
坡地土壤沖蝕力學研究—以紋溝沖蝕為例
Mechanical research of soil erosion on
slopeland-Analysis of rill erosion
成果報告（初稿）

執 行 單 位：國立中興大學水土保持學系

執 行 期 間：105 年 04 月 01 日至 105 年 12 月 31 日

計畫主持人：王詠潔 助理教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 105 年 12 月

（本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考）

坡地土壤沖蝕力學研究—以紋溝沖蝕為例

摘要

台灣山坡地土砂災害問題受氣候變遷與地質破碎影響，複雜且嚴峻，以經驗公式推估土壤沖蝕量雖操作便利，但結果之準確度難以評估且不確定性高，亦難以因應極端氣候事件帶來之衝擊。本研究計畫以地形及水流動力學角度切入，探討紋溝沖蝕之力學機制與過程；進行土壤物化特性及坡面流沖蝕試驗，觀測臨前土壤狀態在坡面流沖蝕下之沖蝕溝發展過程，求得坡面沖蝕量及紋溝發生之臨界條件，找出量化關係式，應用於坡面流沖蝕分析與災害防治。

主要成果提出阿公庫集水區泥砂多屬黏土及砂土顆粒大小，粒徑分布界於 0.001mm 到 0.1mm ($d_{50}=0.031\text{mm}$)；現地土樣多屬 ML-OL 之無機質低塑性土，其平均比重約 2.6。坡面沖蝕試驗結果指出紋溝總沖蝕量得以坡度、逕流量與紋溝總面積估算；並提出紋溝尺寸參數間之正向幂次關係(面積、平均寬度及長寬比等皆正比於紋溝長度)；且發生紋溝沖蝕之臨界剪應力條件與土壤性質及地形(坡度)最為相關。

關鍵詞：紋溝沖蝕、阿公店水庫、物理過程、土壤沖蝕臨界條件

Mechanical research of soil erosion on slopeland-Analysis of rill erosion

Abstract

Impacted by global climate change and ruptured geological conditions, the problem of soil and mud disaster on slopeland in Taiwan has become more complicated and serious. The use of empirical equations to estimate soil loss is convenient and widely applied. However, its accuracy is in question and with high uncertainty, and thus hard to cope with the impacts by extreme weather events. In this project, we focus on the mechanical and physical-process analysis and study the occurring mechanism for rill erosion. Using in-field soil specimens for erosion experiments and geotechnical tests, we analyze the relationship between soil physical properties and its erosion critical condition, in order to formulate the quantitative relationships. The results are further compared with the prevailing equations for exploring their feasibility for slopeland erosion analysis and disaster management.

From this project, we propose that the field sediments are mainly constituted of fine particles with clay and silt size. The particle size distribution ranges from 0.001 mm to 0.1 mm with the d_{50} of 0.031mm. Based on their plastic and liquid limits, most of the reservoir bed sediments belong to ML-OL, with low plasticity and organic matter; the average specific weight is around 2.6. We also found that the total erosion

mass may be estimated using slope, flowrate, and the total area of developed rills. Meanwhile, parameters regarding rills, including the length, area, average width, and length-width ratio, are positive correlated with power-law relationships. The critical shear stress (thresholds for rill erosion) is majorly affected by the slope and physical properties of sediments.

Keywords: Rill erosion, Agongdian reservoir, Physical process, Erosion threshold

目次

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目次.....	IV
表次.....	VI
圖次.....	VIII
第一章 緒論	1-1
第一節 擬解決問題	1-1
第二節 計畫目標	1-2
第二章 工作執行方法與步驟	2-1
第一節 工作執行方法	2-1
第一節 計畫工作進度	2-3
第二節 工作執行步驟	2-5
第三章 文獻收集與回顧	2-1
第一節 土砂沖蝕之型態、運動過程與機制	3-1
第二節 土砂沖蝕之測量方式與設備	3-8
第三節 土壤物化特性及地文因子	3-23

第四章 土壤物化特性試驗	4-1
第一節 粒徑分析	4-1
第二節 塑液限分析	4-3
第三節 土壤比重	4-5
第四節 PH 值分析	4-7
第五章 土壤沖蝕試驗	5-1
第一節 土壤沖蝕試驗結果	5-1
第二節 紋溝尺寸分析	5-1
第三節 土壤沖蝕臨界條件	5-3
第六章 結論及建議	6-1
第一節 結論	6-1
第二節 建議	6-3
參考文獻	參-1
附錄.....	附錄-1
附錄一、期中審查記錄與意見回覆	附錄-1
附錄二、期末審查記錄與意見回覆	附錄-6
附錄三、前人文獻之土壤粒徑分析	附錄-9
附錄四、實驗數據資料	附錄-11

表次

表 2-1 工作進度時程表(實線為預計進度，虛線為完成進度)	2-3
表 3- 1 近年使用臨界剪應力概念之相關沖蝕模型及研究.....	3-7
表 3- 2 土砂沖蝕之測量方法分類表.....	3-8
表 3- 3 土砂沖蝕預估模式彙整.....	3-14
表 4- 1 土壤粒徑分析(a)	4-1
表 4- 2 土壤粒徑分析(b)	4-2
表 4- 3 土壤分類表	4-4
表 4- 4 土樣試驗結果	4-4
表 4- 5 土壤比重計算	4-6
表 4- 6 pH 值實驗記錄.....	4-7
表 4- 7 土壤 pH 值與酸鹼性等級區分表	4-8
表 4- 8 土壤呈現最大有效性之 pH 有效性範圍	4-8
表 5- 1 紋溝沖蝕實驗數據.....	5-1
表 5- 2 含砂濃度與濁度對照表.....	5-6
表 5- 3 紋溝沖蝕臨界條件	5-9

表 5-4 各組實驗結果比較	5-10
----------------------	------

圖次

圖 2- 1 研究流程圖	2-2
圖 2- 2 沖蝕試驗設備：水工渠槽(上)、長型土壤沖蝕箱(下) ..	2-9
圖 3- 1 當水流剪應力(A)小於(B)大於土壤顆粒之臨界剪應力之沖 蝕過程	3-7
圖 4- 1 土壤粒徑分佈曲線圖	4-3
圖 4- 2 塑性圖	4-5
圖 5- 1 紋溝面積與紋溝長度之關係圖	5-2
圖 5- 2 紋溝平均寬度與紋溝長度之關係圖	5-2
圖 5- 3 紋溝長寬比與紋溝長度之關係圖	5-3
圖 5- 4 含砂濃度與濁度之比較	5-6

第一章 緒論

第一節 擬解決問題

土壤沖蝕為全球性的環境問題，相關的研究大量而廣泛。目前的研究發展對於土壤沖蝕之型態、強度和地貌型態等已有較成熟的定性認知；在定量研究方面，則利用室內或現地試區試驗，以經驗公式與統計分析歸納外力強度、植被覆蓋和地形現況等與土壤沖蝕量之關係，如通用土壤流失公式(USLE)及其修正公式如 RUSLE、MUSLE、TUSLE 等。這些經驗公式多針對特定地區及其氣候條件或沖蝕類型進行研究，其研究成果難以適用於不同類型之地形地貌、土壤性質及降雨條件，甚至於全球氣候變遷產生之極端降雨事件中。

近年來，國際間土壤沖蝕之研究開始從動力學角度切入，探討土壤沖蝕之力學機制與過程，發展出以物理過程為基礎之土壤沖蝕模型，如 WEPP (Water Erosion Prediction Project)模型。在國內已有學者提出針對台灣地形及氣候型態和降雨條件之土壤沖蝕模型或公式，如 SEIM(Soil Erosion Index Model)和 TUSLE (Taiwan USLE)；亦有學者提出以修正土壤沖蝕公式(MUSLE)探討極端暴雨事件集水區土壤沖蝕量推估之研究。然而，國內坡地土壤沖蝕的相關研究與案例應用中，多採用經驗公式進行沖蝕量推估，對於沖蝕過程之物理機制和力學分析著墨不多，其研究結果之物理意義無法清楚解釋且應用範圍受限於特定地理、氣候條件。

第二節 計畫目標

台灣山區近年受到地質破碎及氣候變遷影響，山坡地土砂災害問題更加複雜與嚴峻，單以經驗公式推估土壤沖蝕量雖操作便利，但推估結果之準確度難以評估且不確定性高，且難以因應極端降雨事件日趨頻繁之氣象變化。因此，土壤沖蝕量之推估與預測，應從土壤沖蝕過程之物理機制與力學分析著手，從土壤沖蝕之力學原理研究並探討其發生之臨界條件與產量預測，以發展坡地土壤沖蝕物理模型。

本計畫之目標乃從動床水力學的角度，研究紋溝沖蝕之發生原理與物理機制，佐以室內沖蝕試驗及土壤物化特性試驗，分析土壤沖蝕發生之臨界條件及其物理參數。探討土壤物化特性對沖蝕發生臨界條件之相關性與影響程度，並找出量化關係式，建立適用於坡地的土壤沖蝕物理模型，並與現行之土壤沖蝕經驗公式及其參數進行分析比較，討論物理模型之適用條件與範圍。具體計畫目標列述如下：

- (1) 研究紋溝沖蝕產生原理與機制，以室內沖蝕試驗及土壤物化特性試驗，分析土壤沖蝕發生之臨界條件及其物理參數。
- (2) 探討土壤物化特性對沖蝕發生臨界條件之相關性與影響程度，並找出量化關係式。
- (3) 與現行之土壤沖蝕公式/模型及其參數進行分析比較，討論量化公式之適用條件與範圍。

第二章 工作執行方法與步驟

第一節 工作執行方法

本研究計畫擬以一年為期，進行坡地紋溝沖蝕之力學分析與物理模型建立之研究；研究流程圖詳見圖 2-1。

本計畫首先收集前人相關文獻資料，探討坡地土壤沖蝕過程、相關測量方法以及經驗公式之應用，整理分析以建立模型架構，並以力學角度切入設計土壤沖蝕試驗，將結果用於率定及驗證土壤沖蝕物理模型之參數，最後再與現行的土壤沖蝕經驗公式及參數比較，發展坡地土壤沖蝕模型。

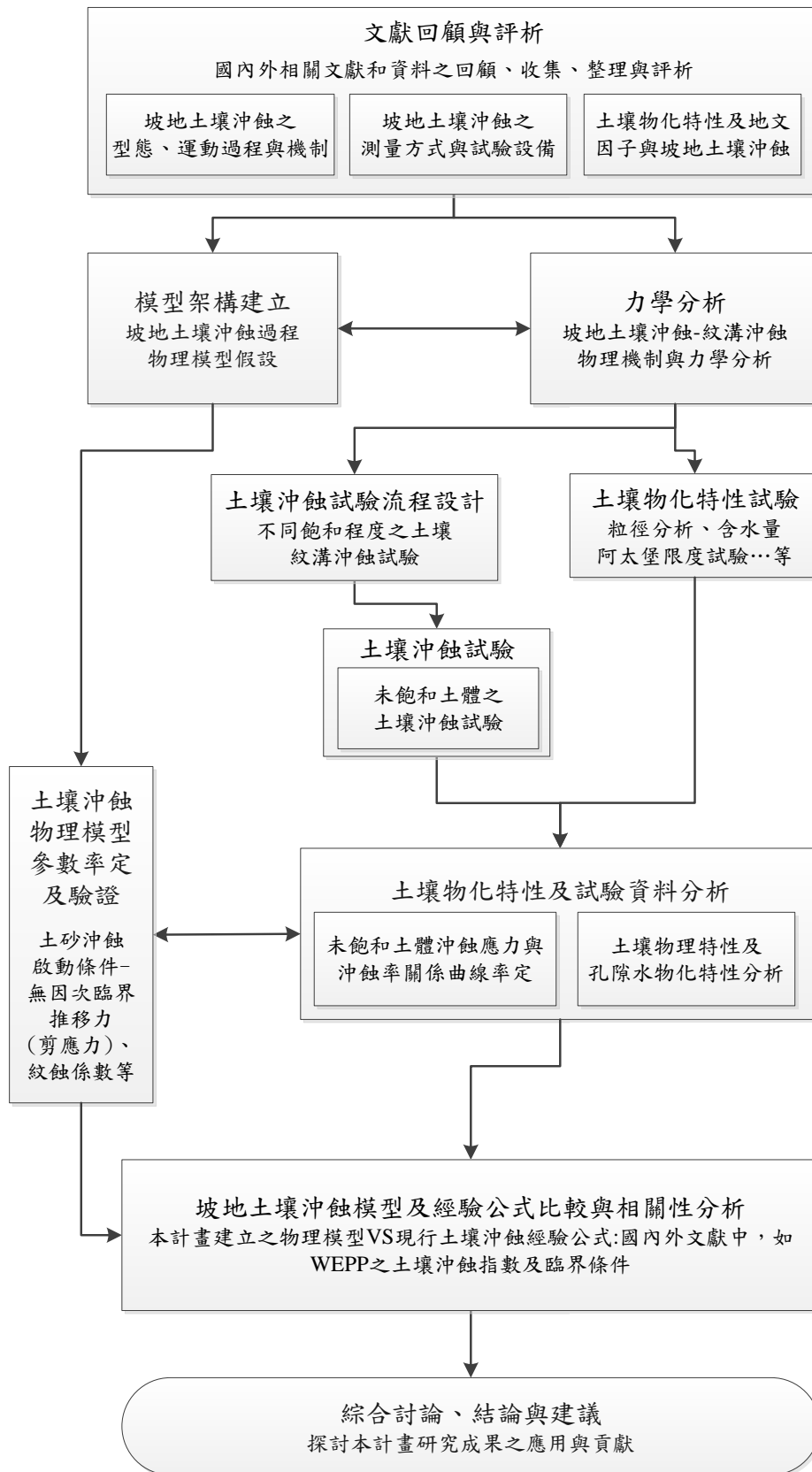


圖 2- 1 研究流程圖

第一節 計畫工作進度

本計畫設定工作期限為自 105 年 4 月 1 日起至民國 105 年 12 月 31 日止，工作進度如下所示。至民國 105 年 8 月提交期中報告，民國 105 年 12 月 23 日提交期末報告，目前完成 100%。

一、重要工作項目及進度

表 2-1 工作進度時程表(實線為預計進度，虛線為完成進度)

工作項目	工作 比重 %	年 月	2016 年									
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	
國內外相關文獻和資料之收集、回顧、整理與評析	15	工作進度	■	■	■	■	■	■				
土壤沖蝕力學分析和物理模型架構建立	15	工作進度	■	■	■							
土壤沖蝕試驗流程設計	5	工作進度		■	■	■	■					
土壤物化特性試驗	15	工作進度	■	■	■	■	■					
室內土壤沖蝕試驗	20	工作進度			■	■	■	■	■	■		
試驗資料分析及模型參數率定和驗證	10	工作進度				■	■	■	■	■		
與現行土壤沖蝕公式及其參數進行綜合分析及討論	10	工作進度						■	■	■	■	■
提出本計畫成果之應用及貢獻，撰寫研究計畫成果報告書	10	工作進度							■	■	■	■

二、 完成進度

- (一) 完成文獻資料之收集與回顧以及整理及評析階段。
- (二) 土壤沖蝕力學分析和物理模型架構建立已完成。
- (三) 土壤沖蝕試驗流程設計已完成。
- (四) 土壤物化特性試驗已完成。
- (五) 室內土壤沖蝕試驗已完成。
- (六) 試驗資料分析及模型參數率定和驗證完成。
- (七) 與現行土壤沖蝕公式及其參數進行綜合分析及討論
完成。
- (八) 撰寫研究計畫成果報告書，完成。

第二節 工作執行步驟

一、力學分析

在明渠流中，河道底泥之土壤沖刷率與水流作用應力和土壤沖刷臨界剪應力(表土壤之抗沖蝕能力)呈冪次關係式：水流作用應力為底床剪應力，可計算為水比重、水力半徑和底床坡降之乘積；土壤沖刷臨界剪應力一般由水槽試驗獲得土壤沖刷率與底床剪應力資料散佈圖，並以圖表法或非線性擬合技巧取得。以相似的概念，當坡面漫地流之沖蝕力大於土壤沖蝕臨界剪應力時，才會產生土壤之分散與剝蝕；故其沖蝕率為漫地流剪應力與土壤沖蝕臨界剪應力差值之函式。

Foster et al. (1981) 與 Elliot et al. (1989)分別對探討層狀及紋溝沖蝕現象，並提出一線性關係式描述水流分散土壤能力(可視為土壤沖蝕率)與作用應力和土壤沖蝕臨界剪應力之差值。兩者皆從水流作用剪應力與土壤抗沖蝕力之抗衡作用推導蝕沖現象之發生，並推估沖蝕(刷)率；唯明渠流與漫地流關係式中，水流沖刷率及沖蝕率與作用應力和土壤抗沖蝕能力之冪次關係不同(明渠流中通常為大於 1 之冪次常數 n ；漫地流則為冪次常數為 1 之線性關係)，可解釋為明渠流與漫地流之流況差異所致。

