

降雨逕流與坡度對表土沖蝕和紋溝發展之影響

周伯原⁽¹⁾ 王咏潔^{*(2)}

摘要

臺灣西南部泥岩地區地質條件不佳，沖蝕嚴重且植生貧乏，為坡地災害中最難整治、植生綠化困難度高的「惡地」地形。青灰泥岩在台灣西南部分布廣泛，透水性差且遇水軟化，無水則容易乾裂。本研究使用臺灣惡地土壤，以阿公店水庫庫區現地採集的青灰泥岩沉積土為研究材料，探討在不同坡度、降雨強度下的沖蝕差異情形。本研究實驗為人工降雨實驗，使用渠槽可調坡度的玻璃實驗土槽，採用兩種降雨強度 75mm/hr 和 100mm/hr，搭配 6 種坡度(5 度、10 度、15 度、20 度、25 度、30 度)，對土壤試體進行 30 分鐘模擬降雨，收取其地表逕流、入滲，及出流土壤，並以土壤濕度計和相機記錄土壤水分與沖蝕地形變化。本研究分析青灰泥沉積土坡面隨時間變化之沖蝕與紋溝發展情形，其結果可作為惡地地區沖蝕評估與坡面治理之參考依據。

(**關鍵詞**：青灰泥沖積土、人工降雨機、坡面沖蝕、紋溝發展)

Effects of rainfall-runoff and slope gradient on surface erosion and rill development

Po-Yuan Chou⁽¹⁾ *Yung-Chieh Wang*^{*,(2)}

ABSTRACT

The mudstone area in southwestern Taiwan has poor geological conditions, severe erosion, and poor vegetation. This area, recognized as the badland, is the most difficult area for remediation and revegetation after hillslope disasters. Widely distributed in southwestern Taiwan, the mudstone is known by its poor water permeability. The mudstone is softened with water, but hardens and cracks without water. In this study, we collected the mudstone deposits in the Agongdian Reservoir area, and used them as the soil specimens for investigating the soil erosion processes in the cases of different slope gradients and rainfall intensities. The experiments in this study were carried out with a rainfall simulator and a rectangular tilting glass flume filled with

(1) 國立中興大學水土保持學系 研究生

(2) 國立中興大學水土保持學系 副教授 (通訊作者 email: wangyc@nchu.edu.tw)

the mudstone sediments. Two rainfall intensities (75mm / hr, 100mm / hr) and seven slope gradients (0 °, 5 °, 10 °, 15 °, 20 °, 25 °, 30 °) were assigned in the 30-minute simulated rainfall events. During each trial of the simulated rainfall experiments, surface runoff, infiltration, and outflow sediments were collected for every five minutes. Meanwhile, the soil moisture content and erosion topography were monitored by using a soil hygrometer (TDT) and a digital camera. Results from the experiments are analyzed and discussed, in order to propose the inter-relationships among rill development, infiltration, and runoff erosion in cases of different slope gradients and rainfall intensities. Consequently, the outcome of this study may provide references for the assessments of hillslope erosion and disaster evaluation of the badland in Taiwan.

(**Keywords** : Mudstone sediments, Rainfall simulator, Slope erosion, Rill development)

前言

台灣主要泥岩地區多分布於台南、高雄和台東一帶，而北部亦有許多地區擁有泥岩分布。泥岩又稱青灰泥岩，因為其粒徑細小，土壤膠結不佳、不保水，乾燥時期土壤呈現結塊且容易造成裂隙；青灰泥岩坡面裂隙橫生，而降雨時土壤吸水軟化崩解。除此之外，因為鹽分過高導致青灰泥岩植生不易(許中立，2003)，且青灰泥岩坡面因孔隙小導致滲透不良(謝豪榮，1986)，坡面治理上一大難題。

Fang(2015)指出裸露坡面對於降雨沖蝕非常敏感。在高強度降雨期間，土壤侵蝕會從飛濺沖蝕或層狀沖蝕迅速演變為紋溝侵蝕(Di Stefano et al.，2013； Shen et al.，2016)。紋溝的侵蝕極大地影響了徑流，土壤流失，形態和斜坡表面的動力特性(Morgan，1977； Lei and Tang，1998； Govers et al.，2007； Dunkerley，2008； Wirtz et al.，2012)。因此，了解紋溝的侵蝕過程對於預測水土流失和防止水土流失很重要。

過去許多實驗曾預測紋溝沖蝕(Torri，1987； Rauws and Govers，1987； Le'onard and Richard，2004； Berger et al.，2010)。一些實驗顯示紋溝沖蝕容易發生於以下原因，流量增加(Mancilla et al.，2005)、降雨強度的改變(Brunton and Bryan，2000)或坡度的增加(Berger et al.，2010)。然而，(Wirtz，2012)表示，紋溝沖蝕並不是一種可以單純用降雨強度和坡度表示的函數，紋溝沖蝕應該是一種複雜的物理運動，包含表土覆蓋、紋溝發展、向源侵蝕、側向侵蝕。除此之外，紋溝沖蝕也受坡面微地形造成強烈的影響(Berger et al.，2010)，紋溝型態有助於增加逕流的流通性並使逕流更為集中的流動(Heras et al.，2011)，而紋溝也成為土壤流失的主要管道之一(Shen et al.，2016)。

Gilley et al. (1990)認為，在同一種降雨機情形下，即使不同土壤，在飽和逕流結果極為相似，但其土壤沖蝕量會依土壤有所不同。除此之外，Gilley et al. (1990)認為累積降雨強度與紋溝內的流量有正向關係，隨著累積降雨強度越大，紋溝內

