

屏東老埤地區雨滴特性及降雨動能分析

江介倫^[1] 陳國銘^[2] 吳宜倩^[3]

摘要 本研究採用雷射雨滴譜儀取得屏東老埤地區逐分降雨資料，並撰寫自動化計算程式快速處理龐大的降雨資料，藉此解決人工無法精確處理每筆降雨資料而造成的人為誤差(Personal Equation)，並由雨滴之粒徑與速計算降雨動能，再與依通用土壤流失公式(USLE)計算所得之降雨動能比較、分析其差異。

本研究分別以颱風、對流雨、梅雨三種不同降雨型態作為比較，結果發現不同於 USLE 所計算之結果，由物理動能公式($\frac{1}{2}mv^2$)計算之降雨動能在降雨強度大於 76mm/hr 時仍持續上升。且降雨強度較低的梅雨之實際降雨動能，明顯較以 USLE 計算之降雨動能低；而降雨強度較高的颱風、對流雨等之實際降雨動能，較接近 USLE 計算之降雨動能。

關鍵詞： 降雨動能、雷射雨滴譜儀、通用土壤流失公式

Analysis of raindrop characters and rainfall kinetic energy in Lao-Pi Pingtung

Chiang, Jie-Lun ^[1*] Chen,Guo-Ming ^[2] Wu, Yi-Chien ^[3]

Abstract the minute rainfall data in Lao-Pi in Pingtung. It can calculate huge rainfall data with self-developed automation program by using random samplings to solve the Sampling Errors which are unable to be manually calculated. For the better accuracy, we used the minute rainfall data to get the unit rainfall kinetic energy and Rainfall in order to calculate the rainfall kinetic energy. Then, we compared and analyzed the differences from USLE and the kinetic energy formula ($\frac{1}{2}mv^2$).

We compared the typhoon, convective rain and plum rain. From the results, we found that, different from USLE, the rainfall intensity continues to rise when it is greater than 76mm/hr by kinetic energy formula; the kinetic energy from plum rain which has lower moment rainfall intensity is lower, that is less than the results calculated from the USLE; the kinetic energy from typhoon and convective rain which has the higher moment rainfall intensity approaches the results calculated by USLE.

Key Words: Kinetic Energy · Laser Precipitation Monitor · Universal Soil Loss Equation

一、前言

台灣本島受造山運動影響，中央山脈地形陡峭、沿岸平原狹窄，可開發土地資源十分有限，隨著農業、休閒、居住等各項土地需求之增加，山坡地不當開發之情況日益嚴重，山坡地整治規劃也逐漸受到重視，而山坡地土壤流失估算方法，大多採用 Wischmeier & Smith 於 1958 年整理、分析全美 21 州 36 地，超過 7500 個標準試驗區年(standard plot-year)及 500 個集水區年(watershed-year)的資料，所提出之通用土壤流失公式(Universal Soil Loss Equation, USLE)。

USLE 自 1958 年提出以來，經美國農部無數次修正後於 1978 年完成，由於參數簡單、使用便利，為目前世界上應用最廣泛的土壤流失估算公式，其公式如下：

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

其中：

A=每年每公頃的土壤沖蝕量(ton/ha-yr)，

R=降雨沖蝕指數(Rainfall Erosivity Index；MJ-mm/ha-hr-yr)，

K=土壤沖蝕性指數(Soil Erodibility Index；ton-hr/MJ-mm)，

L=坡長因子(Slope Length Factor；無因次)，

S=坡度因子(Slope Steepness Factor；無因次)，

C=作物與管理因子(Crop and Management Factor；無因次)，

P=水土保持處理因子(Conservation Practice Factor；無因次)。

降雨沖蝕指數(R 值)為降雨沖蝕潛能重要的定量指標，降雨沖蝕指數乃是降雨動能(Kinetic Energy of Rainfall)與最大三十分鐘降雨強度(I_{30})的乘積，其計算式如下：