在明渠流中，河川底床之沖刷多探討在飽和狀態下，土壤顆粒受水流剪應力而脫離土體之情形。然而，在坡地土壤沖蝕的範疇，沖蝕現象發生前/時，土壤未必為飽和狀態；故其沖蝕關係式應考量土壤在不同飽和程度狀態下，受水流剪應力作用之情

形。此為由明渠流關係式轉為漫地流關係，並應用於坡地土壤沖蝕之關鍵與挑戰。本研究沖蝕模型之架構以 Foster et al. (1981) 與 Elliot et al. (1989) 提出之關係為基礎，佐以土壤特性及沖蝕試驗探討未飽和狀態下土壤抗沖蝕力與沖蝕率，以及其他土壤物化因子之影響，並進行物理模型之參數率定與驗證，建立紋溝沖蝕物理模型。

二、試驗土樣

在明渠試驗土樣為現地採集之阿公店水庫集水區泥沙；其組成以細砂、極細砂、粉粒及黏粒為主，初步粒徑分析結果顯示：試驗土樣對 40 號篩(0.425mm)之通過率為 100%，其中通過 200 號篩(0.075mm)之粉土與黏土約佔 70%。進入庫區之來砂量以濁水溪(約佔 70%)和旺萊溪(約佔 30%)為主；集水區土壤以黃壤為主(約佔總面積之 50%)，並包括石質土、沖積土與崩積土，及臺灣黏土等。

三、土壤物化特性試驗

為瞭解試驗土樣之基礎特性，將進行土樣之含水量及有機質含量、乾密度及容積密度、比重、粒徑分佈曲線(篩分析和比重計法)、和塑性與液性限度等特性試驗；並測量土樣孔隙水之溫度、pH 值和導電度(換算為離子濃度)等基礎物化特性。

(一) 土壤含水量及有機質含量試驗

土壤含水量試驗依美國材料和試驗協會 ASTM 標準

D2216-05 進行，測量採集土樣之孔隙水重量與土壤顆粒重量之比值為其含水量。試驗土樣之有機質含量依 ASTM 標準 D2974-00 進行，使用可加熱高達 500°C 之烘箱，先將土樣加熱至 100°C 並維持衡定質量時秤重；繼續加熱至 440°C，並秤其穩定重量，以計算有機質含量。

(二) 乾密度和容積密度計算

測得含水量後，依土體之孔隙比計算空氣體積，獲得試驗土樣之總體積並計算其乾密度和容積密度。

(三) 土壤比重試驗

試驗土樣之比重使用比重瓶並依 ASTM 標準 D854-06 試驗程式測量，且採用試驗程式的方法 B—烘乾土樣法進行。

(四) 粒徑分佈曲線(篩分析和比重計法)

土壤顆粒之粒徑分佈曲線分析擬以篩分析和比重計試驗進行。篩分析依照 ASTM C136-01(乾篩)和 ASTM D1140-00(溼篩)標準程式進行。比重計(hydrometer)試驗依照 ASTM D 422-63-02 標準程式進行：使用型號 151H 或 152H 之比重計進行試驗。將試驗結果數據計算分析，可繪得土壤顆粒之粒徑分佈曲線，並計算其中值粒徑大小。

(五) 塑性與液性限度試驗

阿太堡限度依據不同土壤含水量訂定並描述土壤狀態與物理行為，其中，塑性與液性限度分別為土壤呈塑性狀態的含水量下限和黏滯流的含水量下限。在土壤受力行為相關研究中，阿太堡限度常用以表示土壤中固、液態成份的交互作用，進而將土壤

依其力學特性分類。本研究依 ASTM 標準 D4318-05 進行試驗土樣之塑性與液性限度試驗，並計算塑性指數。

(六) 孔隙水之基礎物化特性：溫度、pH 值和導電度測量

本研究以 pH 儀和導電度儀分別測量研究土樣孔隙水之基礎物化特性，包括溫度、pH 值和導電度等。本研究使用之 pH 儀和導電度測量儀分別為 Mettler-Toledo S220-BASIC 和 Mettler-Toledo S230-KIT，兩者皆具有自動溫度校正功能。測量時，需先將儀器以標準溶液校正後，將測量電極插入試驗土樣中靜置，待測量及數據記錄完成即可。

四、土壤沖蝕試驗

沖蝕箱坡面流沖蝕試驗，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八小時之沖蝕試驗，觀測飽和及未飽和土體，在坡面流沖蝕下之紋溝發展過程。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。

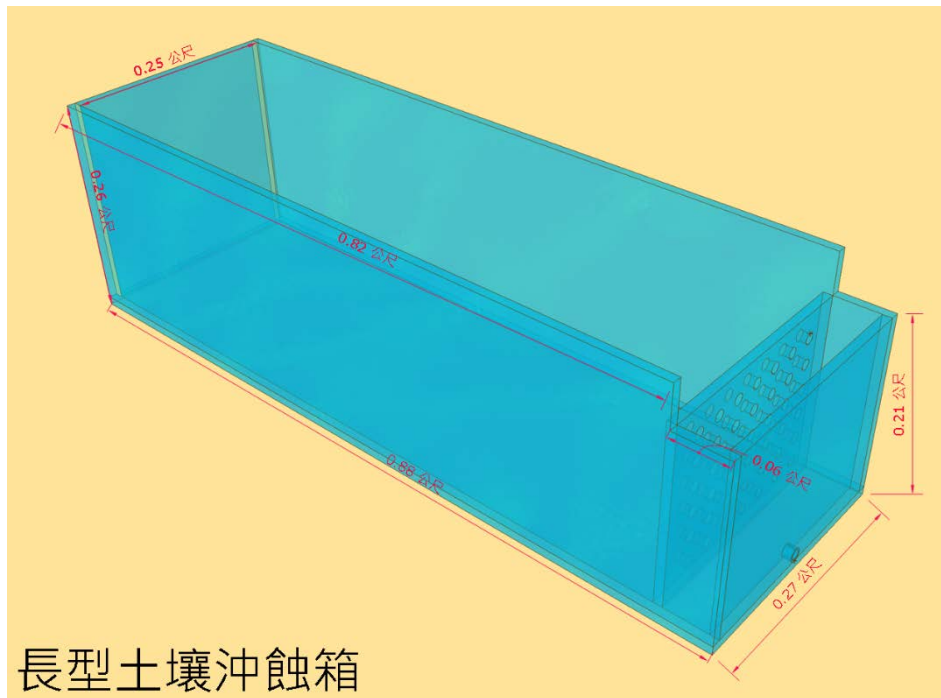


圖 2- 2 沖蝕試驗設備：水工渠槽(上)、長型土壤沖蝕箱(下)

第三章 文獻收集與回顧

收集前人文獻並與整理分析，探討土壤沖蝕型態、運動過程與機制，整理常用的土壤沖蝕測量方式包括現地測量及公式推估，以及作為參數的土壤特性及地文因子，分述如下：

第一節 土砂沖蝕之型態、運動過程與機制

蔡強國等人(2004)認為紋溝侵蝕不應視為單獨行為，需視為整個坡面侵蝕的部分過程來研究。降雨為沖蝕最初動力來源，從雨滴打擊地面開始，產生逕流，一直到最後流入湖海，都是沖蝕的過程。雨滴濺蝕是由於雨滴的打擊與分散作用，其餘侵蝕則是由不同流動方式的坡面逕流所造成的土壤沖蝕，大致可分為四種沖蝕型態，依發展順序先後分別為紋溝間沖蝕(片流侵蝕、面蝕、層狀侵蝕)、紋溝沖蝕(細溝沖蝕、小溝沖蝕、指狀沖蝕)、溝穀沖蝕及切溝沖蝕(李建堂，1997)。一般而言，溝穀沖蝕以及切溝沖蝕已屬於河道沖蝕(溪流沖蝕)的範疇，故在此不多作討論。

一、雨滴濺蝕

降雨為主要沖蝕動力，雨滴打擊土壤表面撞出如火山口形狀的坑洞，消耗 2/3 的能量，使土粒分散，同時雨滴變成許多細小的水滴帶著餘下 1/3 的能量，以放射狀飛濺並將土粒帶離原位，經分散的土粒由接下來的面蝕或是紋溝沖蝕等等的坡面流運輸帶走，是土壤侵蝕裡

面主要且最先產生的物理過程(遊繁結，2012)。

在沖蝕過程中，雨滴打擊壓實並在微生物作用下，使土壤表面形成一層薄薄的緻密層，稱之為土壤表層結皮，雨滴的打擊同時造成結皮形成及破壞的交互作用(Remley and Bradford，1989；Luk and Cai，1990)。被雨滴分散之細小土粒，可封閉土壤孔隙，形成硬殼，減低土壤滲透能力，由於土壤入滲很大部分取決於土壤表面的結構，結皮的形成使土壤入滲能力減小(smith，1999)，而除了減少入滲、增加逕流以外土壤表面變得堅實增加了土壤抗侵蝕的能力(劉青泉等，2004)。

二、紋溝間沖蝕

當降雨持續進行或是降雨強度超過土壤滲透率時，地表即開始形成薄膜水流(Film Current)，緩慢而均勻，深度介於 0.1 到 3.0mm 之間，土壤的細粒及膠體物容易懸浮其中，而此薄層流的侵蝕力大於土壤抗沖臨界切應力時，可以將土壤表面的細粒分散及輸送。在坡面上，上部無紋溝的區域以及下部紋溝間的部分，土壤侵蝕主要為紋溝間沖蝕，又稱面蝕。此坡面流的流速相當緩慢，僅能帶走較細的土粒以及有機質，即沖蝕後的地面保留原均勻平整的狀態，卻顯得較為粗糙，且產生因失去養份而土壤劣化的情形。

Bradford and Foster(1996)實驗發現，在紋溝間沖蝕公式中的坡度

因子會受到土壤組成以及土壤前期含水量的影響，並且提出使用紋溝間沖蝕公式時要注意侵蝕過程。簡單公式並不能完全反應實際的情形，大多數的紋溝間沖蝕公式受限於對薄膜流與輸砂規律的認識，在理論的框架下修正改進，配合經驗或半經驗而產生(劉青泉等，2004)。

三、紋溝沖蝕

逕流自坡面往下流動時，難以保持固定水深及流路，隨流動距離增加，部分坡面片蝕後表面開始凹凸不平，雨水順著坡向朝低處流動，漸漸匯流固定流路並加深水深，當坡面出現許多細小流路將坡面切割成細目狀，其分佈似手指分歧，此時稱為紋溝侵蝕，由於紋溝的出現，流路中水深加大及流速加快，加速了沖蝕的進行，帶走的土砂量與層狀沖蝕不相上下，被視為坡面沖蝕惡化的濫觴(遊繁結，2012)。由於紋溝侵蝕與溝壑沖蝕其主要差異在於大小，水土保持手冊(2013)提出其蝕溝若大於寬 100cm、深 30cm，則應視為溝壑沖蝕。

趙宇等人(2014)以體積法測量模擬紋溝的渠槽中累積侵蝕泥砂量，試驗結果表示，紋溝累積侵蝕泥砂量及水流含砂量與紋溝溝長有擬合於指數的關係，累積侵蝕泥砂量與含砂量隨溝長增加而增加，但增加速度逐漸趨緩，最後達到一個平衡的值。

由於紋溝的形成與發展過程有很強的隨機性，而紋溝中水流的流態也不穩定，因此對紋溝侵蝕率的理論研究很不成熟，仍以觀測和試

驗結果所得的經驗關係式為主。有學者透過分析大量觀測資料，認為紋溝侵蝕率與逕流量和坡度之間的關係可以寫成下列公式：

$$E=aQ^bS^c \quad (\text{Gilley et al. , 1990})$$

其中：

E = 紋溝沖蝕率

Q = 逕流流量

S = 坡面坡度

1998 年張科利與秋吉康宏根據上述關係，對水槽沖刷試驗資料進行多元回歸分析，所得的公式為： $E=0.035Q^{1.065}S^{1.811}$

在土壤沖蝕相關研究中，當水流作用土壤顆粒之運移能力大於土壤本身抵抗移動之抗沖蝕力時，靜止的力平衡狀態受到破壞，使土壤顆粒/團粒脫離周圍土體開始移動，即為沖蝕。水流作用又依狀態分為明渠流和坡面流，前人研究分別以力平衡觀念，提出土壤沖蝕率或分散能力($\text{kg/m}^2/\text{s}$)與水土交界面造成的摩擦剪力(τ)關係式(Foster et al., 1981; Lick, 1982)：

$$\text{明渠流：} \quad E = M(\tau - \tau_c)^n$$

$$\text{坡面流：} \quad D_c = K(\tau - \tau_c)$$

其中：

E = 土壤分離率(kg/m²/s)

M, n = 率定常數

τ_c = 土壤沖刷臨界剪應力，表土壤之抗沖蝕能力(Pa)

K = 土壤可蝕性係數

上述兩公式皆從水流作用剪應力與土壤抗沖蝕力之抗衡作用推導蝕沖現象之發生，並推估沖蝕率(或土壤分離率)，唯因明渠及坡面流之流況及水力條件不同，其正向關係亦有差異。

趙宇等人(2014)及 Chen et al.(2016)為量化坡度與流量對紋溝沖蝕之影響，提出總沖蝕量之迴歸方程式：

$$M = -2.13 + 0.66S + 5.65Q$$

其中， M = 總沖蝕量(kg)； Q = 入流流量(L/min)； S = 坡面坡度(%)。

在泥砂傳輸中，土壤沖刷臨界剪應力(τ_c)為眾多計算河床載(推移載, bed load)與懸浮載(suspended load)之重要參數，前人研究雖已指出粗顆粒非黏性土砂之 τ_c 可由土砂代表粒徑計算，但土體之細顆粒含量與水質狀沖則對非礫床為主土體之 τ_c 具影響力

(Ravisangar et al., 2001; 2005; Wang and Sturm, 2016)，無法單由代表粒徑估算。

Nord and Esteves (2005) 提出 Plot Soil Erosion Model 2D (PSEM 2D)，考量入滲-逕流-沖蝕等三大物理過程，並發展坡面沖蝕物理模型；其沖蝕過程包括由降雨及坡面漫地流造成之土壤初次分離與再剝蝕，以及水層流動對非黏粒之鬆散層造成之土砂捲入與沉降等。此模式可模擬非均勻微地形在降雨時之 Hortonian 漫地流、入滲與沖蝕情形並考慮土砂運移與地形變化之回饋關係；入滲模組使用 Green and Ampt 模式、漫地流模組使用平均水深之二維非穩定流方程式(Saint-Venant equations)，沖蝕模組結合懸浮載質量守恆與逕流分離-搬運等次模組，並以 Darcy-Weisbach 粗糙係數量化土體表面粗糙度。在沖蝕模組中，分別討論水流剪應力大於或小於土壤沖蝕臨界剪應力(τ_c)時之沖蝕情況(如圖 3- 1 所示)，並計算其土砂沖蝕與運移量。

因此，土壤沖蝕臨界剪應力為土砂顆粒在坡面漫地流與河川管道流中土壤抗蝕能力之量化力學參數，可作為坡面沖蝕及土砂運移物理模型之重要考量因子，近年使用臨界剪應力概念之相關沖蝕模型及研究整理如表 3- 1。

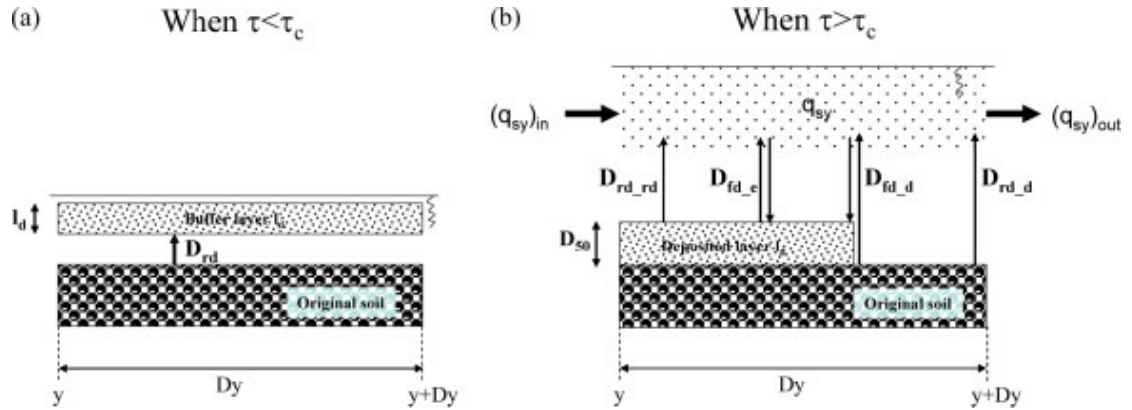


圖 3-1 當水流剪應力(a)小於(b)大於土壤顆粒之臨界剪應力之沖蝕過程

註： D_{rd} = 土粒受雨滴衝擊之分離與重新分佈率， D_{rd_d} = 雨滴造成之土粒剝離原有土體率， D_{rd_rd} = 雨滴造成之沉積層土粒剝離率， D_{fd_d} = 逕流造成之原土體土粒剝離/沉降比例， D_{fd_e} = 逕流造成之沉積層土粒剝離/沉降比例 (Nord and Esteves, 2005)