的流量也會隨之變大，他甚至推倒公式，以式 1-1 表示之。

$$\text{RFR} = -0.351(\text{CRF}) + 4.01(\text{CRF})^2 - 2.64(\text{CRF})^3 \dots\dots\dots(1-1)$$

式中: RFR 為紋溝內的相對流量，而 CRF 為累積降雨強度。

目前，儘管已經進行了許多田間試驗和模擬實驗，但在坡度對土壤入滲的影響方面，Poesen(1986)研究了五個不同的坡度，發現陡峭的坡度降低了坡面的封閉情形，因為雨滴在陡峭的坡度上以更大的銳角撞擊土壤，單位面積的動能更少。Janeau et al. (2003)研究了斜坡對野外入滲的影響，研究了 16%到 63%的坡度。他們的結果表明，穩定的最終滲透率隨坡度的增加而急劇增加。然而，有一些實驗表示，滲透率隨傾斜角的增加而減少，因為地表水流深度的減少和地表可儲水量的減少(Chaplot and Le Bissonnais, 2000)。Nassif (1975)報導，在實驗室實驗中，滲透率隨斜率的增加而降低，Jiang and Huang (1984)、Jin et al. (1995) 和 Yuan et al. (2001)也得到了相同的結果。坡度與入滲之間關係的性質隨著坡度的增加而改變，然而有一些作者則認為坡度與入滲之間並沒有任何關係 (Singer and Blackard, 1982 ; Mah et al., 1992; Cerdà and García-Fayos, 1997;)。

Zhang et al. (2017)做了三種降雨強度的降雨強度試驗，分別為 66mm/hr、94mm/hr 和 127 mm/hr，並且他發現降雨強度對紋溝沖蝕影響非常劇烈，在中等降雨強度時，紋溝網路的發展最劇烈，太強或太弱的降雨強度都不太利於紋溝發展。而在相同的降雨強度下，土壤流失量、紋溝密度、紋溝節點、坡面地貌信息熵會隨

時間增長。

本研究目的為瞭解降雨強度和裸露坡面坡度對於土壤水分入滲、逕流產生，和表面沖蝕及土壤流失量之影響；並觀察不同強雨強度-坡度組合下，裸露坡面紋溝形成與發展情形。本研究以人工降雨機配合可調坡度之沖蝕平台，使用 6 種坡度(5 度、10 度、15 度、20 度、25 度、30 度)和兩種降雨強度(100mm/hr 和 75mm/hr)進行單場延時 30 分鐘之人工降雨沖蝕實驗，將降雨沖蝕過程拍照並錄影，並記錄逕流量和土壤流失量，以瞭解裸露坡面紋溝發展和土壤沖蝕之變化。

實驗材料與方法

1. 降雨沖蝕實驗設置

實驗沖蝕平台由結構框架、沖蝕槽和坡度調整器所組成。沖蝕槽全長 1.5m、寬 0.5m、深度為 0.2m，分為寬度各為 0.25m 之槽體；槽體尾端出口和下方均設孔洞，以利水流和沖蝕土壤流出和向下入滲並收集。槽體前方有一個坡度調整器，可調整坡縱向坡度(0-30 度)。

本實驗使用之降雨噴頭為廣角方錐實心噴嘴，人工降雨機之參數率定包括降雨強度、降雨均勻度、雨滴粒徑分析，和雨滴降下速率等。實驗採兩種降雨強度，分別為 75mm/hr 和 100mm/hr，以三重複的方式進行率定，而降雨強度、降雨均勻度率定資料以表 1 至表 4 展示，可得降雨強度標準偏差小於 1%，而均勻度皆大於 95%。

表 1. 100mm/hr 降雨強度率定

Table 1. 100mm/hr rainfall intensity calibration

100mm/hr			
組數	1	2	3
單次降雨強度 (mm/hr)	99.018	99.328	100.256
平均降雨強度 (mm/hr)	99.534		
標準偏差 (mm/hr)	0.644		
相對標準偏差	0.65%		

表 2. 75mm/hr 降雨強度率定

Table 2. 75mm/hr rainfall intensity calibration

75mm/hr			
組數	1	2	3
單次降雨強度 (mm/hr)	75.19	75.50	75.50
平均降雨強度 (mm/hr)	75.40		
標準偏差 (mm/hr)	0.18		
相對標準偏差	0.24%		

表 3. 100mm/hr 降雨均勻度

Table 3. 100mm/hr rainfall spatial uniformity

100mm/hr			
組數	1	2	3
降雨均勻度 (CUC)	96.25%	97.82%	95.78%
平均降雨均勻度	0.966		
CUC標準偏差	0.011		
CUC 相對標準偏差	1.10%		

表 4. 75mm/hr 降雨均勻度

Table 4. 75mm/hr rainfall spatial uniformity

75mm/hr			
組數	1	2	3
降雨均勻度 (CUC)	95.47%	95.90%	97.54%
平均降雨均勻度	0.963		
CUC標準偏差	0.011		
CUC 相對標準偏差	1.13%		

