

運用時雨量資料推估降雨沖蝕指數

楊斯堯 詹錢登* 黃文舜 曾國訓

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, 它的大小表示降雨對土壤沖蝕能力的高低。分析降雨沖蝕指數的變化有助於了解降雨對土壤沖蝕的影響及變遷。計算降雨沖蝕指數需要 30 分鐘或更短延時的雨量資料, 然而許多地區歷史的雨量記錄資料, 往往缺乏短延時 (如十分鐘) 雨量資料, 只有時雨量資料, 甚至只有日雨量資料。因此如何使用較方便取得的雨量資料來推估降雨沖蝕指數, 是一個非常值得探討的課題。本文首先收集曾文水庫集水區十分鐘雨量資料及時雨量資料, 將十分鐘雨量資料計算所得之降雨沖蝕指數和以時雨量資料計算所得的擬似降雨沖蝕指數 (R_{60}) 進行比較, 結果顯示兩者之間有非常密切之關係, 前者約為後者的 1.52 倍, 因此未來可以利用 R_{60} 來推估降雨沖蝕指數。此外, 本研究結果也顯示曾文水庫集水區歷年降雨沖蝕指數有顯著增大的趨勢。
關鍵詞: 擬似降雨沖蝕指數、降雨沖蝕指數、氣候變遷。

Application of Hourly Rainfall Data to Estimate the Rainfall Erosion Index

Ssu-Yao Yang Chyan-Deng Jan* Wen-Shun Huang Kuo-Hsun Tseng

ABSTRACT The paper proposes a new method to estimate the rainfall erosivity index using hourly rainfall data. A pseudo rainfall erosivity index R_{60} is proposed and computed using hourly rainfall data obtained from six rainfall stations at the Watershed of Tseng-Wen Reservoir, and compared with the rainfall erosivity index calculated with the 10-min rainfall data. Regression analysis shows the rainfall erosivity index is closely and linearly correlated to the pseudo rainfall erosivity index, and the former is about 1.52 times larger than the latter. This study also reveals the annual rainfall erosivity index has an increasing tendency in the Watershed of Tseng-Wen Reservoir.

Key Words: pseudo rainfall erosivity index, rainfall erosivity index, climate change.

一、前言

地表土壤因為受到外力作用, 例如雨水、逕流及風力的剝蝕作用, 或著地震、海浪及溫度的衝擊與刺激作用, 造成固結土壤之鬆散、剝落與搬移之現象稱為「土壤沖蝕」。土壤沖蝕按照外力因素大致上可區分為: 水蝕 (water erosion)、風蝕 (wind erosion)、

冰蝕 (glacial erosion)、雪蝕 (snow erosion)、生物沖蝕 (organic erosion) 及其他外力沖蝕 (如地震)。最常見的是水蝕與風蝕。水蝕是由雨滴打擊地面及地表逕流作用而造成的, 風蝕則是由風吹動能所引起之土粒移動。土壤沖蝕本身是一種自然現象, 它是作用在土壤的外力 (土壤沖蝕力) 大於土壤自身抵抗力的結果。過度土壤沖蝕往往會造成土粒流失、土

成功大學水利及海洋工程學系

Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, Tainan 70101, Taiwan, R.O.C.

*Corresponding Author. E-mail address: cdjan@mail.ncku.edu.tw

壤劣化、土地貧瘠、生產力降低，甚至形成土砂災害。嚴重土壤沖蝕的地區，地表蝕溝遍佈，周圍的地下水位下降，土壤呈現較乾燥的現象；乾燥的表面土壤造成植生退化，致使土壤沖蝕現象更為激烈，甚至引發崩塌或土石流災害。被搬運的土壤進入河川系統後，容易造成河道淤積、水庫淤積及水質惡化的問題。台灣地區地質環境脆弱、河川坡度陡流急、降雨強度大、而且雨量多，因此地表的土壤沖蝕現象明顯，平均每年土壤沖蝕深度約 3~6 mm (Dadson *et al.*, 2003)。台灣中南部地區在 921 大地震及八八的衝擊之後，地表裸露地及鬆散土方大幅增加，土壤沖蝕問題將日益嚴重，因此我們必須重視土壤沖蝕的問題。

為了減少土壤沖蝕及水土流失對農業生產、環境生態及人民生活的衝擊，土壤沖蝕量的調查、推估、預測及適當的控制管理是非常重要的研究課題。準確的土壤沖蝕量推估與預測有助於人們對土地利用和管理的規劃 (Angima *et al.*, 2000)。土壤沖蝕量推估方法大致上可區分為兩大類，第一類是以土壤沖蝕機制基礎所建構之數學模式，例如 EUROSEM 模式 (Morgan, 1995)、WEPP 模式 (Flanagan and Nearing, 1995) 及 GUEST 模式 (Ciesiolka *et al.*, 1995)；另一類是依據土壤沖蝕現地實驗資料而建立的經驗公式，如通用土壤流失公式 (Universal Soil Loss Equation, USLE) 和修正通用土壤流失公式 (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE, Renard *et al.*, 1991 and 1997)。USLE 是降雨導致土壤沖蝕的經驗公式 (Wischmeier and Smith, 1978)，它具有結構單純及使用方便的優點，因此常被工程界廣泛的利用於土壤流失量的估算。

1. 通用土壤流失公式

USLE 公式是美國學者 Wischmeier and Smith (1958) 收集試驗田區許多實測土壤流失資料，經過統計分析，發展出一套估算土壤流失量的公式。USLE 包含降雨沖蝕指數、土壤沖蝕指數、坡長因子、坡度因子、覆蓋與管理因子及水土保持處理因子等六項。單位面積土壤沖蝕量 A (ton/ha) 是這些指數及因子的乘積，即

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

式中， R = 降雨沖蝕指數 (MJ-mm/ha-hr)； K = 土壤沖蝕性指數 (ton-hr/MJ-mm)； L = 坡長因子；

S = 坡度因子； C = 覆蓋與管理因子； P = 水土保持處理因子 (Wischmeier and Smith, 1958；Wischmeier *et al.*, 1958；Lin, 1988；吳嘉俊等，2004)。

USLE 公式中代表降雨作用對土壤沖蝕影響的指標是降雨沖蝕指數 R (Rainfall erosivity index)，它描述降雨和逕流對土壤沖蝕程度所造成的影響，是評估土壤沖蝕的重要指標。因為計算降雨沖蝕指數需要用到最大 30 分鐘降雨強度，為了與本文所提出的擬似降雨沖蝕指數 R_{60} 有所區隔，本文將降雨沖蝕指數 R 表示為 R_{30} 。