表 3-1 近年使用臨界剪應力概念之相關沖蝕模型及研究

文獻	公式
Nord and Esteves, 2005; 2010 Plot Soil Erosion Model 2D (PSEM 2D)	$D_{fd_e} = K_r(\tau - \tau_c)(1 - \frac{q_s}{T_c}) \varepsilon$
Romero et al., 2007	$D_c = K_r(\tau - \tau_c)$ $\tau_c = 2.65 + 6.5 \text{ clay} - 5.8 \text{ vfs}$
Zhang et al., 2008	$D_r = K_r(\tau - \tau_c) \left(1 - \frac{qc}{T_c}\right)$
Wang et al., 2013	$\tau_{cb} = 2.67 + 6.5 \text{ clay} - 5.8 \text{ vfs}$
Wang and Sturm, 2016	$E = M(\tau - \tau_c)^n$ $\hat{\tau}_c^* = 8.46 - 27.76w + 73.69\text{CSF} + 83.22(w \times \text{CSF})$

許多學者利用田野調查或實驗量測的方法得到對紋溝侵蝕率產生影響的因素，有坡面水流之水力學特性、土壤特性及地文因子，水力學特性包括水流剪應力、降雨動能、逕流位能、紋溝內水流沖蝕力(鄭粉莉、康紹忠，1998；蔡強國等人，1996)等等，土壤特性則有土壤可蝕性、土壤抗剪強度(蔡強國等人，1996)並考慮有機質含量、土壤密度、前期含水量、團粒結構等等，地文因子最常見的則有坡度及坡長(蔡強國，2004)。

第二節 土砂沖蝕之測量方式與設備

多數土砂沖蝕之測量方式為黑箱系統，不能監測土壤侵蝕與堆積重新分佈的過程，由於不同量測方法有其限制及適用對象，使用兩種以上的方法進行土壤沖蝕研究有逐年增加的趨勢(Loughran，1989)，許多學者將現地土砂的測量結果與預估模式相互作對照，促進土壤沖蝕模式之發展與驗證：用沖蝕針來驗證 AGNPS 模式在小集水區預估量的可行性(盧光輝、薑善鑫，1990)；梁惠儀等人於 2010 年在石門水庫集水區，應用沖蝕針蒐集現地的沖蝕量，來驗證 USLE 和 MUSLE 在該地區的適用性；何幸娟等人於 2012 年在神木集水區則是使用 MUSLE 分析莫拉克颱風事件所引起的土砂沖蝕量與沖蝕針監測結果作比較；林韋成於 2014 年以沖蝕針量測數據為分析資料基礎，建構

特定雨場或連續降雨引致土壤沖蝕深度經驗推估式，並與實際案例比對趨勢結果相符，能提供工程師在設計水土保持措施所需防砂容量時，除了參考水土保持手冊以外，能有另一個選擇。

土砂沖蝕之測量方式極多，每種方法有其優缺點及適用區域或時間尺度，發展至今對於土砂測量方法也有其分類標準。參考前人研究(許振昆等人，2009；李建堂，1997)整理成下表 3- 2，在此將測量方法大致分為現地試驗法(包括直接測量法及間接測量法)以及沖蝕預估模式(包括經驗模式(empirical models)及物理模式(physically-based models))。

表 3- 2 土砂沖蝕之測量方法分類表

分類	測量方法	相關研究
直接測量法	實驗區法	Loughran(1989)、Roels and Jonker(1983)、Wendt et al.(1986)、Young and Onstad(1987)
	集水區	Campbell(1992)、Robinson(1977)
	輸砂量法	Trimble(1983)、Walling and Webb(1983)、Walling(1983、1988)、賴彥任(2013)
間接測量法	量測 地形起伏變化法	Raina et al.(1991)、Thomas and Welch(1988)、許振崑(2009、2010)、許振崑等人(2014)
	追蹤劑法	Graham(1963)、Loughran(1989)、Oldfield et al.(1979)、Ritchie and McHenry(1975)、李建堂(1999)、謝越平(1978)
	體積法	鄭粉莉(1989)、Casalí, J. et al.(2006)
沖蝕預估模式	經驗模式	Gokhan Ozsoy,et al.(2012)、Onstad and Foster(1975)、Renard et al.(1991；1994)、Williams(1975)、Wischmeier(1976)、范正成(1993)、吳久雄(1990)、萬鑫森與黃俊義(1989)
	物理模式	Foster(1982)、Laflen and Foster(1991)、Blanco-Canqui & Lal(2008)、Lal(1990)、Lo et al.(1992)、Lo(1995)、Nearing et al.(1989)、Young et al.(1989)、林昭遠與陳明義(1992)、薑善鑫(1992)、洪毓華與游繁結(1992)、陳樹群等人(1998)、盧光輝等(1994；1995)

資料來源：參考李建堂(1997)、本研究整理更新

一、直接測量法

出口處收集逕流及沖積物來量測沖蝕量，稱之為直接測量法。由於僅能得知最後的產量，不知道過程中的沖淤情形，因此直接測量法是屬於黑箱系統的一種方法(李建堂，1997)。

實驗區法包括有邊界及無邊界兩種，利用自然或人工降雨模擬，在預定的實驗區下游出口處設置土壤槽或收集器，可直接量測土壤沖蝕量。研究對象大多以紋溝沖蝕及紋溝間沖蝕為主，最常見的 USLE 公式即是利用此方法，收集大量標準單位試區的數據，經過統計分析而得到的。

集水區輸砂量法則以集水區或較大的蝕溝地區為單位，於出水口採集樣本分析含砂量，配合河流流量監測，適用在大區域及全球的沖蝕量預估(李建堂，1997)。用集水區輸砂量法可以得出泥砂遞移率(sediment delivery ratio;SDR)，SDR 反應了集水區內土砂生產量(sediment production)與土砂產出量(sediment yield) 間的關係，兩者間的比值，可以用來量化集水區的淤積情形。賴彥任等人在 2013 年，於森林中設置一小樣區視為一個小集水區，將小型量水堰置於樣區下游，利用小型量水堰收集測量含砂量。

二、間接量測法

測量土壤流失後的高低差或是利用獨特的物化性質(放射性、染

色)等等間接的方法來追蹤及瞭解土壤流失的情形，稱為間接量測法，其中量測地形起伏變化法又可以細分為適用小範圍的沖蝕針、沖蝕樁，以及適用大範圍的照片量測法。

沖蝕針(樁)法，適合用來偵測土壤沖積及堆積的細微變化，可以區分不同的沖蝕作用，早期使用木樁(Schumm, 1956)，後來改用對坡面破壞較小且較能抗蝕的金屬樁(林俊全, 1995；許振崑等人, 2014)。照片量測法比較航照圖不同時間的數值高程差，以獲得土壤沖蝕速率，進而推估監測區域之土壤沖蝕量(Dirk, 2005；Peter et al., 2012)，但不適用在沖積變化緩慢的地區。

以放射同位素或染色劑等等具有可追蹤之獨特物化性質的物質，做為追蹤劑來使用的則是追蹤劑法，又稱化學元素法，以追蹤土壤中特定物質來確定沖積物的空間分佈或預估土壤沖蝕量，常用的有 ^{10}Be 、 ^7Be 、 ^{59}Fe 、 ^{90}Sr 、 ^{131}I 、 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 、銩-137、鐳-226 等等(Yaung et al., 1998；李建堂, 1999；邱昱嘉, 2007；謝正倫, 2008)。

體積法原本常用的回填物是土壤、稻穀或小麥等，趙宇等人在2014 年使用清水做為回填物，實驗前先以人工降雨使土壤飽和後靜置二十四小時確保相同的前期含水率，並消除入滲及人為填土不均的影響，將沖蝕過後的紋溝加入清水回填至原土壤高度，測量紋溝內被沖蝕的土壤體積。準確性高、成本低、效率也高，較適用於室內實驗。

三、沖蝕預估模式

包括經驗模式及物理模式兩種，本研究參考前人文獻整理如表 3-3，其中經驗模式以實際的資料為基礎，經統計分析所導出的經驗公式，通常較簡單，需要的資料較少，有區域性，應用在不同地區需進行修正，如通用土壤流失公式(簡稱 USLE)即為最具代表性的經驗模型。

物理模式則以沖蝕作用為基礎，發展較具理論的數學形式，需輸入大量資料，較經驗式複雜，應用限制較小，不具地域性，但因實際資料取得困難，大都保有部分經驗公式，如：WEPP、GUEST，農業非點源污染模式(Agricultural Non-Point Source Pollution Model，AGNPS)也曾被用來估算台灣水庫集水區的土壤沖蝕量。

表 3-3 土砂沖蝕預估模式彙整

發展者	模式名稱	說明
USDA(美國農部)(1965)	USLE	通用土壤流失公式，估算年平均土壤沖蝕量。
USDA(Williams and Berndt ,1977)	MUSLE	以逕流量及尖峰流量間接反映降雨特性，估算單場降雨事件土壤沖蝕量，不需另外估算泥砂遞移因子。
USDA(Renard and others, 1997)	RUSLE	修正 USLE 之坡度、覆蓋管理因子及沖蝕指數。
USDA(1970)	SWRRBWQ	此模式可以模擬出各集水區及河段的數值。
USDA(1998)	AGNPS	將坡形因子，分成凹坡、凸坡及平坦坡三種，針對長期連續模擬為主。
	AGNPS2001	主要模擬單一暴雨事件。
USDA (Laflen et al., 1991; Flanagan and Nearing, 1995)	WEPP(Water Erosion Prediction Project)	物理性沖蝕模式，主要應用於山坡地及小集水區。
USDA(1980)	CREAMS(Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems)	追蹤化學物質的移動以推估土壤沖蝕量。
USDA(1984)	EPIC	由土壤沖蝕量之結果對生產力進行影響評估。
USEPA (美國環保署) 與 Hydrocomp Inc. 共同開發	HSPF	非點源污染模式。長時間連續性模擬與事件式皆可。
	WINHSPF(WINDOW Hydrological Simulation Program-Fortran)	HSPF 的 Windows 介面版本，是一分散式集塊模式，將流域劃分為數個性質均一的小區，以集塊模式模擬後，再利用河川網路銜接成一個系統(徐森彥，2013)
USDA	SWAT(Soil and Water	模式本身係以物理性描

	Assessment Tool)	述為基礎，僅需要輸入相關資料即可進行模擬並驗證，無須參數率定。
陳樹群等人(1998)		將 USLE 影響參數轉換指數方式，並以 SEIM 指標值配合迴歸公式計算土壤沖蝕量。
林文賜等人(2006)		結合 USLE 及 SDR 之計算，建立集水區泥砂產量推估模式。
陳樹群等人(2009a)		建立 TUSLE 公式中，Km、Rm 以及 LS 因子等 GIS 圖資，簡化估算土壤沖蝕量流程並提升正確性。

參考許振崑等人(2010)、本研究整理更新

(一) SWRRBWQ

SWRRBWQ 模式是美國農業部 (USDA) 用於模擬農村集水區水質，原先發展於美國農業部農業研究局與美國德州農業試驗站。此模式可以模擬水力、輸砂、營養鹽及殺蟲劑在大尺度及複雜分水嶺的茶園。複雜度高，可模擬連續時間，以及決策對水體、輸砂的影響。傳輸方式包含：地表逕流、回水、滲出、蒸散、傳輸損失、沉降作用及作物生長等(林鎮洋，2009)。

(二) SWAT

SWAT 模式由美國 USDA 的 ARS(Agricultural Research Service) 所發展，為一可預測土地變遷對水質、水量、泥沙產量、污染物傳遞

等影響，並可配合實際土壤、土地利用、及管理方式的污染模擬模式。SWAT 在模擬時間上是具有連續性為日的時間模擬尺度，且屬於長時期模擬之模式，不適用於事件式洪水的模擬。在空間上，模式將集水區細分為更小的子集水區，子集水區更可細分為數個 HRU(hydrologic Response Unit)，容許對於每一個 HRU 進行不同的土地管理措施。模擬方面可模式分為土與水兩部分，在土地方面，以 HRU 為模擬單元，分別模擬水流方向，在氣候資料的輸入上包括日降雨量、最大及最低溫度、輻射量、風速及相對濕度，可選擇以實際資料輸入或是以月平均資料合成日所需資料，地表逕流量則 SCS 曲線值法進行模擬，土壤水分則考慮蒸發散及土壤水分的橫向移動，土壤沖蝕量則依照 MUSLE(Modified Universal Soil Loss)的沖蝕公式。

(三) USLE

常被應用的 USLE(universal soil loss equation)，最一開始由美國農部主導，收集全美 21 州 36 個地區標準樣區(備註 1)裡上千筆暴雨及土壤侵蝕的資料，加上 2500 個由模擬降雨機進行室內、外的土壤沖蝕試驗所作出的年降雨沖刷模擬數據，補足原先資料庫的缺失，將這些資料進行多重回歸試驗分析之後產生，目前仍在世界各地廣為應用。由於最初設計模型主要是以坡度 0~7% 的蒙托土緩坡地，美國洛磯山脈以東的地區為主(Wischmeier W H and Smith D D，1965)，此經

驗公式有其地區性，如要應用於其他地區，需對各因子進行適度的修正，在台灣地區所使用的公式如下：

$$A=RKLSCP$$

其中：

A=單位面積多年平均土壤流失量(公噸／公頃.年)

R=降雨沖蝕指數(百萬焦耳.公釐／公頃.小時.年)

K=土壤沖蝕指數(公噸.公頃.年／公頃.百萬焦耳.公釐)

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

備註 1：標準試區為連續兩年以上的休耕及裸露的均勻坡面，坡長為 22.13m、坡度為 9%。(水土保持技術規範，修正於 2014 年 9 月)

公式中的 L、S、C 和 P 因子為任何組配條件下的土壤流失量和標準試區土壤流失量的比值，皆為無因次因子(吳嘉俊等，1999)。L 與 S 又有人將其結合稱為 LS 地形因子，與邊坡的坡長、坡形及坡度有關，影響流速及水的搬運能；R 降雨沖蝕指數量化降雨及逕流的沖

蝕力；K 土壤沖蝕指數代表土壤被侵蝕的容易度，與土壤種類及有機質含量有關；C 覆蓋與管理因子最複雜且最難以定義，需要經驗判斷，受植生密度及種類影響，考量因素包括表示植物冠層遮蔽的 CC 因子以及代表殘株數蓋的 CS 因子，C 值即為 CC 因子與 CS 因子之乘積；P 水土保持處理因子，為耕作方法、控制措施或水土保持方法施作下的田間土壤流失量與標準田間土壤流失量之比值。沒有水土保持措施訂為 1，表示不影響，如果有適當的水保措施，其值會小於 1。

但 USLE 並沒有考慮到泥砂的輸移與沉積、因子之間的交互作用，且只限於坡面侵蝕不包括溝蝕，所以也不包括逕流因子，近年來許多學者致力於其改進及發展的工作，如 RUSLE 以及 TUSLE(Taiwan USLE)。

RUSLE 並非將每個因子都視為獨立，而是彼此之間都有關聯性，可以控制輸入的資料以對應不同的情況，可以推估田間的紋溝沖蝕及紋溝間沖蝕(林俐玲，2010)。1998 年賴如慧結合 GIS 及衛星影像資料，以 RUSLE 模式推估德基水庫集水區之土壤流失量。2012 年 Ozsoy 等人使用的 RUSLE 模型，配合遙感及 GIS 在土耳其西北部研究 Mustafakemalpasa 河流域集水區的土壤流失。

陳樹群等人(1998)為了將 USLE 改良為適用於台灣地區的模式，故發展土壤沖蝕指標 SEIM(Soil Erosion Index Model)模式，將 USLE

影響參數轉換成指數方式，並以指數總值配合迴歸公式求取土壤沖蝕量。此方法使降雨沖蝕性指數 R_m 具時變性，坡度 S 因子採用 McCool 等人(1987)以適用台灣較多陡坡的集水區， C 值在 NDVI 為負值時不使用線性計算，可避免將土壤沖蝕率低的河川建地等區域的值高估， P 值則以較新的田間試驗資料整理歸納出的結果作為參考。

(四) WEPP

Nearing 等人所開發的 WEPP 模型中的紋溝侵蝕模型是一個被使用比較多的模型，其理論基礎來自於質量守恆，並假設紋溝中的輸砂過程為恆定(劉青泉等，2004)。WEPP 模型可以模擬單場暴雨或是連續暴雨所產生的土壤沖蝕量，模式主要有六個模組，分別為氣候運算(Climatic Generation)、水文(Hydrology)、植物生長(Plant Growth)、土壤(Soils)、灌溉(Irrigation)以及沖蝕(Erosion)，每個模組皆具有獨立資料庫及運算之功能，其輸出結果為時間積分 (Time-integrated) 所推得的沖蝕量。優點是可以快速地取得解答，且減少計算時間。