雨滴粒徑分析採用前人研究之關係式，並以濾紙法(色斑法)配合使用，其中公式以式 2-1(陳振宇等人，1996)、式 2-2(竇葆璋和周佩華，1982)、式 2-3(徐向舟等人，2004)表示之，最後將 75mm/hr 和 100mm/hr 之降雨結果分別以圖 2-1 圖 2-2 表示。

$$D_i = 0.334 d_i^{0.749} \dots\dots\dots(2-1)$$

$$D_i = 0.356 d_i^{0.712} \dots\dots\dots(2-2)$$

$$D_i = 0.295 d_i^{0.756} \dots\dots\dots(2-3)$$

D_i 為轉化後實際雨滴粒徑大小(mm)， d_i 則為雨滴粒徑滴在濾紙上之大小(mm)。

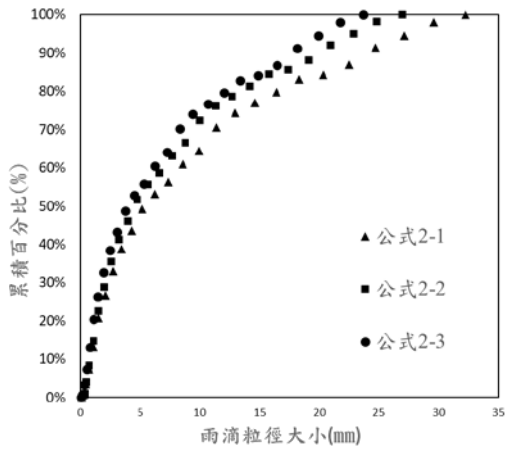


圖 2-1. 75mm/hr 降雨雨滴粒徑分布

Figure 2-1. 75mm/hr rain drop size distribution

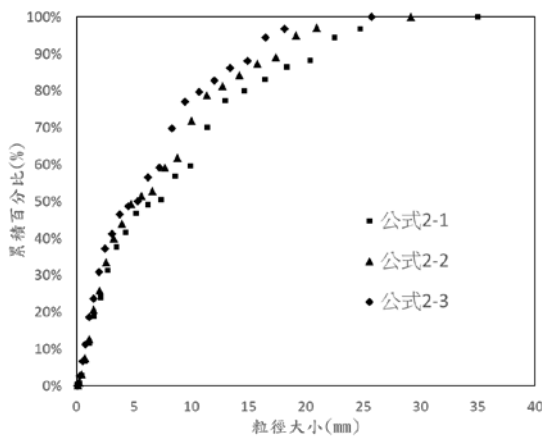


圖 2-2. 100mm/hr 降雨雨滴粒徑分布

Figure 2-2. 100mm/hr rain drop size Distribution

而可以藉由上述分布圖了解發現 75mm/hr 降雨強度之平均中值粒徑為 4.6mm 而 100mm/hr 降雨強度之平均中值粒徑 5.589mm，隨著降雨強度的增加，粒徑大小也會變大，造成此種現象之原因為，使用的降雨噴頭的設計相關，隨著流量變

大，降雨顆粒也變大，而由不同之中值粒徑可以測算出不同顆粒大小，而最後不同顆粒大小會導致不同的衝擊動能。

而因為本實驗降雨噴頭初速乃採用測壓器於噴頭前大約 10cm 測壓，因此假設本實驗測得壓力為實際降雨初速，並不考慮管內損耗，而本研究使用白努力定律求取降雨噴頭降雨初速，以式 2-4 表示之：

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho_w V_1^2 + \rho_w g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho_w V_2^2 + \rho_w g h_2 \dots\dots\dots(2-4)$$

P_1 代表水流在水管內時所受壓力 ($N/m^2/s$)； V_1 代表水流在水管內的速度 (m/s)； g 代表重力加速度 = $9.81 (m/s^2)$ ； P_2 代表降雨噴出後大氣壓力 ($N/m^2/s$)； ρ_w 代表水密度 = $1000 (kg/m^3)$ ； V_2 代表降雨噴頭初速 (m/s)

在使用 Lynch & Lommatsch (2011) 所使用公式推求，因雨滴在滴落時，分別受到重力 F_g 和拖曳力 F_d 影響，分別以式 2-5、式 2-6 表示：

$$F_g = mg \dots\dots\dots(2-5)$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_a v^2 A \dots\dots\dots(2-6)$$

m = 雨滴質量 (kg)，在下方以方程式 2-7 表示之； g = 重力加速度 (m/s^2)； C_d = 拖曳係數 (-)； ρ_a = 空氣密度 = $1.161 (kg/m^3)$ ； v = 雨滴速度 (m/s)； A = 雨滴截面積 (m^2):

$$m = \frac{4}{3} r^3 \pi * \rho_w \dots\dots\dots(2-7)$$

r = 雨滴半徑 (m)； ρ_w = 水密度 = $1000 (kg/m^3)$ 。

最後採用能量守恆方程式推導初始

速度，以式 2-8 表示之：

$$\frac{1}{2}mV_2^2 + mgh = F_d * h + \frac{1}{2}mV_3^2 \dots\dots\dots(2-8)$$

V_3 =雨滴落地後最終速度(m/s)； h = 降雨噴頭高程(m)。為計算雨滴衝擊至地表動能，在此將式 2-9 表示其動能。

$$\frac{1}{2}mV^2 + mgh \dots\dots\dots(2-9)$$

將理論終端速度與實際終端速度各別求取其動能並相除以計算其能量比值。最後將結果以表 5 表示之。而最後將接雨量測量筒分布圖以圖 2-3 於下方表示之

表 5 人工降雨機率定參數

Table 5. Calibrated parameters of the rainfall simulator

降雨強度		公式 [2-1]	公式 [2-2]	公式 [2-3]
75mm/hr	雨滴中值粒徑d50(mm)	2.18	2.05	1.97
	噴出壓力(Pa)	6psi		
	噴出初速(m/s)	9.11		
	實際末速(m/s)	7.81	7.62	7.48
	理論終端速度(m/s)	7.22	7.01	6.87
	達終端速度之百分比	108.19%	108.69%	108.94%
	理論與實際動能比值	1.171	1.181	1.187
100mm/hr	雨滴中值粒徑d50(mm)	2.37	2.13	2.16
	噴出壓力(Pa)	11.5psi		
	噴出初速(m/s)	12.61		
	實際末速(m/s)	9.52	9.06	9.13
	理論終端速度(m/s)	7.39	7.04	7.09
	達終端速度之百分比	128.81%	128.71%	128.77%
	理論與實際動能比值	1.659	1.657	1.658