$$R = E \times I_{30} \quad (2)$$

式中降雨動能 E 為單位降雨動能(em)與單位時間降雨量(P)之乘積總和：

$$E = \sum(em \times P) \quad (3)$$

式中單位降雨動能的計算方式為使用 Wischmeier & Smith 所推導之經驗公式：

$$\left. \begin{aligned} em &= 0.119 + 0.0873 \times \log I, & I < 76\text{mm/hr} \\ em &= 0.283, & I \geq 76\text{mm/hr} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中降雨強度大於 76mm/hr 時，單位降雨動能即為定值 0.283，動能不再隨降雨強度增加而上升並不符合動量守恒定律，加上 USLE 所使用之資料背景為地處大陸型氣候之美國本土降雨資料，應用於海島型氣候之臺灣是否合適，仍有待試驗。

[1] 屏東科技大學水土保持系副教授 (E-Mail: jchiang@mail.npust.edu.tw)

Associate Professor, of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung 912, Taiwan.

[2] 屏東科技大學水土保持系專題生

Undergraduate Student, of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung 912, Taiwan.

[3] 屏東科技大學水土保持系研究生

Graduate Student, of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung 912, Taiwan.

二、文獻回顧

1. 不同雨滴粒徑收集方法之研究

張文詔(1994)以高速攝影法(Photographic method)配合定量人工降水，取得不同體積水滴落下時之粒徑與速度關係。

Thumree Sarkar 等人(2015)以 Joss-Waldvogel disdrometer、微波降雨雷達(Micro rain radar)及雷射雨滴譜儀(Laser precipitation monitor)三種儀器同時收集雨滴資料，分析後發現降雨強度低於 30mm/hr 時三種儀器收集之粒徑一致，降雨強度大於 30mm/hr 之雨滴數據一致性並不高，並且指出雷射雨滴譜儀可能有高估 4-6mm 以上粒徑之疑慮。

2. 有效降雨及不同降雨型態之研究

C.S Chen 等人(2003)以冬季 12 月 1 日~2 月 28 日、春季 3 月 1 日~5 月 15 日、梅雨季 5 月 16 日~6 月 30 日、颱風季 7 月 1 日~8 月 31 日、秋季 9 月 1 日~11 月 30 日來作為台灣地區不同降雨型態之分類依據。

楊文仁等人(2007)蒐集台灣北部地區氣象站 26 年的雨量資料，以兩種排放情境模擬器後變遷，研究顯示未來氣候變遷對台灣北部有效降雨影響不大，反而對月平均有效降雨影響較大。

連琮勛等人(2013)以月分區不同類型降雨型態，鋒面雨 11 月至 4 月、梅雨 5 月至 6 月、颱風 7 月至 10 月中央氣象局公佈之颱風事件、夏季對流 7 至 10 月，研究時雨量空間分佈特性。

3. 降雨、降雨動能之研究

吳嘉俊等人(1996)以污點法(Stain method)收集人工降雨雨滴粒徑，並以中值粒徑估算降雨動能，與 Wischmeier & Smith 及 McGregor & Mutchler 兩種降雨動能公式比較，發現在不同降雨強度下之估算各有優劣。

范正成等人(2009)收集中央氣象局台北站年雨量資料，以迴歸分析建立降雨沖蝕指數推估公式，研究顯示，此模式能準確的模擬降雨沖蝕指數的情形，並且提供可靠的預測能力。

4. USLE 相關研究

梁惠儀等人(2010)於石門水庫現地設置沖蝕針，以 2008 年辛樂克及薔蜜颱風為例，應用 USLE 計算其土壤沖蝕量，並加以說明極端天氣對集水區管理之重要性。

何幸娟等人(2012)透過現場時雨量資料並配合 MUSLE 公式探討年降雨沖蝕量與單場降雨事件之沖蝕量的差異，並透過現場沖蝕針監測顯示經驗推估結果與現地狀況符合。

周佳翰等人(2014)以雷射雨滴譜儀取得中值粒徑 D50 資料，以回歸方式得中值粒徑及強度之乘羈關係，並與多位學者之中值粒徑-強度曲線比較，發現現 2014 年濕季屏東自然降雨之雨滴中值粒徑曲線與 Laws 等人於 1943 年所得曲線相似。

