

細粒土壤之坡面流沖蝕與紋溝形成機制

王咏潔⁽¹⁾ 陳敬旻^{(2)*}

摘 要

坡面流沖蝕研究已有多數歷史，發展出許多經驗或半經驗公式，例如著名的通用土壤流失公式(Universal Soil Loss Equation, USLE) 及其修正版本如 RUSLE 和 MUSLE 等(劉青泉 et al. 2014)。然而，經驗公式多受的域限制，需針對特定的區及其氣候條件或沖蝕類型進行研究，調查校正每個參數，建立完整資料庫予以支持。本研究以沖蝕箱進行細粒土壤之坡面流沖蝕試驗，探討坡面紋溝形成過程與機制，並找出紋溝發生之沖蝕臨界條件、物理參數與量化關係式。本研究採用阿公店水庫的區土壤，其土壤性質屬於泥岩，顆粒細小。現的土壤經過篩處理後，先進行土壤特性基本試驗，如比重、阿太保限度、含水量、有機質含量、粒徑分佈及孔隙水 pH 值和導電度等。接著進行坡面流沖蝕試驗，以預設容積密度將土壤分層填入沖蝕箱(0.82 m×0.25 m×0.21 m)，以定水頭點源方式進行不同流況與坡度之十小時之沖蝕試驗，觀測未飽程土體，在坡面流沖蝕下之紋溝發展過程。實驗結果指出，土壤粒徑介於 0.001~1mm 之間，質的屬於壤土且有機質含量低，比重介於 2.38~2.74 之間，依阿太保限度分類屬於 ML 和 OL。藉由紋溝之發展過程與沖蝕量測量，得找出細粒土壤坡面紋溝發生之臨界條件及其物理參數，探討土壤物化特性對沖蝕臨界條件之相關性與影響程度，並找出量化關係式，其關係式為 $SL=30.76*Q^{2.23}*S^{0.13}$ 、 $SL=-14.52+0.62S+37.82Q$ 、 $SL=0.011A_{total.rill}^{1.09}$ 、 $A_{total.rill}=898.58*Q^{1.13}S^{0.16}$ ，其中 SL 為沖蝕十小時的土壤流失量，單位為公斤；Q 為原預設之流量，單位為 L/min；S 為原預設之坡度，單位為%； $A_{total.rill}$ 為實驗結束後之紋溝總面積之合，單位為 cm²。可應用於坡面流沖蝕分析與災害防治。

(**關鍵詞：**細粒土壤、坡面流、紋溝沖蝕)

The Mechanism of Overland Flow Erosion And Rill Formation in Fine Sediment

YUNG-CHIEH WANG⁽¹⁾ CHING-MIN CHEN^{(2)*}

(1)國立中興大學水土保持學系助理教授

(2)國立中興大學水土保持學系碩士班研究生 (*通訊作者 E-mail: liberty810711@gmail.com)

ABSTRACT

Researchers have been interested in rill erosion for long times, building lots of empirical or semi-empirical models, such as Universal Soil Loss Equation (USLE), Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), and Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE). However, the applicability of the empirical models relies heavily on the localized database of the input parameters. The soil used in this study was the mudstone in A-Gong-Dian Reservoir. The soil was oven-dried before being crushed and passed through the #40 sieve. The sieved soil was used to carry out basic geotechnical tests such as specific gravity, Atterberg limits, moisture content, organic matter, particle size distribution, and pH value and conductivity of the pore water. As the results, the soil is classified as loam in soil texture triangle, and ML or OL based on Atterberg limits with fine sediments (size range from 0.001~1mm) and low organic. The specific gravity of soil ranged from 2.38 to 2.74. Then the overland flow erosion experiments were carried out using an erosion box which was 0.82 meters long, 0.25 meters wide, and 0.21 deep. The soil was filled in the box with a predetermined bulk density of 1.35 g/cm^3 . Prior to the erosion experiments, different slope gradients and flow rates were adjusted and calibrated; specifically, this research conduct the rill experiments under two flow rates (0.4 and 0.8 L/min) in constant water heads and three slope gradients (<0.01%, 5%, and 15%) for ten hours. And then measure the amount of eroded soil and the dimensions of rills to qualify relationships ($SL=30.76*Q^{2.23}*S^{0.13}$ 、 $SL=-14.52+0.62S+37.82Q$ 、 $SL=0.011A_{\text{total.rill}}^{1.09}$ 、 $A_{\text{total.rill}}=898.58*Q^{1.13}*S^{0.16}$), in which SL(kg) is soil loss in 10 hrs; Q(L/min) is required flow rates; S(%) is slope gradients; $A_{\text{total.rill}}(\text{cm}^2)$ is total rills area after experiment finished), which can be applied in overland flow erosion analysis and disaster remediation.