台灣降雨沖蝕指數的研究方面，黃俊德 (1979) 曾經依照 Wischmeier and Smith 對於 R_{30} 的定義，計算台灣地區的沖蝕指數分布，並建立台灣地區年平均降雨沖蝕指數等值線圖。考量降雨特性的變遷，盧光輝 (1999) 及盧昭堯 (2005) 曾經進行台灣降雨沖蝕指數圖的修定。由於降雨會受到大氣條件的支配，加上全球氣候變遷的結果，降雨型態和時空的分佈也會發生明顯的改變 (吳明進, 1994、許晃雄、柯文雄, 2000、姜善鑫、賴栗葦, 2003)。因此，為了掌握降雨沖蝕力對土壤的影響，有必要適時重新核算降雨沖蝕指數的變化。

依照原始定義，在計算降雨沖蝕指數時，需要使用雨量記錄時間間距三十分鐘以內之短研時雨量資料 (例如，每筆十分鐘雨量資料) 來進行計算。但是，有很多地區往往缺乏此種類型的雨量紀錄資料，而只有時雨量資料，甚至只有日雨量資料，造成降雨沖蝕指數計算上的困難。本研究以時雨量資料計算單場降雨的降雨動能及降雨沖蝕指數，如此計算所得降雨動能及降雨沖蝕指數稱為「擬似降雨動能」及「擬似降雨沖蝕指數」。然後，探討使用 10 分鐘和小時 (60 分鐘) 等兩種不同雨量資料，在降雨動能及降雨沖蝕指數計算結果之差異。

2. 降雨動能 E 及降雨沖蝕指數 R

Wischmeier and Smith (1958) 發現單場降雨的土壤流失量和降雨動能 E 及最大 30 分鐘降雨強度 I_{30} 之間存在著高度的相關性。單場降雨的降雨動能 E_j 計算方式為

$$E_j = \sum_{i=1}^{NT_j} (e_i P_{ij}) \quad (2)$$

E_j = 編號 j 單場降雨之降雨動能 (MJ/ha) ; e_i = 編號 j 單場降雨中第 i 時段的單位降雨動能 (MJ/mm-ha) ; P_{ij} = 編號 j 單場降雨中第 i 時刻的降雨量 (mm) ; NT_j = 編號 j 單場降雨中降雨時段數量, 它等於降雨延時除以時段間距; 例如, 降雨延時 10 小時, 時段間距 10 分鐘 (= 1/6 小時), $NT_j = 60$ 。

單場降雨的降雨沖蝕指數是指該場降雨的降雨總動能和該場降雨最大 30 分鐘降雨強度的乘積, 即

$$R_{30j} = E_j \times I_{30j} = \sum_{i=1}^{NT_j} (e_i P_{ij}) \times I_{30j} \quad (3)$$

其中 R_{30j} = 編號 j 單場降雨的沖蝕指數 (MJ-mm/ha-hr) ; E_j = 編號 j 單場降雨的降雨動能 (MJ/ha) ; I_{30j} = 編號 j 單場降雨中最大 30 分鐘降雨強度 (mm/hr)。因為計算前述降雨沖蝕指數需要用到最大 30 分鐘降雨強度, 為了與下一節的擬似降雨沖蝕指數 R_{60} 有所區隔, 本文將計算所得之沖蝕指數表示為 R_{30j} 。

關於前述單位降雨動能, Wischmeier and Smith 分析 Laws and Parson (1943) 的自然降雨雨滴粒徑大小分布資料, 並利用統計迴歸分析後建議下列經驗關係式

$$e_i = \begin{cases} 0.119 + 0.0873 \log I_i & \text{for } I_i < 76 \text{ mm/hr} \\ 0.283 & \text{for } I_i \geq 76 \text{ mm/hr} \end{cases} \quad (4)$$

上式中顯示降雨動能有隨降雨強度增加之趨勢, 但是在降雨強度超過 76mm/hr 後, 雨滴的中值粒徑並不會再增加, 單位降雨動能趨於固定值。此外, 利用降雨動能公式進行分析時, 由於並非每一場降雨都具有啓動沖蝕的能力, 故其所選取之降雨條件為 (1) 單場降雨累積雨量低於 12.7mm, 且與該場降雨間隔 6 小時以上無其他降雨, 則該場降雨的沖蝕力太小, 而不納入記錄 (2) 一場降雨雖然小於 12.7mm, 但若其 15 分鐘雨量達 6.35mm 以上時, 仍然具備有沖蝕力, 則應予以採用, 符合上述的降雨稱為有效降雨 (Wischmeier and Smith, 1958)。

如果某一地區編號 j 年中有 M_j 場降雨事件, 累加該年中每一場降雨事件的降雨沖蝕指數, 可計算得到該年的年降雨沖蝕指數 R_Y , 即

$$R_{30Y} = \sum_{j=1}^{M_j} R_{30j} \quad (5)$$

同理, 當以月或季為時間計算單位時, 可以計算月降雨沖蝕指數或季降雨沖蝕指數。

3. 擬似降雨動能 E_{60} 及擬似降雨沖蝕指數 R_{60}

如前所述, 在計算降雨沖蝕指數需要使用雨量記錄時間間距三十分鐘以內之雨量資料 (例如, 每筆十分鐘雨量資料) 來進行計算。但是, 有很多地區往往缺乏此種類型的雨量紀錄資料, 而只有時雨量資料, 甚至只有日雨量資料, 造成降雨沖蝕指數計算上的困難。然而, 時雨量資料遠比 10 分鐘雨量資料來的普遍, 尤其是歷史降雨資料。有些雨量站雖然已經有 10 分鐘雨量資料, 但是它的歷史降雨資料, 卻仍然是時雨量資料。因此, 如何以普遍較容易獲得的雨量記錄資料, 如時雨量資料, 進行歷年降雨沖蝕指數的推估計算, 進而分析其變遷, 是非常值得探討的課題。緣此, 本研究分析研究區域內 10 分鐘降雨資料和時雨量資料, 先以 10 分鐘降雨資料, 依照 Wischmeier and Smith 建議的方法計算單場降雨的降雨動能及降雨沖蝕指數; 然後, 再以時雨量資料替代 10 分鐘雨量資料, 以小時最大雨量 I_{60} 取代 30 分鐘最大雨量 I_{30} , 計算單場降雨的降雨動能及降雨沖蝕指數, 如此計算所得降雨動能及降雨沖蝕指數稱為「擬似降雨動能 E_{60} 」及「擬似降雨沖蝕指數 R_{60} 」。因此, 編號 j 單場降雨之擬似降雨沖蝕指數 R_{60} 可以寫成

$$R_{60j} = E_{60j} \times I_{60j} = \sum_{i=1}^{NT_j} (e_{60i} \times P_{ji}) \times I_{60j} \quad (6)$$