三、材料與方法

1. 降雨資料之收集

本研究採用德國 Thies Clima 公司，雷射面積 228mm*20mm 之雷射雨滴譜儀(圖 1) 架設於屏東科技大學

水土保持系屋頂空曠處，全天候收集自然降雨資料，記錄每分鐘降雨量、降雨強度、雨滴譜等資料。



圖 1、雷射雨滴譜儀

本研究使用之雷射雨滴譜儀所記錄雨滴譜資料實際有效範圍為雨滴粒徑 0.125mm 至 8mm、雨滴速度 0m/s 至 10m/s，每分鐘共包含 440 筆雨滴顆粒數資訊。

2. 降雨資料之處理

本研究以 2013 年 11 月至 2015 年 10 月之降雨資料，依據 Wischmeier and Smith (1978)有效降雨之定義分別雨場，其定義為：

- (1)單場降雨之累積降雨量超過 12.7mm
- (2)或於 15 分鐘內降下 6.35mm 以上之雨量
- (3)且該場降雨與前一場降雨間隔超過六小時 (圖 2)

期間共累積 93 場有效降雨，降雨延時共 79,680 分鐘之降雨資料作為研究分析之基底資料(去除動能小於 0.000001 之趨近於零資料、降雨強度大於儀器偵測範圍 250mm/hr 之數據後，約有 75,388 筆每分鐘降雨資料)，以本研究室研發之自動化程式(以 C++ 程式語言之 fscanf 及 getline 函數讀取不定格式之原始數據檔案)取得該場降雨之降雨強度(Rainfall Intensity)及單位時間降雨量(Precipitation)，計算 USLE 降雨動能；並取得每分鐘雨滴譜資料，透過物理動能公式計算該場降雨之真實動能。

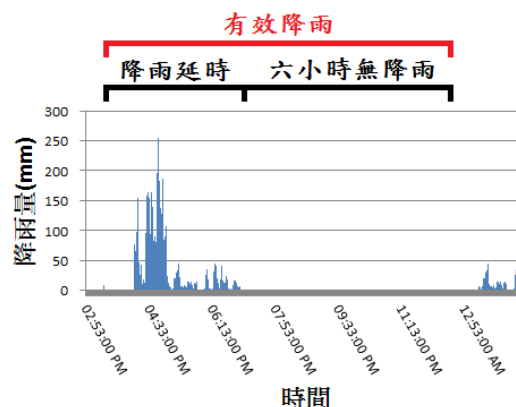


圖 2、單場有效降雨

參考 C.S Chen 等人(2003)、連琮勛等人(2013)之降雨型態分類方式，考量降雨延時、日期、是否為雷雨等條件判

斷該場降雨之降雨型態，並將每分鐘雨滴譜資料依體積向下累積百分比挑選 D10、D20、D30、D40、D50、D60、D70、D80、D90 九項不同百分比粒徑分佈及雨滴最大速度、最大粒徑。

3.物理動能公式動能之計算

藉雨滴譜儀能記錄不同速度一 粒徑下兩滴顆粒數之特性，本研究以物理動能公式

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5)$$

m =質量(kg)，

v =速度(m/s)。

式中質量計算方法為

$$m = D \times V \quad (6)$$

D =密度(本研究以純水密度 1,000 kg/m³計算)

V =體積

並假設雨滴為圓體，配合圓體公式計算兩滴體積：

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (7)$$

π =圓周率，本研究以 3.14159265359 計算，

r =半徑。

以各粒徑一 速度之雨滴顆粒數逐一計算動能，並累加為一分鐘降雨動能，再將降雨延時內每分鐘降雨動能累加後，即為該場降雨之降雨總動能。

4.不同降雨型態降雨動能之分析方法

本研究整理不同降雨型態下各降雨強度區間之 USLE 降雨動能、物理動能公式降雨動能，以皮爾森相關係數 (Pearson correlation coefficient)研究兩者於不同降雨型態、降雨強度區間之差異及動能變化趨勢，分析降雨強度大於 76mm/hr 之物理動能變化趨勢，並以不同降雨強度區間進行分析，了解不同降雨強度下不同百分比粒徑分佈、最大速度、最大粒徑與降雨動能之關聯。