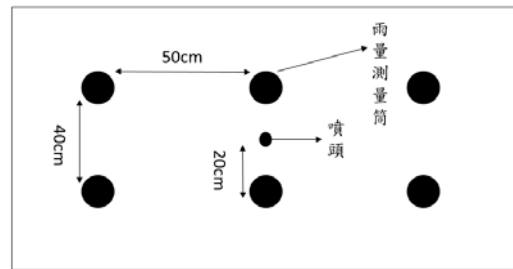


圖 2-3 雨量測量筒分布圖

Figure 2-3. rainfall catching bucket distribution picture.

2. 實驗土壤基本性質

本實驗使用台灣高雄市内上游阿公店水庫集水區之沉積土壤為實驗材料，該地區因主要母岩性質為青灰泥岩，青灰泥岩膠結力弱，有遇水崩解的情形。將土壤帶回實驗室後，進行前處理與分析，實驗前處理參考林俐玲與董小萍(2002)，將現地挖回的土壤風乾後過篩，將非土壤部分去除，並假設土壤在此步驟後基礎性質都不變。

土壤比重採取 ASTM-D854(2006)標準流程進行實驗，在土壤過#10 篩後烘乾即進行實驗。實驗為三重複後取平均，得到土壤顆粒密度如表 6。

表 6 青灰泥沉積土顆粒密度

Table 6. Particle density of the mudstone sediment

青灰泥岩	土壤顆粒密度
組一	2.752
組二	2.759
組三	2.747
平均值	2.753
標準差	0.006

粒徑分析是參考 ASTM-D854(2006) 標準流程進行實驗，實驗施作三重複，並將三次實驗結果如圖 2-4，其中測定砂粒 (63-200 μm)，粉粒(2-63 μm)和黏粒 (<2 μm)，將數據分析之後，得到中值粒徑為 0.0493mm、標準差為 0.0009，而砂粒含量為 39.94%、標準差為 0.0052，粉粒含量為 52.64%、標準差為 0.0055，黏粒含量為 7.42%、標準差為 0.00089，最後將結果以累積百分比曲線圖顯示之。

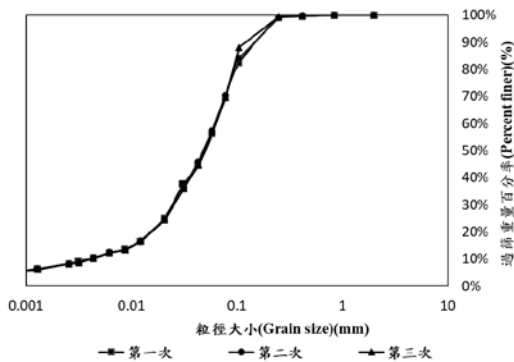


圖 2-4 青灰泥沉積土粒徑分布曲線

Figure 2-4. Size distribution curve of the mudstone sediment

3. 降雨沖蝕實驗步驟

實驗開始之前，先將土槽底層鋪上一層約五公分厚的小石頭，然後把土壤攪拌至設計溼度約(21%-23%)之間，此含水量青灰泥岩濕潤較容易塑形，而填土總量則參考前人文獻(賴俊辰，2018)，將土壤以約乾總體密度 1400kg/m³ 填入沖蝕槽，填入體積為長 0.75m、寬 0.25m、深 0.15 m，大約需 47.25kg 的濕潤青灰泥沉積土。將土壤分三層填入，每一層深度約 5cm，每

填完一層將敲打壓密約 8 次。沖蝕實驗開始前，在每一填入土層中取 6 個點的土樣測量其水分含量，確認土壤水分在空間分布的均勻性；填土完成後，在土體中插入土壤水分測定儀器(TDT)，監測實驗進行時的土壤水分變化。

將土壤填置完成後，將沖蝕槽放平後拍照以獲取裸露土面初始情形，調整至設計坡度後，開始降雨試驗。人工降雨實驗採 6 種坡度(5 度、10 度、15 度、20 度、25 度、30 度)，兩種降雨強度 75mm/hr、100mm/hr，共 12 種降雨強度-坡度組合進行，每場降雨延時為 30 分鐘，降雨期間不中斷，將降雨情形以 nikon2000 相機錄影，觀察土壤變化；並於每 5 分鐘收集降雨入滲量、逕流量，最後將收集的入滲量與逕流量以 110 $^{\circ}\text{C}$ 烘乾並秤重，求得向下入滲和自沖蝕槽尾端出口流出之水、土重量。

4. 紋溝分析參數

4.1 紋溝密度

紋溝密度(ρ_r)為紋溝總長度除以紋溝面積(Bewket and Sterk, 2003)，是一種用於測量紋溝的方法，當紋溝密度越大時，代表紋溝有較大的分岔比和大的沖蝕量。而紋溝密度的公式為下：

$$\rho_r = \sum_{j=1}^n \frac{L_i}{A_r} \dots\dots\dots(2-10)$$

其中 L_i 為紋溝總長(m)，而 A_r 為降雨面積(m²)。

4.2 分岔比

本實驗將紋溝實驗中的形狀採以

Horton-Strahler 河川水系分析方式的分岔比做為主要分析方式，首先本實驗先將紋溝描繪於 ARCGIS 上，並將不同紋溝以 Horton-Strahler 分類之，最後將其計算得到結果分岔比(R_b)，當低級序紋溝比高級序多越多時，分岔比會越大，代表紋溝網絡強烈發展、紋溝分岔多，而不同級序的紋溝發展不同，因此本實驗將採用平均分岔比(Pan Zhanga et al., 2017)。

