

## 利用日、月及年降雨量估算年降雨沖蝕指數

李明熹<sup>[1]\*</sup> 林煥軒<sup>[2]</sup> 詹于婷<sup>[1]</sup>

**摘要** 降雨沖蝕指數是通用土壤流失公式 (universal soil loss equation, USLE) 重要的參數之一, 由於計算降雨沖蝕指數需要 30 分鐘或更短量測間距的雨量資料, 但大部分地區只有日、月或年雨量資料。因此利用何種降雨資料推估年平均降雨沖蝕指數較為接近 30 分鐘雨量資料計算的年平均降雨沖蝕指數, 是本研究的重點。本研究以隘寮溪集水區為研究區域, 蒐集區域內 6 個雨量站 10 年 (2002-2011 年) 10 分鐘等間隔的降雨資料, 計算年平均降雨沖蝕指數 ( $R_{ye}$ ), 另以日、月及年降雨資料, 建立三種降雨量與降雨沖蝕指數關係式, 利用 RMSE、MAPE 及 Bias 等誤差分析方法, 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。本研究結果可提供缺乏短量測間距雨量資料地區年降雨沖蝕指數推估之參考依據。

**關鍵詞**：年降雨量、降雨沖蝕指數、隘寮溪集水區、土壤流失公式。

## Annual Rainfall Erosivity Index Estimation Based on Daily, Monthly and Annual Precipitation

Ming-Hsi Lee<sup>[1]\*</sup> Huan-Hsuan Lin<sup>[2]</sup> Yu-Ting Chan<sup>[1]</sup>

**ABSTRACT** The Universal Soil Loss Equation (USLE) is presently one of the most widely used models for evaluating soil erosion. The rainfall amount is often used to estimate the R factor for Universal Soil Loss Equation (USLE) modeling. Daily, monthly, and annual rainfall data are commonly available. The purpose of the present study is to establish three models for estimating rainfall erosivity based on daily, monthly, and annual precipitation, respectively, and to identify the most suitable model in the Ailiao River watershed located in southern Taiwan. The data set consists of 2266 storm events, monitored by 6 rainfall stations there. The results show that the 6 stations indicate strong positive relationship ( $r^2 > 0.75$ ) between annual rainfall erosivity and annual rainfall with a 99% confidence level, which means the simplified estimation methods based on annual precipitation are useful for predicting long-term annual rainfall erosivity in most of locations in the Ailiao River watershed. The results also show that annual and monthly precipitation correlate with erosivity better than does daily precipitation based on the analysis results of root mean square error (RMSE) and mean absolute percentage error (MAPE) in the Ailiao River watershed.

**Key Words** : Annual precipitation, Rainfall erosivity index, Ailiao River watershed, USLE.

### 一、前言

颱風、豪雨所引發的土壤沖蝕, 對於熱帶及亞熱帶地區是一個攸關環境與經濟的重要問題, 尤其在農業領域上特別重要 (Cooke and Doornkamp, 1990)。台灣位於熱帶及亞熱帶的交界, 每年平均約有 3~4 個颱風登陸, 其中 2009 年莫拉克颱風挾帶超大豪雨, 造成全台土砂災害頻傳, 尤其以南部地區災情最為嚴重。在現有估計土壤沖蝕量之經驗公式中, 以 Wischmeier and Smith (1958) 通用土壤流失公式 (universal soil loss equation, USLE) 最被廣泛使用, 公式是由降雨沖蝕指

數 (R)、土壤沖蝕性指數 (K)、坡長因子 (L)、坡度因子 (S)、作物與管理因子 (C) 及水土保持處理因子 (P) 等 6 項因子所組成, 其中降雨沖蝕指數 (rainfall erosivity index), 通稱 R 指數 (R factor), 為一能具體描述降雨對土壤造成沖蝕之影響程度的因子。探討降雨沖蝕指數對於了解土壤沖蝕問題有相當大的助益, 目前較容易取得的雨量資料以日、月或年為主, 但計算降雨沖蝕指數需要 30 分鐘或更短量測間距 (如 10 分鐘) 的雨量資料 (楊斯堯等人, 2010)。因此, 目前國內外學者相繼做進一步研究, 提出簡化降雨沖蝕指數計算的方法並獲得良好的結果。

[1] 國立屏東科技大學水土保持系  
Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung, Taiwan.

[2] 國立屏東科技大學土木工程系  
Department of Civil Engineering, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung, Taiwan.

\* Corresponding Author. E-mail : mhlee@mail.npust.edu.tw

### 1. 日降雨量與日降雨沖蝕指數

國外學者發現日降雨沖蝕指數與日降雨量呈現乘冪關係 (Richardson et al., 1983; Elsenbeer and Classel, 1993; Brown and Foster, 1987; Bagarello and N'Asaro, 1994; Mannaerts and Gabriels, 2000; 章文波等人, 2002), 關係式為  $R=aP^b$ , 其中  $a$ 、 $b$  為待定係數。胡續禮等人 (2006) 指出利用日雨量計算日降雨沖蝕指數時, 當雨量大、雨型為長延時與低降雨強度時, 估算結果會大於計算值; 反之, 雨型為短降雨延時且高強度時, 估算結果明顯偏小。

### 2. 月降雨量與月降雨沖蝕指數

Nuno and Miguel (2001) 利用月降雨量資料推估葡萄牙月降雨沖蝕指數關係式; 范正成等人 (2009) 迴歸分析月雨量與月降雨沖蝕指數之關係, 建立台北地區降雨沖蝕指數推估公式。