WEPP 模型將逕流分為紋溝和紋溝間兩個區域，剪力之計算是基於紋溝的水力條件，而不是薄層流(Sheet flow)。Foster et al.(1982)認為土壤分散率(侵蝕率)正比於坡面流的輸砂能力與實際輸砂率之間的差值。模型中所使用的穩態泥砂連續方程式(steady-state sediment continuity equation)用來表示沉積物在紋溝以及紋溝間的運動，如下(1)

式：

$$\frac{dG}{dx} = D_f + D_i \quad (1)$$

其中：

G 為水流輸砂率 ($kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)，代表水流實際含沙量

D_f 為紋溝沖蝕率 ($kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$)

D_i 為紋溝間沖蝕率 ($kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$)

而 D_f 紋溝沖蝕率又分成兩種不同的計算方式，當含砂量小於泥沙輸送能力(Sediment transport capacity)時，土壤淨分離量(Net soil detachment)，用(2)式；若含砂量大於泥沙輸送能力，土壤淨沉積量(Net soil deposition)，則用(3)式計算紋溝沖蝕率：

$$D_f = D_c \left(1 - \frac{G}{T_c}\right) \quad (2)$$

$$D_f = \frac{\beta V_f}{q} (T_c - G) \quad (3)$$

其中：

D_c 為泥砂分散容量(detachment capacity)，代表水流分散能力

T_c 為泥砂運移容量(sediment transport capacity in the rill)($kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)，代表坡面流輸砂能力

β 為雨滴引起紊流之係數

V_f 泥沙有效沉降速度($m \cdot s^{-1}$)

q 單寬流量($m^{-2} \cdot s^{-1}$)

D_c 泥砂分散容量以及 T_c 泥砂運移容量公式如(4)、(5)式：

$$D_c = K_r(\tau_f - \tau_c) \quad (4)$$

$$T_c = k_t \tau_f^{3/2} \quad (5)$$

其中：

K_r = 土壤可蝕性係數(紋溝侵蝕率係數)

τ_f = 作用於土壤顆粒的水流切應力(flow shear stress acting on the soil particles)

τ_c = 作用於土壤顆粒的臨界切應力(the rill detachment threshold parameter, or critical shear stress, of the soil)

k_t = 運送率係數

Foster 等人在 1995 年修正了 D_i 紋溝間沖蝕率，使用修正過後的紋溝侵蝕率 K_{iadj} 乘上有效降雨強度及噴灌造成的衝擊的影響，以及紋溝長度與寬度之比，修正過後的紋溝侵蝕率 K_{iadj} 包含了

基線修正、冠層影響、地面植被、根系影響、土壤表面密封與結皮、坡度斜率調整、凍結和解凍影響。

Romero 等人 (2007) 的報告中，於現場測量了 K_r 及 K_i (紋溝及紋溝間沖蝕的可蝕性係數)，並將這些值與 WEPP 及 USLE 所使用的可蝕性係數做比較，在黏土含量相較於砂土及泥土含量低的土壤， K_r 值較高的土壤，在侵蝕初期土壤損失率較大。由於黏土顆粒具有砂粒所缺乏的凝聚力使得土壤較具有抗沖蝕的能力。da Silva, L. F.等人 (2016)以煤礦區之再生土作為研究對象，以室內管道實驗模擬紋溝沖蝕情形，實驗結果得出土壤可蝕性係數(K_r)及臨界剪應力(τ_c)，可將其輸入到 WEPP 模型中，模擬小流域內山坡泥沙的沉積與侵蝕。

Tiwari, A. K.(2000)將 WEPP、USLE 及 RUSLE 這三個模式預估的結果與自然逕流集水區的資料做比較。在年平均土壤流失量這方面 WEPP 較能準確預估，但整體而言，加入更精細且具體的輸入參數的 USLE 及 RUSLE 出來的效果較好，但 WEPP 不是經驗公式，因此適用的範圍更廣。

第三節 土壤物化特性及地文因子

一、影響沖蝕之土壤物理特性

在土壤沖蝕相關研究中，細顆粒泥砂的物理特性常被視為影響泥砂抗沖蝕力的重要指標(Grabowski et al., 2011; Stone et al., 2011)；在工程應用上，常被廣泛研究且用以評估沖蝕行為的物理特性包括：平均粒徑或中值粒徑(d_{50})大小、粒徑分佈(包含黏土，粉土和砂質土)及容積密度與含水量等，且已被確認會顯著影響細顆粒泥砂的可蝕性。

(一) 平均粒徑

泥砂的平均(或中值)粒徑大小為常被研究與泥砂可蝕性相關的物理特性之一。早期對粒徑大小、最小流速，和泥砂啟動傳輸的相關研究，如 Hjølström (1939) and Postma (1967) 已成為水利工程師的參考工具；Smerdon and Beasley (1961)的實驗室水槽試驗建立沖蝕閥值及土壤特性(包含中值粒徑、塑性指數、黏土重量百分比等)的經驗關係式。實驗研究已顯示粒徑大小與沖蝕閥值在非黏性及粗顆粒(砂及礫石)的正相關係(Dade et al., 1992; Tolhurst et al., 1999)。然而，更多關於粒徑對土壤可蝕性影響的研究提出在黏土及粉土大小的泥砂中，顆粒(團粒)粒徑與臨界剪應力存在負相關係(Roberts et al., 1998; Thomsen and Gust, 2000; Briaud et al., 2001; Lick et al., 2004; Kothyari and Jain, 2008)。

(二) 粒徑分佈

泥砂沖蝕特性不僅受平均粒徑的影響，在許多情況中雖有相同平均粒徑，但因組成的粒徑分佈不同，其沖蝕行為仍有差異。細顆粒泥砂在土體中的比例常被作影響土壤沖蝕行為的重要因子進行實驗研究：如 Mitchener and Torfs (1996)、Panagiotopoulos et al. (1997)、Reddi and Bonala (1997)、Lick et al.(2004)、van Ledden et al. (2004)、Barry et al. (2006)、Kothyari and Jain (2008)、Debnath and Chaudhuri (2010a, b)、Grabowski et al. (2010)、Geremew and Yanful (2011)等人；或現地試驗：如 Mitchener and Torfs (1996)、Houwing (1999)、Aberle et al. (2004)、Dickhudt et al. (2011)等人。相關研究中，部分針對粉土及黏土的比例“含泥量”進行研究；另一部分隻針對提供間凝聚力的黏土含量進行研究(van Ledden et al., 2004)；少部分現地實驗結果指出，砂的含量亦會改變泥砂的沖蝕行為(Mitchener and Torfs, 1996; Aberle et al., 2004; Dickhudt et al., 2011)。

(三) 容積密度及含水率

體密度及含水率可透過土壤及水在沉積物中的關係測得，且在多數實驗中已被證實對細粒泥砂沖蝕行為影響極大(Mitchener and Torfs, 1996; Williamson and Ockenden, 1996; Jepsen et al., 1997; Roberts et al., 1998; Houwing, 1999; Krone 1999; Lick and McNeil., 2001; Aberle et al., 2004; Ravisangar et al., 2005; Gerbersdorf et al.,

2007)，而這兩個測量值大致呈負相關，且都會影響泥砂壓密與固結的程度(Grabowski et al., 2011)。一般來說，無論在天然或人工試體中容積密度隨著沉積層深度增加而增加，含水率則相反，因為沉積的時間與壓密的等級亦隨深度增加(e.g. McNeil et al., 1996; Lick and McNeil, 2001; Ravisangar et al., 2005)。正如容積密度對黏性泥砂沖蝕的重要性已被確認，部分學者認為含水率應該是更直觀的因子，可直接影響黏土的力學特性(Grabowski et al., 2011)，事實上，飽和土壤假設(土壤孔隙充滿水且其中氣體可被忽略)已被用來進行底床及河口泥砂的研究。在這個假設下，容積密度可由含水率的函式表示，且兩者可互換(e.g. McNeil et al., 1996; Jepsen et al., 1997; Roberts et al., 1998)。

(四) 絮凝效應

較細的黏性顆粒在水體中由於凡德瓦力及雙電層斥力所組成的黏滯力會凝聚在一起，此黏性顆粒特有的現象，稱為絮凝效應。Greenland and Hayes (1978)的研究指出，非黏性顆粒轉入黏性顆粒的粒徑範圍約在 $5\sim 0.5\mu\text{m}$ 。天然泥沙顆粒大小、成分和結構上的參差不齊、水質、流速以及溫度都會引起絮凝特性的差異。

二、影響沖蝕之地文因子

(一) 坡度及坡長

沈海鷗等人於 2015 年研究雨滴打擊的試驗中，使用細顆粒土壤比較三種最常見出現紋溝侵蝕的坡度(10 度、15 度、20 度)，結果發現不論有無雨滴打擊，坡度對紋溝沖蝕的影響都是一樣的，隨著坡度的增加，紋溝的密度及割裂程度也會增加。許多研究顯示，坡度與降雨強度對逕流的含砂量都有促進作用，李君蘭等人(2011)研究不同降雨強度下，坡度及坡長對紋溝侵蝕的交互作用影響，結果顯示，這兩者的交互作用對含砂量的影響最顯著，而坡長對含砂量沒有顯著影響，影響的是流速以及流動距離。

(二) 紋溝型態特徵

紋溝一旦形成後，周圍的水流匯集，增加了紋溝內的逕流量，使得原本的土壤流失量增加好幾倍，紋溝的長度、寬度及深度皆會影響到後續的侵蝕。由於紋溝形狀不規則且在沖蝕過程中具有時變性，不容易直接量測，沈海鷗等人(2015)根據測點彼此間的間距及座標位置換算相對應的紋溝總長度。

第四章土壤物化特性試驗

第一節粒徑分析

本計畫使用兩種方法將土樣進行粒徑分析，並計算其中值粒徑(d_{50})大小，繪出土壤顆粒之粒徑分佈曲線。試驗結果如表 4- 1 及表 4- 2 所列，分別計算分析後，將兩種方法所得之土壤粒徑曲線分別整合為一條，便於比較。

一、篩分析及比重計試驗分析

利用篩分析將較大顆粒(0.074mm、0.053mm 及 0.044mm)者先篩出，剩餘的細小土粒再利用比重計進行分析，得出表 4- 1。

表 4- 1 土壤粒徑分析(a)

Method	Diameter (mm)	Cumulative P(%)	Cumulative P(%)	Cumulative P(%)
#200 Sieve	0.074	99.82%	99.96%	98.79%
#270 Sieve	0.053	81.21%	81.62%	82.73%
#325 Sieve	0.044	66.13%	67.23%	68.57%
hydrometer	0.032	51.47%	57.87%	50.83%
hydrometer	0.021	39.32%	41.88%	38.69%
hydrometer	0.012	28.77%	32.29%	28.77%
hydrometer	0.009	22.70%	29.09%	23.66%
hydrometer	0.006	22.70%	25.90%	20.46%
hydrometer	0.004	18.86%	22.70%	18.86%
hydrometer	0.001	10.55%	14.71%	9.91%

二、吸管法分析

以吸管法進行分析，得出表 4- 2。

表 4- 2 土壤粒徑分析(b)

累計百分比			D _{SAND}	D _{SILT}	D _{CLAY}
SNAD	silt	clay			
99.00%	60.59%	11.37%	0.074	0.045	0.002
98.00%	60.71%	11.43%	0.074	0.045	0.002
98.00%	60.35%	11.53%	0.074	0.045	0.002
99.00%	59.16%	11.53%	0.074	0.045	0.002
98.00%	61.95%	11.46%	0.074	0.045	0.002
99.00%	50.77%	10.68%	0.074	0.045	0.002

三、與前人文獻之比較

與謝正倫等人在 1999 年用不同土樣：旺萊溪、濁水溪、土樣 A 及神木村的土壤粒徑曲線做為比較，資料量較多，詳細資料見附錄一。將前人文獻資料繪成土壤粒徑曲線，與本計畫使用兩種方法所做的粒徑分析曲線共同繪於圖 4- 1，曲線趨勢大致相似。

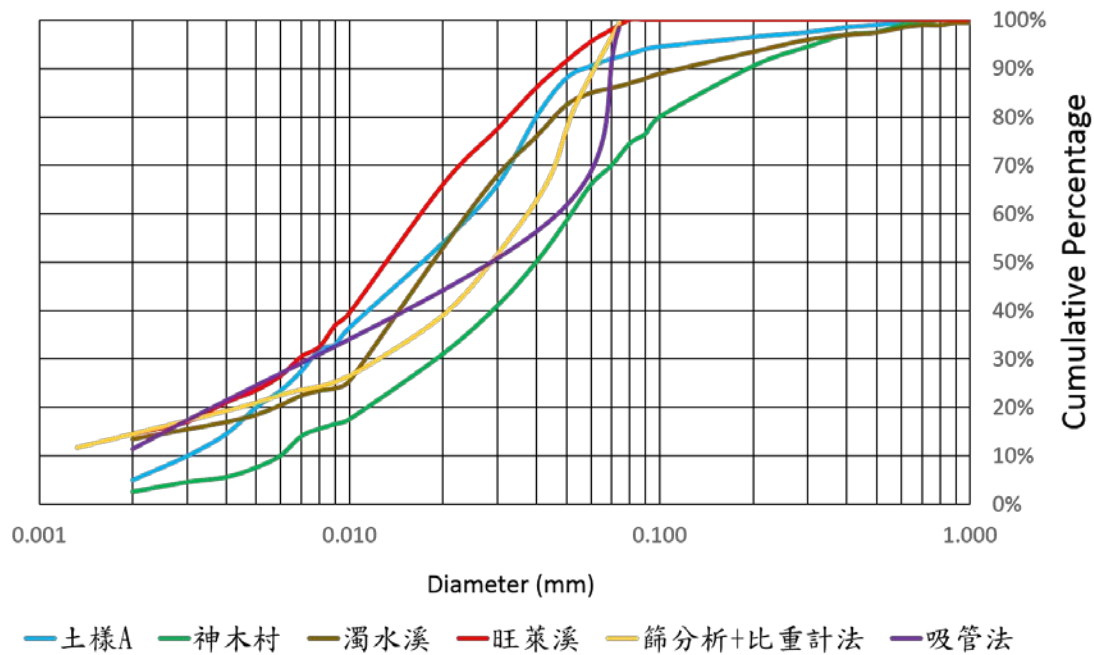


圖 4-1 土壤粒徑分佈曲線圖

第二節 塑液限分析

阿太堡限度(Atterberg limits)依據不同土壤含水量訂定並描述土壤狀態與物理行為，其中，塑性與液性限度分別為土壤呈塑性狀態的含水量下限和黏滯流的含水量下限 (Holtz and Kovacs, 1981)。在土壤受力行為相關研究中，阿太堡限度常用以表示土壤中固、液態成份的交互作用，進而將土壤依其力學特性分類。

測定土壤塑液限的方法，參照 ASTM D2487-11 的土壤分類法(如表 4- 3)，將土壤根據質地粗細及塑性性質分類，每一組都以兩個英文字母符號代表，其中第一個字母表示影響土壤性質的主要成分，第二字母表示土壤顆粒級配之性質、塑性等。

表 4-3 土壤分類表

第一個字母	第二個字母
G(Gravel)：礫石及礫石土壤	W(Well)：優良級配 P(Poorly)：不良級配 H(High)：高塑性 L(Low)：低塑性
S(Sand)：砂石及砂質土壤	
M(Silt)：無機質沉泥及極細砂	
C(Clay)：無機質粘土	
O(Organic)：有機質沉泥及粘土	
Pt(Peat)：泥炭土(Peat)	

將土樣分成六組樣本進行試驗，結果列於表 4-4，如圖 4-2 所示，大多數落在 ML-OL 的區間，顯示土樣為無機質低塑性土。

表 4-4 土樣試驗結果

樣本	PLASTICITY INDEX <i>PI</i>	LIQUID LIMIT <i>LL</i>	ASTM D2487 11
1	6.19	26.77	CL - ML
2	1.7	25.08	ML or OL
3	6.18	22.56	ML or OL
4	2.21	23.03	ML or OL
5	3.2	24.84	ML or OL
6	3.65	25	ML or OL