(**Keywords** : Fine sediment 、Overland flow 、Rill erosion)

前言

坡面流沖蝕之研究已發展許多年了，但早期之研究都放在狀態上的描述，這幾年來則轉向把現象量化，隨著電腦科技的進步與計算方法地快速發展，坡面流的量

化以建構出可用的數學模型(劉青泉 et al. 2004)。實驗方法大概可以分成兩類，一類為室內實驗；一類為野外觀察紀錄。其中室內實驗通常會將土壤放置於沖蝕箱中，提供水源觀察沖蝕現象。在填土時，為了

消弭邊壁效應對土壤沖蝕的影響，大概常見有四種方法：於邊壁黏砂子(Chen et al. 2016; Shen et al. 2016; Zhang et al. 2016)；於邊壁上黏砂紙；將邊壁邊的土壤做壓實(劉淼 et al. 2015; 吳淑芳 et al. 2015; 沈海鷗 et al. 2014)；或者將邊壁土壤填的較中間高些(Chen et al. 2016; He et al. 2016)，當然也不少人沒考慮到邊壁效應，包含本次的研究於實驗初期，回顧文章過少，就沒考慮到邊壁效應。常見的填土方式通常採每五公分分層填入，再填入下一層時會將表面的土壤耙鬆，以消弭空間的不連續性，而在試驗的土壤下，有的會填入一層總體密度較試驗土壤高的土壤，以模擬犁底層，有的則是填入一層總體密度較試驗土壤的土壤，以模擬地下排水的現象，有的兩個因數都考慮到，則填入較疏鬆的一層，也填入較密集的一層，有的為了消弭下層土壤影響到試驗土壤，則會於兩層間填入一層紗布。

紋溝沖蝕試驗常見的供水方式，有下列幾種：1.降雨模擬器 2.坡面流供水 3.管流等，也有研究是結合降雨模擬器和管流供水的兩種供水模式，其設計是為瞭解決降雨模擬器供應的水量不足以使紋溝中的

水量產生匯集，加以管流供水給予輔助。但本試驗採第三種供水方式(管流供水)。相關整理請參照表一：

表 1 前人研究的供水方式與控制因數

Table 1 The Typical of Water Supply System and Control Variables in Past Study		
水 源	研 究 者	控 制 因 數
降雨 模擬 器	Aksoy et al. (2016)	坡度，水量
	He et al. (2016)	坡度
	Shen et al. (2015a)	坡度，水量
	Shen et al. (2015b)	水量
坡 面 流 供	Chen et al. (2016)	坡度，水量
	牛耀彬 et al. (2016)	坡度，水量
	Dong et al. (2014)	坡度，水量
管 流	Silva et al. (2016)	水量
	Shen et al. (2016)	坡度，水量
	Zhang et al. (2014)	坡度，水量
	馬小玲 et al. (2016)	坡度，水量
兩 種	陳浩 et al. (2011)	坡度，水量
	袁殷 et al. (2010)	坡度，水量

†兩種：使用降雨模擬器的同時，也以管流施放水源。

用於沖蝕試驗地土壤以處理方式做分類，通常可以分為三類：採集後不處理(Shen et al. 2015a)、風乾不過篩(Shen et al. 2015b)、風乾過篩(Berger et al. 2010; Fox and Bryan 2000; Huang et al. 2015;

Stefanovic and Bryan 2009)。但本次試驗採用烘乾過篩土，其主要目的是為了減少含水量這個變因，使試驗土壤呈現極端狀態，含水率為零。

牛耀彬 et al. (2016)發現穩定溝寬和流量呈正相關，溝寬和溝深對於放水時間呈現指數關係，溝寬和溝深相乘對於放水時間呈現線性關係，溝寬和坡度呈現負相關和流量呈現正相關，溝深和流量呈現正相關，但對坡度關係受到流量的影響，溝寬對於逕流量呈現指數正相關，溝深對於逕流量呈現降幂正相關，溝寬和溝深相乘對於逕流量和泥沙量呈現降幂正相關。

Shen et al. (2015a) 觀察到土壤流失率，紋溝沖蝕率和紋溝發生時的臨界單寬逕流率對降雨強度和坡度呈現幂次正相關

($A=aR^bS^c$)，隨著降雨和坡度增加，平均剪應力，水流能量和單位水流能量也隨之增加，單寬紋溝沖蝕對平均剪應力，水流能量和單位水流能量呈現線性正相關。He et al. (2016)發現總紋溝長，紋溝密度，最大紋溝深，紋溝沖蝕總量，紋溝節點和紋溝數呈正相關，紋溝寬深比，平均紋溝寬最長紋溝至坡頂距和坡度呈負相關。Silva et al. (2016)發現了隨著流速增加，土壤沖蝕

量和水利參數(水利半徑，剪應力)隨之增加；紋溝分散量和水流剪應力呈現線性關係($R^2=0.91$)(和 x 截距為臨界剪應力)。Shen

et al. (2015b)觀察到降雨強度越大，紋溝發展越複雜越迅速，於同降雨強度下，當降雨量越多平均紋溝曲率複雜度，平均紋溝曲角，紋溝面積密度和紋溝密度也隨之增加，降雨強度大，土壤流失比例少，這是因為更多產生層狀沖蝕，紋溝寬度是最好地形演變指標，平均曲率複雜度是最好的推導而來的地形演變指標。牛耀彬 et al.

