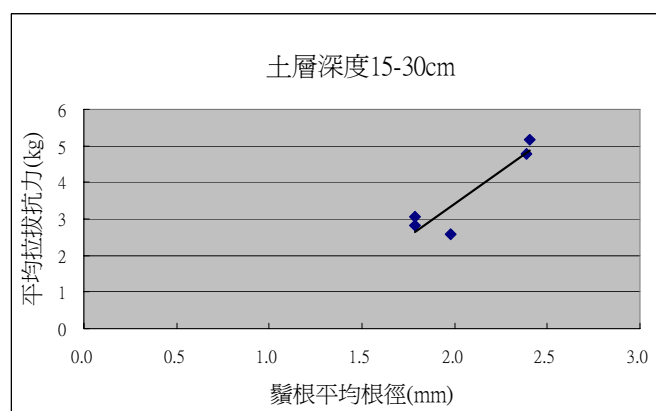
以現地拉拔鬚根試驗紀錄其不同土層深度之鬚根拉拔抗力，並將最大拉拔抗力(Pr)與鬚根根徑(mm)加以迴歸分析，可發現最大拉拔抗力(Pr)與鬚根根徑(mm)之關係與迴歸方程式如下所示：

表 5. 石門水庫試驗區

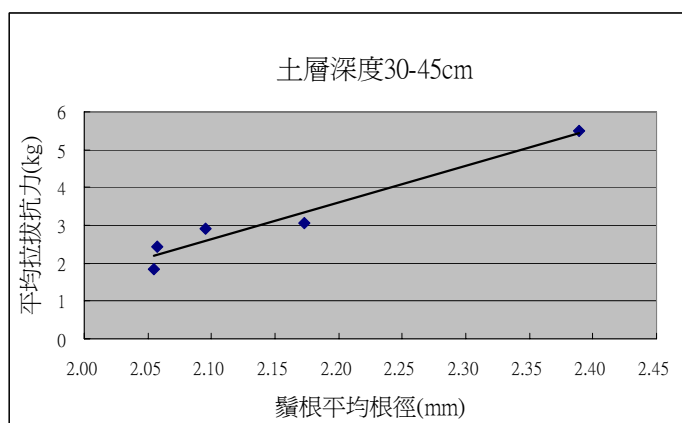
Table5. The experimental zone in Shih-Men Reservoir.



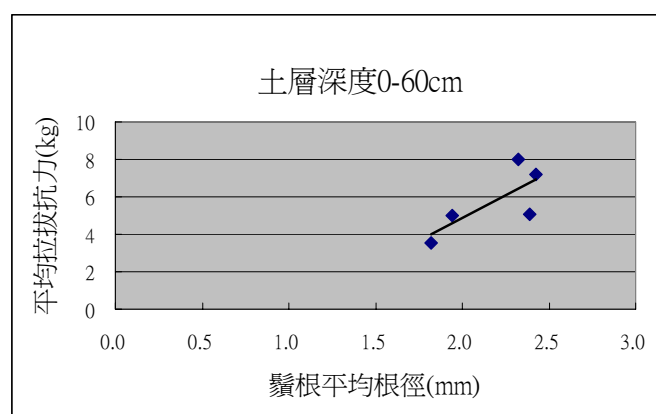
$Pr = 5.6645d - 5.4974 \quad R^2 = 0.5678$
適用範圍：d = 1.77 ~ 2.48 (mm)



$Pr = 3.0946d - 2.5957 \quad R^2 = 0.7006$
適用範圍：d = 1.77 ~ 2.40 (mm)



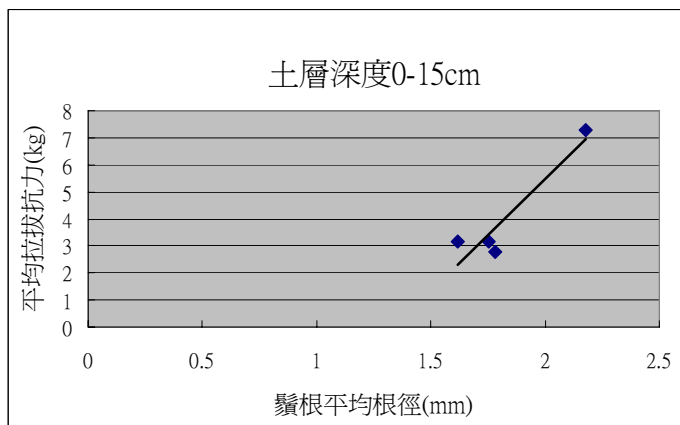
$Pr = 9.6968d - 17.734 \quad R^2 = 0.9544$
適用範圍：d = 2.06 ~ 2.39 (mm)



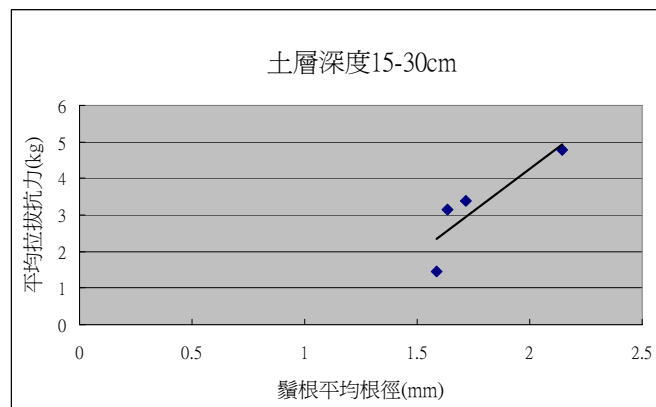
$Pr = 4.8933d - 4.9057 \quad R^2 = 0.5611$
適用範圍：d = 1.82 ~ 2.42(mm)

表 6. 寶山第二水庫試驗區

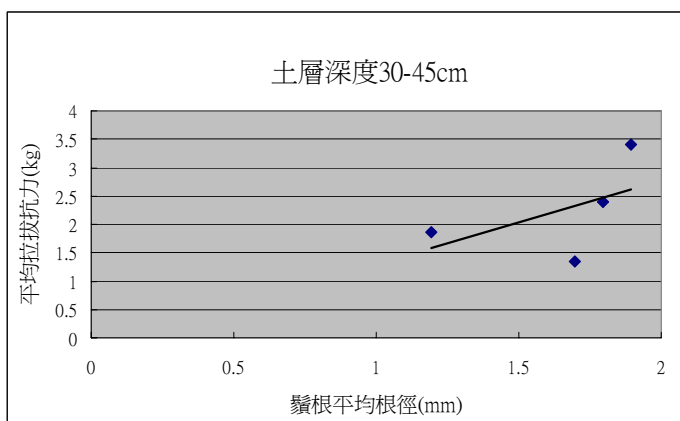
Table6. The experimental zone in Bau-Sang Reservoir.