### 3. 年降雨量與年降雨沖蝕指數

國外學者利用年降雨量與年降雨沖蝕指數建立迴歸關係式, 大部分研究發現, 兩者呈現乘冪關係式 (Jung et al., 1983; Renard and Freimund, 1994; Yu, B., 1996)、線性關係式 (Lo et al., 1985) 或二次多項式關係式 (Renard and Freimund, 1994)。其中, Lo et al. (1985) 提出的線性關係式已被用來推估東南亞國家 (泰國、印尼、緬甸及馬來西亞) 等熱帶及亞熱帶地區的年降雨沖蝕指數 (Funnpheng et al., 1991; Shestha et al., 1996; Myint et al., 1997; Merritt, 2002; Hartcher et al., 2005; Toxopeus, 1997; Sulistioadi, 2004; Thang et al., 2005; Blanco and Nadaoka, 2006)。國內曾有多位學者利用歷年的降雨紀錄, 建立台灣地區年降雨沖蝕指數 (黃俊德, 1979; 盧光輝, 1999; 盧昭堯等人, 2005; 俞俊賓, 2008), 且其年降雨量與年降雨沖蝕指數多以乘冪關係或線性關係為主。

綜合上述前人研究發現, 大部分學者都只各別探討日、月或年降雨量與降雨沖蝕指數的關係, 並建立其推估關係式, 而沒有針對三種降雨資料所建立的推估公式進行比較, 分析其公式適用性。因此, 本研究以隘寮溪集水區為研究區域, 並採用集水區內 6 個雨量站 10 年 (2002-2011 年) 的降雨資料, 探討利用日、月及年降雨資料推估年降雨沖蝕指數之適用性。

## 二、研究材料與方法

本研究蒐集隘寮溪集水區內 6 個中央氣象局雨量站 10 年 (2002-2011 年) 的 10 分鐘等間距降雨資料, 依據 Wischmeier and Simth (1978) 所定義的有效降雨事件進行雨場分割, 計算出每一場有效降雨的降雨沖蝕指數, 再累加為年降雨沖蝕指數 (本研究稱計算之年降雨沖蝕指數), 另外以日、月及年三種不同降雨量 ( $P_d$ ,  $P_m$ ,  $P_y$ ) 與其降雨沖蝕指數 ( $R_d$ ,  $R_m$ ,  $R_y$ ), 迴歸三種降雨量與降雨沖蝕指數關係式, 然後將日、月及年降雨量 ( $P_d$ ,  $P_m$ ,  $P_y$ ) 代入關係式中, 累加推求其年平均降雨沖蝕指數 ( $R_y^*$ ,  $R_y^{**}$  及  $R_y^{***}$ )。將  $R_y^*$ ,  $R_y^{**}$  及  $R_y^{***}$  與計算之年平均降雨沖蝕指數 ( $R_{yc}$ ) 進行均方根誤差 (root mean square error,

RMSE)、平均絕對誤差百分比 (mean absolute percentage error, MAPE) 及偏差 (Bias) 分析, 探討利用三種迴歸式推估之年降雨沖蝕指數的適用性。本研究流程說明如圖 1 所示。

### 1. 研究區域概述

隘寮溪集水區面積為 618 km<sup>2</sup>, 主要涵蓋鄉鎮為霧台鄉 (佔集水區面積 48.6%), 三地門鄉 (佔集水區面積 29.2%) 及高樹鄉 (佔集水區面積 9.3%), 其中三地門鄉與高樹鄉間橫跨潮州斷層。集水區之平均高程為 940 m, 平均坡度為 30°, 地質以廬山層為主, 由於硬頁岩、板岩及千枚岩節理發達, 容易風化碎裂, 地質脆弱, 加上颱風及西南季風帶來豐沛的雨量, 因此土砂災害發生事件頻傳。本研究蒐集研究區域內 6 個中央氣象局雨量站 (包含尾寮山、上德文、阿禮、古夏、三地門及瑪家) 資料, 進行降雨量與降雨沖蝕指數之分析, 各雨量站分布位置如圖 2 所示, 基本資料如表 1 所示。從表中可看出, 高程最高為阿禮雨量站 (1040 m), 其次為尾寮山雨量站 (1018 m), 最低為三地門雨量站 (99 m)。年平均雨量最大為尾寮山雨量站 (4426 mm), 其次為瑪家雨量站 (4083 mm), 最小為阿禮雨量站 (3130 mm)。

表 1 隘寮溪集水區雨量站基本資料

Table 1 Rainfall stations data in Ailiao river watershed

雨量站	鄉鎮	座標 (TWD97)		高程 (m)	年平均雨量 (mm)	雨量資料年限
		X	Y			
尾寮山	三地門鄉	217557	2525849	1018	4426	2002-2011
上德文	三地門鄉	219651	2518093	820	4002	2002-2011
阿禮	霧台鄉	223669	2515810	1040	3130	2002-2011
古夏	三地門鄉	213576	2518815	140	3133	2002-2011
三地門	內埔鄉	212989	2512234	99	3135	2002-2011
瑪家	瑪家鄉	217834	2509207	740	4083	2002-2011