(2016)指出穩定溝寬和流量呈正相關，溝寬和溝深對於放水時間呈現指數關係，溝寬和溝深相乘對於放水時間呈現線性關係，溝寬和坡度呈現負相關和流量呈現正相關，溝深和流量呈現正相關，但對坡度關係受到流量的影響，溝寬對於逕流量呈現指數正相關，溝深對於逕流量呈現降幂正相關，溝寬和溝深相乘對於逕流量和泥沙量呈現降幂正相關。沈海鷗 et al. (2014)發現一開始產生的紋溝是斷續的，之後會串連一起，紋溝數密度下降；隨著降雨時間，紋溝平均寬度、深度和紋溝平均沖蝕深度也隨之增加；紋溝寬度和深度隨著距紋溝溝頭距離增加呈現先增加後減少；紋溝深度超過

耕種層後，紋溝寬度會明顯增加。陳俊傑 et al. (2013) 坡度對土壤本身特性影響不顯著；產流時間隨著降雨強度增大而提前發生；產流時間提前差值隨著坡度增加而減小，特別是粉質黏壤土，代表土壤特性影響坡面產流；穩定入滲速率和黏粒含量呈現降幕負相關；90 分鐘累積入滲量和黏粒含量呈現指數負相關；粉質黏壤土產流時間較粉壤土快；紋溝快速發育和不斷崩塌與鄰近紋溝襲奪連通而導致坡面流短時間減小；粉質黏壤土產流速率一開始快速急速增加便達到波動平衡，而粉壤土急速增加的時間相對較長；坡長增加，波動幅度增加，達到穩定時間也增加；粉質黏壤土沖蝕量較粉壤土高；產砂率先增加後達到平衡並沒因紋溝發展產生明顯變化；土壤顆粒穩定性隨坡度增加而下降；粉壤土比粉質黏壤土更具抗蝕性；粉質黏壤土較易產生紋溝，而粉壤土產生的紋溝的深度和寬度較大，密度較小。和繼軍 et al. (2013)發現粉質黏壤土較易產生蝕溝(產生跌坎至產生紋溝時間短)；逕流泥沙濃度由最高而下降至最低，和慢慢提升達到穩定；坡度和逕流泥沙濃度呈現正相關；泥沙濃度波動較大可能和邊壁隨機崩塌有關；紋

溝產生時，泥沙濃度會快速增加達到最大值。趙宇 et al. (2014)觀察到坡度流量變大，累積土壤沖蝕量和泥水濃度隨著紋溝長度成指數型的增加；出流口的泥沙累積量對坡度及流速呈現線性正相關；對於粉質壤土，流量 4, 8L/min 下的臨界坡度為 20~25 度。劉淼 et al. (2015)發現產流時間隨著坡度增加有下降趨勢；隨著坡度和降雨強度增加，紋溝出現時間有縮短的趨勢；對於 10, 15 度的坡面，沖蝕率隨著紋溝發展逐漸增加後趨於平衡，對於 20, 25 度的坡面，沖蝕速率一直增加；產流速率隨著時間慢慢增加後趨於穩定；對於小坡度，紋溝較長且深但較窄，而對於大坡度，紋溝短且淺，但呈現較寬的樹枝狀；坡度和沖蝕量呈正相關，隨著坡度增加，降雨強度對沖蝕量影響逐漸降低；對於 10~20 度，隨著坡度增加，逕流有增加趨勢，但 25 度時明顯下降，這是因為投影面積變小，此時這坡度稱為臨界坡度；紋溝和紋溝間的沖蝕比例和逕流量，坡度和降雨強度呈現幕次關係。王愛娟 et al. (2016)發現紋溝試驗中施放清水還是含沙水流(此研究採坡面流供水)會對沖蝕試驗有影響，於試驗中清水的流速皆會大於含沙水流。

研究區域

研究區域位於臺灣南部的阿公店水庫，其地質屬於頭嵙山層，其土壤大部分屬於沖積土，其大部分坡度皆屬三級坡以下，經由實驗測定土壤屬於低塑性的粉壤土。

研究方法

土壤基本試驗

在做土壤基本試驗時，本研究會將土壤做前置處理，先把土壤送入攝氏 105 度的恆溫烘箱中烘乾一天，接著取出土壤以橡皮槌敲打分散，並使其過四十號篩網，便完成土壤前置處理作業。接著本研究會依照 ASTM(ASTM-C136/C136M-14 2014; ASTM-D422-63(2007)e2 1998; ASTM-D854-14 2014; ASTM-D2216-10 2010; ASTM-D2487-11 2011; ASTM-D2862-16 2016; ASTM-D2974-14 2014; ASTM-D4318-10e1 2010; ASTM-D4513-11 2011; ASTM-D6913-04(2009)e1 2009; ASTM-F1632-03(2010) 2010; Deshpande and Telang 1950)的規範量測含水量