皮爾森相關係數之分析，其分析結果相關係數 $R=1$ 表示完全相關、 $R=0.99\sim 0.7$ 為高度相關、 $R=0.69\sim 0.4$ 為中度相關、 $R=0.39\sim 0.09$ 為低度相關、 $R=0$ 為無相關；本研究採用雙尾(雙側)檢定，不考慮兩筆資料之何者較高，僅考慮其變化趨勢之相關性，相關性之*號越多表示顯著性越高。

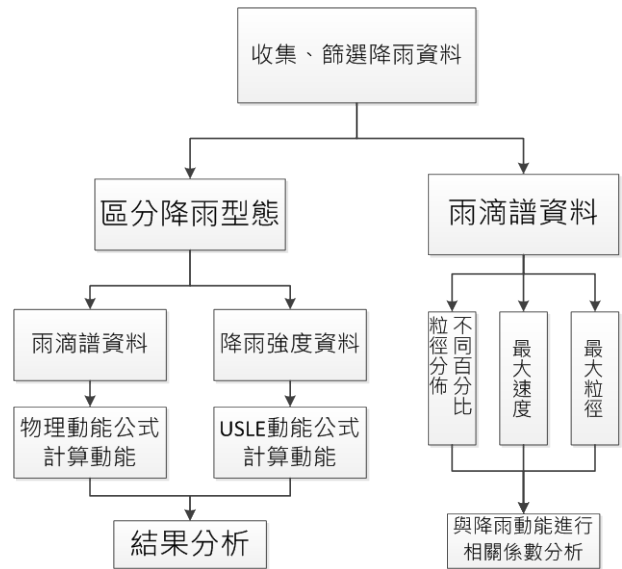


圖 3、研究流程圖

四、結果與討論

1.USLE 動能及物理公式動能

動能為一純量，根據物理動能公式所計算之降雨動能遵守動量恆正之定律，而 USLE 之降雨強度趨近於 76mm 時，單位降雨動能大於 0.283 (如 $I=75.611\text{mm/hr}$ ， $e_m=0.283000469$ ，圖 4)，即降雨強度提高反而降低降雨動能；降雨強度過小時出現負數動能(如 $I=0.043\text{mm/hr}$ ， $e_m=-0.000298204$ ，圖 5)，此結果因 USLE 之動能公式為經驗式所造成，由此可推論 USLE 無法準確估算如梅雨這類連續低強度降雨及颱風、對流雨等連續高強度降雨之降雨總動能，及其是否適合估算與美國地區不同降雨型態之台灣地區降雨動能。

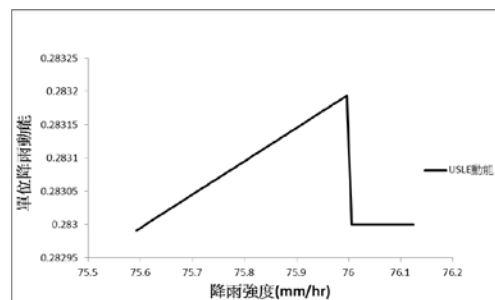


圖 4、高降雨強度 USLE 動能變化趨勢

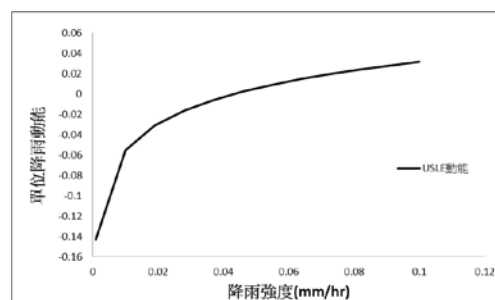


圖 5、低降雨強度 USLE 動能變化趨勢

因此，為避免不同降雨型態造成之差異，以實際降雨所得之降雨資料挑選降雨強度大於 0.043mm/hr、小於 75.610mm/hr 之數據(共 55,733 筆資料)進行計算、相關係數分析，USLE 方面因其動能計算僅使用降雨強度作為計算之依據，故其與強度之相關性甚高(表 1)，未達完全相關可能為計算過程之有效位數所造成。