結果與討論

1. 逕流量與入滲量

降雨沖蝕實驗之後，將逕流量和入滲量收集並將收集的數據以圖 3-1 表示。由圖表得知，入滲所收降雨強度和坡度的影響皆不顯著，主要造成此中現象的原因為土壤濕度(臨前狀態)，因實驗土壤臨前狀態已接近飽和，其入滲量在不同降雨強度-坡度之組合變化不顯著，應接近一定值，入滲量測量值之隨機變化應受收水誤差之影響。

逕流的部分則發現，隨著坡度的增加，逕流會先增加至峰值，然後再減少，造成此種現象的可能原因為，由於土壤是飽和土壤，入滲的速率改變並不會很大，所以影響逕流的只有降雨。隨著坡度的增加，有效降雨截面積會漸漸地減少，所以獲得的水量也會漸漸地減少。

Jiang et al. (2014)得出與本研究相似的逕流結果，逕流先隨著坡度增加然後到一定坡度之後減少，而其入滲率則時隨著坡度增加而減少。而 Jiang et al. (2018)則得到逕流量隨著降雨強度增加而增加，在

相同的降雨強度情況下，平均逕流率會隨著坡度先增加再降低。

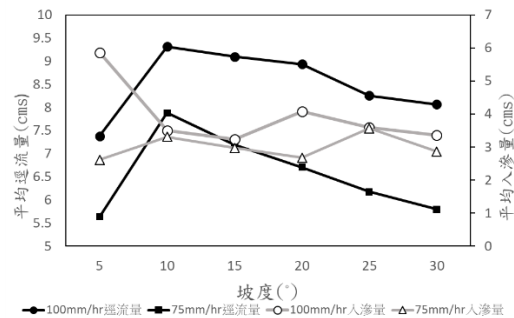


圖 3-1 不同降雨強度產生的平均逕流量和平均入滲量隨坡度之變化

Figure 3-1. Average runoff and average water infiltration caused by different rainfall intensity events and varied with the slope gradient.

2. 土壤沖蝕量

降雨沖蝕實驗結束後將實驗獲得的表土沖蝕量和入滲土壤沖蝕量以圖 3-2 表示之。可以由圖中得出土壤逕流沖蝕會漸漸地隨著坡度增長，在降雨強度越強時增長幅度越為明顯，在 100mm/hr 的結果之中可以看出土壤增長隨著坡度穩定的增加。而入滲沖蝕量改變則並不明顯，並不隨著坡度增長而改變。但有可能在低坡度實因為入滲量較大而獲得較大的土壤沖蝕量。

而由逕流量與入滲量和本章節進行綜合討論可以發現一個特殊的現象，隨著坡度的增加，逕流量在減少的情形下逕流土重反而會增加，造成此現象的原因可能為隨著坡度的上升，逕流量下降，但逕流流速並不減慢，反而隨著坡度增加，造成

此現象的原因可以使用曼寧公式思考，隨著坡度增加，流速會增加，而本實驗所收集到之逕流量雖然減少，但集流時間反而變小，因此本實驗之逕流量與沖蝕量無太大關係。

主要造成土壤沖蝕的原因為雨濺沖蝕和逕流沖蝕(Polyakov and Nearing, 2003)。因此隨著降雨強度的增強，雨滴會造成更強的衝擊，而坡度和降雨強度的增加則會造成逕流的增加，進而增長土壤沖蝕量。而隨著坡度的增長，紋溝也會越來越多，增加沖蝕的速率。

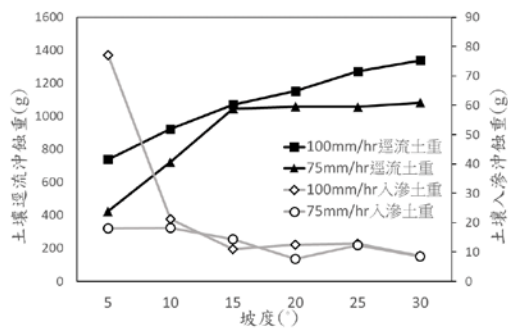


圖 3-2 不同降雨強度產生的土壤逕流沖蝕量和土壤入滲沖蝕量隨坡度之變化

Figure 3-2 Soil runoff erosion and soil infiltration erosion caused by different rainfall intensity events and varied with the slope gradient.

3. 紋溝隨坡度變化的發展情形

圖 3-3 表示在降雨 100mm/hr，坡度為 15 度、20 度、25 度、30 度時，單場降雨 30 分鐘結束後的紋溝發展情形。這些紋溝圖片是將降雨結束後的照片，以 ArcGIS 採以肉眼判讀繪畫而出。而選取這四個坡度的原因是，在坡度 15 度以前無法觀察