其中 R_{60j} = 編號 j 單場降雨的沖蝕指數 (MJ-mm/ha-hr) ; E_{60j} = 編號 j 單場降雨以時雨量資料計算的降雨動能 (MJ/ha) ; I_{60j} = 編號 j 單場降雨中最大 60 分鐘降雨強度 (mm/hr)。

關於單位降雨動能的計算以及有效雨場的判定方式, 則是根據前述 Wischmeier 和 Smith 的定義, 劃定出計算單場擬似降雨沖蝕指數 R_{60j} 的有效雨場後, 在再利用公式(4)計算出單位降雨動能。如果某一地區編號 j 年中有 M_j 場降雨事件, 累加該年中每一場降雨事件的擬似降雨沖蝕指數, 可計算得到該年的年擬似降雨沖蝕指數 R_{60Y} , 即

$$R_{60Y} = \sum_{j=1}^{M_j} R_{60j} \quad (7)$$

同理，當以月或季為時間計算單位時，可以計算月降雨擬似降雨沖蝕指數或季擬似降雨沖蝕指數。

二、研究區域與雨量資料

本研究以曾文水庫集水區為研究對象，收集集水區十分鐘雨量資料及時雨量資料，然後將十分鐘雨量資料計算所得降雨沖蝕指數和以時雨量資料計算所得的擬似降雨沖蝕指數進行比較，同時為了能夠區別兩者，本文後續均以 R_{30} 來代表利用 10 分鐘雨量資料所計算出的降雨沖蝕指數，以強調其最大降雨強度所考慮的時間間距為 30 分鐘。曾文水庫集水區主要位於嘉義縣內，橫跨大埔鄉、番路鄉、三民鄉及阿里山鄉。曾文水庫集水區呈斜長四邊形，除樂野、達邦、大埔等幾處小型盆地外，其餘均屬於山坡地及林班地範圍。區內平均高程約為 961 公尺，河源標高在 2600 公尺以上，平均坡度約為 51.6%。本區為副熱帶型氣候，降雨集中於每年的 5~10 月，年平均雨量為 2721 mm。其中的曾文水庫總容量為 7.127 億立方公尺，有效蓄水容量 5.955 億立方公尺（但由於受到歷年颱風降雨所攜帶之泥砂影響，以及莫拉克颱風的衝擊，有效蓄水容量下降為 4.7 億立方公尺），水庫水域面積為 17 平方公里，為台灣第一大之多目標功能水庫。曾文水庫集水區位於新第三紀沉積岩所組成之西部麓山帶地質區，其中達邦層、中崙層、烏嘴層主要出露於中、上游集水區，庫區附近則以澆水溪層及六重溪層為主。區內之地質構造以褶皺為主，有多條背斜與向斜通過（經濟部水利署南區水資源局，2008）。

考慮到雨量站架設以及雨量資料記錄的一致性，本文選取曾文水庫集水區內的水山、樂野、里佳、龍美、馬頭山和表湖等雨量站，並收集雨量站中的 10 分鐘和時雨量資料（時間為 1987~2002），再分別進行降雨沖蝕指數 R_{30} 以及擬似降雨沖蝕指數 R_{60} 的計算。雖然 RUSLE (Revised Universal soil loss equation, Renard *et al.*, 1991 and 1997) 認為將單位降雨動能公式改為指數函數的形式更能描述降雨強度和動能之間的關係，但考慮到公式的泛用性及水土保持技術規範的規定，本研究仍然採用 USLE 公式對於單位降雨動能公式的定義來計算一場降雨中的總降雨動能。圖 1 顯示本研究所選擇的雨量站在曾文水庫集水區的配置位置。

本研究將從水山、樂野、里佳、龍美、馬頭山和表湖等六個雨量站收集的十分鐘雨量資料和時雨量資料，根據 Wischmeier 和 Smith (1958) 對有效降雨

事件的定義來對雨量資料進行雨場的劃分，再將這些的降雨特性整理於表 1，表中顯示 1987~2002 年間最大的單場最大降雨量發生在民國 85 年 7 月 31 日賀伯颱風時期的里佳站，單場累積雨量高達 1780mm，而除了水山站的單場最大降雨量發生在民國 81 年 8 月的暴雨事件外，其它雨量站均發生於賀伯颱風時期。最大降雨延時各站均發生於 5、6 月的梅雨時期，最大延時為馬頭山站之 110 hr，最小為龍美站的 87 hr；單場最大時降雨強度於六個雨量站均發生在賀伯颱風時期，最大為 120 (mm/hr)，出現在樂野站，最小是里佳站的 76 (mm/hr)；單場最大降雨動能和降雨沖蝕指數除水山站出現在民國 81 年 (1992) 8 月的暴雨外，其餘的雨量站都紀錄於賀伯颱風時期，最大為里佳站的 476.88 (MJ/ha) 和馬頭山的 34923 (MJ-mm/ha-hr)，最小為水山站的 348.11 (MJ/ha) 和 34811 (MJ-mm/ha-hr)；年最大降雨沖蝕指數最大是里佳的 73489 (MJ-mm/ha-hr)，最小是表湖的 59937 (MJ-mm/ha-hr)，都發生在民國 85 年 (1996)。