資料來源：中央氣象局及本研究彙整。

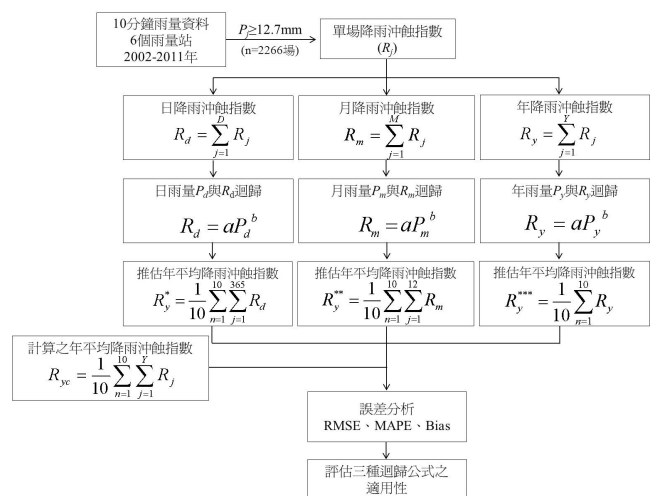


圖 1 研究流程圖

Fig.1 Flow chart of this study

## 2. 研究方法

Wischmeier and Smith (1958) 收集許多試驗區實測的土壤流失資料，經由統計分析後發展成為現今廣泛為世界各國所使用的通用土壤流失公式。公式如下：

$$A=R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

式中， $A$  為每公頃之年平均土壤流失量 ( $\text{ton ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ )； $R$  為降雨沖蝕指數 ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{yr}^{-1}$ )； $K$  為土壤沖蝕性指數 ( $\text{ton ha h yr MJ}^{-1} \text{mm}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ )； $L$  為坡長因子； $S$  為坡度因子； $C$  為作物管理因子； $P$  為水土保持處理因子 (Wischmeier and Smith, 1958；吳嘉俊等人，1996)。

在 USLE 公式中  $R$  值代表降雨沖蝕指數，而降雨沖蝕指數的大小代表了降雨及逕流對土壤可能造成沖蝕程度的高低，是評估土壤沖蝕的重要指標。Wischmeier 經由現場實測的土壤流失資料發現，土壤流失量與降雨總動能 ( $E$ ) 和該場降雨最大 30 分鐘降雨強度 ( $I_{30}$ ) 之乘積呈正相關。因此，單場有效降雨事件的  $R$  值為該場降雨的  $E$  與  $I_{30}$  之乘積，而且降雨沖蝕指數可以線性累加，如公式 (2)~(5) 所示：

$$R_j = E_j \times I_{30j} = \sum_{i=1}^{T_j} (e_i \times P_{ij}) \times I_{30j} \quad (2)$$

$$R_d = \sum_{j=1}^D R_j \quad (3)$$

$$R_m = \sum_{j=1}^M R_j \quad (4)$$

$$R_y = \sum_{j=1}^Y R_j \quad (5)$$

其中， $R_j$  為第  $j$  場降雨的降雨沖蝕指數； $E_j (=e_i P_{ij})$  為第  $j$  場降雨中第  $i$  時刻的降雨動能， $I_{30j}$  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之降雨動能， $P_{ij}$  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。 $R_d$  為每日的單場降雨沖蝕指數累加。 $R_m$  為整月的單場降雨沖蝕指數累加。 $R_y$  為整年的單場降雨沖蝕指數累加。

降雨動能採用 Wischmeier and Smith 依據 Laws 及 Parson 於 1943 年對自然降雨實測資料推導之每公頃單位降雨量之降雨動能公式：

$$e_i = \begin{cases} 0.119 + 0.0873 \log I_i & \text{for } I_i < 76 \text{ mm h}^{-1} \\ 0.283 & \text{for } I_i \geq 76 \text{ mm h}^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

由公式中反應出自然降雨之降雨強度小於  $76 \text{ mm/h}$ ，降雨動能依據公式 (6) 計算；當降雨強度超過  $76 \text{ mm/h}$  後，單位降雨動能為一定值，不再隨降雨強度增加而改變。

另外，降雨沖蝕指數係指由降雨引起的土壤沖蝕潛在能力，為直接反映在降雨對土壤沖蝕的程度，但是並不表示任何一場降雨均具有足夠的土壤沖蝕潛能，故在計算降雨沖蝕指數之前，必須針對有效之單場降雨進行定義。其定義如下：(1) 單場降雨之累積降雨量須超過  $12.7 \text{ mm}$ ，且該場降雨與前場降雨需間隔超過 6 小時以上；(2) 累積降雨量若低於  $12.7 \text{ mm}$ ，但於 15 分鐘內降下  $6.35 \text{ mm}$  以上之雨量，仍具備有沖蝕之潛在能力，則該場降雨仍視為一單場有效降雨事件。

## 3. 誤差分析方法

本研究根據均方根誤差、平均絕對誤差百分比 (Lee and Heo, 2011) 及偏差公式 (Mello et al., 2013)，評估日、月及年降雨量所推估的年平均降雨沖蝕指數 ( $R_y^*$ 、 $R_y^{**}$  與  $R_y^{***}$ ) 與單場降雨沖蝕指數累加計算之年平均降雨沖蝕指數 ( $R_{yc}$ ) 的差異性。均方根誤差、平均絕對誤差百分比及偏差公式分別如公式 (7)~(9) 所示。

- (1) 均方根誤差 (root mean square error, RMSE)

$$\text{RMSE} = \sqrt{(R_{cal} - R_{est})^2} \quad (7)$$

- (2) 平均絕對誤差百分比 (mean absolute percentage error, MAPE)

$$\text{MAPE} = \left| \frac{R_{cal} - R_{est}}{R_{cal}} \right| \times 100\% \quad (8)$$

