

運用 TaiWAP 評估高屏溪集水區未來情境之降雨量與降雨沖蝕指數

Evaluation of Rainfall and Rainfall Erosivity in Gao-ping Watershed for Future Scenario by Using TaiWAP Model

國立屏東科技大學
水土保持系
副教授

李明熹*

Ming-Hsi Lee

國立屏東科技大學
水土保持系
碩士班研究生

廖怡雯

Yi-Wen Liao

國立屏東科技大學
水土保持系
兼任助理教授

郭峯豪

Feng-Hao Kuo

摘 要

本文目的為評估高屏溪集水區在未來情境下之年平均降雨量及降雨沖蝕指數之變異情況。根據高屏溪集水區 27 個測站 1993-2012 年之雨量及氣溫資料，本研究應用氣候變遷整合評估模式(TaiWAP)及 TCCIP 最新發表之第五次氣候評估報告(TCCIP-AR5)的未來情境，分析產製出未來 200 年的年降雨量以及年降雨沖蝕指數，並繪製未來不同情境的年降雨沖蝕指數等值圖，以提供相關單位參考應用。結果顯示不同全球暖化之情境下高屏溪集水區多數雨量站之年平均降雨量及年平均降雨沖蝕指數在未來 200 年大多皆呈現持續上升趨勢。最後，本研究將未來情境下之降雨沖蝕指數與不同學者之降雨沖蝕指數進行比較及探討。

關鍵詞：氣候變遷整合評估模式，降雨量，降雨沖蝕指數，氣候變遷。

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the variations of annual rainfall and rainfall erosivity in Gao-ping Watershed in future scenarios. Based on the rainfall and temperature dataset of 27 rainfall stations from 1993 to 2012 in Gao-ping Watershed, we applied TaiWAP model and the future scenarios of TCCIP-AR5 to generate the rainfall data and rainfall erosivity data for next 200 years. The isoerodent maps of annual rainfall erosivity in different scenarios are also drew in this paper. The results show that the annual rainfall and annual

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

rainfall erosivity for most rainfall stations present an increasing trend in next 200 years. Finally, the rainfall erosivity in different scenarios and the rainfall erosivity in previous studies were also compared and discussed in this paper.

Keywords: TaiWAP, Rainfall, Rainfall erosivity, Climate change.

一、前言

研究指出氣候變遷是長期氣候特性改變，並可能導致短期氣候變異加劇與極端氣候頻率增加，進而導致人類社會與自然環境災害(童慶斌等人，2008)。為彙整瞭解全球氣候變遷之研究成果與資訊，聯合國於1988年成立 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)。IPCC 已分別在1990、1995、2001、2007年及2013年發表五次正式的「氣候變遷評估報告」。IPCC 於2013年公布的第5次評估報告(IPCC-AR5)指出，因氣候變遷使得21世紀後期的豪大雨發生頻率、強度或降雨量增加可能性為非常可能，特別在大部份中緯度陸地或潮濕熱帶地區。台灣地區位於熱帶季風及副熱帶季風交界，而且位處太平洋生成颱風路徑上，因而容易受氣候變遷影響而增加極端氣候的發生頻率。為瞭解未來氣候變異對台灣氣候的變異趨勢，國內科技部自2009年起持續推動「台灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」(以下簡稱 TCCIP)，TCCIP 以國內外最新氣候變遷推估資料的分析與降尺度資料的產製為主要工作任務。2010年開始啟動第一期 TCCIP 計畫後，經過數年來的努力，TCCIP 已藉由 IPCC 第5次氣候變遷評估報告(IPCC-AR5)之氣候變遷模式資料，產製出最新的降尺度氣候資料。藉由氣候變遷評估資料(TCCIP-AR5)之台灣統計降尺度情境，再配合適合之大氣環流模式，進一步產製出台灣未來不同情境下之水文量，以評估未來台灣不同區域受氣候變遷所可能發生之水文量變異情況，提供相關單位參考應用(鄭祈全等人，2007、蘇竹君，2008、陳明石，2011、江介倫，2013)。

在氣候變遷的影響下，近年來台灣地區極端氣候發生頻率大幅增加。每當豐水季來臨，常因

豪雨及颱風事件，造成區域性降雨強度高、累積雨量或降雨延時長之極端降雨，進而導致上山坡地發生大規模崩塌頻率增加以及坡面土壤沖蝕量增加之情況。而在諸多降雨因子中，降雨沖蝕指數(Rainfall Erosivity, R)代表降雨對地表之沖蝕能力，亦為反應坡面崩塌風險(楊斯堯，2010)以及推估土壤沖蝕量(楊文仁，2007)之重要降雨指標之一。因此瞭解未來氣候變遷情況下區域降雨沖蝕指數之變動趨勢，則成為坡地水土保持上極為重要的一個議題。為此，本研究以台灣南部高屏溪集水區為主要研究區域，蒐集集水區的雨量站及氣象站資料(共計20年資料)，並應用氣候變遷整合評估模式對未來200年不同情境下之降雨量變化進行模擬，並推估出未來200年不同情境下之降雨沖蝕指數。最後，應用克利金法完成高屏溪集水區降雨沖蝕指數等值圖，以提供相關單位參考應用。

二、前人研究

Walsh (2002)、Trenberth (2005)、Webster *et al.* (2005)等研究指出全球受氣候變遷之影響下，颶風之降雨、頻度及強度會隨之增加，且若在兩倍CO₂條件下影響會愈劇烈。根據童慶斌等人(2002)之研究，全球暖化導致台灣地區氣候與水文有極端化之趨勢。柳中明(2005)指出依據中央研究院分析過去台灣地區之降雨資料顯示，台灣地區因極端降雨事件之致災規模與範圍均大幅增加，且受極端降雨影響程度均遠超過全球之平均值，可見全球氣候變遷對台灣因極端降雨事件產生災害的規模與範圍影響甚鉅。鍾侑達等人(2009)、蘇元風(2014)等研究指出在氣候變遷的影響下，未來台灣整體的颱風事件降雨延時減少、總降雨量增加，其中高屏河流域分析結果顯示年最大一

日、二日暴雨、年不降雨總天數和年發生大雨天數均呈現上升趨勢，未來因降雨強度增加而引發洪水以及不降雨日數增加而引發旱災的頻率增加。黃文政等人(2014)曾應用 IPCC-AR4 的氣候情境探討 2046-2065 年台灣降雨之影響，並進一步與 1980-1999 年歷史資料進行降雨量比較，分析結果顯示北部地區未來年降雨量有減少之趨勢，中部地區之變化不明顯，南部與東部則有增加之趨勢。