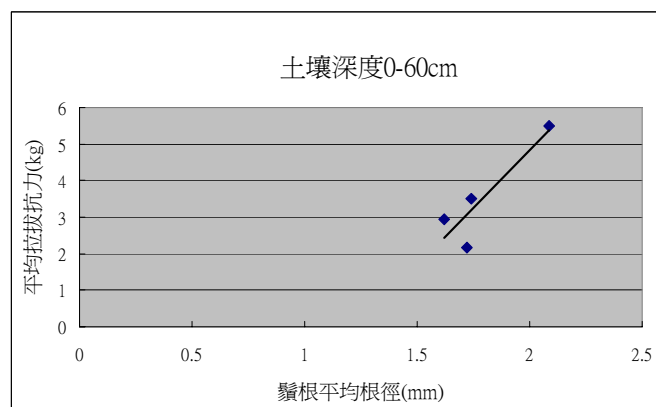
$Pr = 9.1589d - 12.793 \quad R^2 = 0.9092$
適用範圍：d = 1.71 ~ 2.18(mm)



$Pr = 4.688d - 5.1015 \quad R^2 = 0.761$
適用範圍：d = 1.59 ~ 2.14(mm)



$Pr = 1.4792d - 0.1803 \quad R^2 = 0.274$
適用範圍：d = 1.19 ~ 1.89(mm)



$Pr = 6.3112d - 7.7728 \quad R^2 = 0.8094$
適用範圍：d = 1.62 ~ 2.09(mm)

根據試驗結果顯示，在剖面中桂竹之鬚根分佈大部份集中於表層土壤(0~20 cm)，少部份之桂竹鬚根則分佈於其下之土壤層(20~60 cm)；現地鬚根引拔顯示最大拉拔抗力可達 10.53 kg(石門)及 7.28 kg(寶二)，最大拉拔抗力皆在土層深度 0-15cm 出現。

IV、結論

(I)桂竹林根系之特性

竹類地上部林相非常近似而不可分，地下莖發育的形式、根系分布型態就有很大的差異。竹類因根系隨地下莖向外擴充其基本型呈現共同性，桂竹上半部是

非常堅韌竹稈，下半部為網狀系統，根部表皮呈黃棕色，韌性強，竹叢範圍藉由地下莖的生長向外擴充，形成網狀根網結，與樹木比較無具有深根極粗之主根、側根及水平根，但藉由生長快速、茂盛之根量於邊坡產生緻密之根系，網結土壤固定於坡面上產生錨定及拱壁之作用。

桂竹根系生長快速，根徑雖小，但根與根之間在破壞面形成非常密集網狀固結特性，增加了坡面向下滑動抵抗力。植生初期桂竹與各造林樹種根力的補強作用的不同，前者就像多數量的筷子折斷非常不易，林木為幼齡木期間之補強以單獨方式無法一起發揮補強功能。植物對土質補強之作用為一種自然補充材料，本身常為了存活於立地各種環境不斷向外擴充，因此樹木後期形成補強力為一不可預知的力量。

(II)桂竹崩塌機制

崩塌係指邊坡材料因受重力作用，發生向下滑動或崩塌之塊體運動現象。竹林地之崩塌大多屬於淺層崩塌，其特性如下：

- 1.因地震作用力導致竹林根系斷裂，於短時間內降下豪雨，降雨入滲形成飽和浸潤帶，使得基質吸力降低、土壤凝聚力折減，導致典型之淺層崩塌。
- 2.坡面受外力或地震力作用後，致使表土層產生裂縫，於未填補前遇上降雨量大時，因而引發竹林崩塌。
- 3.因長期缺乏管理之竹林，造成現存林呈現竹倒及枯死竹充斥之過密林分，使竹林生產力降低，因而造成地下莖生長停滯，迫使土壤剪應力增加或抗剪強度降低，造成竹林地發生地滑及崩塌。
- 4.桂竹林地具有綿密發達的地下根莖，其莖盤根錯節，相互連結成緊密網狀，但因坡腳沖蝕影響，使得坡面產生片狀崩落。
- 5.受崩塌過後的坡面，由於桂竹淺根性之影響，造成根系與土壤層間滲水而形成一自由端，使得坡面有溯源侵蝕的作用產生。
- 6.由於桂竹之淺根性影響，使得含根之土層具有高透水性，相對的在缺乏根系入侵之土層中，便有土壤發育不全(低透水性)之現象產生，導致水入滲時會匯集於此交界處，造成坡面不穩定。

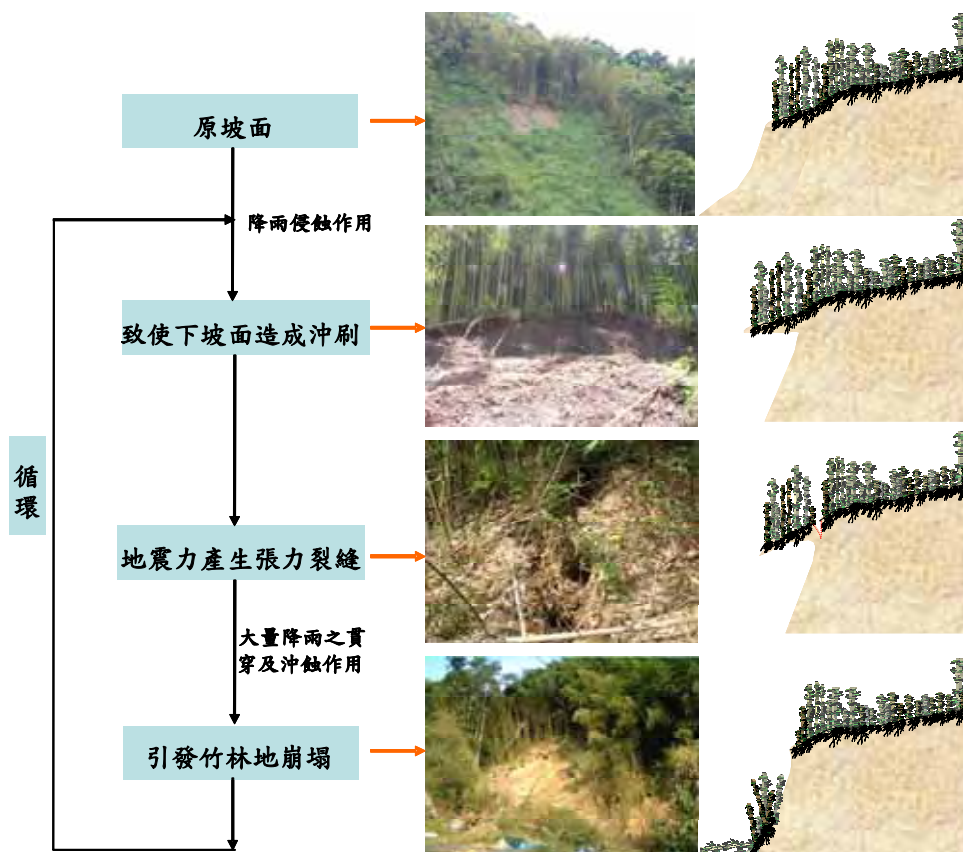


圖 6. 桂竹林崩塌之動態研究

Fig.6. The investigation of makino's bamboo landslide.