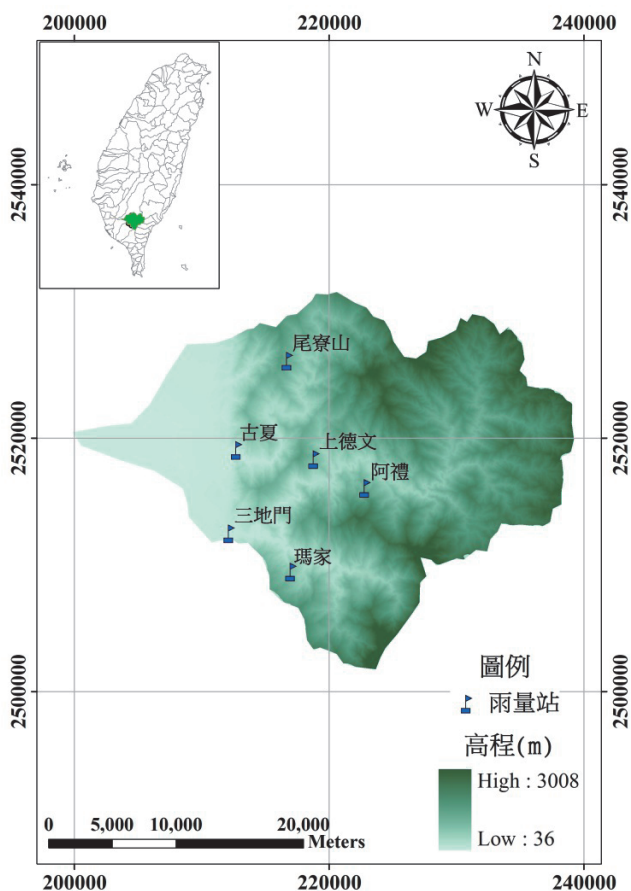


圖 2 隘寮溪集水區 6 個雨量站位置分布圖

Fig.2 Geographic locations of 6 rainfall stations in Ailiiao river watershed

(3) 偏差 (Bias)

$$\text{Bias} = \frac{(R_{est} - R_{cal})}{R_{est}} \times 100\% \quad (9)$$

式中， $R_{cal}$  為計算之年降雨沖蝕指數，由單場降雨沖蝕指數累加； $R_{est}$  為推估年降雨沖蝕指數，由降雨量與降雨沖蝕指數迴歸公式推估。

### 三、結果與討論

#### 1. 有效降雨事件分析

本研究以隘寮溪集水區內 6 個雨量站各 10 年的雨量資料，並根據 Wischmeier and Smith (1978) 提出有效雨場之定義，分析 6 個雨量站單場有效降雨事件，結果如表 2 所示。從表中可看出，單場有效降雨事件共有 2266 場，其中尾寮山雨量站 423 場為最多，其次為古夏雨量站 419 場，阿禮雨量站 309 場為最少。6 個雨量站之單場累積雨量最大值皆發生在 2009 年莫拉克颱風期間，其中尾寮山雨量站的單場降雨量 2969 mm 為最大，其次為上德文雨量站 2296 mm，最小為古夏雨量站 1208 mm。單場降雨沖蝕指數最大值發生於尾寮山與上德文雨量站，皆在 2009 年莫拉克颱風期間，分別為 107675 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> 與 70726 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>；最小值則發生在 2005 年 0612 豪雨期間的阿禮雨量站 28180 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>。古夏、三地門與瑪家雨量站最大值發生在 2007 年梧提颱風期間，分別為 60764 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>、46952 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> 與 45209 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>。

整體而言，單場最大累積降雨量皆發生在莫拉克颱風期間，但單場最大降雨沖蝕指數卻只有尾寮山及上德文是發生在莫拉克颱風期間，其他站分別發生在 0612 豪雨及梧提颱風期間，顯示出年降雨量與年降雨沖蝕指數之間有一定程度的相關性存在，但不可否認的是兩者依然存在著不同程度之變異 (范正成等人，2009)。

#### 2. 不同降雨量與降雨沖蝕指數推估公式之建立

本研究根據 6 個雨量站 10 年(2002-2011 年)的 10 分鐘雨量資料，利用迴歸分析方法，分別建立日降雨量 ( $P_d$ ) 與日降雨沖蝕指數 ( $R_d$ )、月降雨量 ( $P_m$ ) 與月降雨沖蝕指數 ( $R_m$ ) 及年降雨量 ( $P_y$ ) 與年降雨沖蝕指數 ( $R_y$ ) 之推估公式，結果如表 3 所示。表中顯示，推估公式皆達到顯著水準 ( $\alpha < 0.01$ )，表示降雨量與降雨沖蝕指數存在顯著的關係，相關係數 ( $r^2$ ) 皆大於 0.75 以上，兩者達高度或極高度相關。其中，以月降雨量 ( $P_m$ ) 與月降雨沖蝕指數 ( $R_m$ ) 兩者的迴歸關係式 ( $R_m = 0.87P_m^{1.42}$ ) 相關性最高 ( $r^2 = 0.92$ )；其次為日降雨量 ( $P_d$ ) 與日降雨沖蝕指數 ( $R_d$ ) 的迴歸關係式 ( $R_d = 0.66P_d^{1.60}$ ,  $r^2 = 0.83$ ) 及年降雨量 ( $P_y$ ) 與年降雨沖蝕指數 ( $R_y$ ) 的迴歸關係式 ( $R_y = 1.52P_y^{1.29}$ ,  $r^2 = 0.75$ )。在標準誤差部分，以日降雨量最小 (Intercept=0.036, P=0.014)；其次為月降雨量 (Intercept=0.091, P=0.019)；以年降雨量為最大 (Intercept=1.169, P=0.097)，主要是因為年的單位尺度變化幅度較日及月大。