到紋溝。

而可以藉由原始照片發現，坡度其實主要是造成紋溝深度影響，紋溝會隨著坡度越深，擁有越深的紋溝，紋溝形式越為明顯。

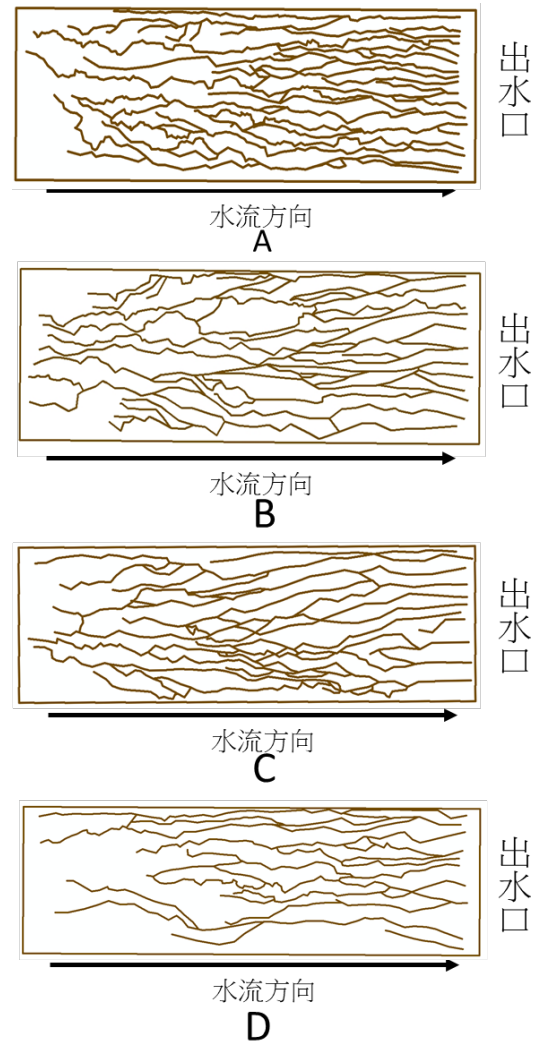


圖 3-3 降雨強度 100mm/hr 事件之紋溝發展圖片。圖 A 為坡度 30 度之結果，圖 B 為坡度 25 之結果，圖 C 為坡度 20 度之結果，圖 D 為坡度 15 度之結果。

Figure 3-3 Rill developments after the rainfall events of 100mm/hr. A is the result of a 30-degree slope, B is the result of a 25-degree slope, C is the result of a 20-degree slope, and D is the result of a 15-degree slope.

由圖 3-4 可以得出坡度越深的坡度可以獲得越多紋溝、在 30 度時紋溝為最發達的時候，而由分岔比則亦可以看出這種現象，而坡度 15 度的分岔比非常大的原因為，紋溝發展不激烈，因此 15 度紋溝級序大約只有到 5 而已，比起其他紋溝級序可以達到 6 或 7 的平均數來的少，因此其紋溝分岔比蠻大，但實際情形為隨著坡度增加，其分岔程度並不越高。

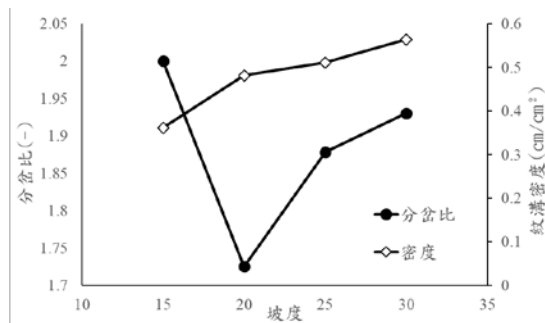


圖 3-4 紋溝密度與分岔比隨坡度改變情形

Figure 3-4. Rill density and bifurcation ratio change with the slope gradient.

4. 紋溝隨時間的發展情形

將沖蝕過程錄影分析後發現，在 100mm/hr 和 75mm/hr 的降雨事件中，紋溝發展時間的一致性頗為相似。坡度在 30 度時，5 分鐘以前並不會有明顯紋溝，而從 5 至 10 分鐘之間可以非常淺的紋溝漸漸發展出現，大約發展到 15 分鐘左右的

時候，就可以看出比較明顯的紋溝，而最後 15-30 分鐘則時可以看到紋溝漸漸地刷深，從幾毫米的紋溝深度至大約一手指節深的深度。而坡度 25 度則在 10 分鐘以前都無法看出紋溝的現象，直到大約 15 分鐘才能明顯看出紋溝的出現，而在 15 分鐘到 30 分鐘則也是可以明顯看出紋溝沖蝕的加深。而坡度 20 度則可以在約 15-20 分才看出明顯紋溝，而最後 10 分鐘也是慢慢刷深。15 度是在降雨 30 分鐘內難以產生明顯紋溝，而降雨結束後的紋溝形態與坡度 30 度降雨 10 分鐘的紋溝發生相似。

而在本實驗施作時，發現一些其他論文未提出之有趣現象，在影片分析過程發現紋溝在裸露坡面的發展並非是水流單純的刷深而已，將影片快轉可以發現坡面沖蝕有點類似淺移的感覺，整個坡面慢慢的向下滑動，此現象自逕流形成，產生層狀沖蝕時就可發現，並非紋溝出現才出現。此現象由快速拉動影片觀察而得，其位移距離並不足五公分。雖此現象難以直接以肉眼觀察，但可指出裸露坡面在形成紋溝前的層狀沖蝕雖然變化幅度小，但確實發生並造成土壤流失。

結論與建議

本實驗係以青灰泥沉積土重組土樣為實驗材料，進行坡面沖蝕在不同坡度不同降雨強度之下的實驗，實驗之前所有土壤的經過#10 篩過篩以確保沒有石礫參雜其中，接下來將土壤加入自來水攪拌至飽和，再將土壤分為三次填入土槽之內。每