表 1、USLE 動能－降雨強度相關性分析

		降雨強度	USLE動能
降雨強度	Pearson 相關	1	.997**
	顯著性 (雙尾)		0.000
	個數	55733	55733

從物理動能公式計算之降雨動能與降雨強度之相關性(表 2)仍有 0.930 之高度相關，證明不論雨滴粒徑－速度之分佈情形為何，其降雨動能都與降雨強度呈高度相關。

表 2、動能公式動能－降雨強度相關性分析

		降雨強度	單位時間動能
降雨強度	Pearson 相關	1	.930**
	顯著性 (雙尾)		0.000
	個數	55733	55733

而將 93 場降雨排除未記錄降雨類型之雨場後分為颱風雨、對流雨、梅雨三種不同降雨型態，共有 40 場對流雨(圖 6)、8 場颱風雨(包含外圍環流，圖 7)、14 場梅雨(圖 8)，個別分析其 USLE 公式與物理動能公式計算所得之降雨總動能差異。將其結果繪製為折線圖，可以發現各種降雨型態之 USLE 降雨動能皆大於物理動能公式之降雨動能，且兩種動能公式之相關性高達 0.987(表 3)，再將每場降雨之動能差異 $\frac{\text{物理動能}}{\text{USLE 動能}} \times 100\%$ 平均後，發現對流雨之物理動能公式計算結果為 USLE 動能公式計算結果之 57.11%，颱風雨為 55.21%，梅雨為 51.63%。

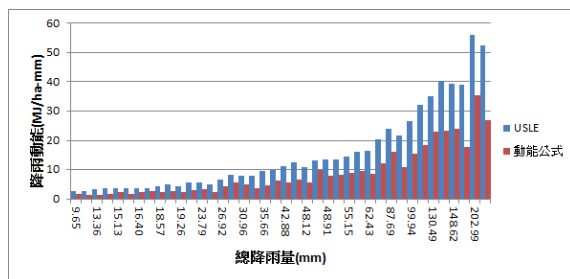


圖 3、對流雨降雨動能分析

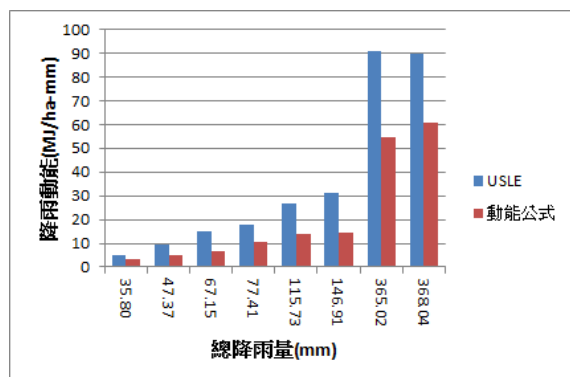


圖 8、颱風雨降雨動能分析

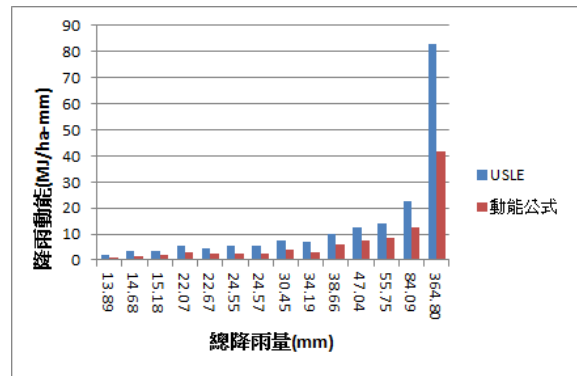


圖 9、梅雨降雨動能分析

表 3、兩種降雨能之相關性分析

		USLE	物理動能公式
USLE	Pearson 相關	1	.987**
	顯著性 (雙尾)		.000
	個數	93	93
物理動能公式	Pearson 相關	.987**	1
	顯著性 (雙尾)	.000	
	個數	93	93