Salako (2008, 2010) 針對奈及利亞濕潤與半濕潤地區進行日降雨量及日降雨沖蝕指數的迴歸分析，前者迴歸公式為  $R_d = 0.27P_d^{1.94}$  ( $r^2 = 0.96$ )，後者為  $R_d = 0.66P_d^{1.74}$  ( $r^2 = 0.86$ )，本研究日降雨量及日降雨沖蝕指數的迴歸關係式較接近半濕潤地區的迴歸公式。范正成等人 (2009) 利用台北地區月降雨量與月降雨沖蝕指數進行迴歸，關係式為  $R_m = 0.002P_m^{2.235}$  ( $r^2 = 0.72$ )，與本研究比較結果顯示，台北地區的月降雨量超過某一累積量時，降雨沖蝕指數上升速度較本研究區域 (南部地區) 快速。Carlos and Karim (2011) 建立智利中部地區年降雨量與年降雨沖蝕指數關係式  $R_y = 0.015P_y^{1.617}$  ( $r^2 = 0.88$ )，Zhang et al. (2005) 分析中國黃河流域年降雨量與年降雨沖蝕指數關係式為  $R_y = 1.084P_y^{1.37}$  ( $r^2 = 0.89$ )，上述兩地區均屬於溫帶氣候區，年降雨量較熱帶氣候區低，因此年降雨沖蝕指數明顯低於本研究地區。

#### 3. 三種降雨沖蝕指數關係式之適用性分析

本研究採用三種誤差分析方法，分別為均方根誤差 (RMSE)、平均絕對誤差百分比 (MAPE) 與偏差 (Bias)，分析各雨量站計算之年平均降雨沖蝕指數 ( $R_{yc}$ ) 與利用日、月及年降雨量推估之年平均降雨沖蝕指數 ( $R_y^*$ 、 $R_y^{**}$  與  $R_y^{***}$ ) 的差異性，分析結果如表 4 及圖 3 所示。從表中可看出，隘寮溪集水區 6 個雨量站中，計算之年平均降雨沖蝕指數 ( $R_{yc}$ ) 以瑪家雨量站最大 (64926 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>)，其次為尾寮山雨量站 (61679 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>)；以日降雨量推估年平均降雨沖蝕指數 ( $R_y^*$ ) 結果，瑪家雨量站最大 (58803 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>)，其次為尾寮山雨量站 (54397 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>)；以月

表 2 隘寮溪集水區內 6 個雨量站單場有效降雨事件分析結果  
Table 2 Rainfall and rainfall erosivity index analysis for 6 rainfall stations in Ailiao river watershed

雨量站	單場有效降雨事件 (場)	單場累積降雨量 (mm)		單場降雨沖蝕指數 (MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	
		最大值	最大值發生事件	最大值	最大值發生事件
尾寮山	423	2969	2009年莫拉克颱風	107675	2009年莫拉克颱風
上德文	382	2296	2009年莫拉克颱風	70726	2009年莫拉克颱風
阿禮	309	1200	2009年莫拉克颱風	28180	2005年0612豪雨
古夏	419	1208	2009年莫拉克颱風	46952	2007年梧提颱風
三地門	367	1299	2009年莫拉克颱風	45209	2007年梧提颱風
瑪家	366	1939	2009年莫拉克颱風	60764	2007年梧提颱風
總計	2266				

表 3 三種降雨量與降雨沖蝕指數迴歸關係分析

Table 3 Regression analyses of rainfall erosivity index under three rainfall amounts ( $P_d$ ,  $P_m$ ,  $P_y$ )

降雨資料	Non-linear regression model		F	Standard error	
	Equation	r <sup>2</sup>		Intercept	P( $d, m, y$ )
日降雨量 ( $P_d$ )	$R_d = 0.66P_d^{1.60}$	0.83**	12670.4	0.036	0.014
月降雨量 ( $P_m$ )	$R_m = 0.87P_m^{1.42}$	0.92**	5322.7	0.091	0.019
年降雨量 ( $P_y$ )	$R_y = 1.52P_y^{1.29}$	0.75**	177.1	1.169	0.097

註：\*\*表 $\alpha < 0.01$ 。

降雨量推估年平均降雨沖蝕指數 ( $R_y^{**}$ ) 結果, 尾寮山雨量站最大 (54643 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>), 其次為瑪家雨量站 (54102 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>); 以年降雨量推估年平均降雨沖蝕指數 ( $R_y^{***}$ ) 結果, 尾寮山雨量站最大 (58548 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>), 其次為瑪家雨量站 (57690 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>)。以平均值來看,  $R_{yc}$ 、 $R_y^*$ 、 $R_y^{**}$ 與  $R_y^{***}$  分別為 49088、43017、43499 及 48446 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>。三種迴歸關係式所推估的年平均降雨沖蝕指數 ( $R_y^*$ 、 $R_y^{**}$ 與  $R_y^{***}$ ), 大致上會比計算之年平均降雨沖蝕指數 ( $R_{yc}$ ) 小, 以平均值來看, 年降雨量所推估的年平均降雨沖蝕指數較為接近計算值。三種誤差分析結果顯示, 在 RMSE 部分, RMSE<sup>\*\*\*</sup>的平均誤差值 (Mean=4051, CV=0.59) 比 RMSE<sup>\*</sup>(Mean =6086, CV=0.49) 及 RMSE<sup>\*\*</sup> (Mean=5922, CV=0.55) 小, 且 6 個雨量站中 RMSE<sup>\*\*\*</sup>有 3 個最小值, RMSE<sup>\*</sup>與 RMSE<sup>\*\*</sup>分別有 2 個及 1 個最小值。換句話說, 利用年降雨量推估年平均降雨沖蝕指數 ( $R_y^{***}$ ) 較為接近計算之年平均降雨沖蝕指數 ( $R_{yc}$ )。MAPE 分析結果顯示, MAPE<sup>\*\*\*</sup>的平均誤差值 (Mean=9, CV=0.64)比 MAPE<sup>\*</sup>(Mean=13, CV=0.62) 與 MAPE<sup>\*\*</sup> (Mean=11, CV=0.46) 小, 且 6 個雨量站中 MAPE<sup>\*\*\*</sup> ≤ 10%共有 4 個雨量站, 而 MAPE<sup>\*</sup>與 MAPE<sup>\*\*</sup> ≤ 10%分別有 3 個及 2 個雨量站。也就是說, 利用年降雨量推估年平均降雨沖蝕指數 ( $R_y^{***}$ ) 較為接近計算之年平均降雨沖蝕指數 ( $R_{yc}$ )。圖 3 為利用三種迴歸關係式推估年降雨沖蝕指數與計算之年降雨沖蝕指數的分析圖。由圖中可知, 以年雨量推估年降雨沖蝕指數, 其值與計算之年平均降雨沖蝕指數 ( $R_{yc}$ ) 最接近 45 度線。偏差分析結果亦顯示以年降雨量迴歸模型較好。