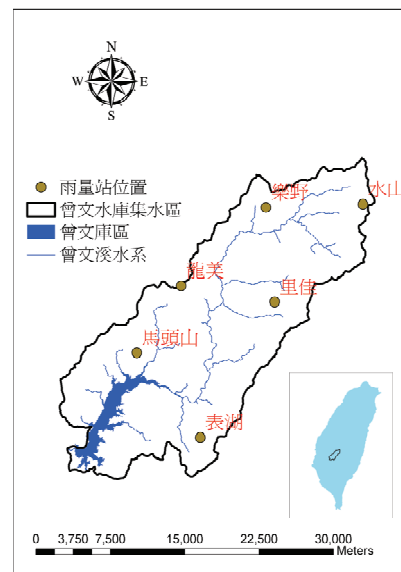


圖 1 曾文水庫集水區雨量站位置圖

Fig.1 Rainfall stations within the Watershed of Tseng-Wen Reservoir

三、結果與討論

由於時雨量資料為國際公定的雨量紀錄標準，加上小時雨量強度為以往多數雨量站的雨量記錄方式，

因此造成在歷史降雨沖蝕指數的計算及研究上造成很大的障礙點，爲了增加能取得之雨量資料年限、應用之便利性，本研究以時雨量資料進行有效雨場的判定後，計算單場降雨的總動能 E_{60} 、最大時降雨強度 I_{60} 、擬似降雨沖蝕指數 R_{60j} ，再比較同一場降雨事件下，以十分鐘雨量資料和以時雨量資料計算相同參數時所產生的差異和存在之關係，並了解總動能 E_{10} 和 E_{60} ，最大 30 分鐘降雨強度 I_{30} 和最大時降雨強度 I_{60} 等關係的變化對降雨沖蝕指數 R_{30j} 和擬似降雨沖蝕指數 R_{60j} 比例係數的影響和敏感程度，然後建立單場擬似降雨沖蝕指數 R_{60j} 推算單場降雨沖蝕指數 R_{30j} 的迴歸公式，接著利用反距權重法，找出年代表沖蝕指數 R_{30} 和年代表擬似降雨沖蝕指數 R_{60} ，探討兩者關係以期建立曾文水庫集水區年降雨沖蝕指數的推估公式。最後利用該推估公式對曾文地區降雨沖蝕指數 R_{30} 歷年的變化及變異情形進行分析探討。

1. 降雨動能 E_{60} 和 E_{10}

本研究依照 USLE (Universal Soil Loss Equation) 對單位降雨動能公式的定義，分別以十分鐘雨量資料和時雨量資料計算後，再將一場降雨內的單位動能進行累加，即可得到該場降雨的總動能 E_{10} 和 E_{60} 。將曾文水庫集水區內六個雨量站(水山、里佳、馬頭山、表湖、樂野、龍美)每一場降雨的 E_{10} 和 E_{60} 點繪於圖 2，根據統計迴歸分析的結果其關係式可以表示如下

$$E_{10} = 1.02E_{60} \quad (8)$$

顯示兩種雨量資料所計算的降雨動能存在高度的相關，資料點的分布集中，離散的程度極低，且兩個參數之間的能量比例係數 α_E 接近 1，說明不同的雨量資料對於總動能的結果影響不大，但是大致上來說，以時雨量資料計算的降雨動能 E_{60} 會比以十分鐘雨量資料計算的降雨動能 E_{10} 小。比較不同雨量站發現(如圖 3)，能量比例係數在各站之間略有變動，介於 1.02~1.04，最大值出現在龍美站，最小值出現在水山站，說明了在空間上係數會有稍微的改變，但是仍在可以接受的範圍內，表示兩個參數之間確實是存在高度的相關，究其原因，本研究所比較的 E_{10} 和 E_{60} 均是爲同一場降雨，故總雨量值都是一樣的，但是由於雨量資料記錄的單位時間不同，而時雨量資料相當於六筆十分鐘雨量資料的累加，累加後的資料和未經

累加的資料帶入單位降雨動能公式時，便會因爲其指數函數形式造成計算結果的些微差異，加上當降雨強度超過 76 mm/hr，降雨動能便不會再增大，使得兩個參數值會更爲接近，因此使用不同單位時間的雨量資料來計算單場降雨動能時，並不會對其結果造成太大的影響。

2. 最大 30 分鐘降雨強度 I_{30} 和最大時降雨強度 I_{60}

最大 30 分鐘降雨強度爲降雨沖蝕指數中代表降雨對土壤的瞬間衝擊能力，不過由於需要 10 分鐘或是更短延時的雨量紀錄資料才能夠獲得，往往因爲缺乏資料造成計算上的窒礙難行。本文蒐集研究區域內的雨量資料，找出最大 30 分鐘降雨強度和最大時降雨強度，並將其點繪於圖，以找出兩者之間的關係。圖 4 爲曾文溪集水區最大 30 分鐘降雨強度 I_{30} 和最大時降雨強度 I_{60} 的關係散佈圖，兩邊的虛線(A)爲資料點變動範圍，可將其表示爲 $I_{60} \leq I_{30} \leq 2I_{60}$ ，若降雨越集中於 30 分鐘內降完，則 I_{30} 越接近 2 倍的 I_{60} ，反之若降雨的分布越均勻，則 I_{30} 便會越接近 I_{60} ，而從資料點的分布情形也可發現，較小的瞬時降雨強度容易與包絡線接觸，但是在 I_{30} 超過 50 (mm/hr) 的降雨事件中，資料點多集中在兩條包絡線中間的位置，主要原因可能是因爲在自然的降雨事件中，較難出現在短短的 30 分鐘內一次累積極高的雨量但是其前後時間均沒有降雨的情況，故在 I_{30} 較低的時候才會出現兩個最大降雨強度之間比例較大的情形，即 $I_{30} = 2I_{60}$ ，但是在高瞬時強度的降雨事件中，如颱風降雨，其整段時間序列都處於高強度的降雨，以整場事件而言，不易出現降雨分配極端不均的現象，故其 I_{30} 和 I_{60} 時之間的比例便會略爲縮小，而大多出現在中間的區域。本研究同時以統計迴歸的方式企圖找出兩者的關係式，結果發現在曾文水庫集水區 $I_{30} = 1.45I_{60}$ ，且由於同一場事件中的最大 30 分鐘降雨強度和最大時降雨強度通常在同一時刻發生，此種特性也反映在兩者的相關度上，相關係數高達 0.97，同時比較不同的雨量站結果發現，各站之間的強度比例係數 α_E 變動不大，介於 1.41~1.51 (如圖 5)，最大值出現在里佳站和樂野站，最小值出現在水山站，顯示里佳和樂野兩站的降雨分布均較爲集中，而水山站則呈現較爲均勻的現象。

表 1 曾文水庫集水區各雨量站降雨特性之比較

Table 1 Rainfall characteristics of 6 rainfall stations in the Watershed of Tseng-Wen Reservoir

雨量站	雨量資料 期限	單場最大 降雨量 (mm)	單場最大 降雨延時 (hr)	單場最大 時降雨強度 (mm/hr)	單場最大降 雨動能	單場最大 降雨沖蝕 指數	最大年降雨 沖蝕指數
水山	1987~2002	1336	106	85	348.11	34811	69704
樂野	1987~2002	1742	107	120	465	39661	66335
里佳	1987~2002	1780	108	76	476.88	31502	73489
龍美	1987~2002	974	87	88	381.37	21509	59263
馬頭山	1987~2002	930	110	80	348.53	34942	69880
表湖	1987~2002	1342	101	100	361	33537	59937

