

近十年蘭陽溪集水區降雨沖蝕指數推估公式之 建立及空間分析之探討

Establishment of the Assessment Model of Rainfall Erosivity and Their spatial distribution in Lan-yang Watershed during the Recent Decade

國立屏東科技大學
水土保持系
助理教授

李明熹*

Ming-Hsi Lee

國立屏東科技大學
水土保持系
副教授

簡士濠

Shih-Hao Jien

國立屏東科技大學
水土保持系
碩士生

徐一平

I-Ping Hsu

國立屏東科技大學
土木工程系
博士生

林煥軒

Huan-Hsuan Lin

摘 要

近年來因為極端降雨事件發生頻率的增加及降雨特性的改變，導致通用土壤流失公式(universal soil loss equation, USLE)中的降雨沖蝕指數(rainfall erosivity index, R)亦隨之改變，間接影響土壤沖蝕量的估算。本研究以蘭陽溪集水區為研究區域，利用 12 個雨量站 2002-2012 年的 10 分鐘雨量資料，透過迴歸分析方法，建立該集水區之月、季及年降雨量及降雨沖蝕指數關係式，並利用地理資訊系統繪製蘭陽溪集水區年平均降雨量及降雨沖蝕指數等值圖。研究結果發現，12 個雨量站之年降雨量與年降雨沖蝕指數的相關性相當好，其中有 11 個雨量站兩者的相關係數均大於 0.7。空間分布方面，年平均降雨量與年平均降雨沖蝕指數的變化趨勢大致相似，均以東南方的古魯與太平山雨量站為最高。本研究結果可提供給相關單位作為日後使用之參考依據。

關鍵詞：降雨沖蝕指數，通用土壤流失公式，蘭陽溪集水區。

ABSTRACT

The increased frequency of extreme rainfall events and changes in rainfall characteristics in recent years have changed the rainfall erosivity index of the Universal Soil Loss Equation, thereby indirectly affecting the estimation of soil erosion. In this study, Lan-yang Watershed was used as the research site. By using 10-min rainfall data of 12 precipitation stations of the period between 2002 and 2012, we conducted

*通訊作者，國立屏東科技大學水土保持系助理教授，91201 屏東縣內埔鄉學府路 1 號，mhlee@mail.npust.edu.tw

regression analysis to establish the relationship between monthly, seasonal, and annual precipitation and the rainfall erosivity index of Lan-yang Watershed. A geographic information system was employed to plot the average annual precipitation and rainfall erosivity index isogram of Lan-yang Watershed. The research results indicate that the annual precipitation and annual rainfall erosivity index of the 12 precipitation stations are positively correlated. Among the 12 stations, 11 exhibited a correlation coefficient higher than 0.7. Regarding spatial distribution, the variation tendencies of average annual precipitation and average annual rainfall erosivity index were nearly identical. The highest value of precipitation and rainfall erosivity index was measured at the Gulu and Taiping Mountain Stations at the southeastern area of Lan-yang Watershed. The results of this study can serve as a helpful reference for relevant institutes and departments.

Keywords: Rainfall erosivity index, Universal soil loss equation (USLE), Lan-yang Watershed.

一、前言

世界各地因降雨造成的土壤沖蝕衍生許多問題，如土地生產力降低、崩塌、水庫淤積及汙染擴散等(Hillel, 1998; Lal, 2001; Lee and Heo, 2011)。通用土壤流失公式(Universal Soil Loss Equation, USLE)為現今最被廣泛運用於推估土壤沖蝕的模式之一(Wischmeier and Smith, 1958)，其中降雨沖蝕指數(Rainfall erosivity index, R)為一描述降雨及逕流對土壤沖蝕影響程度的重要因子。由於降雨沖蝕指數計算過程繁雜且需要延時間距小於 30 分鐘的降雨資料，因此許多學者積極進行簡化降雨沖蝕指數計算之研究，發現降雨沖蝕指數與降雨量關係密切(Lo *et al.*, 1985; Bagarello and D'Asaro, 1994; Renard and Freimund, 1994; Lee and Heo, 2011)