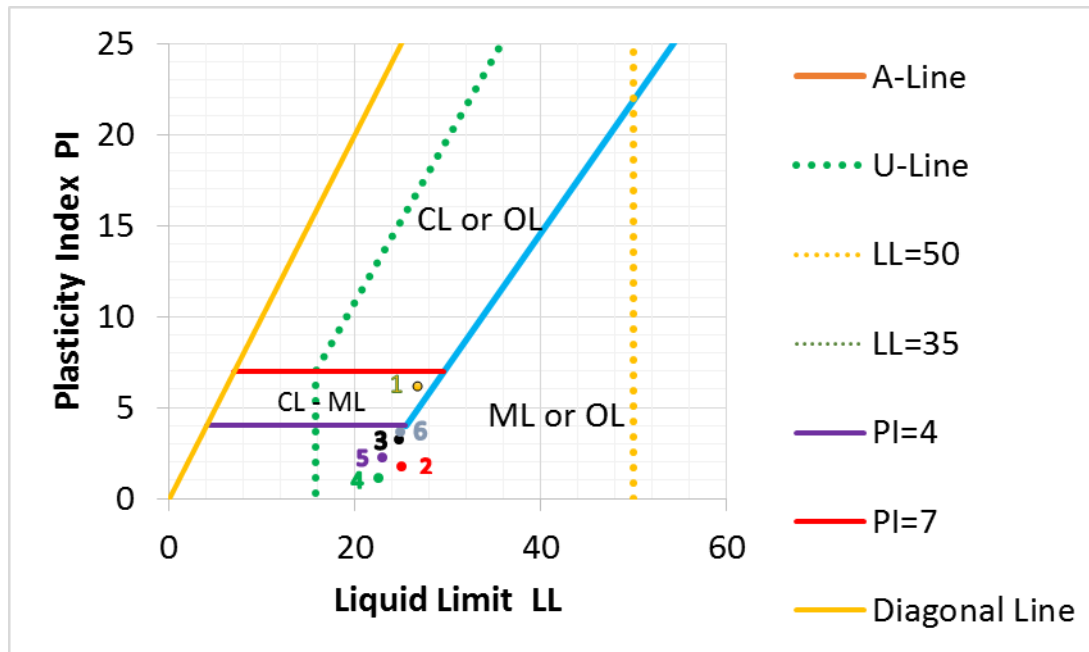


圖 4-2 塑性圖

第三節 土壤比重

研究土樣之比重使用比重瓶(pycnometer)並依 ASTM 標準 D854-06 試驗程式測量，且採用試驗程式的方法 B—烘乾土樣法進行。

比重即為土體之乾密度(ρ_s)與孔隙水密度(ρ_w)之比值，試驗用土樣採自阿公店水庫於 2014~2015 年間清淤放置的棄土堆，分三次取樣，依 ASTM 標準 D854-06 試驗程式，採用烘乾土樣法，分別測量比重瓶(標號 A~F)的重量，加入烘乾後之土樣及蒸餾水，經下列公式計算後如表 4-5：

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{m_s}{m_{pw} - (m_{pws} - m_s)}$$

其中 m_s = 烘乾後之乾土重； m_{pw} = 比重瓶與水重； m_{pws} = 比重瓶、水與乾土重。

表 4-5 土壤比重計算

第一次試驗						
	A	B	C	D	E	F
m_{pws}	82.28	81.74	83.26	82.06	82.05	83.09
m_{pw}	76.05	76.46	76.99	76.17	76.35	76.87
m_s	10.00	8.80	10.00	9.64	9.66	10.00
比重	2.623	2.492	2.672	2.562	2.432	2.637
平均比重	2.570					

*室溫 25.8 度，水的密度為 0.99681 g/cm³

第二次試驗				第三次試驗		
	A'	B'	C'	D'	E'	F'
m_{pws}	169.19	160.84	163.06	160.18	166.92	141.8
m_{pw}	156.65	148.36	150.74	147.76	154.92	129.12
m_s	19.96	19.9	19.95	19.87	19.83	19.91
比重	2.675	2.666	2.600	2.652	2.518	2.738
平均比重	2.647			2.636		

*室溫 34.4 度，水的密度為 0.99437 g/cm³

第四節 pH 值分析

本研究使用之 pH 儀為 Mettler-Toledo S220-BASIC，具有自動溫度校正功能。測量時，需先將儀器以標準溶液校正後，將測量電極插入試驗土樣中靜置，待測量及數據記錄完成即可。將採集土樣混合不同比例之地下水，以 pH 測定儀檢測各組 pH 值，地下水之空白對照組平均 pH 值為 7.07，各組合重覆試驗後取平均值，如表 4- 6 所示：

表 4- 6 pH 值實驗記錄

土與水的 重量比例 (土：水)	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
1:1	7.42	7.36	7.44	7.31	7.35	7.38
1:1.5	7.43	7.52	7.51	7.5	7.51	7.49
1:2	7.53	7.51	7.55	7.54	7.59	7.54
1:3	7.57	7.59	7.6	7.62	7.62	7.60
1:4	7.61	7.61	7.62	7.65	7.65	7.63
1:5	7.7	7.69	7.67	7.68	7.67	7.68
總平均	7.55					

結果顯示 pH 值介於 7.38—7.68 之間，參考土壤 pH 值與酸鹼性等級區分表，屬於中性偏弱鹼性。土壤微生物一般最適宜的 PH 值是 6.5—7.5 之間，同時也是植物必需的三大元素氮(N)、磷(P)、鉀(K) 可以呈現最大有效性的範圍(參考表 4- 7、表 4- 8)，因此由試驗得出的結果可以知道該土壤的環境，適合植物及微生物的生長。

表 4- 7 土壤 pH 值與酸鹼性等級區分表

PH 範圍	土 壤 反 應
<4.5	極酸性(Extremely acid)
4.5-5.0	極強酸性(Very strongly acid)
5.1-5.5	強酸性(Strongly acid)
5.6-6.0	中酸性(Medium acid)
6.1-6.5	微酸性(Slightly acid)
6.6-7.3	中性(Neutral)
7.4-7.8	弱鹼性(mildly alkaline)
7.9-8.4	中鹼性(Moderately alkaline)
8.5-9.0	強鹼性(Strongly alkaline)
>9.0	極強鹼性(Very strongly alkaline)

參考(羅秋雄，2002)

表 4- 8 土壤呈現最大有效性之 pH 有效性範圍

營養元素	最適 pH 值範圍
氮(N)	5.8~8.0
磷(P)	6.5~7.5
鉀(K)	6.0~7.5
鈣(CA)	7.0~8.5
鎂(MG)	7.0~8.5
硫(S)	5.0~10.0
鐵(Fe)	4.0~6.0
錳(MN)	5.0~6.5
硼(B)	5.0~7.0
銅(CU)	5.0~7.0
鋅(ZN)	5.0~7.0
鉬(MO)	7.0~10.0

參考(羅秋雄，2002)

第五章土壤沖蝕試驗

第一節土壤沖蝕試驗結果

在本計畫中，將紋溝定義為長(<82cm)、寬 (<25cm)的沖蝕溝，在試驗開始前先秤量沖蝕箱與土壤的總重量，經 10 個小時的沖蝕後，再測量一次沖蝕箱總重，以計算土壤流失量，並計算紋溝總數及總面積，記錄於表 5- 1。

表 5- 1 紋溝沖蝕實驗數據

Case	坡度	溫度	流量	含水量	土壤 流失量	紋溝 數量	紋溝 總面積
	(%)	(C°)	(L/min)	(%)	(kg) (%)	(條)	(cm ²)
1	<1	27.45	0.874	0.51	20.06 36	6	554.4
2	<1	27.78	0.421	0.25	1.61 3	17	661.9
3	5	26.35	0.836	0.33	13.81 25	109	1007.6
4	5	26.7	0.421	0.24	8.42 15	230	99.0
5	15	25.48	0.809	0.47	30.57 55	79	2392.4

第二節紋溝尺寸分析

各組實驗紋溝尺寸資料繁多，列於附錄二，紋溝長度

將不同流量及坡度組合試驗中(Case1：

$Q = 0.874 L/min, S < 1\%$ ；Case2： $Q = 0.421 L/min, S < 1\%$ ；

Case3： $Q = 0.836 L/min, S = 5\%$ ；Case4：

$Q = 0.421 L/min, S = 5\%$; Case5 : $Q = 0.809 L/min, S = 15\%$), 土壤表面發展之紋溝尺寸量化, 分析紋溝長度(L_i)、面積(A_i)、平均寬度(W_i)與長寬比($\frac{L_i}{W_i}$)之相關性, 如圖 5- 1 至圖 5- 3 所示, 並提出下列量化關係式:

$$A = 0.1403L^{1.5885} ; W = 0.1403L^{0.5885} ; L/W = 7.1253L^{0.4115}$$

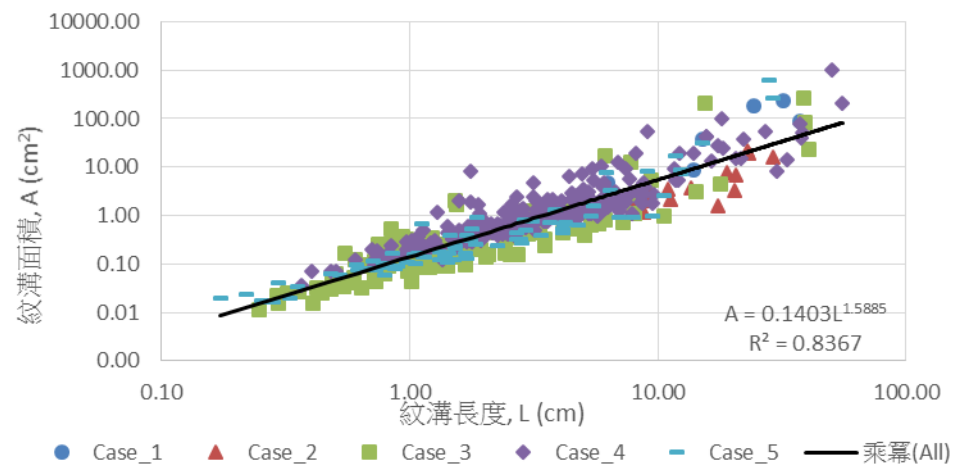


圖 5- 1 紋溝面積與紋溝長度之關係圖

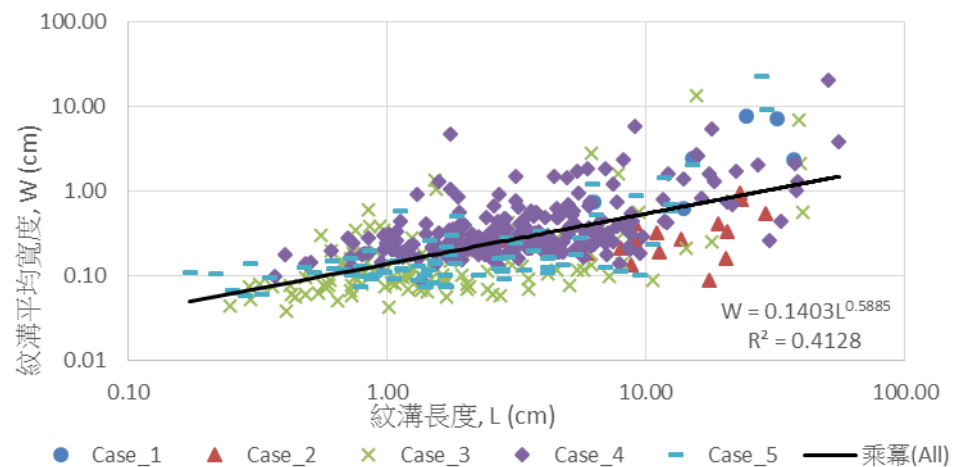


圖 5- 2 紋溝平均寬度與紋溝長度之關係圖

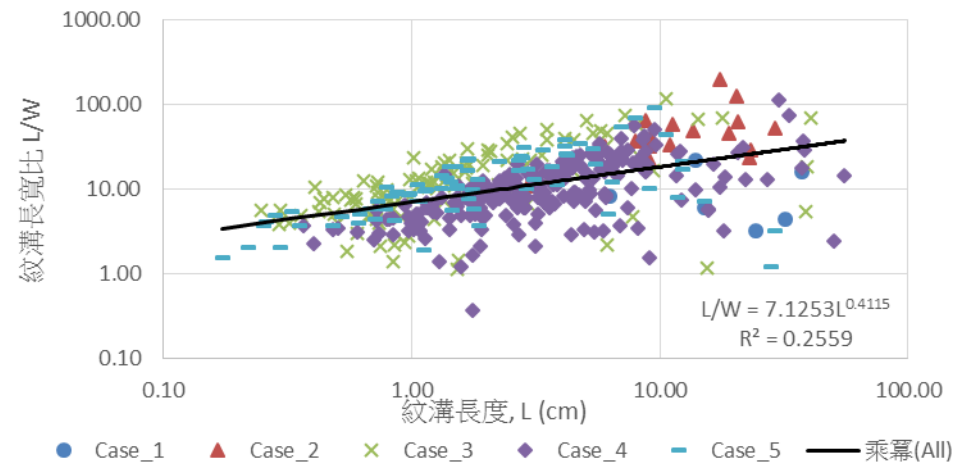


圖 5-3 紋溝長寬比與紋溝長度之關係圖

第三節 土壤沖蝕臨界條件

一、基礎理論

在明渠中，在不同流量與底床坡降組合情形下之正常水深 (normal depth) 可由測量漸變流之 M1 與 M2 水面剖面線之漸近線獲得。使用正常水深可確保渠槽內流況近乎為均勻流 (uniform flow)，使其底床剪應力 (τ) 可計算為 (Sturm, 2001)：

$$\tau = \gamma_w y S_0 \quad [5.1]$$

其中 γ_w = 水的比重； y = 平均水深； S_0 = 底床坡降。在試驗中，渠槽之底床剪應力 (τ) 可藉由流量、水深、與底床坡降之調控，並以 [5.1] 式計算獲得。參照前人研究 (Ravisangar, 2001; Hobson, 2008)，底床剪應力可經由雷射都普勒流速儀 (LDV) 測量之流速，並以對數曲線擬合之流速剖面中心線斜率計算而得，與 [5.1] 式之

計算結果交互比對進行驗證。

Ravisangar (2001)和 Hobson (2008)對[5.1]式計算結果之驗證程式如下：首先，由流量計測得之流量(Q_0)可由 LDV 測得之流速剖面對渠槽截面積積分獲得之流量驗證，而在已知坡降(S_0)下之水深(y)可由漸進線之正常水深獲得；接著，以[5.1]式計算底床剪應力(τ)，而平均流速(V)、水力半徑(R)、雷諾數(Re)，與摩擦因子(f)則由下列方程式求得：

$$V = \frac{Q_0}{by} \quad [5.2]$$

$$R = \frac{by}{b + 2y} \quad [5.3]$$

$$Re = \frac{4RV}{\nu} \quad [5.4]$$

$$f = \frac{8gRS_0}{V^2} \quad [5.5]$$

其中 ν =水的動力黏滯係數； b =渠槽寬度； g =重力常數。

此外，為考量渠槽側壁與底床粗糙程度不同之影響，Ravisangar (2001)和 Hobson (2008)採用側壁校正程式以計算在不同雷諾數情形中渠槽側壁與底床之粗糙因子，包括側壁摩擦因子(f_w)、底床摩擦因子(f_b)、底床水力半徑(R_b)，與底床曼寧粗糙係數(n_b)；其方程式如下：

$$f_w = 0.0015 \left[\log \left(\frac{Re}{f} \right) \right]^2 - 0.0428 \log \left(\frac{Re}{f} \right) + 0.1884 \quad [5.6]$$

$$f_b = f + \frac{2y}{b}(f - f_w) \quad [5.7]$$

$$R_b = \frac{f_b}{f} + R \quad [5.8]$$

$$n_b = \frac{K_n}{\sqrt{8g}} R_b^{1/6} f_b^{1/2} \quad [5.9]$$

其中在公制單位中 $K_n = 1.0$ ，英制單位中 $K_n = 1.49$ 。而相等的砂粒粗糙度值(k_s)則由試誤法取得，可使 Keulegan's 方程式([5.10])得到最佳擬合結果的數值。

$$\frac{n_b}{k_s^{1/6}} = \frac{\frac{K_n}{\sqrt{8g}} \left(\frac{R_b}{k_s} \right)^{1/6}}{2.0 \log \left(12.2 \frac{R_b}{k_s} \right)} \quad [5.10]$$

最後，利用[5.8]與[5.9]式計算之 R_b 和 n_b 值代入曼寧公式可算出流量(Q)，並將計算之流量 Q 以反覆運算法驗證其值是否為測量流量 Q_0 值。在已知一測量流量 Q_0 ，並給定底床坡降 S_0 和底床剪應力 τ 的情況下，此疊代程式可用以決定應有之正常水深；再由[5.2]到[5.9]式計算 R_b 和 n_b 值，以曼寧公式計算流量 Q ；重覆反覆運算直至 $Q_0 = Q$ 為止，可獲得給定 Q_0 、 S_0 和 τ 之流況下的正常水深，以進行流況之調整。

二、濁度計校正-秤重法

以秤重法做實驗，逐一對照土砂實測濃度及濁度計所測得數值，記錄含砂濃度與濁度之間的關係，供日後實驗作對照。綜合所測得的資料，去除誤差過大及不合理者(值為負值)，找出回歸關係，列成對照表表 5- 2，其中 C=濃度(mg/l)；C*=濁度(NTU) ，並繪成圖 5- 4。

表 5- 2 含砂濃度與濁度對照表

C(MG/L)	C*(NTU)	C(MG/L)	C*(NTU)	C(MG/L)	C*(NTU)
0.000	1.340	4801.856	1122.000	6963.194	1837.200
2437.118	116.800	5048.315	1362.600	7137.273	1916.857
2560.990	942.833	5121.979	1817.818	7659.513	2471.143
3201.237	766.636	5570.555	1410.625	8181.752	3138.200
3521.361	1108.400	5762.227	1537.000	8355.832	3366.375
3829.756	823.000	6092.794	1706.167	8963.464	2607.455
4481.732	1523.900	6402.474	2424.300	10884.206	3509.100
4481.732	982.727	6722.598	2250.600	12164.701	3917.750