(III)其他有關保育治理對策之芻見

根據上述之桂竹林根系特性崩塌機制，對於桂竹林崩場地之保育治理對策研議如下：

- (1)由於桂竹根系較淺，加上坡腳抗力較低時，桂竹林地產生淺層崩塌之機會較大，此時需注意坡腳之抗力強度，讓桂竹林坡面安定。
- (2)桂竹林地因具有綿密發達的地下根莖，相互連結成緊密網狀，發生崩塌時會以片狀之方式崩落，可在崩塌後噴植坡面藉此穩定坡面，並輔以改種植木本植物加強坡面之穩定。
- (3)因近年來桂竹林之經濟效益下滑導致農民採伐桂竹林之意願降低，造成桂竹林老化枯死及過密林分，使得竹林生產力降低、地下莖生長停滯，造成土壤剪應力增加或抗剪強度降低，此時需有定期之伐除作業，讓林分更新，桂竹之生產力增加，使抗剪強度增加，減低地滑及崩塌之風險。
- (4)桂竹林地因具有排他性故常為純林，又因淺根性之影響導致根系與土壤層間滲

水而形成自由端，使坡面有溯源侵蝕的作用產生，此時需注意自由端之排水問題，勿讓自由端影響坡面造成持續的溯源侵蝕。

- (5) 桂竹林之崩塌面積其實遠小於其他崩塌型態，因桂竹林之根系綿密，地上部之枯枝落葉層豐富，土壤流失之情形並不嚴重，除非坡面有裸露或裂縫處才易造成崩塌。
- (6) 由於桂竹林根系型態之特殊性與高拓展潛能，桂竹林之林分地進行砍伐、林相更新作業或直接栽植林木，仍甚困難，但如何減少其拓展速度，特別在崩塌地竹林邊緣地區，如何抑制其入侵繁殖應為可行之保育重點，其方法包括竹筍踢除法、使用殺草劑、將桂竹林之邊緣挖掘壕溝，或埋入鋼板、塑膠板等硬質物體防止地下莖穿越，亦可以於崩塌面上鋪上黑布阻止桂竹生長，再藉由林緣栽植速生木本植物，以自然之力抑制桂竹林持續擴張。唯相關之對策方法仍需進一步試驗研究。

V、謝誌

本研究承經濟部水利署北區水資源局「水庫集水區環境棲地管理與保育治理對策之研究(1/2)」經費提供，謹此誌謝。

VI、參考文獻

- 呂錦明(1996)竹類地下莖型態分類之探討。現代育林 12(1):73-90。
- 呂錦明、陳財輝(1992)桂竹之林分構造及生物量—桶頭—桂竹林分之例。林業試驗所研究報告季刊 7(1)：1-13。
- 吳正雄、陳信雄(1989)森林植生根力應用在崩場地處理上之研究。中華林學季刊 22(4)：3-19。
- 宋煦辰(2007)桂竹林根系特性與其引拔力學關係之研究。國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- 林維治(1958)台灣竹類生長之研究。台灣省林業試驗所試驗報告第 54 號。
- 林信輝、賴俊帆、陳耀榮(2007)桂竹林崩場地根系型態與其後續崩塌之調查研究。水土保持學報 39(2)：173-187。
- 高齊治(1998)西南部泥岩地區刺竹耐旱特性及其根力特性之研究。國立中興大學水土保持學系碩士論文。

- 陳耀榮(2006)桂竹林崩塌機制動態之調查研究。國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- 黃士洋、張俊斌、林信輝(2007)石門水庫崩場地優勢植物根力特性之特性。環境綠化技術研討會論文集。49~61 頁。
- 賴俊帆(2007)桂竹林根系拉拔試驗及其坡面之穩定性評估。國立中興大學水土保持學系碩士論文。
- 戴廣耀、楊寶霖、沈榮江(1973)台灣竹林資源。農復會、林務局、航測隊、屏東農專合作計畫 PP.82。
- 經濟部北區水資源局(2007)石門水庫集水區崩場地調查監測暨植生保育對策之研究。成果報告。
- 經濟部水利署(2008)水庫集水區環境棲地管理與治理保育對策之研究(1/2)成果報告。
- 北村 嘉一、難波 宣士(1981)拔根試驗を通して推定した林木根系崩壊の防止機能。日本林業試験所研究報告 313:175-208。
- 竹下 敬司(1989)樹木根系の崩壊防止機能。林業技術 586:12-16。
- 阿部 和時(1984)樹木根系の分布特性と斜面の保護・安定効果。日本緑化工技術 10(3):1-9。
- 阿部 和時(1991)根系の引き抜き抵抗力によるセン斷補強度の推定。日本緑化工學會誌 16(4):37-45。

淺層錨釘應用於林道維護工程之探討

黃瓊彪¹ 林照松²

【摘要】林道是經營森林資源所必須，但因受限於自然和人文條件不佳，其工程的後續維護，成為經常性甚或急迫性的工作；根據多年治理經驗，所應用的工法也是有許多種類，端看主客觀條件的狀況，選擇適地、適時的最佳規劃。淺層錨釘工法（土釘）最初由法國開始使用，由於工法之便利及經濟性與可作為臨時或永久結構物之特性，其應用範圍與規模有愈來愈廣的趨勢。本文旨在探討運用淺層錨釘之使用，在有限的空間建構有效的路基、路面和相關水土保持設施，以穩定林道路基和邊坡，維護交通運輸之暢通，並兼顧景觀和生態之保育。討論對象為林業試驗所福山研究中心之聯外林道5.5k位置，因艾利颱風帶來豪大雨，溪流水位急昇強力淘刷，致影響邊坡及林道不穩定。現場路基崩落且下邊坡陡峭，不適用於做傳統之復舊工法。經調查後選擇土釘工法，並經完善施作，完成後遭颱風豪雨考驗，邊坡和路基路面均維持穩定狀況，植生也恢復良好覆蓋狀態，足證所採用一系列規劃正確、工法有效、成果優異，可作為類似相關設計時之參考。

【關鍵詞】淺層錨釘（土釘）、邊坡穩定、擋土結構。

A study of the application of shallow anchor on the maintenance engineering of forest road

Huang Chiung-piau¹ , Lin Chao-song²

【Abstract】 Due to the disadvantage conditions of nature and human activity in Taiwan , routing maintenance of forest road is necessary and there are many measures for the needs of slope stability and landslide rehabilitation according to site

¹行政院農業委員會林業試驗所集水區經營組研究員，通訊作者。電子郵件: tfrihpc@tfri.gov.tw
Senior Scientist, Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan. Corresponding Author. E-mail: tfrihpc@tfri.gov.tw

²行政院農業委員會林業試驗所六龜研究中心助理研究員。
Assistant Scientist, Liu-Kuei Research Center, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

characteristics and situations .The shallow anchors (soil nails) were first designed and installed in field in France. Because of their advantages in construction efficiency, cost, and application in both temporary as well as permanent structures, shallow anchors have been used for various stabilization purposes and the technology has been significantly advanced since their first application. The purpose of this research is to find out the efficiency of utilizing shallow anchor accompanying with soil conservation measures on forest road reconstruction in Fusan Research Center, TFRI. The basic planning should be coincided with the needs of ecological conservation, engineering safety, and cost effectiveness. According to the check results of completed surveys and constructions four years later, this section of road still keep in stable even though several typhoons and heavy rainfalls had had hit the whole area. This paper presents the advantages of applying the method for road stabilization and it really is a successful example to demonstrate the design methodology.

【Key words】 Shallow anchor (Soil nail) ,Slope stability, Retaining structure.