綜合上述分析結果顯示, 利用年降雨量推估年平均降雨沖蝕指數的適用性較日及月降雨量推估值來的接近計算值, 換句話說, 利用年降雨量與年降雨沖蝕指數迴歸關係式, 推估年平均降雨沖蝕指數適用性較日及月降雨資料的推估值好。章文波等人 (2002)、劉平等人 (2005) 在中國大陸的研究結果指出, 年或月降雨資料屬於較粗略的雨量數據, 用來估算降雨沖蝕指數會受到一定的限制, 而日雨量能夠提供更豐富降雨資訊。本研究地區與中國大陸降雨條件有很大的不同, 許多颱風豪雨的有效降雨事件的延時大多超過 2 天甚至 4 天, 倘若以日為單

位分割降雨量及降雨沖蝕指數時, 對於長延時且雨量大的降雨事件影響很大, 原本的單場降雨沖蝕指數會被分割成好幾場較小的日降雨沖蝕指數, 如此在進行日降雨量與日降雨沖蝕指數迴歸分析時, 因樣本的數值偏小, 故日降雨量所計算之年降雨沖蝕指數誤差較大。

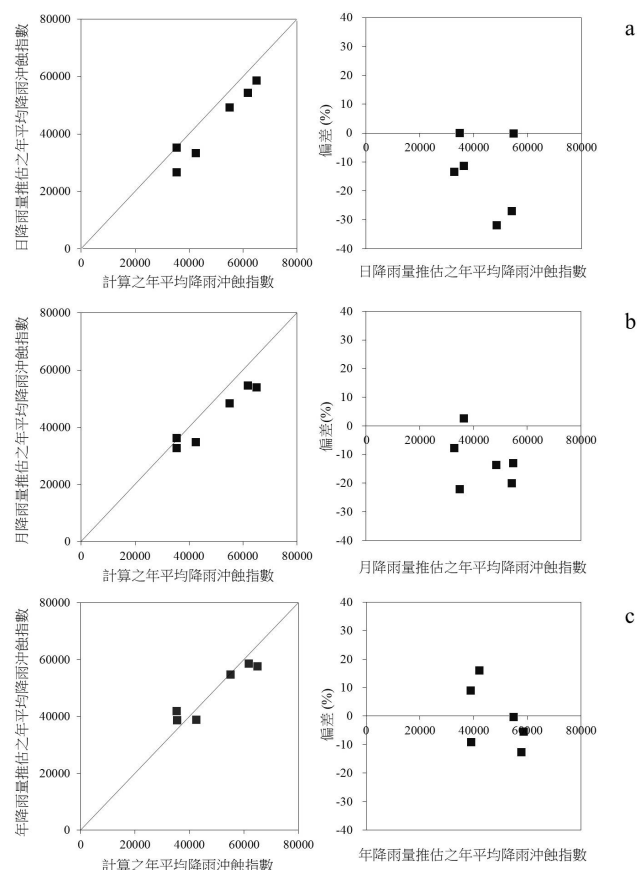


圖 3 日、月、年降雨量迴歸模型驗證 (單位: MJ mm ha<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>)

Fig.3 Validation of the regression models for daily (a), monthly (b), and annual rainfall (c) focusing on the relationships between calculated R factor and estimated one

表 4 各雨量站年平均降雨沖蝕指數之誤差分析

Table 4 Comparison of the estimated R factor evaluated by the previous regression equations with the calculated R factor

雨量站	$R_{yc}$	$R_y^*$	$R_y^{**}$	$R_y^{***}$	RMSE <sup>*</sup>	RMSE <sup>**</sup>	RMSE <sup>***</sup>	MAPE <sup>*</sup>	MAPE <sup>**</sup>	MAPE <sup>***</sup>
尾寮山	61679	54397	54643	58548	722	7036	3131	12	11	5
上德文	35280	26770	32776	38752	8510	2504	3472	24	7	10
阿禮	54945	49395	48417	54764	5550	6528	181	10	12	0
古夏	35257	35303	36255	42011	46	998	6754	0	3	19
三地門	42442	33436	34800	38911	9006	7642	3531	21	18	8
瑪家	64926	58803	54102	57690	6123	10824	7236	9	17	11
Max	64926	58803	54643	58548	9006	10824	7236	24	18	19
Min	35257	26770	32776	38752	46	998	181	0	3	0
Mean	49088	43017	43499	48446	6086	5922	4051	13	11	9
CV	0.25	0.27	0.21	0.18	0.49	0.55	0.59	0.62	0.46	0.64

[ $R_{yc}$ ] Calculated  $R_y$  factor by using Wischmeier and Smith (1978).