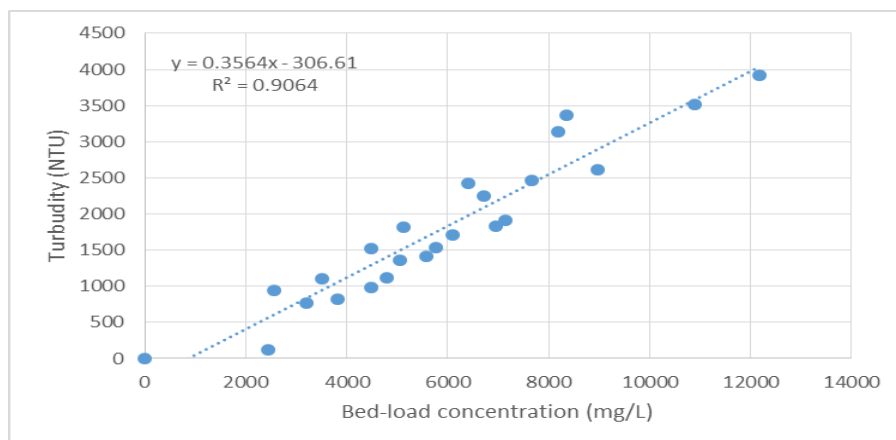


圖 5- 4 含砂濃度與濁度之比較

(濁度計): X 軸 C(mg/l)Y 軸 C*(NTU)

三、土壤沖蝕率之測量與臨界剪應力之推估方法

在給定水力條件(流速、水深、底床剪應力等)之流況中，將試驗土樣安置於渠槽底床並進行土壤沖蝕試驗。試驗中觀察在不同水力條件下，土壤顆粒被搬動及運輸情形，並測量固定沖刷時間內的土壤沖蝕深度，以計算土壤之沖蝕率(E)，即單位時間內之土壤沖蝕量：

$$E = \frac{D}{t} \rho_d \quad [5.11]$$

其中， D = 土壤沖蝕深度； t = 沖刷時間； ρ_d = 土壤容積密度。

經上述方法進行試驗，測量不同流況下之土壤沖蝕率後，可繪製土壤沖蝕率 E 與底床剪應力 τ 之 x-y 散佈圖；以乘冪關係式 ([5.12] 式) 進行資料擬合，獲得試驗土樣之土壤沖蝕臨界剪應力 (τ_c) 推估值，作為阿公店水庫底泥沖刷啟動條件之參數。

$$E = M(\tau - \tau_c)^n \quad [5.12]$$

其中， M, n = 率定常數。為考量試驗結果之不確定性，在相同水條件下將進行三重複土壤沖蝕試驗，且土壤沖蝕率 E 與底床剪應力 τ 之關係曲線需由五種流況下的試驗結果為資料點進行擬合。

紋溝中逕流分散土壤之能力以 $D_c = K(\tau - \tau_c)$ 表示，式中 τ_c 為土壤沖蝕臨界剪應力，視為發生土壤沖蝕臨界力學條件。張科利等人(1998)提出 τ_c 為紋溝發生之臨界剪應力，且 $\tau_c = \gamma h \sin \theta$ (γ =

水的比重； h = 坡面地表逕流深， m ； θ = 坡度， $^{\circ}$)；然坡面流之平均水深不易測量，進一步提出紋溝發生之臨界流量

$q_c = c(\sin\theta)^{-7/6}$ ， c = 與土壤性質相關之常數，本計畫取

0.8283。Wang and Sturm (2016)針對黏、砂為土之細粒土壤，分

析其物理特性與沖蝕條件，提出無因次土壤沖蝕臨界剪應力 τ_c^* ，

以土壤含水量(w ，%)與黏粒含量(CSF ，%)推估：

$$\tau_c^* = 8.46 - 27.76w + 73.69CSF + 83.22(w \times CSF)$$

$$\tau_c^* = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma_w) d_{50}}$$

其中 γ_s 為砂比重、 γ_w 為水比重、 d_{50} 為中值粒徑。

四、土壤沖蝕臨界條件推估結果

由張科利等人(1998)及 Wang and Sturm (2016)的公式代入實驗數據推估土壤沖蝕臨界條件，得到表 5- 4。

表 5- 3 紋溝沖蝕臨界條件

試驗	坡度	Temp (°C)	流量 (L/min)	含水量	黏粒含量	τ_c^a (Pa)	τ_c^b (Pa)
CASE 1	<1 %	27.45	0.874	51 %	11.37%	4.90×10^{-4}	3.68×10^{-3}
CASE 2	<1 %	27.78	0.421	25 %	11.43%	4.90×10^{-4}	6.03×10^{-3}
CASE 3	5 %	26.35	0.836	33 %	11.53%	1.47×10^{-3}	5.34×10^{-3}
CASE 4	5 %	26.70	0.421	24 %	11.53%	1.47×10^{-3}	6.18×10^{-3}
CASE 5	15 %	25.48	0.809	47 %	11.46%	1.47×10^{-3}	4.06×10^{-3}

^a 依張科利等人(1998)之公式 $\tau_c = \gamma h \sin \theta$ ，本計畫 h 取 1~5mm

^b 依 Wang and Sturm (2016)公式計算

五、土壤沖蝕臨界條件—以前人提出之公式推估比較

實驗測得的土壤有機質含量為 0.35%，由張科利等人(1998)及 Wang and Sturm (2016)的公式所得之數值與 Romero et al.(2007)及 Wang et al.(2013)針對 WEPP 使用之參數計算比較，其中 vfs 代表極細砂的比例，有機質含量為 0.035%。

表 5-4 各組實驗結果比較

Case (單位)	vfs (%)	Clay (%)	time (min)	slope (%)	τ_c^a	q_c^a (ml/s/cm)	q_c^a (L/min)	τ_c^b	τ_c^c	τ_c^d	K_r^c
1	9%	11.37	600	1%	0.49×10^{-3}	32.31652	1.938991	3.68×10^{-3}	2.8793	2.8993	47.33×10^{-3}
2	8%	11.43	600	1%	0.49×10^{-3}	32.31652	1.938991	6.03×10^{-3}	2.9070	2.9270	44.33×10^{-3}
3	7%	11.53	600	5%	1.47×10^{-3}	4.942647	0.296559	5.34×10^{-3}	2.9780	2.9980	41.33×10^{-3}
4	35%	11.53	600	5%	1.47×10^{-3}	4.942647	0.296559	6.18×10^{-3}	1.3695	1.3895	125.33×10^{-3}
5	29%	11.46	600	15%	1.47×10^{-3}	1.371886	0.082313	4.06×10^{-3}	1.7129	1.7329	107.33×10^{-3}

註：公式來源：^a 張科利等人(1998)、^b Wang(2016)、^c Romero(2007)、^d Wang(2013)

●Romero et al.(2007)：

$$D_c = K_r(\tau - \tau_c)$$

$$\tau_c = 2.65 + 6.5 \text{ clay} - 5.8 \text{ vfs}$$

$$K_r = 0.00197 + 0.030 \text{ vfs} + 0.03863 e^{-184 \text{ orgmat}}$$

其中：

D_c =土壤沖蝕率

τ_c = 土壤沖刷臨界剪應力，表土壤之抗沖蝕能力(Pa)

clay/vfs/orgmat=黏土含量/極細粒/有機質的百分比比例

K_r =土壤可蝕性係數

●Wang et al.(2013)：

$$\tau_{cb} = 2.67 + 6.5 \text{ clay} - 5.8 \text{ vfs}$$

第六章 結論及建議

第一節 結論

台灣山區近年受到地質破碎及氣候變遷影響，山坡地土砂災害問題更加複雜嚴峻，單以經驗公式推估土壤沖蝕量雖操作便利，但推估結果之準確度難以評估且不確定性高，且難以因應極端降雨事件日趨頻繁之氣象變化。除經驗公式外，土壤沖蝕之研究亦應從動力學角度切入，探討土壤沖蝕之力學機制與過程，發展出以物理過程為基礎之土壤沖蝕模型。

土壤物化特性試驗結果指出，水庫底泥之粒徑分佈界於 0.001mm 到 0.1mm，中值粒徑約 0.032mm，多屬黏土及粉土顆粒大小，僅少數屬極細砂。與前人研究(謝正倫等，1999)採集阿公店集水區之入砂河川底泥，如旺萊溪、濁水溪及神木村等土樣土壤粒徑曲線相似。阿太堡限度試驗結果指出，現地土樣多屬 ML-OL 之無機質低塑性土，其平均比重約 2.6。土體之孔隙水則多為中性偏弱鹼性(pH 平均值約 7.55)之低離子濃度狀態，其土壤環境適合植物及微生物的生長。

本研究計畫從土壤沖蝕過程之物理機制與力學分析著手，進行土壤物化特性及坡面流沖蝕試驗，觀測臨前土壤狀態在坡面流沖蝕下之紋溝發展過程，求得坡面沖蝕量及紋溝發生之臨界條件，找出量化關係式，應用於坡面流沖蝕分析與災害防治。主要成果提出紋溝總沖蝕

量 M 與坡度 S 及逕流量 Q 之關係式： $M = -10.22 + 0.99S + 29.98Q$ ；

總沖蝕量與紋溝總面積 A_{total} 之關係式：

$M = -1.2168 + 0.0305A_{total}$ ；並提出紋溝之面積 A 、平均寬度 W 及長

寬比 L/W 等皆與其長度 L 呈正相關之幂次關係： $Y = aL^b$ ；利用前人公

式，本計畫提出阿公店水庫集水區泥砂發生紋溝沖蝕之臨界剪應力條

件 τ_c 約為 5×10^{-4} 至 6×10^{-3} Pa 之間，其力學條件與土壤性質及地形(坡

度)最為相關。

第二節 建議

對於本計畫後續執行之相關建議列述如下：

- 一、彙整多次採樣之現地土壤物理特性，探討其時變性及可能之入砂環境與氣候變遷影響。
- 二、庫區底泥之物理特性(粒徑範圍)與坡面土壤並非完全相同，未來可直接採集各地區現地坡面土壤進行相關試驗與分析，增加計畫成果之應用範圍。
- 三、與傳統明渠水流相比，坡面流仍具有許多特殊之水力特性；且受降雨、入滲及地形之影響，坡面流在時間和空間上都是變化的。未來應考量降雨及入滲之影響，進行相關之試驗及分析，增進本計畫成果之應用範圍及貢獻。
- 四、考量效率及經濟性等因素，未來可以試驗案模擬推估現地實際情形，採模型模擬或數值模擬等方式配合辦理，增進本計畫成果之應用價值。

參考文獻

1. 范正成(1993)。台灣地區沖蝕預測公式之回顧、研究與展望，中華水土保持學報 24(2): 131-152。
2. 賴彥任、張振生、曹崇銘、魏聰輝、江博能、王亞男(2013)。利用小型量水堰評估復育造林過程對土壤沖蝕影響之初探。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 27(4):273-284。
3. 李建堂(1997)，土壤沖蝕的量測方法。國立台灣大學地理學系地理學報(23)：89-106。
4. 李建堂(1999)，銻 137 技術應用於土壤沖蝕研究之回顧與展望，台灣大學地理學系地理學報，26:25-44。
5. 李君蘭、蔡強國、孫莉英、陳俊傑(2011)。降雨強度，坡度及坡長對細溝侵蝕的交互效應分析。中國水土保持科學，9(6):8-13.
6. 劉青泉、李家春、陳力、向華(2004)。坡面流及土壤侵蝕動力學 (II)。力學進展 34(4):493-506。
7. 林俐玲、陳品岡(2010)。修正版通用土壤流失公式 (RUSLE) 之簡介。水保技術，5(4):251-257。
8. 林俊全(1995)，泥岩邊坡發育模式之研究，台灣大學地理學系地理學報，18:45-58。
9. 林昭遠、陳明義(1992)，利用 AGNPS 模式評估野火對森林集水區磷肥運移之影響，中華水土保持學報，23(1):33-43
10. 林鎮洋(2009)，環境影響評估地表水水質評估模式研究，行政

院環保署。

11. 林韋成(2014)，「石門水庫集水區土壤沖蝕與水文地文影響因子研究」，淡江大學土木工程學系研究所，碩士論文。
12. 林文賜、林昭遠、周文傑、黃碧慧(2006)。集水區坡面泥砂產量推估模式建立之研究。明道學術論壇，2(2):55-67.
13. 林文英、林俐玲(2008)，土壤流失推估模式之應用與探討，中華水土保持學報，40(3): 357-368。
14. 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，中興工程季刊，106:5-15。
15. 盧光輝 (1997)，水裡溪集水區土壤流失量之推估，私立中國文化大學地理研究報告，10:17-30。
16. 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。
17. 盧光輝(1996)，土壤沖蝕模式之建立，85 年水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，林業特刊，15(1):1-19。
18. 盧光輝、范正成、林俐玲、黃俊德、吳嘉俊 (1995)，土壤沖蝕研究發展技術之改進(二)，84 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編。
19. 盧光輝、薑善鑫(1990)。農業非點源污染模式在大湖小農業集水區之應用。中華水土保持學報，21(1):2-72。
20. 盧光輝、薑善鑫、蔡博文(1994)。坡地環境品質可容許土壤流失量之推估，82 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，行政院農業發展委員會。林業特刊，46: 125-135。

21. 羅秋雄(2002)，強酸性土壤改良，桃園區農業改良場。
22. 何丹、馬東豪、張錫洲、張佳寶、鄭子成(2013)。土壤入滲特性的空間變異規律及其變異源。水科學進展 24(3)：340-348。
23. 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(3)：275-283。
24. 許振崑、林伯勳、賴承農、簡以達、蔡明發(2014)，以沖蝕針量測資料評估曾文水庫集水區整治邊坡土壤沖蝕抑制率。2014年中華水土保持學會年會及學術研討會論文集。
25. 許振崑、林伯勳、梁惠儀、冀樹勇、黃文洲、尹孝元(2010)，「莫拉克颱風於石門水庫集水區土壤沖蝕量特性分析」。財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心與行政院農業委員會水土保持局。
26. 許振崑、林伯勳、鄭錦桐、高丞瑋、冀樹勇、黃文洲、尹孝元(2009)，「3S 技術於石門水庫集水區坡面沖蝕調查之應用」，水保技術，4(3):191-203。
27. 洪毓華、遊繁結(1992)。AGNPS 模式應用於小集水區推估土壤流失量與逕流量之探討。水土保持學報 24(2):35-56。
28. 薑善鑫(1992)，八掌溪山坡地土壤沖蝕之定量研究，國立臺灣大學理學院地理學報，15:1-14。
29. 邱昱嘉(2007)，「放射性核種銫 137 在土壤重新分佈率估算之研究」，博士論文，國立台灣大學土木工程學研究所。
30. 謝正倫(1999)，水庫凝聚性沉滓之流變關係研究，國科會研究報告，計畫編號:NSC88-2218-E006-024。

31. 謝正倫(2008)，「水庫濁水現象之研究子計劃-水庫集水區細微土砂來源之空間分佈特性之分析」，國科會研究成果報告，計畫編號 NSC 95-2625-Z-006-003。
32. 謝越平(1978)，利用台灣集水區粘土礦物特徵推測坡地土壤沖蝕來源。中華水土保持學報。9(2): 93-102。
33. 徐森彥(2013)。土石流潛勢溪流土砂生產分析技術之研究，中興大學水土保持學系，博士論文。
34. 趙春紅、高建恩(2016)。坡面不同侵蝕溝斷面特徵及水力幾何形態。水科學進展 27(1)：22-30。
35. 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):1234-1241。
36. 陳樹群、簡如宏、馮智偉、巫仲明(1998)。本土化土壤沖蝕指標模式之建立，中華水土保持學報，29(3):233-247。
37. 陳樹群、吳俊毅、吳岳霖、王士豪 (2009a)，GIS 圖層及修正因子建置台灣通用土壤流失公式 (TUSLE) – 以石門水庫集水區為例，中華水土保持學報，40(2):185-197。
38. 陳樹群、吳岳霖、蔡義誌 (2009b)，臺灣地區集水區土壤沖蝕量估算模組系統應用於石門水庫集水區及西南部泥岩區，工程環境會刊，23:59-67。
39. 張攀、唐洪武、姚文藝、孫維營(2016)。細溝形態演變對坡面水沙過程的影響。水科學進展 27(4): 535-541。
40. 張攀、姚文藝、唐洪武、肖培青(2015)。模擬降雨條件下坡面細溝形態演變與量化方法。水科學進展 26(1)：51-58。
41. 張科利、秋吉康宏、張興奇(1998)。坡面徑流沖刷及泥沙輸移