I、前言

林道工程的後續維護，是急需而必要的工作；其所應用的工法也是有許多種類，端看主客觀條件的狀況，選擇適地、適時的最佳規劃。尤以台灣山區地形和地質條件不佳、水文及人文狀況複雜，在早期林道的設計均因陋就簡，其升降坡度、曲率半徑、路面寬度、以及相關的擋土護坡排水設施，大部分不符合標準規範之規格，尤其在諸多回頭彎的路況，坡度陡峭急升急彎路幅狹窄，再加上土壤淺薄地質破脆，一般護坡和擋土牆不易施工之外，且因硬式基礎量體大、成本高、影響範圍廣，除非必要通常不予採用（黃瓊彪等，2008）。

近年來，世界各先進國家均極力倡導生態工法，來維護自然生態系統之結構與機能，同時保障人類安全及達到永續經營之理想。如公共建設缺乏生態理念，僅顧及工程結構體表面近自然之協調或美觀，無法維護生態機能之平衡，此乃金玉其表，敗絮其中，實則美中不足。生態工法不應僅侷限於結構式之硬體工程，同時亦應涵括非結構式之植栽、保育措施與人文之景觀意念。因此，生態工法應涵蓋「生態保育」與「工程技術」兩種層面，遵循自然法則，採取順應自然之工法，減輕對環境之損傷或是復育環境原有之自然生態。本文旨在探討基於安全原則，運用 RC 水泥路面並配合淺層錨釘之使用，在有限的空間

條件下，建構有效的水土保持設施，以穩定林道路基和邊坡，維護交通運輸之暢通，並兼顧景觀和生態之保育。

II、林道特性及維護工法

(I)林道之特性

林道之天然條件及人文環境異於平原地區。其特性可略予分述如下:

- 1.縱坡大:林道穿梭於陡峭山區，須在短距離內攀升至相當之高度，故為翻嶺越坡需要，一般山區之縱坡均相當陡急。
- 2.彎曲多:為減少土方數量及構造物，林道必須順地形而行。且因其地形複雜，一般較少直行線甚至全路線幾全以彎路來構成。
- 3.挖填土方大:林道係開鑿山坡而成，故其挖填土方數量特大。如不配合構造物而欲在陡坡地區闢建相當寬度之路面，勢須挖填可觀之土方。
- 4.維護困難:林道因築於斜坡上，常因天然條件之不足，路基易於滑動，或邊坡易於崩坍。同時由於坡面逕流之沖蝕大，其維護工作特別困難。
- 5.地勢陡險，易發生危險:林道因須穿越高山峻嶺，林道兩邊如非陡坡高山，即深淵險谷。同時視距也常受地形之限制。故行車時如不小心，其危險性遠較一般平地林道大。

其他，如交通量較小，行車速度較慢，林道用地問題較少等等，也均為林道較特殊之情形。故規劃設計林道應配合此等特性來實施。

(II)、林道維護方法和應用之考量

林道的維護可分為三大項：路面改善、排水設施(邊溝、橫向排水)，邊坡穩定。而所應用的工法包括有：

- 1.排水工程：排水工程之目的在攔截地表或地下水，並加以誘導排除，避免邊坡因水的影響（如孔隙水壓升高、抗剪強度降低、含水量增加）而破壞，故排水工程應依據地形、地下水或岩盤面分佈狀況之調查後，再選擇最有效而經濟之方法。
- 2.擋土工程：擋土工程是利用構造物來抵抗滑動力，具即效性，常與挖填工程及排水工程配合使用。擋土牆種類繁多，有三明治式、重力式、半重力式、疊式、扶臂式、版樁式、地錨式等。原則上，在有滑動之虞之地區，以採用挖方少且具柔性之擋土工程為佳。

3.坡面保護工程：坡面保護工程旨在保護坡面風化、防止沖刷，通常應就景觀與工程費用加以考慮，以採用植生為原則。若岩石邊坡或無土壤成分之岩石碎屑地植物無法生長，必要時在坡面客土（坡度須緩於 1：0.8）或以構造物穩定坡面。坡面亦須有完整之排水措施（包括地表水及地下水）。植生方法有植草苗法、植生帶法、噴植法、挖穴施肥鋪網客土噴植法、打樁編柵法、預鑄框或自由型框客土植生法等。採用構造穩定之方法有噴漿工、混凝土工、框架工、錨定工等（廖洪鈞等，2002）。

近年來有關邊坡穩定之技術進步迅速，植生處理與植物材料種類甚多，唯邊坡植生技術需配合工程方法並視立地條件作適當處理，以達到設計邊坡之穩定效果。在豪雨地震頻繁、高地下水位及地質不良而易於發生小面積沖蝕、滑崩之土地，或採礦棄石地、岩層裸露地、道路邊坡等，均需儘速完成植生覆蓋之坡面，且應視其岩層裸露及破碎程度、沖蝕情形及有關植物生育之不利因素等條件加以處理，適當的採用植生、工程方法或兩者善加配合，因地制宜。在林地所闢建的道路，其經常性之維護通常以植生、工程方法兩者併用，稱之為「林道植生工程」。

台灣山坡地兼併地表沖蝕破壞及淺層無限邊坡破壞同時發生之案例頗多。工程實務界有的以針對地表沖蝕問題加以處理，有的則常誤判為深層破壞予以處理。前者未能治本，故失敗案例普遍（陳信雄，2004）。後者則動輒花費鉅大經費形成浪費，枯竭公帑資源。為解除上述矛盾，於設定一定程度治理效果之指標下，為發展本節約公帑經濟資源之緣由。基於上述之分析及考量，為解決淺層無限邊坡破壞的問題，採取淺層錨釘工法；為解決地表沖蝕破壞的問題，則採取自由型框加噴植工法。如此期望於最短時間內可一併解決安全、綠化、美化等問題。

同時為因應舊有林道不合格之設計標準，以及其位處於偏遠山區，調查施工均有所不便，因此於有限的時間內，不易取得精確基本資料，此時需憑藉對當地之地形、地質、土壤及水文特性之熟悉程度，加上多年現場經驗之累積，研判出若干土壤及水文參數之取捨，這也是在台灣山區多變的自然環境條件下，所發展出不偏離原則下之彈性做法，也藉以驗證所謂生態工法中適地適性之精神（黃瓊彪，2002），並以多年之現地綜合追蹤檢核，做一績效評估。

III、施工地點概述及工法設計分析

(I) 施工地點概述

福山研究中心海拔約 400~1400 公尺（行政大樓位於海拔 614 公尺），面積約 1097.9 公頃，行政區跨北、宜兩縣（為台北縣烏來鄉福山村與宜蘭縣員山鄉湖西村）。北以阿玉山、南以紅柴山為界，水系西側有哈盆溪(南勢溪上游)及東側有粗坑溪(蘭陽溪上游)分流。依據自然環境、資源特性與設立宗旨，將轄內試驗林地規劃設置「水源保護區」、「植物園區」、「哈盆自然保留區」等三大塊。由於福山地區屬於雪山山脈，受到構造運動的擠壓，造成了福山地區是以板岩為主的岩石。受到地殼的擠壓後，形成規則的三組主要解理。因為這些節理組慢慢變成了河道的所在，所以福山地區的河流在空間上有一定的排列。試驗林內東西側各為蘭陽溪支流粗坑溪與南勢溪上游哈盆溪之上游集水區，由於山岳、溪流交錯，區內地形起伏甚大，地勢平坦之區域極少。試驗林當地氣候屬於溫暖重濕型，夏季暖熱潮濕，冬季因季風與地形因素造成陰濕多雨、全年平均溫度 18.4°C，相對溼度約 88%，年雨量約 2900 公厘。