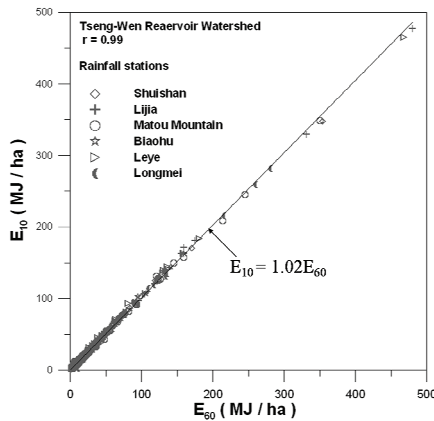


圖 2 曾文水庫集水區歷次降雨之降雨動能 E_{10} 與 E_{60} 之比較

Fig.2 Comparison of the rainfall kinetic energy calculated by 10-min and hourly rainfall data (E_{10} and E_{60}) in the Watershed of Tseng-Wen Reservoir

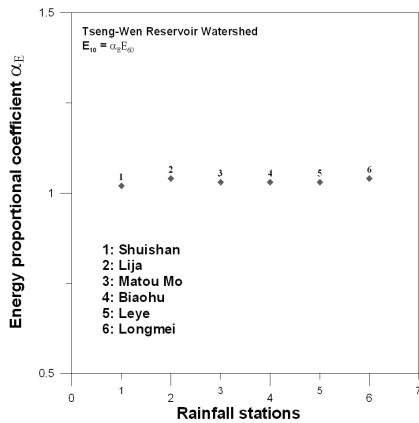


圖 3 六個雨量站的降雨能量比例係數 α_E

Fig.3 Rainfall energy proportional coefficient α_E at six different rainfall stations

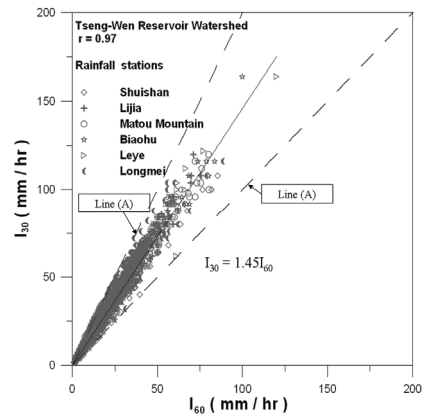


圖 4 最大 30 分鐘降雨強度 I_{30} 和最大 60 分鐘降雨強度 I_{60} 的關係

Fig.4 Comparison of the maximum 30-minute rainfall intensity I_{30} and the maximum hourly rainfall intensity I_{60}

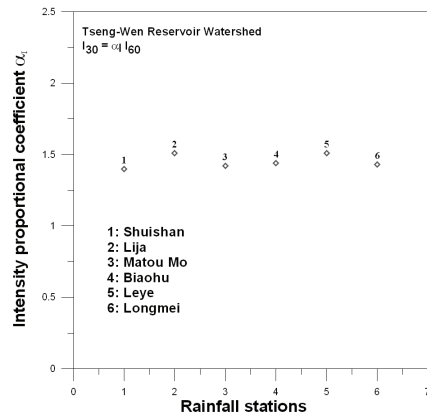


圖 5 曾文水庫集水區六個雨量站的降雨強度比例係數 α_I

Fig.5 Rainfall intensity proportional coefficient α_I at six different rainfall stations

3. 單場降雨沖蝕指數 R_{30j} 和單場擬似降雨沖蝕指數 R_{60j}

在以 USLE 估算水區土壤沖蝕量的時候，由於十分鐘或更短延時雨量資料的缺乏，造成歷年變化造分析上的阻礙，因此工程上常以年平均的方式來描述一個地區的土壤沖蝕量。然而，一場颱風或暴雨事件產生的土砂量通常是工程評估的重點，卻往往與年平均值存在著顯著的差異，因此有必要對單場降雨事件的降雨沖蝕指數進行分析。在根據前面兩節的討論中我們可以發現，當利用不同的雨量資料計算同一場降雨事件的降雨動能時，兩者差距小且比例於動能越大時越接近 1，故應以直線來表示兩種降雨動能之間的關係，而在最大 30 分鐘降雨強度 I_{30} 和最大時降雨強度 I_{60} 關係的方面，以直線表示亦較為合理，因為若以曲線來表示，該推算公式則會在高強度的時候超越包絡線，而與實際的物理現象不符，因此我們可以將降雨沖蝕指數表示為：

$$R_{30j} = E_{10j} \times I_{30j} = (\alpha_E E_{60}) \times \alpha_I I_{60} = \alpha_E \alpha_I E_{60} I_{60} \quad (9)$$

若將係數 $\alpha_E \alpha_I$ 簡化為 α_{Rj} ，即可將公式(9)改寫為

$$R_{30j} = \alpha_{Rj} R_{60j} \quad (10)$$

由公式(10)可知單場降雨沖蝕指數 R_{30j} 和當場擬似降雨沖蝕指數 R_{60j} 之間為線性關係。由圖 2 和圖 4 可知 $\alpha_E = 1.02$ 及 $\alpha_I = 1.45$ ，兩者係數相乘得到 $\alpha_{Rj} = 1.48$ ，即

$$R_{30j} = 1.48 R_{60j} \quad (11)$$

若直接由關係式(10)，將研究區域內所收集到的十分鐘雨量資料和時雨量資料對所有降雨事件中之 R_{30j} 和 R_{60j} 分別計算後，再配合統計迴歸分析找出兩者之間的比例係數 α_{Rj} 。結果顯示，在單場事件中，降雨沖蝕指數 R_{30} 和擬似降雨沖蝕指數 R_{60} 具有高度的相關性，相關係數高達 0.98，說明了在同一場降雨中，以 R_{60j} 來描述 R_{30j} 是合理的，且從資料點的分布情形來看，確實兩者的關係應該以直線來表示，同時也印證了公式(9)和(10)的結果。故我們可以將曾文水庫集水區的單場降雨沖蝕指數 R_{30j} 和擬似降雨沖蝕指數 R_{60j} 經驗式表示為：

$$R_{30j} = 1.46 R_{60j} \quad (12)$$

圖 6 為研究區域內各雨量站單場降雨沖蝕指數 R_{30j} 和單場擬似降雨沖蝕指數的關係散佈圖。圖 7 為 6 個雨量站經過分析後所得公式(11)中的沖蝕比例係數 α_{Rj} ，由圖中可知各雨量站之係數 α_{Rj} 存在些微差異，其值介於 1.42~1.6 之間，且最小的出現在水山站，最大的出現在樂野站，其變化情形與圖 5 相似，顯現降雨集中程度對待定係數的影響較具有敏感性，而不同雨量資料的降雨動能差異較小，對於 α_{Rj} 的影響力較低，此外圖 7 中各雨量站之間的標準差僅 0.06，說明了空間並不是影響關係式主要的決定因素，不同的雨量站和地區並不會造成係數大幅度的改變，而只會產生小範圍的跳動。