觀察個別降雨類型之趨勢變化，發現降雨強度越大之降雨資料，其物理動能越接近 USLE 動能，例如 2014 年 10 月 3 日 11 點 11 分至 2014 年 10 月 3 日 16 點 17 分，降雨延時 306 分鐘、降雨量 13.03mm 之對流雨，其物理動能為 USLE 動能之 85.10%，顯示在高降雨強度降雨下以物理動能公式計算之降雨動能與 USLE 降雨動能公式所得之降雨總動能相似；而在低強度、高延時之降雨，如 2014 年 6 月 13 日 10 點 38 分至 2014 年 6 月 14 日 23 點 43 分，降雨延時 2225 分鐘、降雨量 34mm 之梅雨，其物理動能為 USLE 動能之 43.55%，USLE 有明顯高估降雨動能之趨勢。

2. 最大粒徑、最大速度與降雨動能

本研究挑選每分鐘雨滴譜資料之最大速度及最大粒徑，為避免無降雨時段，天空之掉落物造成雨滴譜儀誤判為降雨之問題，經觀察發現，排除雨滴數未滿 20 顆之雨滴譜資料，可以有效排除誤判之問題。

取降雨強度大於 0.043mm/hr、小於 75.610mm/hr 之數據(共 55,733 筆資料)，排除一筆未滿二十顆雨滴之降雨資料，共 55,732 筆每分鐘降雨資料，與不同方法計算之降雨動能進行相關係數分析(表 4)，分析結果顯示其相關性與動能、降雨強度皆呈中度、高度相關，表示雨滴最大粒徑、最大速度與降雨之強度呈正相關。

表 4、最大粒徑、最大速度之分析

		降雨強度	USLE	最大粒徑	最大速度
降雨強度	Pearson 相關	1	.997**	.722**	.687**
	顯著性 (雙尾)		0.000	0.000	0.000
	個數	55732	55732	55732	55732
USLE	Pearson 相關	.997**	1	.693**	.648**
	顯著性 (雙尾)	0.000		0.000	0.000
	個數	55732	55732	55732	55732

五、結果與討論

1. 結論

(1)高降雨強度越的情況下，物理動能與 USLE 動能相近，可能是因為 USLE 本身就高估老埤地區降雨動能，USLE 降雨強度大於 76mm/hr 之單位降雨動能為定值 0.283，物理動能公式所計算之結果則不受此限制持續上升所造成，使得降雨強度超過 76mm/hr 時物理動能公式所計算之降雨動能會使降雨總動能逐漸接近 USLE 所計算之結果。

(2) 隨著降雨強度上升，降雨強度及物理動能與 D10~D90 粒徑分佈之相關性呈現遞減，可能為 Thumree Sarkar 等人(2015)研究發現之雨滴譜儀誤判直徑 4mm-6mm 雨滴之現象所造成，使得粒徑變化之趨勢與強度變化之趨勢有所差異，此部分仍待後續之研究驗證。

(3)在降雨類型分類的過程發現，依降雨延時、日期、雷雨之條件來分別降雨類型似乎不夠嚴謹，導致出現低強度、高延時之對流雨，以及高強度低延時之梅雨等情形，應深入探討降雨類型之分類依據、方法，以利後續研究。

2. 建議

(1)本研究收集兩年之降雨資料，雖有 93 場有效降雨、約 79,680 筆降雨每分鐘降雨強度、雨滴譜資料，可供研究分析，但如颱風雨之降雨場數樣本數明顯不足，故對流雨、梅雨之研究可信度較颱風雨高。

(2)國內外許多降雨動能相關研究仍使用 Wischmeier & Smith 推導之降雨動能公式，其對於實際動能雖存在高估之疑慮，但不會對趨勢之研究造成太大之影響，若是針對強度預測、估算、資料之延用應予以改正、修正其估算之降雨動能，避免高估低強度降雨造成之系統誤差(System error)。