此外，在氣候變遷對集水區之影響分析方面，蘇竹君(2008)也曾採用 IPCC-AR3 氣候情境，分析氣候變遷與土地利用改變對石門水庫集水區之流量與泥砂產量影響，結果顯示氣候變遷導致石門水庫集水區之降雨量及流量均減少，未來恐增加在供水調配的困難度。顧承宇等人(2012)也曾探討氣候變遷下極端降雨引致廣域坡地災害評估技術，藉由模式分析基隆河流域降雨和坡地社區崩塌關係，結果顯示評估成果可以瞭解崩塌高潛勢區域分布情況。陳明石(2011)曾應用 TaiWAP 模式以及 IPCC-AR3 氣候情境，對彰化地區農業用水推估進行分析，分析結果顯示彰化地區未來的降雨量呈現增加趨勢，但枯水期減少趨勢更較豐水期顯著，對未來農業耕作制度影響甚大。

在氣候變遷對降雨沖蝕指數影響之研究方面，Takahiro Shiono (2013)、Plangoen P. *et al.* (2014)等研究均顯示氣候變遷將導致降雨特性之改變，降雨沖蝕指數因而隨之變化，進而影響土壤流失。楊文仁(2006)曾分析氣候變遷對台灣地區降雨沖蝕指數之影響，分析結果顯示在兩倍 CO₂ 情境下，高雄與台東地區之年平均降雨沖蝕指數則有減少之趨勢。另外，楊文仁等人(2007)曾分析氣候變遷對台灣北部地區土壤沖蝕之影響，結果顯示未來氣候變遷對日有效降雨事件之雨量有較大之影響，雨季之月平均有效雨量有增加之趨勢，氣候變遷對北部地區之土壤沖蝕防治將有負面之影響。江介倫(2013)也曾根據 IPCC-AR4 之氣候變遷情境分析氣候變遷對台灣年降雨沖蝕指數之潛在影響，分析結果顯示五種不同的大氣環流模式下，高雄地區不論是未來短、

中、長期的降雨沖蝕指數均會較以前更大。

上述研究成果可知，以往許多學者曾應用不同大氣環流模式進行氣候變遷對集水區水文及地文可能影響進行模擬。然而隨著氣候變遷推估報告及資訊的更新，對於未來氣候推估的情境也不斷改進，加上范正成等人(2009)、楊斯堯等人(2010)、李明熹等人(2015)均指出近年台灣因氣候變遷，導致降雨量及降雨沖蝕指數有逐年上升的趨勢。因此本研究採用 TaiWAP 模式以及第五次氣候變遷評估資料之情境(TCCIP-AR5)，推估未來 200 年的降雨量與降雨沖蝕指數並分析其時間與空間之變化趨勢。

三、研究區域概述

本研究以台灣南部高屏溪集水區為研究區域，主要由主流高屏溪及支流荖濃溪、旗山溪、隘寮溪匯集而成，僅次於濁水溪，為台灣第二長河川，全長約 171 公里，集水區面積約 3,257 平方公里，為台灣集水區面積最大的水系。其河川短促，降雨量大，且坡度陡峭，地形高度落差大，集水區地質脆弱，平均高程約為 999 公尺。高屏溪集水區於 2009 年莫拉克風災中，受到大範圍、高強度及長延時型態的極端降雨衝擊，造成集水區內大規模崩塌增加，而且集水區土砂生產量亦大幅增加。在未來氣候變遷的情況下，集水區的年平均降雨量以及年降雨沖蝕指數的變異情況，為未來在高屏溪坡地治理及水土災害防治的重要指標之一。因此，本研究蒐集研究區域內 4 個氣象站及 23 個雨量站，自 1993-2012 年共 20 年的日氣溫及日雨量資料，進行未來氣候變遷情況下年降雨量與年降雨沖蝕指數變異之分析，其中雨量站之位置與基本資料如圖 1 及表 1 所示。

四、研究方法及流程

氣候變遷整合評估模式(TaiWAP)包含了氣候變遷風險評估所需的氣候情境以及氣象合成模式，亦同時針對氣候變遷下水資源風險評估，整合了水文模式、水資源評估模式等，並提供多準則排序評估法作為氣候變遷調適的支援決策工具。目前 TaiWAP 已經加入 TCCIP-AR5 台灣

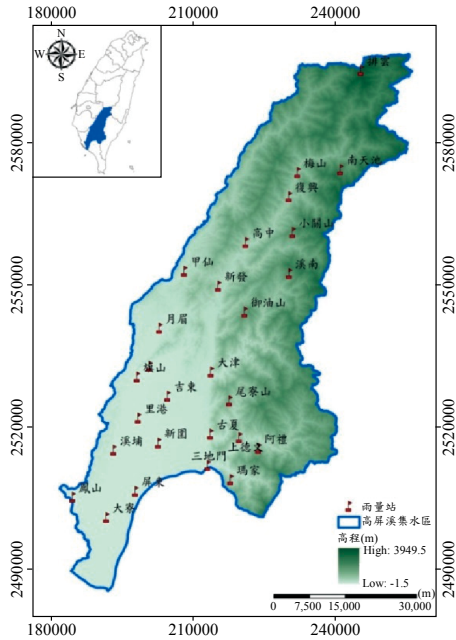


圖 1 高屏溪集水區雨量站分布圖。

表 1 高屏溪集水區雨量站及氣象站基本資料表

雨量站	所在地區	座標(TWD97)		高程(m)	年平均雨量(mm)
		X	Y		
甲仙	高雄市甲仙區	208054	2553189	270	1,868
美濃	高雄市美濃區	200673	2533155	46	2,649
三地門	屏東縣內埔鄉	212989	2512234	99	2,988
尾寮山	屏東縣三地門	217556	2525850	1,018	3,706
上德文	屏東縣三地門	219650	2518094	820	3,756
大津	高雄市六龜區	213694	2531949	190	3,114
大寮	高雄市大寮區	191600	2501228	24	2,151
小關山	高雄市桃源區	230890	2561394	1,781	3,464
月眉	高雄市杉林區	202808	2541177	112	2,667
古夏	屏東縣三地門	213576	2518815	140	3,085
吉東	高雄市美濃區	204558	2526806	95	2,548
里港	屏東縣里港鄉	198327	2522182	42	2,282
阿禮	屏東縣霧臺鄉	223668	2515810	1,040	2,891
南天池	高雄市桃源區	240967	2574633	2,700	3,872
屏東	屏東縣屏東市	197759	2506742	43	2,377
高中	高雄市桃源區	221015	2559248	760	2,920
御油山	高雄市桃源區	220787	2544545	1,637	4,159
排雲	高雄市桃源區	245315	2595585	3,690	3,050
梅山	高雄市桃源區	231947	2574026	870	2,714
復興	高雄市桃源區	230132	2568922	700	1,677
新園	屏東縣鹽埔鄉	202559	2516908	56	2,503
新發	高雄市六龜區	215219	2550063	470	3,314
溪南	高雄市桃源區	230167	2552711	1,792	4,026
旗山	高雄市旗山區	198100	2530857	63	2,425
瑪家	屏東縣瑪家鄉	217834	2509208	740	3,752
溪埔	高雄市大樹區	193168	2515433	36	2,266
鳳山	高雄市鳳山區	183822	2505321	27	2,070