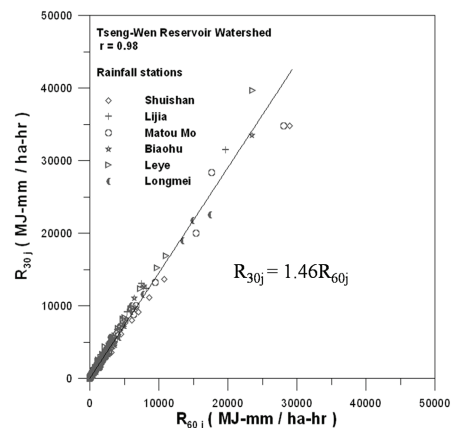


圖 6 單場降雨之降雨沖蝕指數 R_{30j} 和擬似降雨沖蝕指數 R_{60j} 的關係

Fig.6 Relationship between the rainfall intensity R_{30j} and R_{60j} for each rainfall events

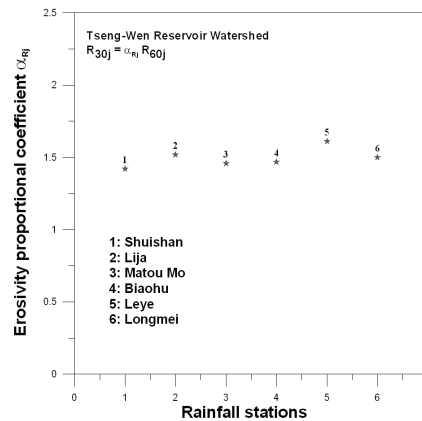


圖 7 六個雨量站的降雨沖蝕指數比例係數 α_{Rj}

Fig.7 Erosivity proportional coefficients α_{Rj} at six different rainfall stations

4. 年降雨沖蝕指數 R_{30} 和年擬似降雨沖蝕指數 R_{60}

爲了增加推估模式的便利性、應用性以及快速性，本文亦針對年降雨沖蝕指數 R_{30} 和年擬似降雨沖蝕指數 R_{60} 的分析及探討。首先，若將一年中所有降雨場次的 R_{30j} 和 R_{60j} 進行累加則可將公式(11)改寫爲

$$\sum_{j=1}^{T_i} R_{30j} = \sum_{j=1}^{T_i} (\alpha_{R_j} R_{60j}) \tag{13}$$

假設 α_{R_j} 爲一定值，故將其提出可以得到

$$\sum_{j=1}^Y R_{30j} = \alpha_{R_j} \sum_{j=1}^Y (R_{60j}) \Rightarrow R_{30} = \alpha R_{60} \tag{14}$$

公式(14)即爲年降雨沖蝕指數和年擬似降雨沖蝕指數的關係式。接著本研究進行研究區域內各雨量站年 R_{30} 和年 R_{60} 的計算，再利用反距權重法找出代表值，最後將其點繪於圖以建立兩者之間的關係。從圖 8 中可以發現，降雨沖蝕指數 R_{30} 和擬似降雨沖蝕指數 R_{60} 在年的時間尺度上相依程度高，相關係數均達到 0.98，且變化趨勢良好，幾乎是 R_{60} 越大，所伴隨的 R_{30} 就越大，顯示 R_{60} 對於 R_{30} 有著相當程度的掌握能力。曾文水庫集水區的年降雨沖蝕指數和年擬似降雨沖蝕指數的關係式可以表示爲：

$$R_{30} = 1.52R_{60} \tag{15}$$

各雨量站的係數 α 標示於圖 9，主要介於 1.45~1.62 之間，最大的 1.62 出現在樂野站，最小的 1.45 出現在水山站，且其變異情形和單場降雨事件尺度下的 α_{R_j} 一樣，顯示將其假設爲定值是成立且可行的，只是因爲當利用迴歸分析來找尋最佳直線時，會因爲統計的關係而產生些微的差異（差異僅 0.06）。

5. 年降雨沖蝕指數 R_{30} 的變化

雖然除了降雨因子外，仍有許多因子會對土壤沖蝕量造成影響，但是分析降雨沖蝕指數的歷年變化，有助於了解在氣候變遷情境下對土壤沖蝕的影響。以時雨量資料推估降雨沖蝕指數，可以解決因爲十分鐘或更短延時雨量記錄資料的缺乏，而造成算降雨沖蝕指數困難的問題，也較能夠掌握瞬時降雨強度對土壤沖蝕的影響，故本研究以該推估模式爲基礎，探討曾文水庫集水區鄰近地區歷年年降雨沖蝕指數的變異情形。

在歷年趨勢分析之部分，本研究選取鄰近的阿里山、玉山、嘉義和台南等四個氣象局雨量站 1969~2009 年共 40 年的時雨量資料，並利用 5 年移動平均法了解大範圍區域的降雨沖蝕指數變異情形。四站歷年年降雨沖蝕指數趨勢變化如圖(10)所示。

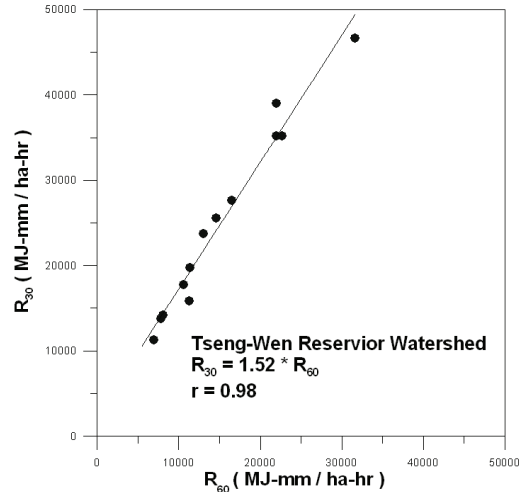


圖 8 曾文水庫集水區年降雨沖蝕指數 R_{30} 和年擬似降雨沖蝕指數 R_{60} 的關係

Fig.8 Relationship of the annual R_{30} and the annual R_{60} in Tseng-wen Reservoir watershed