福山聯外道路為林業試驗所福山研究中心所屬試驗林之主要林道，全長 8.7 公里，位於宜蘭縣和台北縣境，相關位置請參閱圖 1。基本上聯外道路穿越中間部分的「植物園區」。海拔高度較低緩且地勢平緩的山區有人類活動及人工造林地外，並保留相當面積具原生闊葉林植物相。其地質屬漸新世至中新世澳底層及大桶山層，多為硬頁岩、板岩，至為破碎，其上覆蓋崩積土，透水性高，土壤甚為淺薄，林相不佳，每遇豪雨容易在陡坡處和林道彎頭產生崩塌。

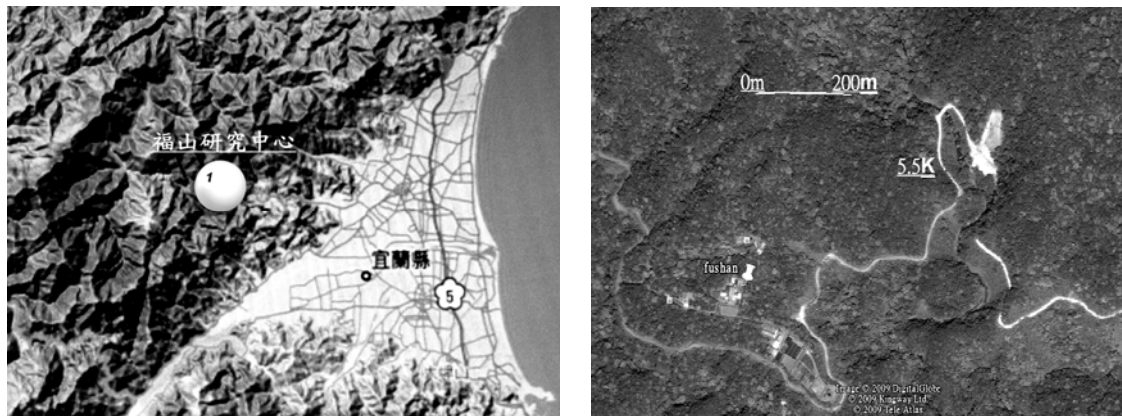


圖 1. 福山研究中心及林道施工位置示意

Fig.1. Locations of Fusan Research Center and mark 5.5K in forest road.

(II)、福山聯外道路 5.5k 邊坡之概況

，因2004年8月艾莉(AERE)颱風來襲形成後向西北方向移動，到達臺灣東北

方海面後緩慢偏西移動通過臺灣北部近海，進入臺灣海峽後逐漸轉向西南西，25日22時由金門東北方進入福建。受颱風外圍環流影響，北部、東北部、中南部有豪雨發生，引發嚴重土石流災情，以新竹縣五峰鄉桃山村最為嚴重。全台灣雨量統計：自23日0時至26日11時止，出現較大累積雨量如下：苗栗縣馬達拉1546毫米、新竹縣白蘭1335毫米、台中縣雪嶺1243毫米、台北縣福山881毫米、嘉義縣奮起湖841毫米、陽明山775毫米、南投縣望鄉706毫米、高雄排雲692毫米、桃園縣高義608毫米。

福山聯外道路5 K+ 500M處，因下邊坡陡峭且溪流水位暴漲淘刷，使本路段下邊坡至溪谷土石崩坍長30公尺、深25公尺，合計崩坍面積750平方公尺，並導致柏油路面及護欄下陷崩潰長30公尺。鑒於該處係屬彎路路段，車輛行駛會車非常危險，即刻提報道路工程需求，將行車路面及下邊坡崩坍地處理改善，提高參訪植物園遊客及上下班員工行車安全（參閱圖2、圖3）。



圖 2. 柏油路面及護欄下陷

Fig.2. Subsidence of asphalt concrete pavement and protection fence



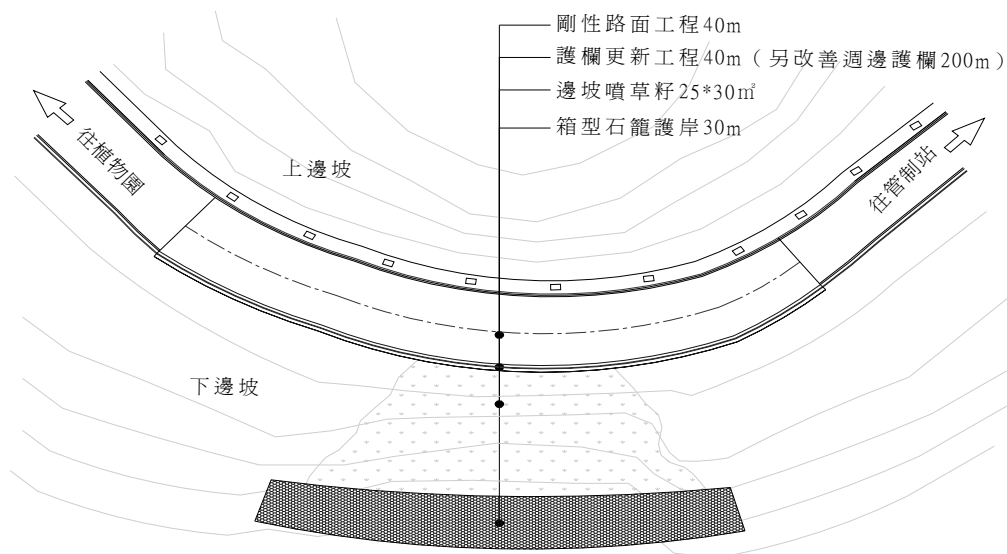
圖 3. 下邊坡至溪谷土石崩坍

Fig.3 Landslide occurred in lower slope and debris flowed to creek.

(III)、邊坡穩定規劃設計原則

本路段將路面及下邊坡崩坍地處理改善，使參訪植物園遊客及上下班員工，行車安全。基於上述客觀條件限制和主觀條件需求，為能在狹窄的空間中，同時解決邊坡基腳穩定、坡面土壤固著、植生復舊、路基完整等問題，採取對策如下：

- 1.下邊坡崩坍地基腳箱型石籠（ $5\text{m}^3/1\text{m}$ ）*30m=150 m^3 。
- 2.邊坡崩坍地噴附植生及縱、橫溝及跌水設施計1,200平方公尺。
- 3.鋼板護欄長40公尺，下邊坡路肩護欄加反光規標。
- 4.A4路面（含淺層錨釘、RC 結構及 AC 路面）處理長度約40公尺。下邊坡路基每隔1公尺鑽孔，共兩排做三角形排列；上邊坡路基每隔1公尺鑽孔，計一排。深度均6公尺，低壓灌漿以改良路基（圖4、圖5）。