\*Estimated  $R_y$  by using daily rainfall model. ( $R_d = 0.66P_d^{1.60}$ )

\*\*Estimated  $R_y$  by using monthly rainfall model. ( $R_m = 0.87P_m^{1.42}$ )

\*\*\*Estimated  $R_y$  by using annual rainfall model. ( $R_y = 1.52P_y^{1.29}$ )

## 四、結 論

本研究以隘寮溪集水區為研究區域，採用區域內 6 個雨量站 10 年 (2002-2011 年) 的 10 分鐘雨量資料，分割出 2266 場有效降雨事件，並建立日降雨量 ( $P_d$ ) 與日降雨沖蝕指數 ( $R_d$ )、月降雨量 ( $P_m$ ) 與月降雨沖蝕指數 ( $R_m$ ) 及年降雨量 ( $P_y$ ) 與年降雨沖蝕指數 ( $R_y$ ) 之迴歸關係式。文中利用均方根誤差 (RMSE)、平均絕對誤差百分比 (MAPE) 與偏差 (Bias) 三種誤差分析方法，評估三種推估模式之適用性。研究結果說明如下：

1. 利用日、月及年三種不同降雨資料所建立的降雨沖蝕指數推估公式分別為  $R_d=0.66P_d^{1.60}$  ( $r^2=0.83$ )、 $R_m=0.87P_m^{1.42}$  ( $r^2=0.92$ ) 及  $R_y=1.52P_y^{1.29}$  ( $r^2=0.75$ )。
2. 利用三種誤差分析方法 (RMSE、MAPE 及 Bias) 探討利用日、月及年降雨資料推估年平均降雨沖蝕指數 ( $R_y^*$ 、 $R_y^{**}$  與  $R_y^{***}$ ) 之適用性，分析結果顯示，利用年降雨量推估年平均降雨沖蝕指數的適用性較日及月降雨量推估值來的好，也就是說，利用年降雨量與年降雨沖蝕指數的迴歸關係式，推估年平均降雨沖蝕指數與計算值最為相近。
3. 本研究成果可提供缺乏短量測間距雨量資料地區之年降雨沖蝕指數推估之參考依據。

## 致 謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會提供研究經費 (NSC102-2625-M-020-002)，及兩位審查委員提供寶貴建議，以利本研究順利進行，謹此致謝。

## 參考文獻

- [1] 吳嘉俊、盧光輝、林俐玲 (1996)，「土壤流失量估算手冊」，國立屏東技術學院。(Wu, C.C., Lo, K.F., and Lin L.L. (1996). *Handbook for Estimating Soil Loss*, National Pingtung Institute of Technology, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [2] 范正成、楊智翔、劉哲欣 (2009)，「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，40(2)，113-121。(Fan, J.C., Yang, C.H., and Liu, C.H. (2009). "Establishment of the assessment model of the rainfall erosivity and their annual variation trend in Taipei." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 40 (2), 113-121. (in Chinese))
- [3] 俞俊賓 (2008)，「曾文水庫集水區年降雨沖蝕指數與年降雨量關係之研究」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。(Yu, J.P. (2008). *Relationship Between Annual Rainfall Erosion Index and Annual Rainfall Amount in the Watershed of Tseng-Wen Reservoir*, Master thesis, National Cheng Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [4] 胡續禮、姜小三、楊樹江、潘劍君、高太成 (2006)，「利用日雨量模型進行伏山牛山區降雨侵蝕力的初步研究」，水土保持研究，13(3)，195-197。(Hu, X.L., Jiang, X.S., Yang, S.J., Pan, J.J., and Gao, T.C. (2006). "Study on Rainfall Erosivity in Funiu Mountainous Region Using Daily Rainfall Amounts Models." *Research Soil and Water Conservation*, 13(3), 195-197. (in Chinese))
- [5] 章文波、謝雲、劉寶元 (2002)，「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。(Zhang, W.B., Xie, Y., and Liu, B.U. (2002). "Rainfall Erosivity Estimation Using Daily Rainfall Amounts." *Scientia Geographica Sinica*, 705-711. (in Chinese))
- [6] 黃俊德 (1979)，「台灣降雨沖蝕指數之研究」，中華水土保持學報，10(1)，127-142。(Huang, C.T. (1979). "Studies on the rainfall erosion index in Taiwan." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 10(1), 127-142. (in Chinese))
- [7] 楊斯堯、詹錢登、黃文舜、曾國訓 (2010)，「運用時雨量推估降雨沖蝕指數」，中華水土保持學報，41(3)，189-199。(Yang, S.Y., Jan, C.D., Huang, W.S., and Tseng, K.H. (2010). "Application of Hourly Rainfall Data to Estimate the Rainfall Erosion Index." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 41 (3), 189-199 (in Chinese))
- [8] 劉平、吳志峰、匡耀球、王繼增、程炯、程漢先 (2005)，「基於日降雨數據的廣東省降雨侵蝕力初步分析」，熱帶氣象學報，21(5)，555-560。(Liu, P., Wu, Z.F., Kuang, Y.Q., Wang, J.Z., Cheng, J., and Chen, H.X. (2005). "Analysis of Rainfall Erosivity Based on the Daily Precipitation in Guangdong Province." *Journal of Tropical Meteorology*, 21(5), 555-560 (in Chinese))
- [9] 盧光輝 (1999)，「降雨沖蝕指數之修訂」，中華水土保持學報，30(2)，87-94。(Lo, K.F. (1999). "Revised Rainfall erosion index." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 30(2), 87-94 (in Chinese))
- [10] 盧昭堯、蘇志強、吳藝昀 (2005)，「台灣地區年等降雨沖蝕指數圖之修訂」，中華水土保持學報，36(2)，159-172。(Lu, J.Y., Su, C.C., and Wu, I.Y. (2005). "Revision of the Isoerodent Map for the Taiwan Area." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 36(2), 159-172 (in Chinese))
- [11] Bagarello, V., and D'Asaro, F. (1994). "Estimation single storm erosion index." *Transaction of the ASAE*, 37(3), 785-791.
- [12] Blanco, A.C., and Nadaoka, K. (2006). "A comparative assessment and estimation of potential soil erosion rates and patterns in Laguna Lake watershed using three models: towards development of an erosion index system for integrated watershed-lake management." *Symposium on Infrastructure Development and the Environment*, University of the Philippines, Diliman, Quezon City, Philippines, 1-12.
- [13] Brown, L.C., and Foster, G.R. (1987). "Storm erosivity using idealized intensity distributions." *Transaction of the ASAE*, 30, 379-386.
- [14] Carlos A.B., and Karim L.V. (2011). "Rainfall erosivity in Central Chile." *Journal of Hydrology*, 410, 126-133.
- [15] Cooke, R.U., and Doornkamp, J.C. (1990). *Geomorphology in environmental management: A new introduction*, Clarendon Press, Oxford.