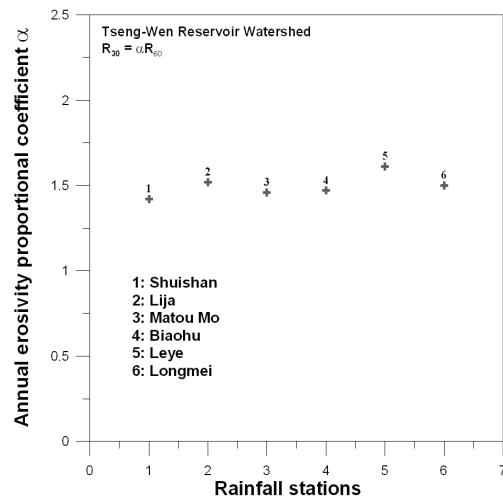


圖 9 曾文水庫集水區六個雨量站的年降雨沖蝕指數比例係數 α

Fig.9 The annual erosivity proportional coefficients α at six different rainfall stations

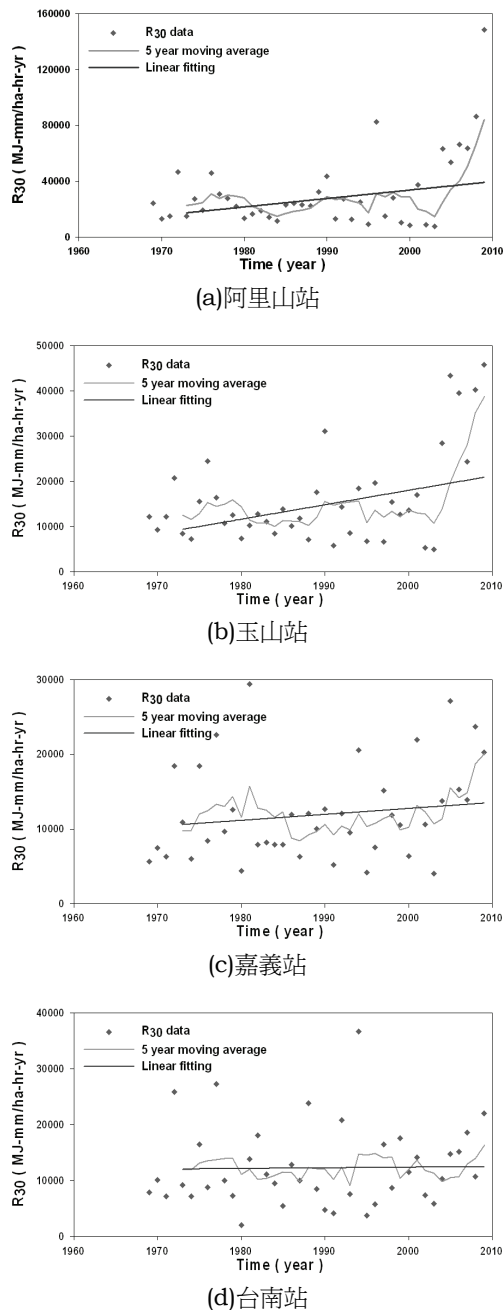


圖 10 歷年降雨沖蝕指數變異趨勢
Fig.10 Trend analysis of annual rainfall erosivity index

以趨勢變化而言，四個站都是呈現上升的狀態，但從歷年的變化來看，阿里山站的降雨沖蝕指數在 1980s 初期有略為下降，但在中期過後就開始呈現穩定的成長，而在 2003 過後的最近 7 年之間急速上升，尤以 2009 年為歷史之最。而玉山站則是以十年為一

個周期的變化，分別在 1970~1980、1980~1990、1990~2000 之前呈現高低、高低的情形，但在之後也是急遽上升的現象，2009 年亦為歷年之最。嘉義站除了在 1980 年初期略微下降外，其後主要呈現逐步上升的趨勢，而台南站僅有些微的上升，一直以來都是存在於一個較為穩定的狀態。

為了瞭解降雨沖蝕指數在四個氣候站的變遷程度，本研究同時使用了 Mann-Kendall 法進行長時間序列的趨勢檢定。Mann-Kendall 法已經被廣泛的利用在評估長時間系列資料在趨勢上的顯著程度，此種方法能夠針對時間序列資料做趨勢的檢定，並且可以改善資料缺漏和低於偵測值的問題。其計算方式表示如下：

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & , s > 0 \\ 0 & \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & , s < 0 \end{cases} \quad (16)$$

其中，S 為一統計值，Var(s)為序列資料的變異數，Z 即為時間序列的檢定值，當 Z 大於零為正向趨勢而小於零則為負向趨勢，且若 $-Z_{\alpha/2} < Z < Z_{\alpha/2}$ ，則表示資料呈常態分布而未有顯著性的改變，虛無假設 H_0 將被接受；反之若 $Z < -Z_{\alpha/2}$ 或 $Z > Z_{\alpha/2}$ ，則虛無假設將被拒絕，表示資料有發生重大、顯著性的改變。當 $\alpha = 5\%$ 的時候， $|Z_{\alpha/2}|$ 會等於 1.96。阿里山、玉山、嘉義和台南等站的 Mann-Kendall 趨勢檢定分別表示在表 2。

在趨勢檢定的部份我們可以發現，阿里山站 1.31、玉山站 1.82、嘉義站 1.99，以及台南站 0.97，四個站都是呈現上升的趨勢，嘉義站上升的幅度最大，同時也已經達到了拒絕虛無假設的標準，顯示嘉義站的歷年年降雨沖蝕指數有發生顯著性的變遷，而四站中以台南站上升的幅度最小，與前述的五年移動平均法結果類似，顯示曾文附近地區的降雨沖蝕能力確實有發生變異的情形，而且是呈現出一個上升的狀態。

四、結論與建議

本研究以曾文水庫集水區為例，建立以時雨量資料推估降雨沖蝕指數的經驗式，最後再提出其應用方式，以提供工程師或是後續研究的參考，所得結論與建議如下：

表 2 Mann-Kendall 趨勢檢定之結果

Table 2 Mann-Kendall testing results (Z value) for annual rainfall erosivity index

Stations	Ali-Shan	Yu-Shan	Chia-Yi	Tainan
Year	1969~2009	1969~2009	1969~2009	1969~2009
R	31769	16175	12186	12425
Z	1.31	1.82	1.99	0.97