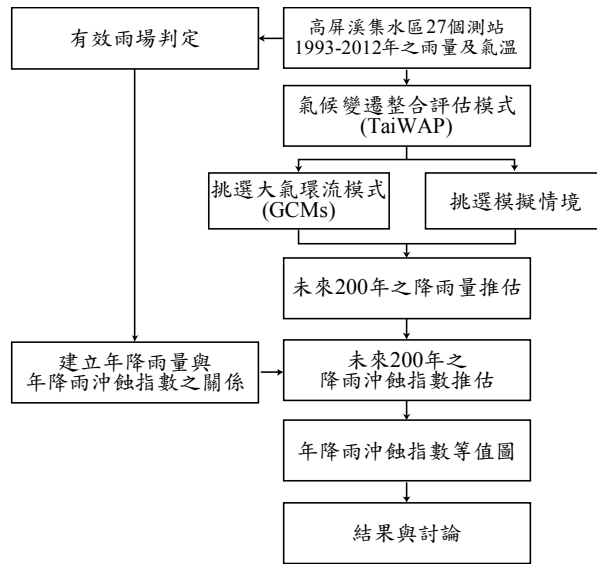


圖 2 研究流程圖。

表 2 研究區域落在台灣十個分區以及全台灣所適合之 GCM 列表

Name	Rank 1	Rank 2	Rank 3
北部	HadGEM2-AO	NorESM1-ME	CSIRO-Mk3-6-0
東北部	MRI-CGCM3	bcc-csm1.1	CESM1-CAM5
東部	CESM1-CAM5	GISS-E2-R	CCSM4
西南部	HadGEM2-AO	MIROC5	bcc-csm1.1m
南部	MIROC5	GISS-E2-R	CCSM4
北部山區	bcc-csm1.1	CESM1-CAM5	NorESM1-ME
中部	MIROC5	CCSM4	HadGEM2-AO
南部山區	HadGEM2-AO	CESM1-CAM5	MIROC5
西部外島	HadGEM2-AO	MIROC5	CESM1-CAM5
東部外島	GISS-E2-R	CSIRO-Mk3-6-0	CESM1-CAM5
全台	HadGEM2-AO	CESM1-CAM5	CCSM4

資料來源：科技部臺灣氣候調適科技服務網

統計降尺度情境，本研究主要利用 TaiWAP 內之 TCCIP-AR5 之氣候變遷模擬產製未來降雨情境並進行降雨沖蝕指數之計算。研究流程圖如圖 2 所示，其分析過程說明如下：

4.1 基本資料蒐集

本研究首先蒐集高屏溪集水區內 27 個測站 1993-2012 年(共計 20 年)的日雨量與日氣溫資料，輸入至氣候變遷整合評估模式 TaiWAP。

4.2 挑選大氣環流模式(GCMs)

大氣環流模式(GCMs)為描述行星大氣或海洋的數學模型，其被廣泛的應用與天氣預報、理解氣候、預測氣候變化等方面。本研究參考科技部臺灣氣候調適科技服務，得知西南部及南部山區所適用的大氣環流模式為 HadGEM2-AO，如表 2 所示。因此，本研究採用 HadGEM2-AO 為主要應用的大氣環流模式。

4.3 挑選模擬情境

IPCC 的第五次評估報告中，科學界定義了 4 組情境，稱為「代表濃度途徑(RCPs)」，作為氣候模式進行數值模擬(未來氣候推估)的規範。這 4 組代表濃度途徑是描述 4 種不同溫室氣體排放、空氣污染排放和土地使用條件下的 21 世紀情境。相較於 IPCC 第三次和第四次評估報告所考慮的情境，這 4 種代表濃度途徑所能涵蓋的層面更廣。4 組代表濃度途徑中，RCP2.6 是極低輻射強迫的減緩情境；RCP4.5 與 RCP6.0 是中等穩定化的情境；RCP8.5 是溫室氣體高度排放的情境。在沒有額外限制排放的情形下，將是介於 RCP6.0 和 RCP8.5 的情境。RCP2.6 則代表全球暖化幅度可能維持在比工業革命前的溫度高攝氏 2 度以內的情境。本研究採用 RCP2.6 及 8.5 相對較樂觀與悲觀的情境作為此次主要探討。

4.4 未來 200 年之年降雨量推估

根據 TaiWAP 所內建氣候資料產生模組，產製出未來 200 年之氣候資料，可得出不同情境下未來 200 年情境下之日雨量資料。本研究根據所產製出之日雨量資料，進一步計算出未來 200 年之年平均降雨量。

4.5 建立年降雨量與年降雨沖蝕指數之關係式

李明熹(2014)曾蒐集隘寮溪集水區內 6 個雨量站 2002-2011 年之 10 分鐘雨量資料，分析單場、日、月及年降雨量與降雨沖蝕指數的關係並建立其迴歸關係式，評估三種降雨沖蝕指數推估關係式之適用性，研究結果顯示，利用年降雨資料推估年降雨沖蝕指數的適用性較好。因此本研究採用其分析方法，根據 1993-2012 年之降雨量資料，並依據 Wischmeier and Smith (1978)所定義的有效雨場(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；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)切割後，計算出單場降雨的降雨沖蝕指數，其值為該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，如公式(1)，並累加成年降雨沖蝕指數，如公式(2)。最後將年降雨量與降雨沖蝕指數建立迴歸公式，分析出年降雨量與年降雨沖蝕指數之關係式，如公式(3)：

$$R_i = \sum_{i=1}^{T_j} (E_{ji}) \times I_{j30} = \sum_{i=1}^{T_j} (e_i P_{ji}) \times I_{j30} \dots\dots (1)$$

$$R_y = \sum_{j=1}^Y R_j \dots\dots\dots (2)$$

$$R_y = aP_y^b \dots\dots\dots (3)$$

式(1)中， R_j 為第 j 場降雨的降雨沖蝕指數； $E_{ji}(=e_i P_{ji})$ 為第 j 場降雨中第 i 時刻的降雨動能； I_{j30} 為第 j 場降雨的最大 30 分鐘降雨強度； e_i 為第 j 場降雨中的第 i 時刻的每公頃單位降雨量之降雨動能； P_{ji} 為第 j 場降雨中第 i 時刻的降雨量； T_j 為第 j 場降雨的降雨延時。式(2)中， R_j 為第 j 場降雨之單場降雨沖蝕指數； R_y 為整年的單場降雨沖蝕指數累加。式(3)中， a 和 b 為待定係數； R_y 為雨量站之年平均降雨沖蝕指數； P_y 為雨量站之年平均降雨量。其研究區域內 27 個雨量站分析結果如表 3 所示。