台灣近年來受到氣候變遷影響，造成區域性降雨強度增強、累積雨量變高以及降雨延時更長的情況發生(陳晉琪等人，2008)，土壤沖蝕問題相較過去更加嚴重。目前國內在工程設計時，大多參考黃俊德(1979)利用全台灣 8 個雨量站 20 年的自記日雨量資料，及 200 個雨量站的月雨量資料，所建立之台灣年等降雨沖蝕指數等值圖。盧光輝(1999)與盧昭堯等人(2005)也針對台灣年降雨沖蝕指數進行修訂，發現年降雨沖蝕指數有逐

年增大的趨勢。因此，目前台灣地區年降雨沖蝕指數等值圖是否能代表現今之氣候狀況存在著不確定性。

本研究以蘭陽溪集水區為例，蒐集區域內 12 個雨量站近 11 年(2002-2012 年)之 10 分鐘雨量資料，建立各雨量站年平均降雨沖蝕指數值及年降雨沖蝕指數關係式，和蘭陽溪集水區月、季及年降雨量及降雨沖蝕指數關係式，並繪製年平均降雨沖蝕指數等值圖，以利後續相關人員在進行水土保持規劃設計中之參考依據。

二、研究材料與方法

2.1 研究區域

本研究以蘭陽溪集水區為研究區域，其位於台灣的東北部地區，面積為 978 km²，主要行政區域為宜蘭縣壯圍鄉、員山鄉、冬山鄉、大同鄉、羅東鄉及三星鄉，其主流為蘭陽溪，最主要的支流有宜蘭河及冬山河，全長約 73 km，集水區平均高程約為 591 m，地勢由東北向西南方向逐漸升高，如圖 1 所示。

本研究蒐集區域內 12 個雨量站，中央氣象局 2002-2012 年的 10 分鐘雨量資料，進行年降雨量與降雨沖蝕指數之研究，其中各雨量站基本資料，如表 1 所示。從表中可看出，雨量站之高程範圍介於 17~2,036 m 之間，其中以壯圍雨量站高

表 1 蘭陽溪集水區雨量站基本資料

雨量站(站碼)	縣市	鄉鎮	座標		高程 (m)	年平均雨量 (mm)
			經度	緯度		
壯圍(C1U620)	宜蘭縣	壯圍鄉	121°46'53''	24°44'44''	17	2,792
雙連埤(C1U521)		員山鄉	121°37'59''	24°45'17''	517	3,810
再連(C1U630)		員山鄉	121°40'16''	24°43'01''	140	2,876
寒溪(C1U670)		冬山鄉	121°42'30''	24°38'10''	147	4,182
古魯(C1U510)		大同鄉	121°39'48''	24°34'24''	492	5,037
玉蘭(C0U650)		大同鄉	121°34'44''	24°40'38''	494	3,972
太平山(C0U710)		大同鄉	121°31'03''	24°30'26''	1,810	4,608
南山(C1U720)		大同鄉	121°22'24''	24°26'21''	1,260	2,545
思源(C0U730)		大同鄉	121°20'55''	24°23'56''	2,036	3,389
羅東(C0U640)		羅東鎮	121°44'26''	24°41'06''	24	3,206
牛門(C1U501)		大同鄉	121°33'55''	24°38'22''	47	3,752
三星(C1U660)		三星鄉	121°38'46''	24°40'21''	103	3,268