施工規劃配置示意圖

圖 4. 施工規劃之配置

Fig.4. A plan allocation of construction design

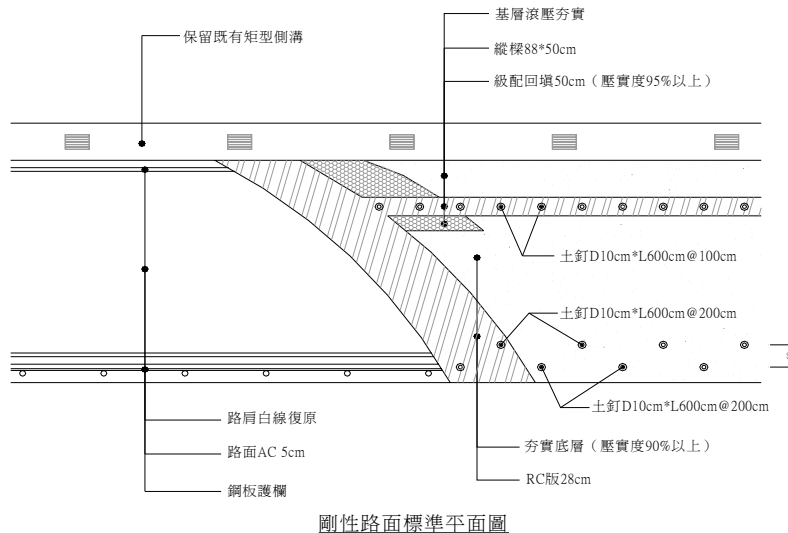


圖 5. 剛性路面與土釘配置平面圖

Fig.5. The combination of soil nails and concrete pavement

(IV) 淺層錨釘之整體配置和力學分析

淺層錨釘（shallow anchor）或稱之為土釘（soil nail）工法為歐美近二十年來所發展之土壤加勁技術，以支撐開挖面或不穩定邊坡。其方法係利用鋼棒貫入土壤或先行鑽孔、放入鋼棒，再以水泥砂漿填充於孔中，與地層結合成一連貫之結構實體（廖會生，1998）。淺層錨釘可配合剛性路面作業，使混凝土與淺層錨釘結合，達到穩定路基和坡面之目的。且淺層錨釘不需擴大基礎面積，可克服陡峻地勢，避免大量挖方而造成環境景觀的破壞。

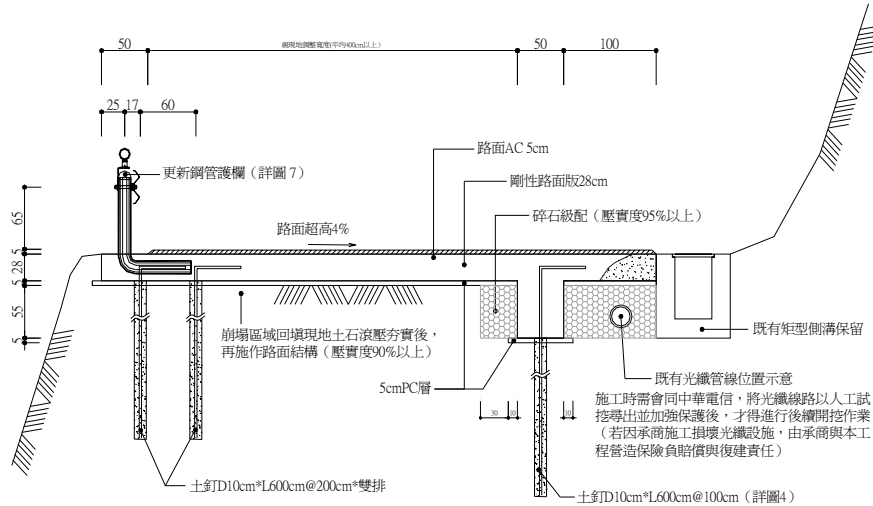
結構型態與應力分析結果，簡述如下：

1、結構型態及鋼筋配置配置，如圖 6 所示。

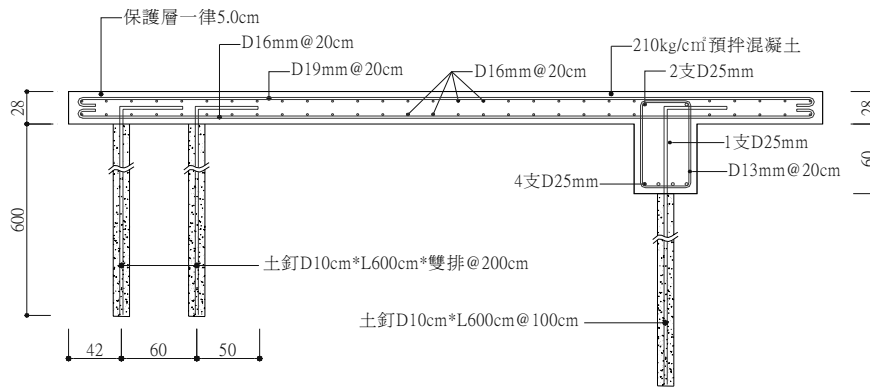
(1) RC 剛性路面：

- a.規格：厚 28cm，寬 460cm，保護層 5cm。
- b.材質：鋼筋混凝土，210 kg/cm²。
- c.配筋：主筋 ϕ 19mm@20 cm，縱筋 ϕ 16mm@20 cm。
- d.上層鋪設 5 cm 柏油路面。

(2) 土釘規格： ϕ 10cm，深度（D）600cm 之 1：2 水泥砂漿圓柱。內插 ϕ 25mm 竹節筋（末端具 180°彎鈎）；配置數量路面外側 2 枝，內側 1 枝。外側土釘之排列方式，已互相交錯為之。



剛性路面標準斷面圖



剛性路面配筋圖

圖 6. 淺層錨釘和剛性路面之細部設計和路面配筋

Fig. 6. Detailed design of soil nails and pavement with a instruction of composition of reinforcing steel bar

2.穩定及應力分析

(1) 基樁承載力理論分析

基樁承載力推估的方法大致可歸納為靜力學公式及經驗公式兩類，其中靜力學公式主要依據極限平衡理論推導而得；經驗公式分析法則彙整既往樁載重試驗結果，以土壤強度參數如標準貫入試驗N值、圓錐貫入試驗 q_c 值或不排水剪力強度來反推分析。

一般以分析方法推估樁承載力的方式，主要是考慮土壤的承載力，其包含樁底端點提供之支承力及樁周表面提供之摩擦力，可以下列公式表示：

$$Q_u = q_b A_b + \sum f_s A_s$$

式中 Q_u = 樁之極限承載力(tf)

q_b = 樁底端點土壤單位面積極限承載力(tf/m²)

A_b = 樁底端點斷面積

f_s = 樁周與土壤間之摩擦應力(tf/m²)

A_s = 樁周之表面積(m²)

而很多的設計規範，利用標準貫入試驗N 值以經驗的方式來估算植入式基樁的承載力（蘇百家等，2005）。利用埋設在樁體內之鋼筋計，量測得樁周土壤摩擦力，經與標準貫入試驗N 值及不排水剪力強度回饋分析，提出適用於本地區植入式基樁承載力之合理推估模式。計算群樁抗拉拔力時群樁容許拉拔力常使用 $RA = w + \tau LU/FS$ 之公式。亦可儉約為程載力之50%至80%。

(2) 土釘支承強度檢核：本件工程設計乃是發包委由工程顧問公司負責，有關之土釘力學穩定分析，亦由其列式敘明。其中或有若干簡化計算程序涉及商業機密，無法全盤。茲檢附其分析結果如下：

a. 外土釘支承強度檢核分析：（圖 7）

分析 10.0m 縱向長度*下陷寬 2.0m 之路面版

靜載重： $0.38\text{m} \times 2.0\text{m} \times 10.0\text{m} \times 2.4\text{t}/\text{m}^3 = 18.24\text{t}$

活載重：H20-44（M18）載重

均佈載重 = $0.96\text{t}/\text{m}^2 \times 10.0\text{m} \times 2.0\text{m} = 19.2\text{t}$