- [16] Elsenbeer, H.D., and Classel, W.T. (1993). "A daily rainfall erosivity model for Water Amazonia." *Soil and Water Conservation*, 48(5), 705-711.
- [17] Funnpheng, P., Patinavin, S., Mekpaiboonwatana, S., and Pramojanee, P. (1991). "Application of remote sensing and GIS for appraisal of soil erosion hazards." In: Proceedings of the Meeting on Conservation and Sustainable Development, Asian Institute of Technology, Khao Yai National Park, Thailand, 77-91.
- [18] Hartcher, M.G., Post, D.A., and Kinsey-Henderson, A.E. (2005). "Uncertainty in modelling the sources and sinks of suspended sediment in the Mae Chaem catchment, Thailand." *The 2005 International Conference on Simulation & Modeling (SIMMOD)*, Bangkok, Thailand.
- [19] Jung, P., Ko, M., Im, J., Um, K., and Choi, D. (1983). "Rainfall Erosion factor for estimating soil loss." *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 16(2), 112-118.
- [20] Lee, J.H., and Heo J.H. (2011). "Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea." *Journal of Hydrology*, 409, 30-48.
- [21] Lo, A., El-Swaify, S.A., Dangler, E.W., and Shinshiro, L. (1985). "Effectiveness of  $EI_{30}$  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, 384-392.
- [22] Mannaerts, C.M., and Gabriels, D. (2000). "Rainfall erosivity in Cape Verde." *Soil and Tillage Research*, 55, 207-212.
- [23] Mello, C.R., Viola, M.R., Beskow, S., and Norton, L.D. (2013) "Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil." *Geoderma*, 202-203, 88-102.
- [24] Merritt, W.S. (2002). "Biophysical Considerations in Integrated Catchment Management: A Modelling System for Northern Thailand." Doctor in Philosophy Thesis. Australian National University, Australia.
- [25] Myint, S.W., Thongthap, C., and Eiumnoh, A. (1997). "Soil nutrient depletion modeling using remote sensing and GIS: a case study in Chonburi, Thailand." *The 18th Asian Conference on Remote Sensing*, 20-25 October, 1997, Kuala Lumpur, Malaysia, R51-R53.
- [26] Nuno, d.S.L., and Miguel, d.A.C. (2001). "A new procedure to estimate the RUSLE  $EI_{30}$  index, based on monthly rainfall data and applied to the." *Journal of Hydrology*, 250, 12-18.
- [27] Renard, K.G., and Freimund, J.R. (1994). "Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE." *Journal of Hydrology*, 157, 287-306.
- [28] Richardson, C.W., Foster, G.R., and Wright, D.A. (1983). "Estimation of erosion index from daily rainfall amount." *Transactions American Society of Agricultural Engineers*, 26, 153-157.
- [29] Salako, F.K. (2008). "Rainfall variability and kinetic energy in Southern Nigeria." *Climatic Change*, 86 (1-2), 151-164.
- [30] Salako, F.K. (2010). "Development of isoerodent maps for Nigeria from daily rainfall amount." *Geoderma*, 156, 372-378.
- [31] Shrestha, R.P., Eiumonoh, A., and Baimoung, S. (1996). "Soil erosion assessment and its policy implications: a case study of RS and GIS applications in Uthai Thani, Thailand." *The 17th Asian Conference on Remote Sensing in Sri Lanka*.
- [32] Sulistioadi, Y. B. (2004). "Identification of High Conservation Value Forest (HCVF) related to Soil and Water Conservation: The Use of Remote Sensing and GIS to Support Forest Certification in Indonesia." The Master Degree Thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands, 31.
- [33] Thang, C.C., Eiumnoh, A., Shivakoti, G.P., and Clemente, R. (2005). "Spatial modeling for land degradation assessment using remotely sensed data and geographic information system: a case study of Daungay Watershed, Magway District, Myanmar." In: Conference Proceedings: Map Asia.
- [34] Toxopeus, A.G. (1997). "Cibodas: the erosion issue." In: van Westen, C.J., Saldaña López, A., Uria cornejo, S.P., Chavez Ardanza, G. (Eds.), ILWIS 2. for Windows: Applications guide: the Integrated Land and Water Information System. Enschede: ITC, Chapter 23, 307-321.
- [35] Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1958). "Rainfall energy and its relationship to soil loss." *Transactions American Geophysics Union*, 39, 285-291.
- [36] Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1978). "Predicting rainfall erosion losses—A guide to conservation planning. U. S. Department of Agriculture." *Agriculture Handbook*, 537.
- [37] Yu, B., and Rosewell, C.J. (1996). "An assessment of a daily rainfall erosivity model for New South Wales." *Austral. J. Soil Res.*, 34, 139-152.
- [38] Zhang, G.H., Nearing, M.A., and Liu, B.Y. (2005). "Potential effects of climate change on rainfall erosivity in the Yellow River basin of China." *Trans. ASAE*, 48(2), 511-517.

---

2013年12月31日 收稿

2014年02月13日 修正

2014年03月18日 接受

(本文開放討論至 2014 年 12 月 31 日)