一層土壤都經過壓密並採取每一層土壤含水量已測定土壤均勻度。

前置結束之後，將坡面條整至(5 度、10 度、15 度、20 度、25 度、30 度)，並將連結降雨機之水槽注滿水，即可開始實驗，實驗步驟為降雨 30 分鐘，每 5 分鐘換取逕流收集桶和入滲收集桶，換取期間不關水，最後實驗結果以相機拍照和錄影紀錄之。

而本實驗所得到的結果為，坡面土壤沖蝕量會隨著坡度越陡而越為增加，而此種現象會特別發生在降雨強度越大的時候越為穩定，而坡面逕流量回先到達峰值，然後再隨坡度增加減少；造成此種現象的原因是，坡度緩的時候，入滲較大，所以逕流增加越快，而隨著坡度越陡，有效降雨面積越小，逕流會越來越少，而入滲量則是因為改變量不大，但在坡度越陡時，入滲理論上會越小，因為水流接觸土壤表面的時間縮短，此種現象在高坡度較為明顯，低坡度的穩定度不高。

本實驗也發現紋溝會隨著坡度越陡，變得越深越明顯，除此之外，在錄影中發現，紋溝會隨著地表逕流向下移動，紋溝並非不動的，而且在坡度越陡的情形時，肉眼可見的紋溝出現的時間會越早。

本實驗主要施作原因為增加惡地形坡地沖蝕的了解，以解決惡地形難以處理的邊坡問題，那由結果發現，青灰泥岩飽和時的最大的問題為邊坡入滲不佳普遍降雨成為逕流，而因為青灰泥岩紋溝發展的速度並不快速，導致前期的漫地流侵蝕，因此如果要治理青灰泥岩，因以減少漫地

流為主。

最後，本實驗建議(1)除了飽和溼度之下的坡面土壤沖蝕之外，也可以施作不同濕度情形的坡面沖蝕。(2)除了 0 度至 30 度的坡面之外，亦可以施作更為陡峭的坡度例如 35 度、40 度.....等。(3)除了裸露坡面之外，亦可以施作植生覆蓋坡面和裸露坡面沖蝕的比較。

參數列表

D_i	雨滴實際粒徑
d_i	雨滴粒徑在濾紙上大小
P_1	水流在水管內時所受壓力
V_1	水流在水管內的速度
g	重力加速度
P_2	降雨噴出後大氣壓力
ρ_w	水的密度
V_2	降雨噴頭初速
F_g	重力
F_{ds}	拖曳力
m_s	雨滴質量
C_{dc}	拖曳係數
ρ_a	空氣密度
v	雨滴速度
A	雨滴截面積
r	雨滴半徑
V_3	雨滴落地後最終速度

h_2	降雨噴頭高程
ρ_r	紋溝密度
L_i	紋溝總長
A_r	降雨面積
R_b	分岔比

參考文獻

1. 林俐玲與董小萍，(1996)。土壤物理學實習手冊。國立中興大學水土保持學系
2. 許中立、陳慶雄，(2003)，夯實對風化泥岩剪力強度之影響，坡地防災學報 doi:10.29995/JSHR.200312.0002
3. 徐向舟、張紅武、朱明東，(2004)，雨滴粒徑的量測方法及其改進研究。中國水土保持通報(2): 22-24.
4. 陳振宇、葉全民、趙美香、霍文平、武永卿，(1996)，噴霧霧滴濾紙率定法研究初探 DOI : 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.1996.04.027
5. 賴俊成與王詠潔，(2019)。應用 Hairsine-Rose 模型於人工降雨實驗之土壤流失量評估。國立中興大學水土保持學系碩士學位論文
6. 謝豪榮、陳慶雄，(1986)，嘉義中埔石礮地之滑地研究，中華水土保持學報 17(2):107-122
7. 竇葆璋和周佩華，(1982)，雨滴的觀測和計算方法，水土保持通報
8. ASTM-D854, (2006). “Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer.” West Conshohochen, P., American Society for Testing and Materials.
9. Asadi H, Ghadiri H, Rose CW, et al. (2007) An investigation of flow-driven soil erosion processes at low streampowers. Journal of Hydrology 342: 134-142.
10. Brunton, D.A., Bryan, R.B., (2000). Rill network development and sediment budgets. Earth Surf. Process. Landf. 25, 783–800.
11. Bewket, W., Sterk, G., (2003). Assessment of soil erosion in cultivated fields using a survey methodology for rills in the Chemoga watershed. Ethiopia. Agric. Ecosyst. Environ. 97, 81–93.
12. Berger, C., Schulze, M., Rieke-Zapp, D., Schlunegger, F., (2010). Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity. Earth Surf. Process. Landf. 35, 1456–1467.
13. Cerdà, A., García-Fayos, P., (1997). The influence of slope angle on sediment, water and seed losses on badland landscapes. Geomorphology 18 (2), 77–90.
14. Chaplot, V., Le Bissonnais, Y., (2000). Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. Earth Surface Processes and Landforms 25, 145–153.