- 特徵的試驗研究，地理研究，17(2):163-170。
42. 張寬地、王光謙、呂宏興、王占禮、劉俊娥(2012)。模擬降雨條件下坡面流水動力學特性研究。水科學進展 23(4):229-235。
 43. 鄭粉莉(1989)。細溝侵蝕量測算方法的探討。水土保持通報 9(4): 41-45。
 44. 鄭粉莉、康紹忠(1998)。黃土坡面不同侵蝕帶侵蝕產沙關係及其機理。地理學報 5:422-428。
 45. 中華水土保持學會編印(2013)。水土保持手冊。
 46. 沈海鷗、鄭粉莉、溫磊磊、盧嘉、薑義亮(2015)。雨滴打擊對黃土坡面細溝侵蝕特徵的影響。農業機械學報。46(8): 104-112。
 47. 蔡強國、陸兆熊、王貴平(1996)。黃土丘陵溝壑區典型小流域侵蝕產沙過程模型。地理學報(02):108-117。
 48. 蔡強國、朱遠達、王石英(2004)。幾種土壤的細溝侵蝕過程及其影響因素。水科學進展：15(1):12-18.
 49. 遊繁結編著(2012)。土壤沖蝕講義。
 50. 吳嘉俊、盧光輝、林俐玲(1999)，土壤流失量估算手冊，國立屏東科技大學。
 51. 吳久雄、林俐玲、盧光輝(1990)，山坡地土壤流失量之推估，林業特刊，26:31-48。
 52. 萬鑫森、黃俊義(1989)，臺灣東部山坡地土壤沖蝕性及流失量之推估，農林學報，38(2): 37-48。
 53. 王軍光、李朝霞、蔡崇法、王玉華、張國彪、馬仁(2012)。坡面流水力學參數對團聚體剝蝕程度的定量影響。水科學進展 23(4)：502-508。

54. 王盛萍、姚安坤、趙小嬋(2014)。基於人工降雨模擬試驗的坡面水文連通性。水科學進展 25(4)：526-533。
55. Agassi M, Bloem D, Ben-Hur M. (1994). Effect of drop energy and soil and water chemistry on infiltration erosion. *Water Research Res*, 30(4), 1187-1193.
56. Amorim R S S, Silva D D, Pruski F F, Matos A T. (2001). Influence of the soil slope and kinetic energy of simulated precipitation in the interrill erosion process. In : Proc of Int Symposium : Soil Erosion Research for the 21st Century, Honolulu, Hawaii, ASAE St. Joseph, MI, USA. 155-158.
57. Anthony J Parsons. (2003). *Overland Flow: Hydraulics And Erosion Mechanics*. CRC Press.
58. Anthony J. Parsons, John Wainwright, Athol D. Abrahams, J. Roger Simanton.(1997). Distributed dynamic modelling of interrill overland flow. *Hydrological Processes*, 11(14):1833-1859.
59. ASTM D 1140 (2000). "Standard test methods for amount of material in soils finer than the No. 200 (75- μ m) sieve." West Conshohochen, P., American Society for Testing and Materials.
60. ASTM D 2216 (2005). "Moisture content of soil." West Conshohochen, P., American Society for Testing and Materials.
61. ASTM D 4318 (2005). "Standard test method for liquid limit, p. 1., and plasticity index of soils." West Conshohochen, PA, American Society for Testing and Materials.

62. ASTM D 854 (2006). "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer" West Conshohochen, P., American Society for Testing and Materials.
63. Beasley, D. B., Huggins, L. F., & Monke, A. (1980). ANSWERS: A model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*, 23(4), 938-0944.
64. Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2008). *Principles of soil conservation and management*. Springer Science & Business Media.
65. Bradford J M, Foster G R. (1996). Interrill soil and slope steepness factors. *SSSAJ*, 60(3), 909-915.
66. Braud I, Vich A I J, Zuluaga J, Fornero L, Pedrani A. (2001). Vegetation influence on runoff and sediment yield in the Andes region : observation and modeling. *Journal of Hydrology*, 254, 124-144.
67. Briaud, J. L., Ting, F. C. K., Chen, H. C., Cao, Y., Han, S. W., & Kwak, K. W. (2001). Erosion function apparatus for scour rate predictions. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(2), 105-113.
68. Campbell, B. L. (1992). Spatial and temporal variation in erosion and sediment yield. In: Bogen, J., Walling, D. E. and Day, T. (eds.) *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*, International Association of Hydrological Sciences Publication no. 210, 455-465.

69. Casalí, J., Loizu, J., Campo, M. A., De Santisteban, L. M., & Álvarez-Mozos, J. (2006). Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion. *Catena*, 67(2): 128-138.
70. Chen, X. Y., Zhao, Y., Mi, H. X., & Mo, B. (2016). Estimating rill erosion process from eroded morphology in flume experiments by volume replacement method. *Catena*, 136, 135-140.
71. Cochrane T A, Flanagan D C. (1997). Detachment in a simulated rill. *Transaction of the ASAE*, 40(1), 111-119.
72. Cochrane T A, Flanagan D C. (2001). Deposition processes in a simulated rill. In:Proc of Int Symposium:Soil Erosion Research for the 21st Century, Honolulu, Hawaii. *ASAE*, St. Joseph, MI, USA. 139-142.
73. Collision A, Simon A. (2001). Modeling gully head—cut recession processes in loess deposits. In:Proc. of Int. Symposim:Soil Erosion Research for the 21st Century. Honolulu, Hawaii, *ASAE*, St. Joseph, M I, USA. 87-90.
74. Csáfordi, P., Pődör, A., Bug, J., & Gribovsky, Z. (2012). Soil erosion analysis in a small forested catchment supported by ArcGIS Model Builder. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 8(1): 39-56.
75. da Silva, L. F., Cassol, E. A., Murliki, J. D., da Silva, B. P., & Pandolfo, M. L. (2016). Susceptibility to rill erosion of a

- 12-year-old soil reconstructed after coal mining. *International Journal of River Basin Management*, (just-accepted), 1-15.
76. De Roo A P J, Offermans R J E, Cremers N H D T. (1996). LISEM : a single event physically-based hydrologic erosion model for drainage basins II: Sensitivity analysis, validation and application. *Hydrological Processes*, 10, 1119-1126.
77. Dirk H. Rieke-Zapp. (2005). Digital close range photogrammetry for measurement of soil erosion. *The Photogrammetric Record*. 20(109): 69 – 87.
78. Elliot W J. (1993). A process based rill erosion model. *Trans ASAE*, 36(1), 65-72.
79. Elliot, W. J., Liebenow, A. A., Laflen, J. M., Kohl, K. D., (1989). A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 and 88. *NSERL Report*, 3, 316.
80. Forsberg, B., Godoy, J. M., Victoria, R., & Martinelli, L. A. (1989). Development and erosion in the Brazilian Amazon: A geochronological case study. *GeoJournal*, 19(4): 399-405.
81. Foster, G. R. (1982). Modelling the erosion process. CT Haan (Ed.), *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*, The American Society of Agricultural Engineers Monograph.no 5. pp. 297-370.
82. Foster, G. R., Lane, L. J., Nowlin, J. D., Laflen, J. M., & Young, R. A. (1981). Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas. *Transactions of the ASAE*, 24(5): 1253-1262.
83. Foster, I. D. L., Dearing, J. A., Grew, R. and Orend, K. (1990). The

- sedimentary data base: an appraisal of lake and reservoir sediment based studies of sediment yield. In: Walling, D. E., Yair, A. and Berkowicz, S. (eds.) *Erosion, Transport and Deposition Processes*, International Association of Hydrological Sciences Publication no. 189, 19-43.
84. Gilley J E, Kottwitz E R, Simanton J R. (1990). Hydraulic characteristics of rills. *Trans ASAE*, 33, 1900-1906.
85. Gokhan Ozsoy, Ertugrul Aksoy, M. Sabri Dirim, Zeynal Tumsavas. (2012). Determination of Soil Erosion Risk in the Mustafakemalpasa River Basin, Turkey, Using the Revised Universal Soil Loss Equation, Geographic Information System, and Remote Sensing. *Environmental Management* 50:679 – 694.
86. Grabowski, R. C., Droppo, I. G., and Wharton, G. (2010). Estimation of critical shear stress from cohesive strength meter-derived erosion thresholds. *Limnol. Oceanogr. Methods*, 8:678-685.
87. Grabowski, R. C., Droppo, I. G., and Wharton, G. (2011). Erodibility of cohesive sediment: The importance of sediment properties. *Earth-Science Reviews*, 105(3-4), 101-120.
88. Graham, E. R. (1963). Factors affecting Sr-85 and I-131 removal by runoff water. *Water and Sewage Works*, 110: 407-410.
89. Greenland, D. J., & Hayes, M. H. B. (1978). The chemistry of soil constituents. *The chemistry of soil constituents*.
90. Holger Gärtner. (2006). Tree roots — Methodological review

- and new development in dating and quantifying erosive processes. *Geomorphology*. 86(3-4):243-251.
91. Horton, R.E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins-hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, 56(3), 275-370.
 92. Huang C H, Bradford J M, Laflen J M. (1996). Evaluation of the detachment-transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation. *SSSAJ*, 60(3), 734-739.
 93. Huang C, Bradford J M, Cushman J H. (1983). A numerical study of raindrop impact phenomena:The elastic deformation case. *SSSAJ*, 47(5), 855-861.
 94. L. Vanderkerckhove, B. Muys, J. Poesen, B. De Weerd, N. Coppé. (2001). A method for dendrochronological assessment of medium-term gully erosion rates. *Catena*(45):123-161.
 95. Laflen, J. M., Lane, L. J., & Foster, G. R. (1991). WEPP: A new generation of erosion prediction technology. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46(1): 34-38.
 96. Lal, R. (1990). *Soil erosion in the tropics: principles and management*. McGraw Hill.
 97. Lei T, Nearing M A, Haghighi K, Bralts V F. (1998). Rill erosion and morphological evolution:A simulation model. *Water Resources Research*, 34(11), 3157-3168.
 98. Lick, W. (1982). "The transport of contaminants in the great

- lakes." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 10, 327.
99. Liebenow, A. M., Elliot, W. J., Laflen, J. M., & Kohl, K. D. (1990). Interrill erodibility: collection and analysis of data from cropland soils. *Transactions of the ASAE*, 33(6), 1882-1888.
100. Liu, Q., Li, J., Chen, L., Xiang, H. (2004). Dynamics of overland flow and soil erosion (II). *Advances in Mechanics*, 34(4), 493-506.
101. Lo, A. F. K., & Tsai, W. B. (1992). Erosion evaluation and prediction in mountain regions of Taiwan. *Erosion, Debris, Flows and Environment in Mountain Regions*, (209), 119-128.
102. Lo, K. F. A. (1995). Erosion assessment of large watersheds in Taiwan. *Journal of soil and water conservation*, 50(2): 180-183.
103. Loughran, R. J. (1989). The measurement of soil erosion. *Progress in Physical Geography*, 13(2): 216-232.
104. LUO Mei, ZHOU Yunchao, WANG Keke. (2015). Soil Erosion Characteristics According to Tree-rings in a Karst Area. *Journal of Resources and Ecology*, 6(4): 257-262.
105. McAuliffe J R, L A Scuderi, L D McFadden. (2006). Tree-ring record of hillslope erosion and valley floor dynamics: landscape responses to climate variation during the last 400 yr in the Colorado Plateau, northeastern Arizona. *Global and Planetary Change*, 50: 184-201.
106. McManus, J., & Duck, R. W. (1985). Sediment yield estimated from reservoir siltation in the Ochil Hills, Scotland. *Earth Surface*

- Processes and Landforms*, 10(2): 193-200.
107. McNeil, J., Taylor, C., and Lick, W. (1996). Measurements of erosion of undisturbed bottom sediments with depth. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(6):316-324.
 108. Meyer L D, Harmton W C. (1989). How row-sideslope length and steepness affect sideslope erosion. *Transactions of the ASAE*, 24(1):472-475.
 109. Nearing M A, Bradford J M. (1985). Single waterdrop impact detachment and mechanical properties of soils. *SSSAJ*, 49, 457-552.
 110. Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J., & Finkner, S. C. (1989). A processbased soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of the ASAE*, 32(5): 1587-1593.
 111. Nord, G. and Esteves, M. (2010). The effect of soil type, meteorological forcing and slope gradient on the simulation of internal erosion processes at the local scale. *Hydrological processes*, 24(13):1766-1780.
 112. Oldfield, F., Clark, R. L., Boardman, J., Foster, I. D. L., & Dearing, J. A. (1990). Lake sediment-based studies of soil erosion. In *Soil erosion on agricultural land. Proceedings of a workshop sponsored by the British Geomorphological Research Group*, Coventry, UK, January 1989. (pp. 201-228). John Wiley & Sons Ltd.

113. Oldfield, F., Rummary, T. A., Thompson, R., & Walling, D. E. (1979). Identification of suspended sediment sources by means of magnetic measurements: some preliminary results. *Water Resources Research*, 15(2): 211-218.
114. Onstad, C. A., & Foster, G. R. (1975). Erosion modeling on a watershed. *Transactions of the ASAE*, 18(2): 288-0292.
115. Ozsoy, G., Aksoy, E., Dirim, M. S., Tumsavas, Z. (2012). Determination of soil erosion risk in the Mustafakemalpasa River Basin, Turkey, using the revised universal soil loss equation, geographic information system, and remote sensing. *Environmental Management*. 50(4):679 – 694.
116. Park S W, M itchell J K, Bubenzer G D. (1982). Splash erosion modeling : Physical Analyses. *Trans ASAE*, 25(2):357-361.
117. Parsons, A. J., Wainwright, J., Abrahams, A. D., & Simanton, J. R. (1997). Distributed dynamic modelling of interrill overland flow. *Hydrological Processes*, 11(14): 1833-1859.
118. Poesen, Jean.(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.
119. Raina, P., Joshi, D. C., & Kolarkar, A. S. (1991). Land degradation mapping by remote sensing in the arid region of India. *Soil use and management*, 7(1): 47-51.
120. Rauws, G. & Covers, G. (1988). Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. *Journal of Soil*

- Science*, 39(1):111-124.
121. Remley, P. A., and J. M. Bradford.(1989). Relationship of soil crust morphology to inter-rill erosion parameters. *Soil Science Society of America Journal*. 53(4): 1215-1221.
 122. Renard K G, Foster G R, et al. (1991). RUSLE : revised universal soil loss equation. *Journal of soil and Water Conservation*, 46(1):30-33.
 123. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C. (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Agricultural Handbook No 703. United States Department of Agriculture, Washington, DC.
 124. Renard, K. G., Foster, G. R., Yoder, D. C., & McCool, D. K. (1994). RUSLE revisited: status, questions, answers, and the future. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(3): 213-220.
 125. Ritchie, J.C., McHenry, J.R. (1975). Fallout Cs-137: A tool in soil conservation research. *Journal of Soil and Water Conservation*, 30 (1975): 283-286.
 126. Robinson,A R.,(1977). Relationships between soilerosion and sediment delivery. In:Erosion and Solid Matter Transport in Inland Water,International Association of Hydrological Sciences Publication no.122,159-167.
 127. Roels,J. M. and Jonker,P. J.(1983). Probability sampling techniques for estimating soil erosion,*Soil Science Society of*

America Journal,47:1224-1228.

128. Romero, C. C., Stroosnijder, L., & Baigorria, G. A. (2007). Interrill and rill erodibility in the northern Andean Highlands. *Catena*, 70(2): 105-113.
129. S.H. Luk , Q.G. Cai. (1990). Laboratory experiments on crust development and rainsplash erosion of loess soils, China. *Catena*,17(3):261-276.
130. Schumm, S. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badland at Perth Amboy, New Jersey, *Bulletin of Geological Society of America*, 67(5): 597-646.
131. Selen Deviren Saygin, Chi-Hua Huang, Dennis Flanagan and Gunay Erpul.(2014). Developing Relations Between Soil Erodibility Factors in Two Different Soil Erosion Prediction Models (USLE/RUSLE AND WEPP) and Fluidized Bed Technique for Mechanical Soil Cohesion.Poster session presented at ASA, CSSA and SSSA International Annual Meetings, Long Beach. Poster Number 1830.
132. Sharma P P, Gupta S C, Foster G R. (1995). Raindrop-induced soil detachment and sediment transport from interrill areas. *SSSAJ*, 59(3):727-734
133. Smith R E, Corradini C, Melone F. (1999). A conceptual model for infiltration and redistribution in surface-sealed soils. *Water Resources Research*,35(5):1385-1393.
134. Smith, R. E., Goodrich, D. C., Woolhiser, D. A., & Unkrich, C. L.