(Moisture content)，阿太保限度試驗

(Atterberg Limits)、粒徑分析(包含篩分析、比重計法及吸管法)和有機質。pH 值和導電度測量方式，首先取一些處理過的土樣混入水中，達到本研究所預定的含水量，接著以 METTLER TOLEDO 公司的導電度儀和 pH 儀測量樣品，採五重複試驗，在此強調測量導電度和 pH 值所使用的水並非去離子水，則是沖蝕試驗所用的水，屬於地下水。

一、土壤沖蝕試驗

影響紋溝的沖蝕現象的因數包含了降雨、逕流、地形、土壤等因數(Sun et al. 2013)，本次試驗選擇了兩個因數做為控制因數，分別為流量和坡度，總體密度(Bulk density)設定為 1.35kg/m^3 。本研究將上述處理過的土壤填於長形沖蝕箱(長約 0.82 米，寬約 0.25 米，高約 0.26 米)，本研究會依照預設的總體密度分三層的填入沖蝕箱中，並盡量給予抹平，並以定水頭施放水去做試驗，以縮時錄影每十五秒拍一張做觀察，觀察十個小時，並於每三至五分鐘量測一次產沙率，採秤重法測量。

(1) 流量控制

流量本研究會透把地下水輸入一桶中，

並於施放水時，讓些微水流溢出桶外，以確保其定水頭，並於桶外放置一塊抹布來消能溢出的水，避免水打擊到地上，間接濺到土面，影響試驗結果。接著控制水量，並秤其施放三分鐘水的重量達到本研究先前之假設，重複十次，並紀錄之，接著會於實驗過程中每個小時量測一次水溫，並將其取平均，透過平均水溫把重量流量轉成體積流量，而目前假設兩個流量分別為 0.8L/min 和 0.4L/min。

(2) 坡度控制

坡度本研究採用山保條例中所劃分的六級坡作為實驗選取坡度的依據，但本研究只選取其中一級坡至三級坡的坡度，這原因有二，其一由於礙於沖蝕箱不夠長，無法選定太陡的坡度做試驗，其二研究區域中三級坡以下所占面積高達 84.4%(財團法人成大研究發展基金會 2014)，因此本研究選定三個坡度<0.01%，5%，15%，其中<0.01%其意義為假設坡度小於 0.01%都視為水準，在數據分析中坡度為水準時，視為 0.01%做分析，以解決幕次迴歸分析中無法迴歸的問題。



圖 1 研究方法與流程

Figure 1 The Flowchart and The Measures of This Study

結果與討論

一、基本土壤試驗

實驗初步結果為土壤粒徑介於 0.001~1mm 之間，每次採集回來的結果會些微不同，和採掘的點不同有關(磐誠工程顧問有限公司 2016)；質地屬於壤土且有機質含量極低；比重介於 2.38~2.74 之間；依阿太保限度分類屬於 ML 和 OL；發現 pH 值和含水量呈現正相關，而純地下水的 pH 值為 7.07。

Table 2 The Properties of The Soil in
Different Sites

量測項目	單位	量驗結果		
		大壩	新尖大橋	蓬萊橋
含水量	%	50.7	90.0	89.2
比重		2.25	2.11	2.23
孔隙比	%	0.86	1.54	1.81
液性限度	%	24.9	42.9	35.8
塑性限度	%	19.5	26.7	22.7
塑性指數	%	5.4	16.2	13.1
黏土	%	5.08	6.99	8.91
粉土	%	47.11	70.25	70.80
砂土	%	47.81	22.76	20.29