標準貨車載重 36.5t 寬 3.0m，每邊分重 50%

集中載重 = $36.5\text{t} \times \text{單邊輪重之 } 50\% = 18.25\text{t}$

合計 $18.24 + 19.2 + 18.25 = 55.69\text{t}$

暫時忽略 RC 版載重均佈效應，僅考慮外土釘之支承強度：

單樁支承力 = $78.5\text{c} \text{ m}^2 \times 140\text{kg}/\text{c} \text{ m}^2 / 1000 = 11.0\text{t}$

共有 $10.0\text{m} / 2.0\text{m} \times 2$ 支 = 10 支

總支承力 = $10 \times 11.0\text{t} = 110.0\text{t}$

承載安全係數 = $110.0\text{t} / 55.69\text{t} = 1.97$ ，OK

b.內土釘抵抗傾覆彎矩檢核分析：（圖 8）

分析 10.0m 縱向長度*下陷寬 2.0m 之路面版

靜載重彎矩： $18.24\text{t}\times 1.0\text{m}=18.24\text{t}\cdot\text{m}$

均佈載重彎矩= $19.2\text{t}\times 1.0\text{m}=19.2\text{t}\cdot\text{m}$

標準貨車載重 36.5t

寬 3.0m，每邊分重 50%

集中載重彎矩= $18.25\text{t}\times 1.5\text{m}=27.38\text{t}\cdot\text{m}$

傾覆彎矩合計= $18.24+19.2+27.38=64.82\text{t}\cdot\text{m}$

以內土釘之抗拔彎矩檢核臨界斷面之傾覆安全係數：

單樁抗拔力 1=鋼筋抗拉 $5.067\times 1700=8614\text{kg}$

單樁抗拔力 2=樁週摩擦力 $10\times \pi\times 600\times 0.4=7536\text{kg}$ ，

1 與 2 取較小值 $7536\text{kg}=7.54\text{t}$

總抗拔彎矩= $10\times 7.54\text{t}\times 2.75\text{m}=207.4\text{t}\cdot\text{m}$

傾覆安全係數= $207.4/64.82=3.2$ ，OK

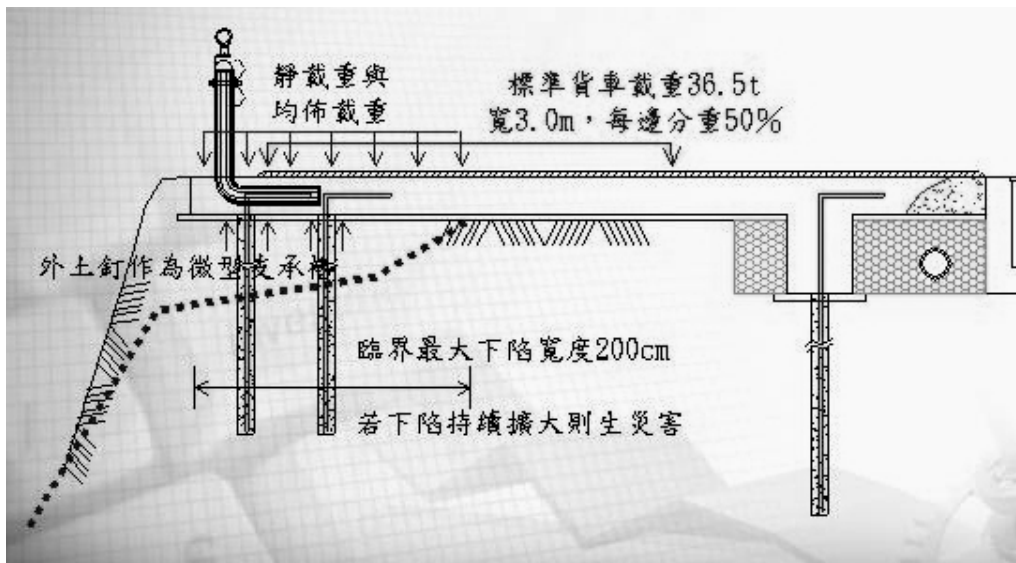


圖 7. 外土釘支承载強度檢核分析

Fig.7. Analysis on bearing capacity of soil nails in outer side of road

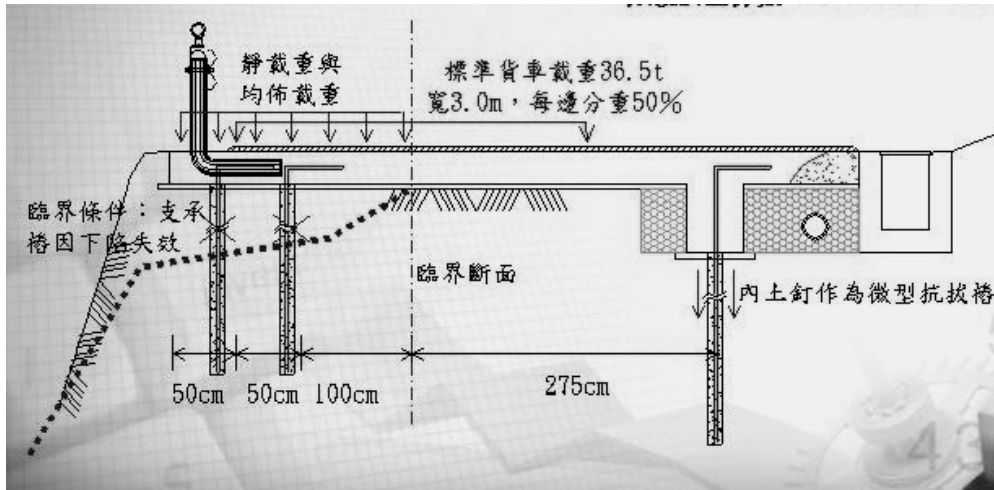


圖 8. 內土釘抵抗傾覆彎矩檢核分析

Fig.8. Analysis on bearing capacity of soil nails in inner side of road

(V) 實際施工和完工狀況

當規劃設計所有細節經過審查委員會審核通過後，依一特定程序遴選優良廠商，進行現地施工。所有的施工注意要點和規範，均載明於招標文件及合約書中，進場材料也經嚴格檢驗通過，才予以放行。相關規定和條件非本文討論要項，在此不予詳述。僅列示出重要的施工要項順序如下：編寫施工方案及施工準備。開挖。清理邊坡。孔位布點。成孔。安設土釘鋼筋。注漿。鋪設剛性路面鋼筋。混凝土澆置。瀝青混凝土路面鋪設。根據不同土性特點和支護構造方法，上述個別順序可以變化。施作之照片，以及完工後之情形（圖 9 之【1】至【6】）供做檢核。