參考文獻

- [1] Laws, J.O.. (1941). "Measurements of fall velocity of water drops and raindrops," Transactions of the American Geophysical Union, 24, 452.
- [2] Bread, K.V. and H.R. Pruppacher. (1969). "A determination of the terminal velocity and drag of water drop by means of a wind tunnel" Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 26, 1066-1072.
- [3] 張文詔(1994)，水滴於靜止空氣中自由落下加速過程之量測與數值模擬，中華水土保持學報 25 卷 2 期，P.103-P.120。(Chang W.J(1994). *Measurement and Numerical Simulation for the Acceleration of a Water Droplet Falling in Stagnant Air*, Chinese Soil and Water Conservation, Vol. 25, No.2, 103 - 120. (in Chinese))
- [4] 吳嘉俊、王阿碧(1996)，屏東老埤地區雨滴粒徑與沖蝕動能之研究，中華水土保持學報 27 卷 2 期，P.151-P.165。(Wu C.C, Wang A.B(1996). *Drop Size Characteristics and Erosive Kinetic Energy of Natural Rainstorms in Pingtung Laopi Area*, Chinese Soil and Water Conservation, Vol. 27, No.2, 151 - 165. (in Chinese))
- [5] C.S Chen、Y.L.Chen(2003)，The rainfall characteristics of Taiwan. *Mon. Wea. Rev.* 131, 1323-1341.
- [6] 楊文仁、范正成、張于漢(2007)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 53 卷 1 期，P.1-P.12。(Yang W.J, Fan J.C, Chang Y.H(2007). *Effects of Climate Change on Effective Rainfall Events for Soil Erosion in Northern Taiwan*, Journal of Chinese Agricultural Engineering, Vol. 53, No.1, 1 - 12. (in Chinese))
- [7] 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 卷 2 期，P.113-P.121。(Fan J.C, Yang C.H, Liu C.H(2009). *Establishment of the assessment model of the rainfall erosivity and their annual variation trend in Taipei*, Chinese Soil and Water Conservation, Vol. 40, No.2, 113- 121. (in Chinese))
- [8] 梁惠儀、許振崑、林伯勳、鄭錦桐、冀樹勇(2010)極端暴雨事件於石門水庫集水區之土壤沖蝕量估算及探討，中興工程 106 期，P.5-P.15。(Liang H.Y, Xu Z.K, Lin B.X, Zheng J.T, Ji S.Y (2010) Extreme storm events in the catchment area of the Shihmen Reservoir estimate the amount of soil erosion SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC. No.106, 5- 15. (in Chinese))
- [9] 何幸娟、林伯勳、冀樹勇、尹孝元、施美琴、羅文俊(2012)神木集水區土壤沖蝕特性，中華水土保持學報 43 卷 3 期，P.275-P.283。(Ho H.C, Lin B.S, Chi S.Y, Yin H.Y, Shih M.C, Lo W.C(2012). *Preliminary Study on Soil Erosion Caused by Rainfall in Shenmu Watershed*, Chinese Soil and Water Conservation, Vol. 43, No.3, 275- 283. (in Chinese))
- [10] 連琮勳、連政佳、吳宜珍、鄭克聲、潘宗毅、黃立遠(2013)，地理統計應用於臺北市山坡地雨量站網評估與調整，中華水土保持學報 45 卷 3 期，P.155-P.164。(Lien, T.H, Lien, C.C, Wu, Y.C, Cheng, K.S, Pan, T.Y, Huang, L.Y, Li, C.L, Pan, Y.H (2013). *Rainfall Network Evaluation and Augmentation Using Geostatistics--An Example in Taipei City*, Chinese Soil and Water Conservation, Vol. 45, No. 3, 155- 164. (in Chinese))
- [11] 周佳翰、江介倫、林紘立(2014)，不同降雨強度下雨滴粒徑與速度特性-以屏東老埤地區為例，中華水土保持學會 103 年年會，編號 5-8。(Chia H.C, Chiang J.L, Lin H.L(2014). *Characteristics of Drop Size and Velocity of Various Rainfall Intensities - A Case Study in Pingtung Laopi Area*, 103th Chinese Soil and Water Conservation Society, number 5-8. (in Chinese))
- [12] Thumree Sarkar、Saurabh Das、Animesh Maitra(2015)，Assessment of different raindrop size measuring techniques: Inter-comparison of Doppler radar, impact an optical disdrometer, *Atmospheric Research* 160, P.15-P.27。