†節錄於磐誠工程顧問有限公司 (2016)。

其中代碼為英文字的部分，為本研究所做的試驗，每組試驗為三至五組資料做平均，編號方式為試驗方法加上第幾次採集的土

壤，而代碼中文字的部分為參考其他文獻的資料繪製而成。

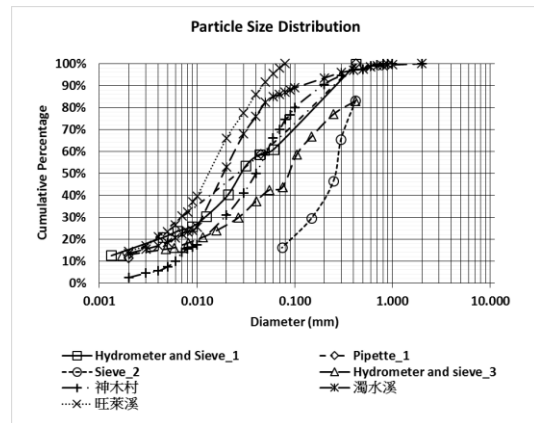


圖 2 粒徑分析

Figure 2 Particle Size Distribution

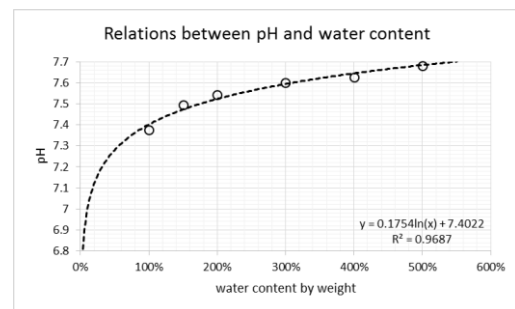


圖 3 pH 值和含水量的關係

Figure 3 The Relations between pH Value
and Moisture Content

每點資料採五重複試驗，做平均。

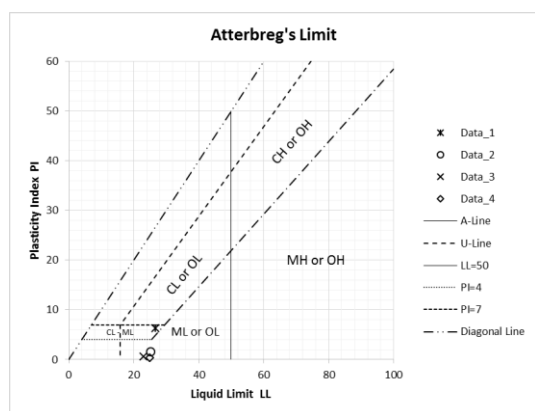


圖 4 阿太保限度的結果

Figure 4 The Results of The Classification
of The Atterberg's Limit

二、土壤沖蝕試驗

在實驗初期，可以觀察到土壤表面有一層薄膜水，但其覆蓋面積受流量和坡度的影響，通常較大的流量，薄膜水覆蓋的土壤面積較大，坡度較大，薄膜水覆蓋也較大。

(一) 量化紋溝關係式

在每次試驗中會將沖蝕結束後的沖蝕箱整個秤重，在將箱中的土壤挖出烘乾秤重，接著透過 Excel 運算可以推得實驗結束時的土壤含水量和整個試驗中流失的土壤量。

將第十個小時的照片中的沖蝕箱的上方擷取出來，接著會透過 Photoshop 這套軟件拉成矩形，再拉成 82*25 的比例，接著透過顏色差，把紋溝擷取出來，最後透過 ImageJ 這套軟件量測紋溝面積和長度，最後以 Excel 算出平均寬度和長寬比。

前人發現土壤流失量對流量和坡度呈現幕次關係($SL=aQ^bS^c$)(Aksoy et al. 2016; Chen et al. 2014; Wang et al. 2015; Wu et al. 2016; Zheng et al. 2014)，也研究者發現土壤流失量對於流量和坡度呈現線性關係($SL=a+bQ+cS$)(王鵬飛 et al. 2015; 趙宇 et al. 2014; Chen et al. 2016)；牛耀彬 et al. (2016)發現在不同時間點下，紋溝大小和累積產沙量有幕次關係，但本研究選定最後個時間點的紋溝大小和總土壤流失量做分析，結果仍算屬於合理範圍內；張攀 and 姚文藝 (2014)提到紋溝的大小和坡度與流量有關，He et al. (2016)也發現紋溝面積和坡度有關，因此本次研究選定總沖紋溝面積和坡度與流量做分析。在幕次關係式迴歸時，坡度不可以為零，因此在此假設坡度小於 0.01% 皆視為水準，上述相關結果整理成下方表 3：

表 3 紋溝量化結果關係式

Table 3 The Qualifications of Rills

Erosion	
Result	R ²
$SL=30.76*Q^{2.23}S^{0.13}$	0.82
$SL=-14.52+0.62S+37.82Q$	0.81
$SL=0.011A_{total.rill}^{1.09}$	0.78
$A_{total.rill}=898.58*Q^{1.13}S^{0.16}$	0.70

†SL 為沖蝕十小時的土壤流失量，單位為公斤；Q 為原預設之流量，單位為 L/min；S 為原預設之坡度，單位為%；A_{total.rill} 為實驗結束後之紋溝總面積之合，單位為 cm²。

(二) 紋溝尺寸關係式

有些研究者針對紋溝的長、寬、深和麵積幾個因數及其運算因數做分析。在此次研究中只可以得到長、寬和麵積，透過迴歸發現紋溝面積和長與寬有較好的關係，隨著紋溝面積增大，寬度和長度也會增大。得到關係式可以參照表 4：

表 4 紋溝尺寸的關係式

Table 4 The Trend line Equation in The

Dimensions of Rills

Result	R ²
$A_{Rill}=0.14L^{1.51}$	0.85
$L/W_{Mean}=7.26L^{0.49}$	0.38
$W_{Mean}=0.14L^{0.51}$	0.40
$A_{Rill}=-7.01+31.71W_{Mean}$	0.84
$A_{Rill}=-9.29+0.71L+30.01W_{Mean}$	0.85

†A_{Rill} 為紋溝面積，單位為 cm²；L 為紋溝長，單位為 cm；L/W_{Mean} 為長和平均寬比，為無因次；W_{Mean} 為平均寬，單位為 cm。