4.6 未來 200 年降雨量及降雨沖蝕指數之分析

本研究根據模式所推估出之未來 200 年平均降雨量，代入上述推估之迴歸關係式，計算出研究區域內 27 個雨量站之未來 200 年平均降雨沖蝕指數。為探討未來 200 年不同情境下降雨量與降雨沖蝕指數之變化，以差異百分比進行分析，其公式如下：

$$|B - A| / A \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

式中， A 為原來之數值； B 為變化後之數值。

4.7 年降雨沖蝕指數等值圖

而本研究為瞭解研究區域降雨沖蝕指數空間分布，使用地理資訊系統軟體 ArcMAP 10.2，利用其中的克利金法(Kriging)繪製年平均降雨量與降雨沖蝕指數等值圖，探討降雨量與降雨沖蝕指數之空間變化，且根據以往不同學者所繪製出之降雨沖蝕等值圖進行比對，瞭解過去、現在及未來情況的降雨沖蝕指數變異情形。

表 3 高屏溪集水區 27 個雨量站年降雨量與年降雨沖蝕指數關係式

雨量站	$R_y = aP_y^b$		判釋係數 (r^2)	雨量站	$R_y = aP_y^b$		判釋係數 (r^2)
	a	b			a	b	
美濃	10.07	1.04	0.76	南天池	0.05	1.64	0.77
月眉	41.56	0.85	0.73	御油山	1.37	1.30	0.71
甲仙	3.13	1.20	0.76	大寮	4.16	1.15	0.67
旗山	37.20	0.87	0.69	溪埔	1.37	1.31	0.72
排雲	0.37	1.35	0.69	屏東	3.03	1.20	0.76
鳳山	12.43	1.01	0.68	新園	7.90	1.09	0.56
大津	1.93	1.25	0.81	上德文	10.41	1.06	0.59
吉東	213.45	0.64	0.60	阿禮	1.62	1.26	0.68
新發	6.58	1.11	0.76	瑪家	12.47	1.05	0.59
高中	1.36	1.29	0.73	古夏	1.05	1.34	0.75
復興	1.68	1.26	0.56	尾寮山	3.59	1.19	0.85
小關山	0.24	1.50	0.63	里港	30.07	0.90	0.61
溪南	0.34	1.44	0.71	三地門	5.39	1.14	0.59
梅山	0.34	1.45	0.76				

五、結果與討論

本研究應用 1993-2012 年共計 20 年的日雨量與日氣溫資料，以及 TaiWAP 模式下 TCCIP-AR5 中的 RCP2.6 及 RCP8.5 情境模擬，推估高屏溪集水區未來 200 年之降雨量及降雨沖蝕指數分析與變化趨勢。其分析結果如下：

5.1 不同情境下之未來 200 年降雨量分析

未來 200 年不同情境下之降雨量分析結果如表 4，可看出未來氣候產製模組根據不同的 RCP 情境分析出未來 200 年之最大降雨量($P_{y(max)}$)、最小降雨量($P_{y(min)}$)以及平均降雨量($P_{y(mean)}$)，其中高屏溪集水區 27 年雨量站在 RCP2.6 情境下未來之年降雨量平均值為 2,689mm；RCP8.5 情境下之 200 年後年降雨量平均值為 3,039mm，分別為目前年平均降雨量 2,900mm 的 0.93 倍與 1.05 倍，顯示高屏溪集水區未來年平均降雨量會因暖化程度不同而受到影響，高度排放溫室氣體之情境會使得年平均降雨量增加。此外，本研究進一步計算出不同情境下未來 200 年之年雨量平均差異百分比，其差異百分比公式(如式 4)，A 為 RCP2.6、B 為 RCP8.5，計算結果如表 4 所示，

可看出在 RCP2.6 以及 RCP8.5 情境下所產製之年雨量最大値之差異百分比約為 16.7%；最小値平均之差異百分比約為 12.2%，顯示出在未來不同情境條件下可能對年平均降雨量所造成之差異約在 12%-16%之間，整體上可以看出 RCP8.5 情境之年降雨量皆大於 RCP2.6 情境。

另外，在未來降雨量趨勢分析方面，以小關山站雨量站為例，如圖 3 所示。圖中藍點、紅點分別為 RCP8.5 及 RCP2.6 情境下 200 年之雨量資料，藍線、紅線則分別為 RCP8.5 及 RCP2.6 情境的 10 年移動平均線。本研究根據上述分析方法，分析 27 個雨量站在未來 200 年降雨量變動趨勢，結果顯示 RCP2.6 情境下有 17 個雨量站呈現持續上升趨勢；RCP8.5 情境下則有 19 個雨量站呈現持續上升趨勢，其彙整結果如表 5 所示。

最後，在未來降雨變動的空間分布方面，本研究進一步利用克利金模式繪製出 RCP2.6 及 RCP8.5 情境之未來 200 年降雨量等值圖。分析結果如圖 4 及圖 5 所示。圖中可看出 RCP2.6 及 RCP8.5 情境之降雨量趨勢，皆由東部山區往西部沿海遞減。

表 4 不同情境下未來 200 年之降雨量分析

雨量站	$P_{y(max)}$ (mm)		$P_{y(min)}$ (mm)		$P_{y(mean)}$ (mm)	
	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5
尾寮山	5,234	7,081	1,670	1,880	3,445	3,839
三地門	3,853	4,463	1,761	1,993	2,730	3,156
甲仙	2,769	3,057	5,902	0,900	1,717	1,963
美濃	3,602	3,924	1,475	1,775	2,443	2,737
里港	2,832	3,686	1,321	1,655	2,067	2,429
古夏	4,114	4,767	1,925	2,137	2,817	3,274
上德文	4,868	5,675	2,109	2,780	3,396	3,947
阿禮	3,726	4,056	1,551	1,853	2,611	2,956
瑪家	4,396	5,814	2,238	2,432	3,393	3,952
新園	3,066	3,908	1,435	1,753	2,269	2,699
屏東	3,254	3,757	1,341	1,560	2,161	2,498
排雲	3,850	4,130	2,017	1,920	2,759	2,991
大寮	2,820	3,463	1,151	1,135	1,993	2,290
南天池	4,775	5,279	2,375	2,357	3,473	3,688
梅山	3,662	3,858	1,677	1,925	2,524	2,711
復興	3,457	3,630	1,529	1,622	2,433	2,599
小關山	3,997	4,666	2,202	2,266	3,179	3,502
高中	3,974	4,192	1,793	2,043	2,737	3,012
新發	4,197	5,183	1,955	2,494	3,079	3,450
月眉	3,324	4,632	1,739	1,819	2,486	2,870
溪南	5,216	5,298	2,561	2,977	3,678	4,122
御油山	5,266	5,493	2,793	3,026	3,793	4,237
吉東	3,203	4,258	1,563	1,770	2,350	2,759
旗山	3,012	3,749	1,202	1,445	2,222	2,528
大津	3,927	4,193	2,038	2,184	2,851	3,227
溪埔	2,943	3,438	1,072	1,271	2,060	2,410
鳳山	2,692	3,370	1,165	1,256	1,926	2,211
平均	3,779	4,408	1,724	1,934	2,689	3,039
平均差異百分比(%)	16.7		12.2		13.0	