1. 結論

- (1) 本研究以曾文水庫集水區十分鐘雨量資料和時雨量資料分別計算所得之降雨動能 E_{10} 及 E_{60} ，發現其關係可以表示為 $E_{10} = 1.02E_{60}$ ，相關係數達 0.99。曾文水庫集水區最大 30 分鐘降雨強度 I_{30} 和最大時雨量強度 I_{60} 也有很密切之關係，他們的關係可以表示為 $I_{30} = 1.45I_{60}$ 。
- (2) 根據統計迴歸分析發現曾文水庫集水區單場的降雨沖蝕指數和單場的擬似降雨沖蝕指數之關係可以表示為 $R_{30j} = 1.46R_{60j}$ ，而年降雨沖蝕指數和年擬似降雨沖蝕指數之關係為 $R_{30} = 1.52R_{60}$ 。
- (3) 在歷年年降雨沖蝕指數趨勢變異分析上，根據五年移動平均法可以知道，位於曾文水庫集水區內的阿里山站，及鄰近的玉山、嘉義站和台南站均呈現上升的趨勢，尤以近幾年上升的幅度較大，同時本研究也利用 Mann-Kendall 趨勢檢定法來判斷各站年降雨沖蝕指數的變異程度，發現阿里山、玉山、嘉義和台南等站的檢定值分別為 1.31、1.82、1.99 和 0.97，都是呈現正向趨勢，其中嘉義站達到顯著性變遷的水準，而台南站變化的幅度最小。研究結果顯示曾文地區的降雨沖蝕指數有發生變遷的現象，而部分區域則有重大、顯著性的改變，勢必對土砂災害的行為造成影響。

2. 建議

根據本研究的成果，未來將可運用本研究之分析結果對其它集水區進行降雨沖蝕指數推估，尤其在分鐘雨量資料不連續、遺缺情況下，是一個可行且便利的具體方法。在目前氣候變遷的議題下，若想要了解台灣集水區歷年降雨沖蝕指數變化及土壤沖蝕量的變異情形，運用本研究之成果將可適切掌握降雨沖蝕指

數的變異趨勢。

五、謝 誌

本研究為國科會 NSC 97-2625-M-006-015 研究計劃之部分成果，謹此致謝。

符號表

- E_{10} = 單場降雨動能 (以 10 分鐘雨量資料計算) (MJ/ha)
- E_{60} = 單場降雨動能 (以時雨量資料計算) (MJ/ha)
- I_{30} = 最大 30 分鐘降雨強度 (mm/hr)
- I_{60} = 最大時降雨強度 (mm/hr)
- R_{30j} = 單場降雨沖蝕指數 (MJ-mm/ha-hr)
- R_{60j} = 單場擬似降雨沖蝕指數 (MJ-mm/ha-hr)
- R_{30} = 年降雨沖蝕指數 (MJ-mm/ha-hr)
- R_{60} = 年擬似降雨沖蝕指數 (MJ-mm/ha-hr)
- a_E = 降雨能量比例係數
- a_I = 降雨強度比例係數
- a_{Rj} = 降雨沖蝕指數比例係數
- a = 年降雨沖蝕指數比例係數
- Z = Mann-Kendall 檢定值

參考文獻

- 吳明進 (1994)，「台灣的氣溫和降水之長期變化」，科學月刊，25(2):122-126。
- 吳嘉俊、盧光輝、林俐玲 (2004)，「土壤流失量估算手冊」，國立屏東科技大學。
- 南區水資源局 (2008)，「曾文水庫集水區水文量測及保育防災監測計畫」成果報告，經濟部水利署。
- 姜善鑫、賴栗葦 (2003)，「台灣地區降雨變遷之研究」，中華水土保持學報，34(2):161-170。
- 許晃雄、柯文雄 (2000)，「台灣環境變遷與全球環境變遷衝擊之評估分析-氣候變遷 (II)」，行政院國家科學委員會專題研究成果報告。

- 黃俊德 (1979), 「台灣降雨沖蝕指數的研究」, 中華水土保持學報, 10(1):127-144。
- 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。
- 盧昭堯、蘇志強、吳藝芸 (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。
- Angima, S. D., M.K. O'Neill, A.K. Omwega, and D.E. Stott (2000), "Use of tree/grass hedges for soil erosion control in the Central Kenyan Highlands," *Journal of Soil and Water Conservation*, 55, 478-482.
- Ciesiolka, C.A., K.J. Coughlan, C.W. Rose, M.C. Escalante, G.M. Hashim, E.P. Paningbatan Jr, and S. Sombatpanit (1995), "Methodology for a multi-country study of soil erosion management," *Soil Technology*, 8, p.179-192
- Dadson, S. J., H. Niels, H. Chen, D. W.Brian, M.L. Hsieh, D.W. Sean, J.C. Hu, M.J. Horng, M.C. Chen, P.S. Colin, L. Dimitri, and J.C. Lin, (2003), "Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen," *Nature*, 426, p.648-651.
- Flanagan, D.C., and M.A. Nearing (1995) USDA Water erosion prediction project (WEPP). WEPP user summary, NSERL report no. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN.
- Laws, J.O., and D.A. Parsons (1943), "The relation of rain drop size to intensity," *Transactions, American Geophysical Union*, 24, pp. 452-460.
- Lin, L.L. (1988) "Literature Review of Wischmeier Universal Soil Loss Equation" *Journal of Soil and Water Conservation*, 20:97-106.
- Morgan, R.C.P. (1995), "The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments," *Earth Surface Process and Landforms*, 23, pp.527-544.
- Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, and J.P. Porter (1991). "RUSLE. Revised Universal Soil Loss Equation," *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, pp. 30-33.
- Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, and D.C. Yoder (1997). "Predicting soil erosion by water—a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)," *United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service (USDA-ARS) Handbook No. 703*, United States Government Printing Office, Washington, DC.
- Wischmeier, W.H., D.D. Smith, and R.E. Umland (1958), "Evaluation of factors in the soil loss equation," *Agricultural Engineering*, 39, pp. 458-462.
- Wischmeier, W.H., and D.D. Smith (1958), "Rainfall energy and its relationship to soil loss." *Transactions American Geophysics Union*. 39, pp. 285-291.
- Wischmeier, W. H., and D.D. Smith (1978), "Predicting rainfall erosion losses-Aguide to conservation planning," U.S. Department of Agriculture, *Agricultural Handbook No. 282*.

2010年7月26日 收稿

2010年9月27日 修正

2010年10月18日 接受

(本文開放討論至2011年6月30日)