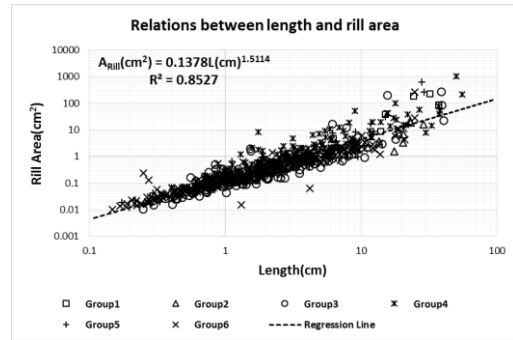


圖 5 紋溝長和紋溝面積的關係

Figure 5 The Relations between Rill

Length and Rill Area

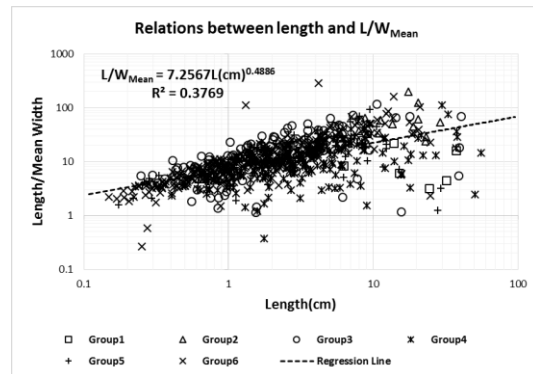


圖 6 紋溝長和紋溝長和平均寬比的關係

Figure 6 The Relations between Rill

Length and Rill Length to Mean Width

Ratio

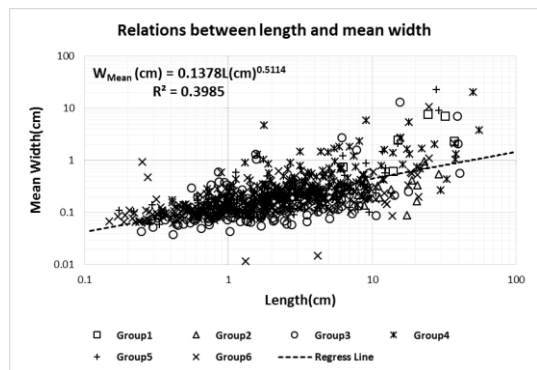


圖 7 紋溝長和平均寬的關係

Figure 7 The Relations between Rill Length and Mean Width

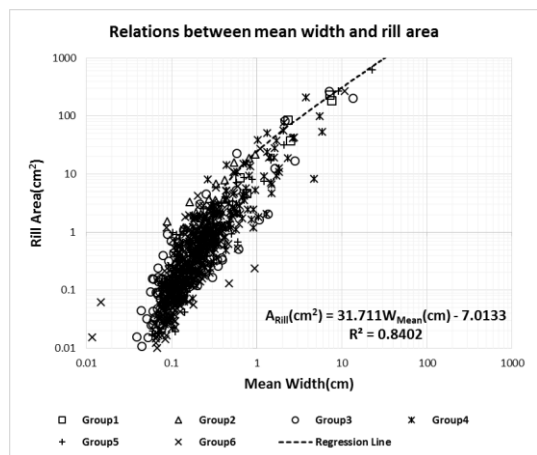


圖 8 紋溝平均寬和紋溝面積的關係

Figure 8 The Relations between Mean Rill Width and Rill Area

(三) 濃度變化

在此次研究中發現，產流時間會隨著坡度流量增大有縮短的趨勢，對於兩個不同流量下，坡度於 15%，兩者產流時間約

差半小時；也發現一開始發生產流時，對於產沙量，小流量是大流量的兩倍(圖 9)。

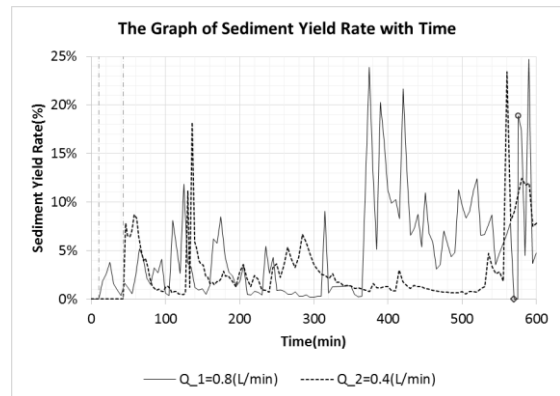


圖 9 在坡度 15%下，不同流量對泥沙產量隨時間的影響，

Figure 9 The Sketch of Sediment Yield Rate with Aging under Two Flow Rates in 15% Slope

圖中實線(Solid Line)為大流量(8L/min)下，泥沙產量隨時間變化的關係線；圖中虛線(Dash Line)為小流量(4L/min)下，泥沙產量隨時間變化的關係線；左端的第一條點畫線(Dot Dash Line)，為大流量下，始產沙的時間點；左端第二條點畫線，為小流量下，使產沙時間點，不同流量下，兩個產沙時間差約半小時。圖中菱點處為大流量下，產沙率降為零處；圈點處則是再次產沙，停止產沙時間約六分鐘。