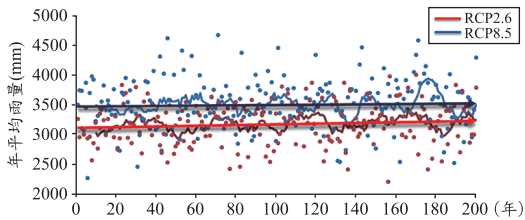


圖 3 不同情境下未來 200 年之降雨量趨勢圖(小關山)。

表 5 不同情境下未來 200 年之降雨量趨勢

趨勢	RCP2.6		RCP8.5	
	雨量站 (個)	百分比 (%)	雨量站 (個)	百分比 (%)
上升	17	63	19	70
下降	10	37	08	30
總計	27	100	27	100

5.2 不同情境下之未來 200 年降雨沖蝕指數分析

本研究根據前述未來 200 年平均降雨量進一步推估出不同雨量站的年降雨沖蝕指數，在不同

情境下降雨沖蝕指數的最大值($R_{y(max)}$)、最小值($R_{y(min)}$)、平均值($R_{y(mean)}$)及平均差異百分比，如表 6 所示。從表中顯示出高屏溪集水區 27 個雨量站在 RCP2.6 情境下未來之年降雨沖蝕指數平

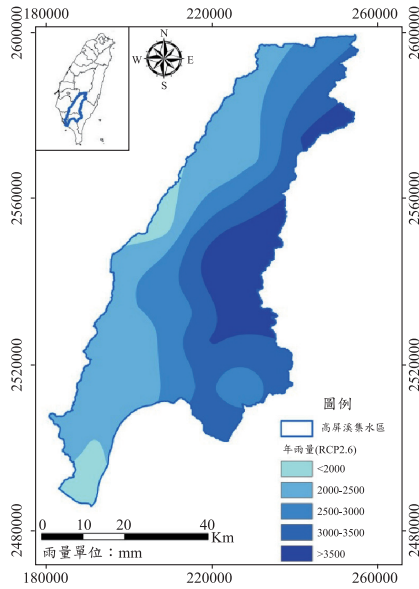


圖 4 RCP2.6 年降雨量等值圖。

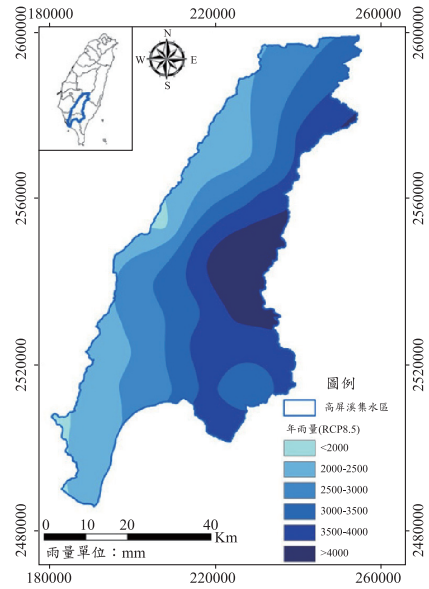


圖 5 RCP8.5 年降雨量等值圖。

表 6 不同情境下未來 200 年之降雨沖蝕指數分析

站名	$R_{y(max)}$		$R_{y(min)}$		$R_{y(mean)}$	
	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5
尾寮山	97,550	139,870	24,982	28,769	59,563	67,737
三地門	65,458	77,393	26,834	30,894	44,285	52,258
甲仙	41,305	46,507	10,795	10,753	23,423	27,512
美濃	52,212	57,096	20,550	24,928	34,826	39,218
里港	37,410	47,376	18,888	23,108	28,178	32,566
古夏	70,762	86,165	25,655	29,492	42,862	52,418
上德文	85,064	100,091	35,013	46,945	58,087	68,138
阿禮	51,530	57,353	17,061	21,360	33,032	38,633
瑪家	83,154	111,520	40,932	44,664	63,382	74,399
新園	49,101	63,934	21,502	26,720	35,426	42,786
屏東	51,490	61,226	17,701	21,237	31,559	37,570
排雲	25,340	27,858	10,592	9,910	16,226	18,090
大寮	39,049	49,467	13,912	13,698	26,256	30,816
南天池	55,553	65,522	17,644	17,420	33,232	36,731
梅山	49,423	53,307	15,934	19,451	28,989	32,155
復興	47,625	50,631	17,057	18,377	30,705	33,370
小關山	59,656	75,193	24,450	25,526	42,544	49,226
高中	59,249	63,487	21,232	25,133	36,768	41,616
新發	68,516	86,572	29,364	38,467	48,644	55,177
月眉	41,604	55,200	23,959	24,886	32,448	36,655
溪南	87,182	88,705	35,178	46,816	59,170	67,142
御油山	91,439	94,795	53,199	56,963	69,026	75,878
吉東	38,877	46,713	24,477	26,523	31,766	35,212
旗山	37,984	45,909	17,162	20,130	29,158	32,607
大津	61,168	66,393	26,903	29,337	41,056	47,963
溪埔	48,000	58,851	12,791	15,987	30,272	37,173
鳳山	36,112	45,310	15,497	16,728	25,762	29,613
平均	56,734	67,498	22,936	26,453	38,394	44,173
平均差異百分比(%)	19.0		15.3		15.1	

R_y 單位：MJ-mm/ha-hr-yr

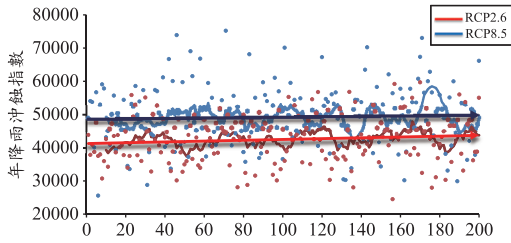


圖 6 不同情境下未來 200 年之降雨沖蝕指數趨勢圖(小關山)。

表 7 不同情境下未來 200 年之降雨沖蝕指數趨勢

趨勢	RCP2.6		RCP8.5	
	雨量站(個)	百分比(%)	雨量站(個)	百分比(%)
上升	23	85	20	75
下降	4	15	7	25
Total	27	100	27	100