【1】 外土釘位置鑽孔

【1】 Boring hole of outer soil nail



【2】 內土釘位置鑽孔

【2】 Boring hole of inner soil nail



【3】土釘結合地樑完成
【3】Combination of soil nail and Ground beam



【4】剛性路面紮筋
【4】Composition of reinforcing steel bar



【5】鋪設瀝青混凝土
【5】Paving asphalt concrete



【6】瀝青混凝土路面滾壓
【6】Rolling asphalt concrete

圖 9. 施工中之各項作業

Fig.9. Working items during operation procedure

V、後續追蹤成果

自 2004 年 12 月至 2008 年底之間，台灣經歷了幾次極端氣候變化，其中最為人所常提起的有：侵台發生重大災害颱風敏督利、愛莉、南瑪督、海棠、龍王等等（詳見表 1），在在造成嚴重災害。茲以海棠颱風為例，最後的統計資料略述如下：「總計海棠颱風侵台，共有 12 人死亡、3 人失蹤、31 人受傷，農林漁牧業損失金額約 42 億元以上；前述提及的屏東尾寮山總計降下 2347 毫米的雨量，其中 18 日單日降雨量 1009 毫米！而全台各地出現的風力皆頗為可觀。如此巨大的颱風，由於諸多氣象因素之影響，在台灣東方外海繞圈，削減掉部分勢力，則其災情必更加慘重（颱風災害防治中心）」。可見得本工程完成之後，所受到一系列嚴厲的考驗。

完工四年後，至現地觀察結果發現若干事證：

1. 邊坡已趨穩定，下邊坡中之表土幾無沖蝕，植生覆蓋率達 90% ，裸露之處多為岩石露頭，或脆石片和崩積石質土（圖 10 之【3】、【4】）。
2. 從遠處觀察整體坡面，除草本植物和灌叢外，有本地種之小喬木進駐，亦即其自然演替正旺盛進行中（圖 10 之【3】）。
3. 回頭彎上下邊坡植生均已恢復且生長良好，其坡面和路基經過颱風豪雨的考驗，似無再次崩塌之虞（圖 10 之【5】、【6】）。

表 1. 2004 至 2008 期間侵台重大颱風清單

Table 1. A list of vital typhoons that hit Taiwan from 2004 to 2008

編號	中文名稱	英文名稱	警報期間	強度
200815	<u>薔蜜</u>	JANGMI	09/26~09/29	強烈
200813	<u>辛樂克</u>	SINLAKU	09/11~09/16	強烈
200808	<u>鳳凰</u>	FUNG-WONG	07/26~07/29	中度
200807	<u>卡玫基</u>	KALMAEGI	07/16~07/18	中度
200715	<u>柯羅莎</u>	KROSA	10/04~10/07	強烈
200708	<u>聖帕</u>	SEPAT	08/16~08/19	強烈
200613	<u>珊珊</u>	SHANSHAN	09/14~09/16	中度
200608	<u>桑美</u>	SAOMAI	08/09~08/10	中度
200604	<u>碧利斯</u>	BILIS	07/12~07/15	輕度
200603	<u>艾維尼</u>	EWINIAR	07/07~07/09	強烈
200519	<u>龍王</u>	LONGWANG	09/30~10/03	強烈
200513	<u>泰利</u>	TALIM	08/30~09/01	強烈
200509	<u>馬莎</u>	MATSA	08/03~08/06	中度
200505	<u>海棠</u>	HAITANG	07/16~07/20	強烈
200427	<u>南瑪都</u>	NANMADOL	12/03~12/04	中度



【1】 2004. 11. 04



【2】 2004. 11. 04



【3】 2007. 04. 13



【4】 2007. 04. 13



【5】 2009.03.14



【6】 2009.03.14

圖 10. 施工前後不同時間之照片比對

Fig.10. Photos in different date to show the achievement of construction

VI、結論

本案例執行過程，經過事前現地踏勘、群體討論，找出復舊方案的確定方向，以兼顧安全、保育、景觀為考量重點；並慎選工程顧問公司及施工廠商，俾能徹底依既定目標進行各項實務工作。完工後，亦經長時間自然因素的考驗，證實與當初構想之成效極為吻合，故獲致具體結論如下：

- 1.淺層錨釘（又稱土釘）結合剛性路面之工法，可強化道路基礎和邊坡之力學性質，適用於防制坡面潛在淺層滑動之威脅，又可避免全面施做噴凝土造成環境景觀的破壞，不失為一穩定邊坡之良好方法。
- 2.相較於地錨之施工，淺層錨釘較受歡迎之原因主要是因為它的經濟性與施工便利性。施工速度快，容易隨土層狀況而改變施工計畫。與傳統錨錠結構(如地錨)比較，約可節省10%~30%之費用。鑽掘機械和噴凝土機具的設備輕巧，機動性高，較不受地形之限制。透過密間距之淺層錨釘加勁，邊坡之穩定性可大幅提高。施工完成後，可於短期間達成植生綠化之成果。
- 3.淺層錨釘使用於軟弱崩積土層開挖之邊坡穩定，常需使用較長且較密之淺層錨釘，以加強施作效果。一般來說淺層錨釘於軟弱黏土的開挖並不適用。本工程案例地點之土質屬較酥脆之崩積土，是為一種適地適性之工法。
- 4.針對短期與長期的邊坡穩定，淺層錨釘已經發展成爲一種相當成熟的工法；鋼質淺層錨釘使用於長期邊坡的穩定需注意防銹蝕之處理，以避免因錨釘腐蝕而導致抗剪力降低，致造成損害。

VII、參考文獻

1. 水土保持局（1992）水土保持手冊。
2. 房性中（1994）標準貫入試驗N值應用的比較與探討。宏文書局，台北市。
3. 陳信雄（2004）水土保持工程學。臺北市：科技圖書。
4. 郭耀章（2003）地工合成材於水土保持工程上之應用，講習班講義。
5. 黃瓊彪（2002）林道植生工程技術。林業叢刊第 147 號。
6. 黃瓊彪、林照松、王炳宗（2004）敏督利颱風對六龜試驗林林道之影響及復建對策。林業研究專訊 11(04)。
7. 黃瓊彪、林照松、郭耀章、黃國輝（2006）扇平林道2k崩塌地調查及道路復建工程。海峽兩岸山地災害與環境保育研究論文集，中國水土保持

學會 第五卷：398-408

8. 黃瓊彪、林照松、郭耀章（2008）RC自由行框和淺層錨釘應用於林道邊坡之穩定。2008全國危機災害處理研討會，長榮大學。22-34。
9. 張吉佐、陳坤泉（1999）設計參數對深開挖擋土支撐之敏感度評估。地工技術76：17-24。
10. 廖洪鈞等（2002）臺灣地區道路邊坡崩塌發生機制及防治效益評估方法研究與應用（一）。交通部。
11. 廖瑞堂（2001）山坡地護坡工程設計。臺北市：科技圖書。
12. 廖會生（1998）微型樁。地工技術67:101-104。
13. 蘇百加、陳哲人、梁守志、王元靖（2005）植入式基樁承載力案例探討。萬鼎工程公司，高雄。14頁。

國家圖書館出版品預行編目資料

森林集水區經營研討會論文集
Proceedings of Symposium on 2009
Forest Watershed Management

林壯沛主編

--臺北市：農委會林試所，民 98.06

ISBN 978-986-01-8537-9 (平裝)

1.林業管理 2.集水區 3.文集

436.12407

98008596

2009 森林集水區經營研討會論文集

發行人：黃裕星
策劃：盧惠生
主編：林壯沛
編輯：羅方岑
美編：許明峰
出版單位：行政院農業委員會林業試驗所
電話：台北市南海路 53 號
傳真：02-23039978
網址：<http://www.tfri.gov.tw>
印刷：震大打字印刷有限公司
出版年月：九十八年六月
工本費：每冊新台幣 200 元

GPN：1009801211

ISBN：978-986-01-8537-9