結論

本研究藉由紋溝之發展過程與沖蝕量測量，得找出細粒土壤坡面紋溝發生之臨界條件及其物理參數，探討土壤物化特性對沖蝕臨界條件之相關性與影響程度，並找出量化關係式，應用於坡面流沖蝕分析與災害防治。透過分析得知可以透過坡度和流量預測土壤流失量；也可以透過得知紋溝面積推估。紋溝大小和坡度與流量存在了幕次關係式，此外紋溝長度與平均寬度都和紋溝面積大小存在正向關係。未來可以應用於萃取 DEM 中的紋溝大小預測出土壤流失的大小。

誌謝

感謝游繁結老師提供沖蝕箱和南區水資源局提供的清淤的水庫泥沙，使得本次研究可以順利進行，特於此敬上誠摯的感謝。

參考文獻

1. 馬小玲, 張寬地, 董旭, 楊明義 & 楊帆, 2016, 黃土坡面細溝流土壤侵蝕機理研究, 農業機械學報 (9):134-140.
2. 牛耀彬, 高照良, 李永紅, 羅珂, 袁雪紅, 杜捷 & 張翔 (2016), 「工程堆積體坡面細溝形態發育及其與產流產沙量的關係」, 農業工程學報, 32 (19), 頁 154-161。
3. 王愛娟, 符素華, 馮克義 & 朱小立, 2016, 放水沖刷條件下紫色土細溝侵蝕特徵, 中國水土保持科學, 14(5):23-28.
4. 王鵬飛, 鄭子成 & 張錫洲(2015), 「玉米苗期橫壟坡面地表糙度的變化及其對細溝侵蝕的影響」, 水土保持學報, 29 (2), 頁 30-34。
5. 劉青泉, 李家春, 陳力 & 向華 (2004), 「坡面流及土壤侵蝕動力學(I)-----坡面流」, 力學進展, 34 (3), 頁 360-372。
6. 劉青泉, 李家春, 陳力 & 向華 (2014), 「坡面流及土壤侵蝕動力學(II) -----土壤侵蝕」, 力學進展, 34 (4), 頁 493-506。
7. 劉淼, 楊明義 & 張風寶(2015), 「黃土坡面細溝發育及細溝與細溝間侵蝕比率研究」, 水土保持學報, 29 (1), 頁 12-16。
8. 吳淑芳, 劉政鴻, 霍云云 & 孟慶香 (2015), 「黃土坡面細溝侵蝕發育過程與模擬」, 土壤學報, 52 (1), 頁

- 48-56。
9. 張攀 & 姚文藝 (2014),「坡面細溝形態與侵蝕產沙間的量化回應研究進展」, 中國水土保持 (2)。
 10. 沈海鷗, 鄭粉莉, 溫磊磊, 盧. 嘉 & 韓. 勇 (2014),「黃土坡面細溝侵蝕形態試驗」, 生態學報, 34 (19), 頁 5514-5521。
 11. 和繼軍, 呂燁, 宮輝力 & 蔡強國 (2013),「細溝侵蝕特徵及其產流產沙過程試驗研究」, 水利學報, 44 (4)。
 12. 陳俊傑, 孫莉英, 蔡崇法, 劉俊體 & 蔡強國 (2013),「不同土壤坡面細溝侵蝕差異與其影響因素」, 土壤學報, 50 (2), 頁 281-288。
 13. 陳浩, 王占禮, 劉俊娥, 譚貞學, 袁殷 & 王莎, 2011, 黃土坡面細溝水流含沙量變化過程試驗研究, 水土保持學報, 25(5):8-11.
 14. 趙宇, 陳曉燕, 米宏星 & 莫斌 (2014),「基於體積法對黃土細溝侵蝕沿程分佈模擬的研究」, 土壤學報, 51 (6), 頁 1234-1241。
 15. 袁殷, 王占禮, 劉俊娥, 譚貞學, 陳浩 & 王莎, 2010, 黃土坡面細溝徑流輸沙過程試驗研究, 水土保持學報, 24(5):88-91.
 16. 財團法人成大研究發展基金會 (2014),「103 年度阿公店水庫空庫防淤泥砂觀測及成效評估」 (Sediment Observation and Efficiency Evaluation for Desiltation of Agongdian Reservoir by Using Empty Flushing in 2014), : 經濟部水利署南區水資源局。
 17. 磐誠工程顧問有限公司 (2016),「阿公店水庫減淤方案規劃一年度工作成果報告」(經濟部水利署南區水資源局)。
 18. Aksoy, H., E. Eris & G. Tayfur, 2016, Empirical Sediment Transport Models Based On Indoor Rainfall Simulator And Erosion Flume Experimental Data, Land Degradation & Development.
 19. ASTM-C136/C136M-14, 2014, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, Astm, 04.02.
 20. ASTM-D422-63(2007)e2, 1998, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, Astm.
 21. ASTM-D854-14, 2014, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, Astm, 04.08.