均值為 37,550 MJ-mm/ha-hr-yr; RCP8.5 情境下未來之年降雨沖蝕指數平均值則達 43,416 MJ-mm/ha-hr-yr，分別為目前年平均降雨沖蝕指數 41,134 MJ-mm/ha-hr-yr 的 0.91 倍與 1.06 倍，顯示高屏溪集水區未來年平均降雨沖蝕指數會因暖化程度不同而受到影響，高度排放溫室氣體之情境會使得年平均降雨沖蝕指數增加。此外，本研究進一步計算出不同情境下未來 200 年之降雨沖蝕指數平均差異百分比，其差異百分比公式(如式 4)，A 為 RCP2.6，B 為 RCP8.5，計算結果如表 6 所示，RCP2.6 與 RCP8.5 情境下最大降雨沖蝕指數之平均差異百分比為 19%，最小降雨沖蝕指數之平均差異百分比為 15.3%，顯示出在未來不同情境條件下對年降雨沖蝕指數所造成之可能差異約在 15-19%之間。

另外，在未來降雨沖蝕指數趨勢分析方面，以小關山站雨量站為例，如圖 6 所示。圖 6 之藍點、紅點分別為 RCP8.5 及 RCP2.6 在未來 200 年的降雨沖蝕指數資料，藍線、紅線分別為資料的 10 年移動平均。本研究進一步分析 27 個雨量站未來降雨沖蝕指數之變動趨勢(如表 7 所示)，結果顯示 RCP2.6 情境下有 23 個雨量站呈現持續

上升趨勢；RCP8.5 情境下則有 20 個雨量站呈現持續上升趨勢。江介倫(2013)研究成果顯示，未來 2 種情境在 5 個大氣環流模式模擬下，南部地區降雨沖蝕指數大多有上升的趨勢，此成果與本研究結果相近。

最後，本研究根據所推估出未來 200 年之降雨沖蝕指數，進一步繪製 RCP2.6 及 RCP8.5 情境之降雨沖蝕指數等值圖，分別如圖 7 及圖 8 所示。可看出 RCP2.6 或 RCP8.5 情境之降雨沖蝕指數之空間分布皆由東部山區往西部沿海遞減。

5.3 過去、現在及未來的降雨沖蝕指數等值圖探討

本研究根據以往不同學者所繪製出之降雨沖蝕等值圖比對，進一步瞭解過去、現在及未來情況的降雨沖蝕指數變異情況。根據黃俊德(1979)以及張譽譚(2014)所繪製之降雨沖蝕指數等值圖(分別如圖 9 及圖 10 所示)可看出，黃俊德(1979)所繪製之降雨沖蝕指數等值圖中，其最大降雨沖蝕指數約僅 30,000 MJ-mm/ha-hr-yr，然而張譽譚(2014)所繪製之降雨沖蝕指數等值圖之最大降雨沖蝕指數可達 70,000 MJ-mm/ha-hr-yr 以上。其可能原因為雨量年限與雨量使用資料的精度不同，加上近年來極端降雨事件發生機率大幅增加，因而導致黃俊德(1979)所推估之降雨沖蝕指數明顯較張譽譚(2014)之推估值小。

此外，若根據黃俊德(1979)所應用之雨量站，進一步將本研究分析出之不同情境之降雨沖蝕指數與黃俊德(1979)以及張譽譚(2014)之成果進行比對(在 RCP2.6 情境下不同雨量站之分析結果比較如表 8 所示)，其差異百分比公式(如式 4)，A 為本研究(RCP2.6)，B 分別為黃俊德(1979)及張譽譚(2014)，可看出 RCP2.6 情況之降雨沖蝕指數與張譽譚(2014)之分析結果較為接近，9 個雨量站中最大差異百分比約達 44%(甲仙站)；而與黃俊德(1979)之分析結果則明顯差異較大，雨量站中最大差異百分比達 174.6%(月眉站)。

在 RCP8.5 情境下之降雨沖蝕指數比對(如表 9 所示)亦有類似情況，其差異百分比公式(如式 4)，A 為本研究(RCP8.5)，B 分別為黃俊德(1979)