15. Dunkerley, D., (2008). Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments, a comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting. *Hydrol. Process.* 22, 4415–4435.
16. Di Stefano, C., Ferro, V., Pampalone, V., Sanzone, F., (2013). Field investigation of rill and ephemeral gully erosion in the Sparacia experimental area, South Italy. *Catena* 101, 226–234.
17. Fang, K.Y., Sun, L.Y., Tang, Z.H., (2015). Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: an experimental study using two loess soils. *Hydrol. Process.* 29, 2649–2658.
18. Fangshi Jiang, Zhenzhi Zhan, Jialin Chen, Jinshi Lin, Ming Kuang Wang, Hongli Ge, Yanhe Huang, (2018), Rill erosion processes on a steep colluvial deposit slope under heavy rainfall in flume experiments with artificial rain, *Catena* 169 (2018) 46–58
19. Govers, G., Giménez, R., van Oost, K., (2007). Rill erosion: exploring the relationship between experiments, modelling and field observations. *Earth Sci. Rev.* 84, 87–102.
20. Hairsine PB, Rose CW (1992a) Modeling water erosion due to overland flow using physical principles, I. Sheet flow. *Water Resources Research* 28 (1): 237-243.
21. Hairsine PB, Rose CW (1992b) Modeling water erosion due to overland flow using physical principles, II- Rill flow. *Water Resources Research* 28 (1): 245-250.
22. Heras, M.M., Espigares, T., Merino-Martín, L., Nicolau, J.M., (2011). Water-related ecological impacts of rill erosion processes in Mediterranean-dry reclaimed slopes. *Catena* 84, 114–124.
23. Issa OM, Bissonnais YL, Planchon O, et al. (2006) Soil detachment and transport on field- and laboratory-scale interrill areas: erosion processes and the size-selectivity of eroded sediment. *Earth Surface Processes and Landforms* 31: 929-939.
24. Jiang, D.S., Huang, G.J., (1984). Simulated experiment on the influence of slope gradient on rainfall infiltration. *Bulletin of Soil and Water Conservation* 4 (4), 10–13 In Chinese with English abstracts.
25. Jin, C.X., Cai, Q.G., Wang, Z.K., (1995). An experimental study of infiltration and erosion under slope gradients and vegetal covers. *Chinese Geography* 4, 62–73.
26. Janeau, J.L., Briquet, J.P., Planchon, O., Valentin, C., (2003). Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand. *European Journal*

- of Soil Science 54 (3), 543–553.
27. Jiang YL, Zheng FL, Wang B, et al. (2013) The impact of sheet and gully erosion on soil aggregate losses in the black soil region of Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*: 33(24): 7774–7781. (In Chinese, with English Abstract)
 28. Jiang, F.S., Huang, Y.H., Wang, M.K., Lin, J.S., Zhao, G., Ge, H.L., 2014. Effects of rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial deposit erosion in southeast China. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78, 1741–1752.
 29. Gilley, J. E., E. R. Kottwitz, J. R. Simanton, 1990, Hydraulic Characteristics of Rills.
 30. Lei, A.L., Tang, K.L., (1998). Kinetic condition of rill erosion on loess sloping face. *J. Soil Eros. Soil Water Conserv.* 4 (3), 39–43 (in Chinese, with English Abstract).
 31. Le'onard, J., Richard, G., (2004). Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. *Catena* 57, 233–249.
 32. Lynch, B., & Lommatsch, G. (2011). Modeling the velocity of a raindrop
 33. Lu J, Zheng FL, Li GF, et al. (2016) The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China. *Soil & Tillage Research* 161: 79–85.
 34. Morgan, R.P.C., (1977). Soil Erosion in the United Kingdom: Field studies in the Silsoe area, 1973–1975. Occasional Paper.4 Nat. Coll. Agr. Eng. Silsoe, UK.
 35. Mah, M.G.C., Douglas, L.A., Ringrose-Voase, A.J., (1992). Effects of crust development and surface slope on erosion by rainfall. *Soil Science* 154, 37–43.
 36. Mancilla, G.A., Chen, S., McCool, D.K., (2005). Rill density prediction and flow velocity distributions on agricultural areas in the Pacific Northwest. *Soil Tillage Res.* 84, 54–66.
 37. Ma RM, Li ZX, Cai CF, Wang JG (2014) The dynamic response of splash erosion to aggregate mechanical breakdown through rainfall simulation events in Ultisols (subtropical China). *Catena* 121: 279–287.
 38. Nassif, S.H., (1975). The influence of slope and rain intensity on runoff and infiltration. *Hydrological Sciences Bulletin* 20 (4), 539–552.
 39. Poesen, J., (1986). Surface sealing as influenced by slope angle and position of simulated stones in the top layer of loose sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* 11 (1), 1–10.
 40. Polyakov, V.O., Nearing, M.A., 2003. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions. *Catena* 51, 33–43.
 41. Pan Zhang, Wenyi Yao , Hongwu Tang ,

- Guanju Wei , Lingling Wang, (2017), a Laboratory investigations of rill dynamics on soils of the Loess Plateau of China, *Geomorphology* 293 (2017) 201–210
42. Rauws, G., Govers, G., (1987). Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. *J. Soil Sci.* 39, 111–124.
43. Singer, M.J., Blackard, J., (1982). Slope angle–interrill soil loss relationships for slopes up to 50%. *Soil Science Society of America Journal* 46, 1270–1273.
44. Shen, H.O., Zheng, F.L., Wen, L.L., Han, Y., Hu, W., (2016). Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope. *Soil Tillage Res.* 155, 429–436.
45. Torri, D., (1987). Threshold conditions for incipient rilling. *Catena Suppl.* 8, 97–105.
46. Vaezi AR, Ahmadi M, Cerdà A (2017) Contribution of raindrop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls. *Science of the Total Environment* 583: 382-392.
47. Wirtz, S., Seeger, M., Ries, J.B., (2012). Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena* 91, 21–34.
48. Yuan, J.P., Lei, T.W., Guo, S.Y., Jiang, D.S., (2001). Study on spatial variation of infiltration rates for small watershed in loess plateau. *Journal of Hydraulic Engineering* 10, 88–92
-

109年5月13日收稿

109年6月15日修改

109年6月19日接受

水土保持學報 50 (4): 2595–2610 (2020)

Journal of Soil and Water Conservation, 50 (4): 2595–2610 (2020)