資料來源：中央氣象局及本研究彙整

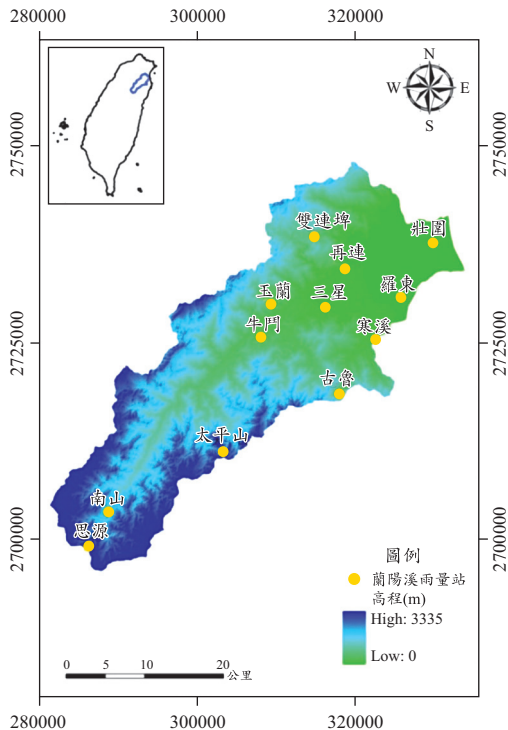


圖 1 蘭陽溪集水區 12 個雨量站位置圖

程最低，思源雨量站最高。年平均降雨量部分，12 個雨量站皆超過台灣年平均雨量(2,500 mm)，以古魯雨量站為最大(5,037 mm)，其次為太平山雨量站(4,608 mm)，最小為 2,545 mm。

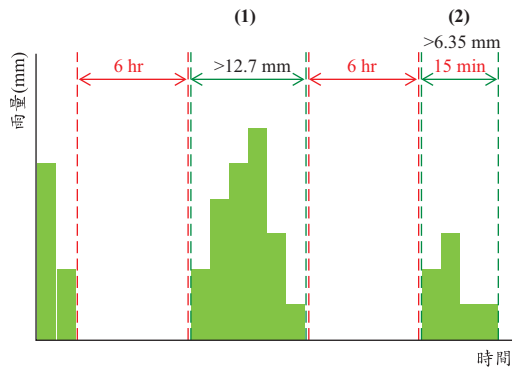


圖 2 有效降雨事件示意圖

2.2 研究方法

2.2.1 有效雨場判定

本研究收集區域內 12 個雨量站 2002-2012 年的 10 分鐘等間隔雨量資料，並依據 Wischmeier and Smith (1978)所定義的有效雨場如下：

- (1)單場降雨之累積降雨量須超過 12.7 mm，且該場降雨與前場降雨需間隔超過 6 小時以上；
- (2)降雨若低於 12.7 mm，但於 15 分鐘內降下 6.35 mm 以上之雨量，仍具備有沖蝕之潛在能力，則該場降雨應視為一場有效降雨事件，如圖 2 所示。

2.2.2 降雨沖蝕指數(R_m)之計算

計算出單場降雨的降雨沖蝕指數，其值為該

表 2 蘭陽溪集水區各雨量站年降雨量與年降雨沖蝕指數分析表

雨量站	P _y (mm)			CV (%)	R _y (MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹ yr ⁻¹)			CV (%)	R _y = αP _y ^β		r
	max	min	mean		max	min	mean		α	β	
思源	3,442	1,197	2,307	26	28,432	4,259	13,638	69	0.01	1.78	0.94
南山	2,495	785	1,644	36	20,696	4,027	10,233	93	0.96	1.23	0.88
太平山	5,361	1,740	3,523	17	81,453	9,694	36,224	26	0.03	1.72	0.94
古魯	6,748	2,344	3,770	16	61,955	13,365	45,156	21	0.07	1.61	0.87
牛鬥	4,091	1,492	2,815	21	37,135	7,494	27,727	34	0.004	1.96	0.89
玉蘭	4,226	1,744	3,040	20	59,609	9,275	23,448	40	1.29	1.22	0.87
三星	4,170	1,212	2,564	23	70,954	9,332	22,435	42	1.34	1.23	0.79
寒溪	5,255	1,687	3,340	18	44,324	13,442	31,377	30	1.62	1.21	0.81
羅東	3,601	1,339	2,507	24	28,459	14,976	22,397	42	8.56	1.00	0.80
再連	3,059	1,501	2,284	26	35,338	8,671	16,929	56	4.98	1.04	0.71
雙連埤	3,789	892	2,882	21	37,623	3,439	20,664	46	0.19	1.45	0.94
壯圍	2,714	1,055	2,082	29	37,623	6,405	17,131	55	10.60	1.96	0.63

場降雨的降雨總動能與該場降雨最大 30 分鐘降雨強度之乘積，並把它分別累加成月、季與年之降雨沖蝕指數，如公式(1)~(3)所示：

$$R_m = \sum_{j=1}^M R_j \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$R_s = \sum_{j=1}^S R_j \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$R_y = \sum_{j=1}^Y R_j \quad \dots\dots\dots(3)$$