22. ASTM-D2216-10, 2010, Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, Astm,04.08.
23. ASTM-D2487-11, 2011, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), Astm,35(4).
24. ASTM-D2862-16, 2016, Standard Test Method for Particle Size Distribution of Granular Activated Carbon, Astm,15.01.
25. ASTM-D2974-14, 2014, Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils, Astm,04.08.
26. ASTM-D4318-10e1, 2010, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, Astm,4.08.
27. ASTM-D4513-11, 2011, Standard Test Method for Particle Size Distribution of Catalytic Materials by Sieving, Astm,05.06.
28. ASTM-D6913-04(2009)e1, 2009, Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, Astm,04.09.
29. ASTM-F1632-03(2010), 2010, Standard Test Method for Particle Size Analysis and Sand Shape Grading of Golf Course Putting Green and Sports Field Rootzone Mixes, Astm,15.07.
30. Berger, C., M. Schulze, D. Rieke-Zapp & F. Schlunegger, 2010, Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity, Earth Surface Processes and Landforms,35(12):1456 – 1467.
31. Chen, X.-y., Y. Zhao, H.-x. Mi & B. Mo, 2016, Estimating rill erosion process from eroded morphology in flume experiments by volume replacement method, CATENA,136:135-140.
32. Chen, X. Y., Y. Zhao, B. Mo & H. X. Mi, 2014, An Improved Experimental Method for Simulating Erosion Processes by Concentrated Channel Flow, Plos One,9(6):e99660-e99660.
33. Deshpande, V. V. & M. S. Telang, 1950, Pipet Method of Sedimentation Analysis. Rapid Determination of Distribution of particle Size, Analytical Chemistry,22(6):840-841.

34. Dong, Y., X. Zhuang, T. Lei, Z. Yin & Y. Ma, 2014, A method for measuring erosive flow velocity with simulated rill, *Geoderma*, 232 – 234:556-562.
35. Fox, D. M. & R. B. Bryan, 2000, The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient, *Catena*, 38(3):211-222.
36. He, J.-j., L.-y. Sun, H.-l. Gong, Q.-g. Cai & L.-J. Jia, 2016, The characteristics of rill development and their effects on runoff and sediment yield under different slope gradients, *Journal of Mountain Science*, 13(3):397-404.
37. Huang, Y., X. Chen, B. Luo, L. Ding & C. Gong, 2015, An experimental study of rill sediment delivery in purple soil, using the volume-replacement method, *Peerj*, 3(1):e1220.
38. Shen, H., F. Zheng, L. Wen, Y. Han & W. Hu, 2015a, Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope, *Soil and Tillage Research*, 155:429-436.
39. Shen, H., F. Zheng, L. Wen, J. Lu & Y. Jiang, 2015b, An experimental study of rill erosion and morphology, *Geomorphology*, 231:193-201.
40. Shen, N., Z. Wang & S. Wang, 2016, Flume experiment to verify WEPP rill erosion equation performances using loess material, *Journal of Soils and Sediments*, 16(9):2275-2285.
41. Silva, L. F. d., E. A. Cassol, J. D. Murlikic, B. P. d. Silvad & M. L. Pandolfo, 2016, Susceptibility to rill erosion of a 12-year-old soil reconstructed after coal mining, *International Journal of River Basin Management*, 14(4):379-384.
42. Stefanovic, J. R. & R. B. Bryan, 2009, Flow energy and channel adjustments in rills developed in loamy sand and sandy loam soils, *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(1):133-144.
43. Sun, L., H. Fang, D. Qi, J. Li & Q. Cai, 2013, A review on rill erosion process and its influencing factors, *Chinese Geographical Science*, 23(4):389-402.
44. Wang, Z., X. Yang, J. Liu & Y. Yuan, 2015, Sediment transport capacity and its response to hydraulic parameters in experimental rill flow on steep slope, *Journal of Soil & Water*

- Conservation,70(1):36-44.
45. Wu, B., Z. Wang, N. Shen & S. Wang, 2016, Modelling sediment transport capacity of rill flow for loess sediments on steep slopes, Catena,147:453-462.
 46. Zhang, P., H. Tang, W. Yao, N. Zhang & L. V. Xizhi, 2016, Experimental investigation of morphological characteristics of rill evolution on loess slope, CATENA,137:536-544.
 47. Zhang, Q., Y. Dong, F. Li, A. Zhang & T. Lei, 2014, Quantifying detachment rate of eroding rill or ephemeral gully for WEPP with flume experiments, Journal of Hydrology,519:2012-2019.
 48. Zheng, Z. C., S. Q. He & F. Q. Wu, 2014, Changes of soil surface roughness under water erosion process, Hydrological Processes,28(12):3919 – 3929.

水土保持學報 49 (2): 2065–2082 (2017)

Journal of Soil and Water Conservation, 49 (2): 2065–2082(2017)

105 年 12 月 19 日收稿

105 年 12 月 29 日修改

105 年 12 月 30 日接受