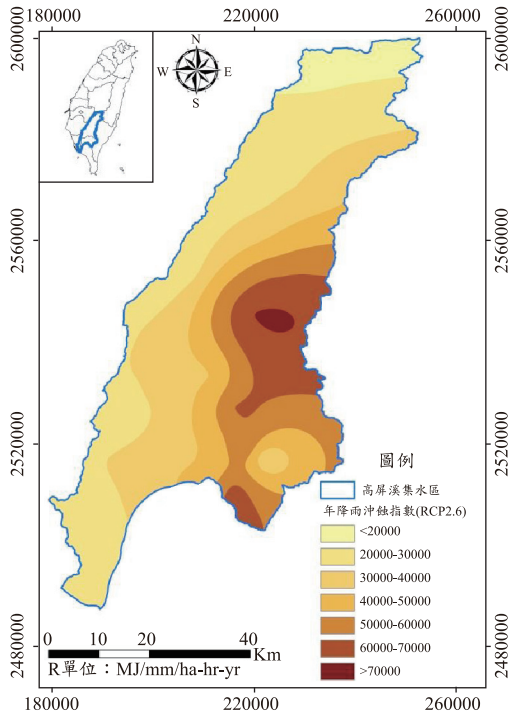


圖 7 RCP2.6 年降雨沖蝕指數等值圖。

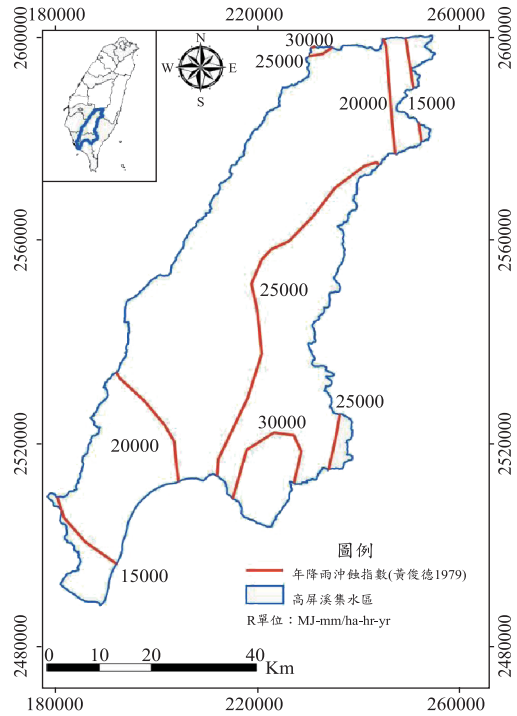


圖 9 年降雨沖蝕指數等值圖(黃俊德，1979)。

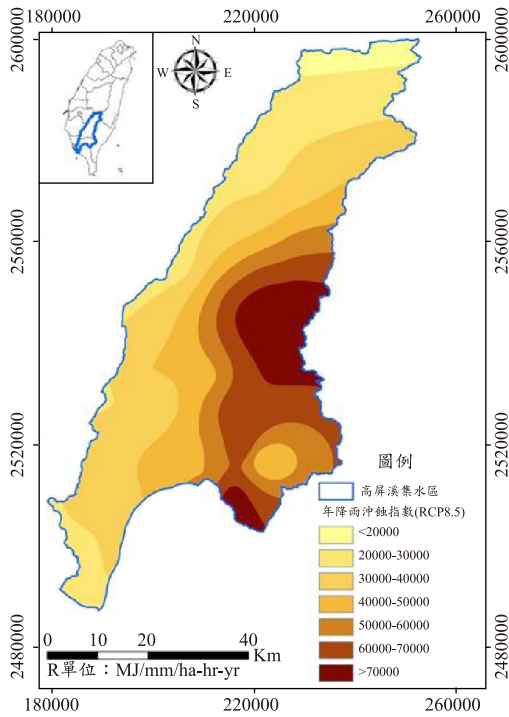


圖 8 RCP8.5 年降雨沖蝕指數等值圖。

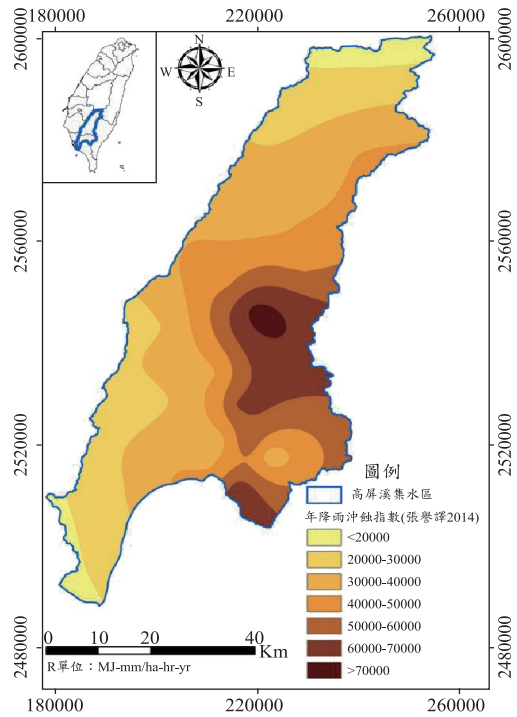


圖 10 年降雨沖蝕指數等值圖(張譽譚，2014)。

表 8 RCP2.6 情境與不同學者之年降雨沖蝕指數比較

站名	本研究 RCP2.6	黃俊德(1979)		張譽譚(2014)	
	R _y	R _y	差異百分比 (%)	R _y	差異百分比 (%)
旗山	29,158	20,305	43.6	25,366	14.9
古夏	42,862	24,500	74.9	35,147	22.0
里港	28,178	19,539	44.2	27,818	1.3
阿禮	33,032	39,890	17.2	35,270	6.3
屏東	31,559	19,301	63.5	31,859	0.9
甲仙	23,423	21,028	11.4	41,745	43.9
三地門	44,285	24,556	80.3	42,633	3.9
美濃	34,826	23,191	50.2	32,310	7.8
月眉	32,448	11,815	174.6	29,995	8.2

R_y 單位：MJ-mm/ha-hr-yr

表 9 RCP8.5 情境與不同學者之年降雨沖蝕指數探討

站名	本研究 RCP8.5	黃俊德(1979)		張譽譚(2014)	
	R _y	R _y	差異百分比 (%)	R _y	差異百分比 (%)
旗山	32,607	20,305	60.6	25,366	28.5
古夏	52,418	24,500	114.0	35,147	49.1
里港	32,566	19,539	66.7	27,818	17.1
阿禮	38,633	39,890	3.2	35,270	9.5
屏東	37,570	19,301	94.7	31,859	17.9
甲仙	27,512	21,028	30.8	41,745	34.1
三地門	52,258	24,556	112.8	42,633	22.6
美濃	39,218	23,191	69.1	32,310	21.4
月眉	36,655	11,815	210.2	29,995	22.2

R_y 單位：MJ-mm/ha-hr-yr

及張譽譚(2014)，其與張譽譚(2014)分析結果之差異百分比約達 49%(古夏站)；與黃俊德分析結果之差異百分比可達 210%(月眉站)。整體而言，RCP2.6 情境之分析結果與近年張譽譚(2014)之分析結果相近，顯示若氣候暖化情況能維持在低度排放的情境下，未來 200 年之年降雨沖蝕指數可能與現行之年降雨沖蝕指數較為接近；但若是以溫室氣體較高度排放的 RCP8.5 情境下，未來

200 年之年降雨沖蝕指數將有明顯上升之趨勢。

六、結論

本研究以 TaiWAP 模式下之 TCCIP-AR5 模組進行高屏溪集水區未來 200 年的降雨量及降雨沖蝕指數之推估及探討，其分析結果說明如下：

1. 高屏溪集水區 27 個雨量站在 RCP2.6 情境下之未來年降雨量平均值為 2,689 mm；

RCP8.5 情境下之未來年降雨量平均值為 3,039 mm，分別為目前年平均降雨量的 0.93 倍與 1.05 倍，顯示高屏溪集水區未來年平均降雨量會因暖化程度不同而受到影響，高度排放溫室氣體之情境會使得年平均降雨量增加。

2. 本研究分析 27 個雨量站在未來 200 年之降雨量變動趨勢，其分析結果顯示 RCP2.6 情境下有 17 個雨量站呈現持續上升趨勢；RCP8.5 情境下則有 19 個雨量站呈現持續上升。此外，在未來降雨變動的空間分布方面，RCP2.6 及 RCP8.5 情境之降雨量趨勢，皆由東部山區往西部沿海遞減。
3. 高屏溪集水區 27 個雨量站在 RCP2.6 情境下未來的年降雨沖蝕指數平均值為 37,550 MJ-mm/ha-hr-yr；RCP8.5 情境下未來的年降雨沖蝕指數平均值則達 43,416 MJ-mm/ha-hr-yr，分別為目前年平均降雨沖蝕指數的 0.91 倍與 1.06 倍，顯示高屏溪集水區未來年平均降雨沖蝕指數會因暖化程度不同而受到影響，高度排放溫室氣體之情境會使得年平均降雨沖蝕指數增加。
4. 本研究分析 27 個雨量站未來降雨沖蝕指數之變動趨勢，其分析結果顯示 RCP2.6 情境下有 23 個雨量站呈現持續上升趨勢；RCP8.5 情境下則有 20 個雨量站呈現持續上升。在未來降雨沖蝕指數空間分布方面，無論為 RCP2.6 或 RCP8.5 情境之降雨沖蝕指數之空間分布皆由東部山區往西部沿海遞減。
5. 本研究根據以往不同學者所繪製出之降雨沖蝕等值圖比對，進一步討論過去、現在及未來情況的降雨沖蝕指數變動情況。分析結果顯示黃俊德(1979)所分析出之降雨沖蝕指數明顯較小，其可能原因為雨量年限與雨量站使用資料的精度不同，加上近年來極端降雨事件發生機率大幅增加，因而導致所推估之降雨沖蝕指數明顯較小。
6. 本研究以不同情境之年降雨沖蝕指數與張譽譚(2014)之分析結果相較，比較結果顯示