其中，R_j 為第 j 場降雨之單場降雨沖蝕指數；R_m 為每月之單場降雨沖蝕指數之累加；R_s 為每季之單場降雨沖蝕指數之累加；R_y 為整年之單場降雨沖蝕指數之累加。最後加入單場降雨量(P_j)、月降雨量(P_m)、季降雨量(P_s)與年降雨量(P_y)與降雨沖蝕指數進行迴歸公式的建立。

2.2.3. 降雨沖蝕指數空間分布

本研究為瞭解蘭陽溪集水區降雨沖蝕指數空間分布，使用 ESRI 公司所開發的 ArcGIS Desktop 9.3 地理資訊系統軟體，以 Topo to Raster 模組作為主要之空間分析工具，並繪製蘭陽溪集水區年平均雨量與年平均降雨沖蝕指數等值圖，探討蘭陽溪集水區之空間分布趨勢。

三、結果與討論

3.1 各雨量站年降雨量與年降雨沖蝕指數之關係

本研究利用蘭陽溪集水區內 12 個雨量站 2002-2012 年 10 分鐘雨量資料，進行年降雨量與降雨沖蝕指數分析，並以變異係數(coefficient of variation, CV)探討各雨量站之降雨量與降雨沖蝕指數離散的程度，CV 值越大代表分析的資料較為分散；反之，愈小則顯示分析的資料較為集中。接著利用統計方法，迴歸出各雨量站降雨量與降雨沖蝕指數的指數關係式，結果如表 2 所示。表中可看出各雨量站之最大年降雨量以古魯雨量站最高為 6,748 mm (CV = 16%)，最小年降雨量以南山雨量站最低為 786 mm (CV = 36%)。年降雨量之平均值大致介於 1,600~3,800 mm 之間，有 4 個雨量站(太平山、古魯、玉蘭及寒溪)超過 3,000 mm，以古魯雨量站為最大(3,770 mm, CV = 16%)。最大年降雨沖蝕指數均超過 20,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ yr⁻¹，約有三成的雨量站超過 50,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ yr⁻¹，其中太平山雨量站高達 81,453 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ yr⁻¹。年降雨量沖蝕指數之平均值大致介於 10,000~45,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ yr⁻¹ 之間，有 3 個雨量站(太平山、古魯及寒溪)超過 30,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ yr⁻¹，其中以古魯雨量站為最大(45,156 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ yr⁻¹)。