RCP2.6 情境之分析結果與近年張譽譚(2014)之分析結果較為相近。顯示若氣候暖化情況能維持在低度排放量的情境，未來之年降雨沖蝕指數可能與現行的年降雨沖蝕指數較為相近；但若是以溫室氣體較高度排放的情境下，則未來 200 年之年降雨沖蝕指數將有明顯上升之趨勢。

參考文獻

1. Kevin Trenberth, "Uncertainty in Hurricanes and Global Warming," *Science*, 308, Issue 5729, 1753-1754, 2005.
2. Kevin Walsh, "Tropical cyclones and climate change: unresolved issues," *Climate Research*, 27: (1)77-83, 2004.
3. Liu, T.M., C.P. Tung, K.Y. Ke, L.H. Chuang, and C.Y. Lin, "Application and development of a decision-support system for assessing water shortage and allocation with climate change," *Paddy and Water Environment*, 7: (4)301-311, 2009.
4. Plangoen P, and Babel MS, "Projected Rainfall Erosivity Changes under Future Climate in the Upper Nan Watershed, Thailand," *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 5, Issue 10, 2014.
5. Takahiro Shiono, Shigeo Ogawa1, Teruhito Miyamoto, and Koji Kameyama "Expected impacts of climate change on rainfall erosivity of farmlands in Japan," *Ecological Engineering*, 61, Part C, 678-689, 2013.
6. Tung, C.P., T.M. Liu, S.W. Chen, K.Y. Ke, and M.H. Li, "Carrying capacity and sustainability appraisals on regional water supply systems under climate change," *British Journal of Environment and Climate Change*, 4: (1)27-44, 2014.
7. Webster, P.J., Holland, G.J., Curry, J.A., and Chang, H.R., "Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming

- environment,” *Science*, 309, Issue 5742, 1844-1846, 2005.
8. Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. *Predicting rainfall erosion losses-Aguide to conservation planning*, Department of Agriculture Agricultural Handbook, U.S., 1978.
 9. Wischmeier, W.H., Smith D.D. and Umland R.E., “Evaluation of factor in the soil-loss equation,” *Agricultural Engineering*, 458-462, 1958.
 10. 江介倫：「氣候變遷對臺灣年降雨沖蝕指數潛在影響」，*地理學報*，第 68 期，pp. 1-17，2013。
 11. 李明熹、簡士濠、徐一平、林煥軒：「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」，*農業工程學報*，第 61 卷第 4 期，pp. 46-54，2015。
 12. 柳中明：「氣候變遷、衝擊、因應與永續發展研究進展 2005(上)」，國立臺灣大學全球變遷研究中心、國立中央大學環境研究中心、國科會永續發展研究推動委員會，2005。
 13. 柳中明：「氣候變遷、衝擊、因應與永續發展研究進展 2005(下)」，國立臺灣大學全球變遷研究中心、國立中央大學環境研究中心、國科會永續發展研究推動委員會，2005。
 14. 范正成、楊智翔、劉哲欣：「台北地區降雨沖蝕指數推估公式之建立及歷年變化趨勢分析」，*中華水土保持學報*，第 40 卷第 2 期，pp. 1-9，2009。
 15. 氣候變遷整合評估模式，<http://sdl.ae.ntu.edu.tw/TaiWAP/>
 16. 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」，國立屏東科技大學水土保持系，碩士論文，2014。
 17. 陳明石：「TaiWAP 模式對彰化地區農業用水推估之應用研究」，國立中興大學土木工程學系，碩士論文，2011。
 18. 童慶斌、游保杉、張良正、李明旭、洪念民，「強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力(2/2)」，2008。
 19. 童慶斌、吳明進、張斐章、李明旭、柳文成、謝龍生：「氣候變化綱要公約國家通訊衝擊調適資料建置-氣候、水文、生態部分(一)」，行政院環境保護署專題研究計畫報告，2002。
 20. 黃文政、吳彥樺、李俊驊：「氣候變遷對臺灣地區 2046-2065 年降雨之衝擊評估」，*農業工程學報*，第 60 卷第 1 期，pp. 66-80，2014。
 21. 黃俊德：「台灣降雨沖蝕指數之研究」，*中華水土保持學報*，第 10 卷第 1 期，pp. 127-142，1979。
 22. 楊文仁：「氣候變遷對台灣北部地區土壤沖蝕有效降雨事件之影響」，*農業工程學報*，第 53 卷第 1 期，pp. 3-12，2007。
 23. 楊文仁：「氣候變遷對台灣地區降雨沖蝕指數之影響」，國立臺灣大學生物環境系統工程學系，博士論文，2006。
 24. 楊斯堯：「曾文溪集水區降雨沖蝕指數與土砂災害關聯性之研究」，國立成功大學水利及海洋工程學系，碩士論文，2010。
 25. 楊斯堯、詹錢登、黃文舜、曾國訓：「運用時雨量資料推估降雨沖蝕指數」，*中華水土保持學報*，第 41 卷第 3 期，pp. 189-199，2010。
 26. 臺灣氣候變遷與推估平台，<http://tccip.ncdr.nat.gov.tw/v2/index.aspx>
 27. 劉子明：「氣候變遷對區域水資源衝擊評估整合系統之研究」，國立臺灣大學生物環境系統工程學系，博士論文，2010。
 28. 鄭祈全、吳治達、莊永忠：「土地利用變遷與氣候變遷對集水區流量模擬影響之研究—以林試所蓮華池試驗林之蛟龍溪集水區為例」，*臺灣林業科學*，第 22 卷，第 4 期，pp. 483-495，2007。
 29. 鍾侑達、郭峻菖、陳昶憲：「台灣區域降雨趨勢分析」，*農業工程學報*，第 55 卷第 4 期，pp. 1-8，2009。
 30. 蘇元風：「以動力降尺度資料評估氣候變遷下颱風降雨事件特性變異」，*農業工程學報*，第 60 卷第 4 期，pp. 48-60，2014。
 31. 蘇竹君：「氣候變遷與土地利用改變對石門

水庫集水區之流量與泥砂產量影響」，國立中央大學土木工程學系，碩士論文，2008。

32. 顧承宇、陳建忠、張怡文、許世孟、陳耐錦、溫惠鈺：「氣候變遷下極端降雨引致廣域坡地災害評估技術之研究」，中華水土保持學報，第 43 卷第 1 期，pp. 75-84，2012。

收稿日期：民國 106 年 4 月 20 日

修正日期：民國 106 年 5 月 25 日

接受日期：民國 106 年 6 月 6 日