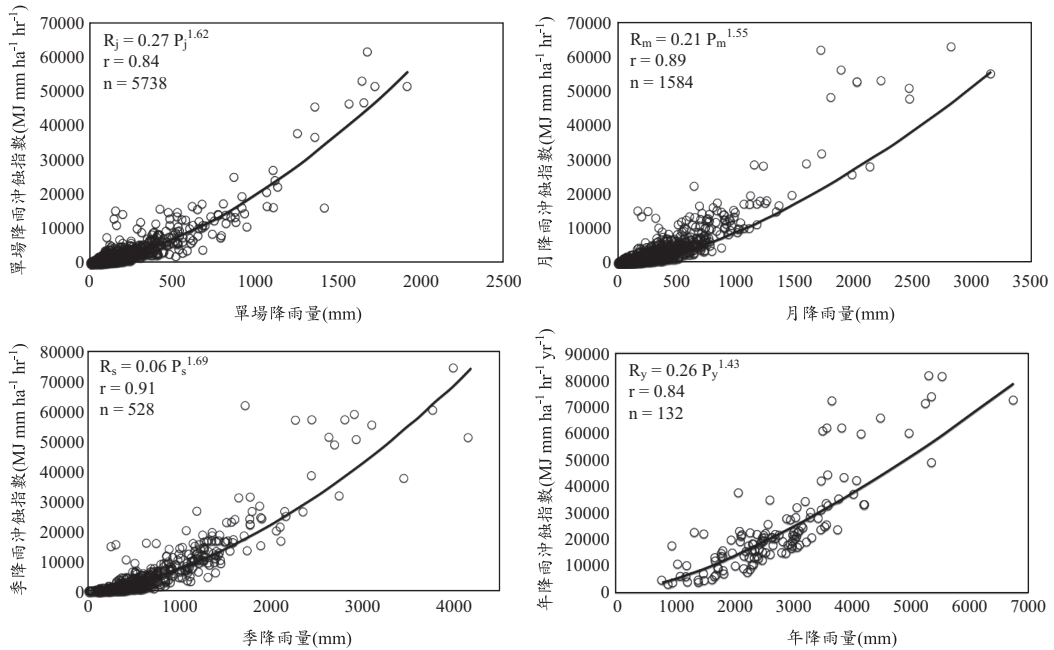


圖 3 單場、月、季及年降雨量與降雨沖蝕指數之迴歸關係式

表 3 國內外年降雨沖蝕指數及年降雨量迴歸關係式

學者	研究區域	迴歸式	r
Lee and Heo (2011)	韓國	$R_y = 0.0115P_y^{1.4947}$	0.87
Carlos and Karim (2011)	智利中部	$R_y = 0.015P_y^{1.617}$	0.97
章文波(2003)	中國	$R_y = 0.0668P_y^{1.6266}$	0.91
張譽譯(2014)	高屏溪集水區	$R_y = 2.41P_y^{1.22}$	0.82
本研究	蘭陽溪集水區	$R_y = 0.26P_y^{1.43}$	0.84

此外，本研究亦將 12 個雨量站的年降雨量與年降雨沖蝕指數以乘幕關係建立關係式，由表中可看出，迴歸關係式中，約有九成的相關係數大於 0.7，呈高度相關以上。

3.2 蘭陽溪集水區單場、月、季及年降雨量與降雨沖蝕指數之關係

本研究採用蘭陽溪集水區 12 個雨量站，進行不同降雨量與降雨沖蝕指數之關係探討。根據 2002-2012 年的 10 分鐘雨量資料，經有效雨場判定後，分別計算出單場降雨量(P_j)與單場降雨沖蝕指數(R_j)、月降雨量(P_m)與月降雨沖蝕指數(R_m)、季降雨量(P_s)與季降雨沖蝕指數(R_s)及年降雨量(P_y)與年降雨沖蝕指數(R_y)，透過迴歸分析進行不

同尺度之降雨量與降雨沖蝕指數推估公式，如圖 3 所示。從圖中可看出不同尺度之降雨量所建立的公式相關係數皆大於 0.8 以上，其中以季降雨量(P_s)與季降雨沖蝕指數(R_s)的迴歸方程式($R_s = 0.06P_s^{1.69}$)相關係數最高($r = 0.91$)，呈極高度相關；其次為月降雨量(P_m)與月降雨沖蝕指數(R_m)的迴歸方程式($R_m = 0.21P_m^{1.55}$ ， $r = 0.89$)；而單場降雨量(P_j)與單場降雨沖蝕指數(R_j)的迴歸方程式($R_j = 0.27P_j^{1.66}$ ， $r = 0.84$)；年降雨量(P_y)與年降雨沖蝕指數(R_y)的迴歸方程式($R_y = 0.26P_y^{1.43}$ ， $r = 0.84$)，皆呈極高度相關。

本研究彙整韓國、智利中部、中國、高屏溪集水區及本研究的年降雨沖蝕指數及年降雨量之迴歸式，如表 3 所示。表中可知年降雨沖蝕指

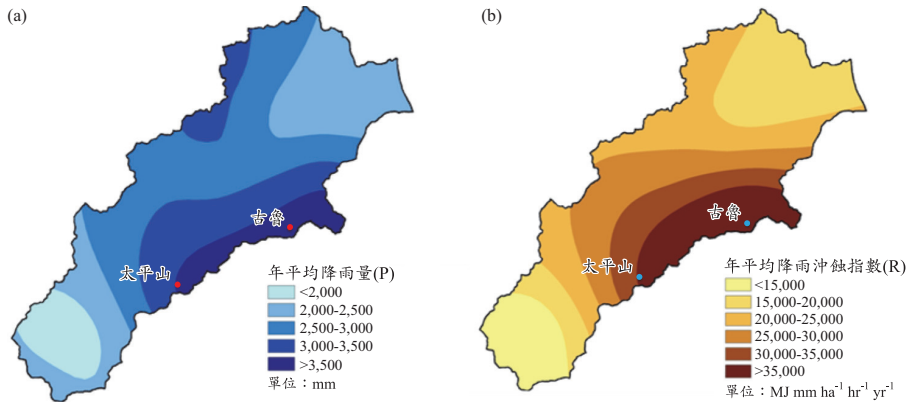


圖 4 蘭陽溪集水區(a)年平均降雨量與(b)年平均降雨沖蝕指數之空間變化

表 4 蘭陽溪集水區(a)年平均降雨量與(b)年平均降雨沖蝕指數之面積百分比

(a)年平均降雨量之面積百分比				
年平均降雨量(mm)		面積(km ²)	面積百分比(%)	
<2,000		107.65	11.01	
2,000-2,500		362.18	37.03	
2,500-3,000		278.42	28.47	
3,000-3,500		139.50	14.26	
>3,500		90.25	9.23	
(b)年平均降雨沖蝕指數之面積百分比				
年平均降雨沖蝕指數 (MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹ yr ⁻¹)	黃俊德(1979)		本研究	
	面積(km ²)	面積百分比(%)	面積(km ²)	面積百分比(%)
<10,000	132.42	13.54	0.00	0.00
10,000-15,000	306.02	31.29	80.12	8.19
15,000-20,000	264.45	27.04	240.68	24.61
20,000-25,000	275.11	28.13	345.12	35.29
25,000-30,000	0.00	0.00	173.03	17.69
30,000-35,000	0.00	0.00	76.07	7.78
>35,000	0.00	0.00	62.98	6.44
總和	978.00	100.00	978.00	100.00

數及年降雨量相關係數介於 0.82~0.97，皆呈現高度相關，其中以 Carlos and Karim (2011)之迴歸式相關係數最高。降雨沖蝕指數雖受地域性影響，但利用降雨量進行迴歸分析，即可有效的簡化降雨沖蝕指數繁複的計算過程。

3.3 蘭陽溪集水區年平均降雨量及降雨沖蝕指數之空間分布

本研究利用 ArcGIS 中 Topo to Raster 模組，以 500 mm 及 5,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ yr⁻¹ 等間距分別繪製蘭陽溪集水區之年平均降雨量與年平均

降雨沖蝕指數等值圖，如圖 4(a)與圖 4(b)所示。從圖 4(a)中可看出，研究區域年平均降雨量除東北及西南部分區域外，其他地區皆高於 3,000 mm，空間分布基本上是由西北往東南遞增，尤其以古魯雨量站附近最大。另外，從圖 4(b)中亦可看出，年平均降雨沖蝕指數等值圖大多高於 15,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ yr⁻¹，空間分布趨勢大致上與年平均降雨量一致，皆由西北向東南遞增，其中以古魯和太平山雨量站附近最大。

另外，本文整理出年平均降雨量及降雨沖蝕指數之面積百分比，如表 4 所示。從表 4 中可發

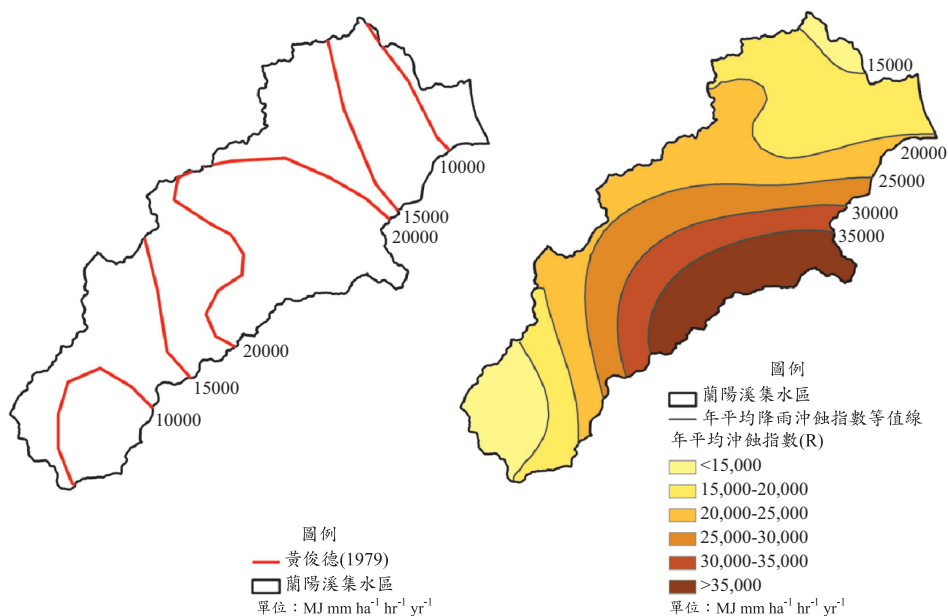


圖 5 本研究與黃俊德(1979)之年平均降雨沖蝕指數等值圖

表 5 蘭陽溪集水區之年平均降雨沖蝕指數差異百分比分析

單位：MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ yr⁻¹

雨量站/集水區	年平均降雨沖蝕指數		差異百分比(%) (B-A)/A×100%
	黃俊德(1979) A	本研究 B	
南山	9,410	10,233	8.04
太平山	19,884	36,224	82.18
蘭陽溪集水區	15,962	23,078	44.58

現，年平均降雨量於 2,000~2,500 mm 所占之面積百分比最高，其值為 37.03%，而本研究區域內，超過 65%的面積其年平均降雨量落在 2,000~3,000 mm 間。另外，在年平均降雨沖蝕指數部分，本研究計算出黃俊德(1979)與本研究的年平均降雨沖蝕指數等值圖面積百分比如表 4 所示。從表中可以看出，黃俊德(1979)在蘭陽溪集水區年平均降雨沖蝕指數最大值為 25,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ yr⁻¹，且約有 87%的面積介於 10,000~25,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ yr⁻¹之間；而本研究最大值超過 35,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ yr⁻¹，且約有 78%的面積介於 15,000~30,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ yr⁻¹之間。由上述可知，近十年來由於極端降雨事件的影響，使得蘭陽溪集水區年平均降雨沖蝕

指數有明顯上升的趨勢。

3.4 蘭陽溪集水區年平均降雨沖蝕指數之探討

本研究嘗試將研究結果與黃俊德(1979)所建立之年降雨沖蝕指數等值圖進行探討，如圖 5 所示。從圖 5 中可發現黃俊德(1979)與本研究所分析的年平均降雨沖蝕指數分布範圍分別介於 10,000~20,000 與 15,000~35,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ yr⁻¹，兩者的最大值均發生在集水區右邊的古魯雨量站附近，其值分別為 20,000 及 35,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ yr⁻¹，本研究的分析結果明顯高於黃俊德(1979)的研究結果。另外，本研究以兩個雨量站(南山站及太平山站)及蘭陽溪集水區的年平均降雨沖蝕指數進行探討，如表 5 所示。從表中可得

知，本研究分析之南山站、太平山及蘭陽溪集水區之年平均降雨沖蝕指數皆大於黃俊德(1979)分析結果，差異百分比分別為 8.04%、82.18%及 44.58%，其中以太平山雨量站增加幅度最大(約 1.8 倍)。

綜合上述分析結果，可瞭解到近十年來蘭陽溪集水區受多次極端降雨事件(如芭瑪、梅姬與蘇拉颱風等)影響，且因使用的雨量站數量、降雨資料年限及精度等不同，造成兩者分析與繪製的年平均降雨沖蝕指數有所差異。整體而言，本研究使用的雨量站資料較多、降雨資料的精度較細，故本研究繪製的年平均降雨沖蝕指數等值圖較容易呈現空間上的細部變化。另因近十年的雨量資料受極端降雨事件影響，使得分析出的年降雨沖蝕指數有明顯增加的趨勢。

四、結 論

本研究以蘭陽溪集水區為研究區域，蒐集區域內 12 個雨量站之 2002-2012 年共 11 年 10 分鐘雨量資料，分析出 5,738 場單場有效降雨事件，建立蘭陽溪集水區單場、月、季及年雨量與降雨沖蝕指數之關係式，且繪製年雨量及年平均降雨沖蝕指數等值圖，並與黃俊德(1979)之研究成果進行探討。

研究發現研究區域的年平均降雨沖蝕指數最小值發生於南山雨量站為 $10,233 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，最大值發生於古魯雨量站為 $45,156 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。單場、月、季及年降雨量與降雨沖蝕指數推估公式的相關係數皆於 0.8 以上，呈現極高度相關以上。國內外之年平均降雨沖蝕指數迴歸式中，相關係數皆大於 0.8，顯示降雨量與降雨沖蝕指數關係密切。

蘭陽溪集水區年平均降雨量與降雨沖蝕指數空間分布趨勢大致一致，由西北向東南遞增，最大值皆發生於古魯雨量站。另外，與黃俊德(1979)研究成果對應發現，蘭陽溪集水區近十年來降雨沖蝕指數有明顯上升的趨勢，建議應修正全台灣年降雨沖蝕指數，以提供相關單位研擬土石災害防治對策及土壤沖蝕量估算之參考依據。

致 謝

本研究承蒙科技部 MOST 103-2625-M-020-003-計劃補助，僅致謝忱。

參考文獻

1. 吳嘉俊、盧光輝、林俐玲：土壤流失量估算手冊，國立屏東技術學院，1996。
2. 張譽譯：降雨沖蝕指數時間與空間變化之研究-以高屏溪集水區為例，國立屏東科技大學碩士論文，2014。
3. 章文波、謝雲、劉寶元：利用日雨量計算降雨侵蝕力的方法研究，地理科學，22(6)，705-711，2002。
4. 陳晉琪、楊育瑄、黃文舜、李亮廷、詹錢登：「土石流發生頻率與降雨特性關係之研究」，第十七屆水利工程研討會，台中，論文編號：L4，1-5，2008。
5. 黃俊德：「台灣降雨沖蝕指數之研究」，中華水土保持學報，10(1)，127-142，1979。
6. 盧光輝：「降雨沖蝕指數之修訂」，中華水土保持學報，30(2)：87-94，1999。
7. 盧昭堯、蘇志強、吳藝均：「台灣地區年等降雨沖蝕指數圖之修訂」，36(2)：159-172，2005。
8. Bagarello, V., and D'Asaro, F., "Estimation single storm erosion index." *Transaction of the ASAE*, 37(3), pp. 785-791, 1994.
9. Carlos A. B., and Karim L. V., "Rainfall erosivity in Central Chile." *Journal of Hydrology*, 410, pp. 126-133, 2011.
10. Hillel, D., "Environmental Soil Physics." Academic Press, San Diego, 1998.
11. Lal, R., "Soil degradation by erosion." *Land Degrad Dev.* 12, pp. 519-539, 2001.
12. Lee, J. H., and Heo J. H., "Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea." *Journal of Hydrology*, 409, pp. 30-48, 2011.
13. Lo, A., El-Swaify, S. A., Dangler, E. W., and

- Shinshiro, L., "Effectiveness of EI30 as an erosivity index in Hawaii." *Soil erosion and conservation*. In: El-Swaify, S.A., Moldenhauer, W.C., Lo, A., (Eds.), Soil Conservation Society of America. Ankeny, Iowa, pp. 384-392, 1985.
14. Renard, K. G., and Freimund, J. R., "Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE." *Journal of Hydrology*, 157, pp. 287-306, 1994.
15. Wischmeier, W. H., and Smith, D. D., "Predicting rainfall erosion losses—A guide to conservation planning. U. S. Department of Agriculture." *Agriculture Handbook*, 537, 1978.
16. Wischmeier, W. H., and Smith, D. D., "Rainfall energy and its relationship to soil loss." *Transactions American Geophysics Union*, 39, pp. 285-291, 1958.

收稿日期：民國 104 年 6 月 11 日

修正日期：民國 104 年 7 月 31 日

接受日期：民國 104 年 8 月 8 日