- (1995). KINEROS – a kinematic runoff and erosion model. *Computer models of watershed hydrology*, 20, 627-668.
135. Stavi, I., & Lal, R. (2011). Variability of soil physical quality and erodibility in a water-eroded cropland. *Catena*, 84(3), 148-155.
 136. Sturm, T. W. (2001). Open channel hydraulics. *Textbook series in water resources and environmental engineering*, 2 Ed., McGraw Hill, New York.
 137. Thomas, A. W., & Welch, R. (1988). Measurement of ephemeral gully erosion. *Transactions of the ASAE*, 31(6): 1723-1728.
 138. Tiwari, A. K., Risse, L. M., & Nearing, M. A. (2000). Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. *Transactions of the ASAE*, 43(5): 1129-1135.
 139. Torri D. (1996). Slope , Aspect and surface storage. In : Menachem Agassi, ed. *Soil Erosion, Conservation, and Rehabilitation*, New York, USA : Marcel Dekker Inc., 77-106.
 140. Trimble,S. W.(1983). A sediment budget for Coon Creek basin in the Driftless Area. Wisconsin,1853- 1977,*American Journal of Science*,283:454-474.
 141. Van Ledden, M., Van Kesteren, W. G. M., & Winterwerp, J. C. (2004). A conceptual framework for the erosion behaviour of sand–mud mixtures. *Continental Shelf Research*, 24(1), 1-11.
 142. Walling,D. E.,(1988). Measure sediment yield from river basin. In:Lal,R.(ed.)*Soil Erosion Research Methods*,Iowa:SWCS,39-74.
 143. Walling,D.E.(1983). The Sediment delivery problem, *Journal of*

- Hydrology*,65(1):209-237.
144. Wang Y.-C. (2013). Effects of physical properties and rheological characteristics on critical shear stress of fine sediments. PhD dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
 145. Wang, B., Zheng, F., Römken, M. J., & Darboux, F. (2013). Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences. *Geomorphology*, 187: 1-10.
 146. Wang, Y.-C. and T. W. Sturm. (2016). “Effects of soil physical properties on erosional and yield strengths of fine-grained sediments” . *Journal of Hydraulic Engineering*, 10: 1061.
 147. Wendt, R. C., Alberts, E. E., & Hjelmfelt, A. T. (1986). Variability of runoff and soil loss from fallow experimental plots. *Soil Science Society of America Journal*, 50(3): 730-736.
 148. WH Wischmeier; Use and Misuse of the Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 31: 5 – 9.
 149. Williams, J. R. (1975). Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*, Vol. ARS-S-40, pp. 244-252.
 150. Williams, J. R., and H. D. Berndt (1977). Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 20(6):1100-1104.
 151. Williamson, H. J. & Ockenden, M. C. (1996). ISIS: an instrument for measuring erosion shear stress in situ. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 42(1): 1-18.

152. Wischmeier, W. H. and Smith D. D. (1965). “Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains-guide for selection of practices for soil and water conservation,” U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook.
153. Yang, H., Chang, Q., Du, M., Minami, K., and Hatta, Y. (1998). Quantitative model of soil erosion rates using ^{137}Cs for uncultivated Soil. *Soil Science*, 163(3): 248-257.
154. Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D. D., & Anderson, W. P. (1989). AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of soil and water conservation*, 44(2): 168-173.
155. Young, R. A. and Onstad, C. A. (1987). Soil erosion : measurement and prediction. In: Harlin, J. M. and Berardi, C. M. (eds.) *Agricultural Soil Loss: Process, Policies, and Prospects*, Boulder, Colorado: Westview, 91-111.
156. Zhang, K. L., Shu, A. P., Xu, X. L., Yang, Q. K., and Yu, B. (2008). “Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in China.” *Journal of Arid Environments*, 72: 1002 – 1011.
157. Zhang, Q., Lei, T., & Zhao, J. (2008). Estimation of the detachment rate in eroding rills in flume experiments using an REE tracing method. *Geoderma*, 147(1): 8-15.

附錄

附錄一、期中審查記錄與意見回覆

時間：105 年 8 月 25 日

地點：行政院農業委員會水土保持局第三會議室

期中報告(105/08/25)出席委員審查意見及改正說明	
審查意見	回覆說明
1. 本計畫對於紋溝沖蝕的文獻蒐集宜再加強，而與本計畫無關的文獻亦須刪除。	感謝委員指教，已加強與本計畫相關之文獻，並刪除與本計畫無關的文獻。
2. P. 3-5，土壤分散公式(以剪應力為主)適用於紋溝間沖蝕，而 P. 3-6 及 P. 3-7 公式(以流量及坡面坡度為主)為適用於紋溝沖蝕，惟本計畫以紋溝沖蝕為主，何以皆採用剪應力進行分析之依據。	感謝委員意見，已補充相關資料及成果，請參考 3-4~3-8，以及第五章第三節。
3. P. 2-5 之兩種試驗方式，包括渠槽試驗及沖蝕箱坡面流沖蝕試驗，其目的為何？	<p>感謝委員意見，渠槽試驗為搭配前人公式推估土壤沖蝕臨界條件。</p> <p>本計畫以沖蝕箱坡面流沖蝕試驗為主，找出流量、坡度與沖蝕量(流失量)之關係式及紋溝量化關係式。</p>

<p>4. 依土壤粒徑分布曲線，參與沖蝕試驗泥砂皆有小於 0.01mm 之粒徑是否考量其可以產生團粒(絮凝)效應？</p>	<p>感謝委員意見，已新增說明，本計畫引 Wang & Sturm(2016)之公式，其中 CSF (黏粒含量)即代表絮凝效應對土壤沖蝕臨界條件之影響。</p>
<p>5. P. 3-34，基礎理論之敘述不甚瞭解其內涵及後續應用，且在量測上亦應說明清楚。例如，採用何種流量計、如何量測、在橫斷面係採幾組垂線量測…等。</p>	<p>感謝委員意見，第五章第三節之基礎理論已新增說明。本計畫採用沖蝕箱坡面流沖蝕試驗，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)，定水頭點源的方式製造坡面流，進行不同逕流量與坡度之十小時之沖蝕試驗，觀測未飽和土體在坡面流沖蝕下之沖蝕溝發展過程。</p>
<p>6. 降雨因素是否影響紋溝沖蝕？</p>	<p>感謝委員意見，沈海鷗等人(2015)研究指出雨滴打擊不影響坡度對紋溝沖蝕量的關係。趙宇等人(2014)及 Chen et al. (2016)亦採用穩定坡面流進行紋溝沖蝕試驗。故本計畫未將降雨打擊</p>

	影響納入，僅考慮流量。降雨之因素已列入後續研究建議。
7. P. 3-34，圖 3-9 水流剪應力方向係指何意？圖 3-10 採用剪力合力意義為何？且第一輪點位、第二輪點位…等，係指何意？	感謝委員意見，已在第五章第三節土壤沖蝕試驗中說明。
8. P. 4-2 取物理特性與現地土壤(水庫底泥)相近之標準砂進行，惟水庫底泥僅可代表現地坡面結構中較細顆粒被沖蝕到水庫沉積的部分，並不能完全代表坡面實際的土壤結構。	感謝委員指教，石英砂相關試驗僅為確認沖蝕試驗方法及流程之初步試驗。已使用現地土壤進行研究。
9. 本研究欲以力學解析土壤沖蝕過程，但緒論提到的 USLE/RUSLE、MUSLE 公式含降雨、雨滴沖蝕，但本實驗中似乎主要考量漫地流/逕流對表面土砂之運移，本來是否有要與 USLE 等比較，擬如何比較。	感謝委員意見，USLE/RUSLE、MUSLE 等僅為提出研究動機之引言，後續比較則與 WEPP 中提及之公式參數(土壤沖蝕臨界剪應力 τ_c)為主。
10. 目前石英砂之試驗成果，如何與現地土砂聯結，未來是否有可能以現地土砂進行試驗。	感謝委員意見，已使用現地土砂進行實驗。
11. 試驗中，以漫地流方式模擬坡地沖蝕，則其與現況降雨沖蝕的差異？	感謝委員意見，沈海鷗等人(2015)研究指出雨滴打

<p>建議說明。</p>	<p>擊不影響坡度對紋溝沖蝕量的關係。趙宇等人(2014)及Chen et al. (2016)亦採用穩定坡面流進行紋溝沖蝕試驗。故本計畫未將降雨打擊影響納入，僅考慮流量。降雨之因素已列入後續研究建議。</p>
<p>12. 提供一段坡面流紋溝沖蝕之水理問題予以參考。</p> <p>與傳統明渠水流相比，坡面漫地流具有許多特殊的水力特性。</p> <p>(1)漫地流在流動過程中，一方面得到降雨的補給，另一方面又消耗於土壤的入滲，不論降雨或入滲，在時間和空間上都是變化的。因此，漫地流往往為非均勻、非穩定流，即使在無入滲的水泥、柏油路面或機場上的水流，僅受降雨的影響，亦是如此。</p> <p>(2)在山坡頂處近分水嶺處，坡面漫地流水深很小，水流雷諾數處在傳統明渠層流的範圍內，惟受雨滴的擾動作用，實際上是一種攪動的層流</p>	<p>感謝委員意見，受降雨、入滲及地形之影響，坡面流在時間和空間上都是變化且較為複雜的。為研究坡面沖蝕之基礎物理機制及力學分析，本計畫實驗設計將現實情況簡單化；相關意見及影響因素已納入後續研究建議。</p>

流態。隨著坡長增加，水深增大，雷諾數可逐漸增大至紊流區內，加上不規則地形的影響及降雨的擾動，水流結構將完全處於紊流狀態。

(3)由於坡度沿程變化較大，加上局部地形起伏的影響，使水深時而大，又瞬間低於臨界水深；水流可為緩流，亦可為急流，在急流向緩流轉變處也會有水躍的產生。

(4)因漫地流水深很小，邊界粗糙和微地形的變化都會對其流動特性產生顯著作用，而發生的變化。

(5)因水深很小，雨滴的打擊會增強水流紊動，提高水流阻力，並影響其水力特性。這些影響，又隨水深、坡度等因素而改變。

附錄二、期末審查記錄與意見回覆

時間：105 年 12 月 3 日

地點：國立中興大學雲平樓一樓 F2 推廣教室

期中報告(105/08/25)出席委員審查意見及改正說明	
審查意見	回覆說明
1. 以試驗案模擬推估現地實際情形，較有效率及符合經濟性，可採模型模擬或數值模擬等方式配合辦理，則本案可更臻完備。	遵照辦理，已納入後續研究建議。
2. 紋溝沖蝕量與各地區的土壤地質型態影響變化大，希望增加不同土壤地質的紋溝區推估總沖蝕量。	遵照辦理，已納入後續研究建議。
3. 計畫僅以阿公店水庫底泥進行試驗，是否可適用全部土壤特性。	計畫僅以阿公店水庫底泥進行試驗，不足以適用全部土壤特性。已將增加不同土壤地質之試驗納入後續研究建議。
4. 需要更多驗證資料(如不同土質)，後續才有可能實際應用，並可與經驗方式比較分析。	遵照辦理，已納入後續研究建議。
5. 本計畫所做之推導公式，在相同條件下與 USLE 公式之差異性為何？	USLE 公式是應用於整個集水區坡面年沖蝕量，本計

	畫所推導之公式為針對單場降雨事件中坡面紋溝沖蝕量及流量和坡度之影響。
6. 可再加強未來更廣度的運用，並和 USLE 比對分析，提出修正 USLE 式之可行性。	本計畫所推導之公式主要用於研究單場降雨事件中坡面紋溝沖蝕量及流量和坡度之影響，與 USLE 公式應用方向不同。
7. 因為台灣土壤特性及種類差異性甚大，建議將實際案例彙集、針對各種地質土壤特性狀況，期待建立專屬台灣適合的公式。	遵照辦理，已納入後續研究建議。

附錄三、前人文獻之土壤粒徑分析

不同土樣		旺萊溪		濁水溪		土樣 A		神木村	
Diameter (mm)	Cumulative P (%)	Diameter (mm)	Cumulative P (%)	Diameter (mm)	Cumulative P (%)	Diameter (mm)	Cumulative P (%)	Diameter (mm)	Cumulative P (%)
0.007	7.00%	0.002	14.50%	0.002	13.50%	0.002	5.00%	0.002	2.50%
0.008	9.00%	0.003	17.00%	0.003	15.50%	0.003	10.00%	0.003	4.50%
0.009	10.00%	0.004	21.00%	0.004	17.00%	0.004	14.50%	0.004	5.50%
0.100	11.00%	0.005	23.50%	0.005	18.50%	0.005	20.00%	0.005	7.50%
0.150	17.00%	0.006	26.50%	0.006	20.50%	0.006	23.50%	0.006	10.00%
0.170	23.00%	0.007	30.50%	0.007	22.50%	0.007	27.50%	0.007	14.00%
0.240	36.00%	0.008	32.50%	0.008	23.50%	0.008	32.00%	0.008	15.50%
0.300	80.00%	0.009	37.00%	0.009	24.00%	0.009	33.00%	0.009	16.50%
0.500	89.00%	0.010	39.50%	0.010	25.50%	0.010	36.50%	0.010	17.50%
0.600	92.00%	0.020	66.00%	0.020	53.00%	0.020	54.00%	0.020	31.00%
0.700	95.00%	0.030	77.50%	0.030	68.00%	0.030	66.00%	0.030	41.00%
0.800	98.00%	0.040	86.00%	0.040	76.00%	0.040	80.00%	0.040	50.00%
0.900	100.00%	0.050	91.50%	0.050	82.50%	0.050	88.00%	0.050	58.50%
1.000	100.00%	0.060	95.50%	0.060	85.00%	0.060	90.50%	0.060	66.00%
2.000	100.00%	0.070	98.00%	0.070	86.00%	0.070	92.00%	0.070	70.00%
		0.080	100.00%	0.080	87.00%	0.080	93.00%	0.080	74.50%

	0.090	100.00%	0.090	88.00%	0.090	94.00%	0.090	76.50%
	0.1	100.00%	0.1	89.00%	0.1	94.50%	0.1	80.00%
	0.200	100.00%	0.200	93.50%	0.200	96.50%	0.200	90.50%
	0.300	100.00%	0.300	96.00%	0.300	97.50%	0.300	94.50%
	0.400	100.00%	0.400	97.00%	0.400	98.50%	0.400	97.00%
	0.500	100.00%	0.500	97.50%	0.500	99.00%	0.500	97.50%
	0.600	100.00%	0.600	98.50%	0.600	99.50%	0.600	99.00%
	0.700	100.00%	0.700	99.00%	0.700	99.50%	0.700	99.50%
	0.800	100.00%	0.800	99.00%	0.800	100.00%	0.800	100.00%
	0.900	100.00%	0.900	99.50%	0.900	100.00%	0.900	100.00%
	1.000	100.00%	1.000	99.50%	1.000	100.00%	1.000	100.00%
	2.000	100.00%	2.000	100.00%	2.000	100.00%	2.000	100.00%

附錄四、實驗數據資料

一、Case-1

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
37.23	86.74	2.33	15.98
15.16	37.45	2.47	6.14
6.25	4.71	0.75	8.29
13.93	8.79	0.63	22.08
32.16	230.59	7.17	4.49
24.45	186.12	7.61	3.21

二、Case-2

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比	紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
23.26	18.90	0.81	28.62	7.98	1.72	0.22	36.96
11.27	2.18	0.19	58.40	10.92	3.58	0.33	33.37
20.38	3.34	0.16	124.49	8.78	1.20	0.14	64.12
9.06	3.68	0.41	22.27	17.52	1.55	0.09	198.66
13.59	3.76	0.28	49.17	23.01	22.09	0.96	23.95
28.98	15.76	0.54	53.30				
5.96	1.09	0.18	32.53				
18.94	7.94	0.42	45.20				
20.55	6.86	0.33	61.51				
9.08	2.54	0.28	32.39				
2.93	0.77	0.26	11.15				
9.24	2.05	0.22	41.63				

三、Case_3

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比	紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
0.80	0.06	0.08	9.88	14.23	3.06	0.21	66.25
1.05	0.10	0.10	10.71	1.24	0.35	0.28	4.43
0.71	0.10	0.14	5.21	1.38	0.13	0.09	14.70
0.84	0.51	0.61	1.39	8.07	1.11	0.14	58.48
3.02	0.41	0.14	22.35	1.68	0.14	0.08	20.43
5.41	0.64	0.12	45.58	1.49	0.20	0.14	10.85
5.76	0.68	0.12	48.75	0.98	0.12	0.12	8.24
10.56	0.94	0.09	118.44	1.42	0.09	0.07	21.76
1.48	0.14	0.09	15.71	1.16	0.11	0.10	12.15
0.90	0.17	0.19	4.74	1.23	0.12	0.10	12.38
7.24	0.71	0.10	74.20	0.73	0.06	0.08	9.33
40.44	23.23	0.57	70.39	2.60	0.84	0.32	8.07

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比	紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
6.06	1.13	0.19	32.44	0.58	0.04	0.07	8.12
5.06	0.40	0.08	64.65	0.74	0.07	0.10	7.66
6.52	1.79	0.27	23.79	2.03	0.16	0.08	25.57
0.42	0.03	0.08	5.53	0.60	0.05	0.09	6.78
0.43	0.03	0.06	7.09	0.49	0.05	0.10	5.08
0.82	0.09	0.11	7.41	2.81	0.35	0.13	22.49
1.18	0.12	0.10	11.66	0.98	0.07	0.07	13.23
8.17	2.66	0.33	25.10	0.25	0.01	0.04	5.57
1.94	0.20	0.10	19.19	3.52	0.24	0.07	51.12
0.72	0.05	0.07	10.79	1.07	0.08	0.08	13.52
0.89	0.10	0.12	7.51	1.26	0.16	0.12	10.17
0.79	0.08	0.10	7.65	0.30	0.02	0.05	5.66

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比	紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
17.87	4.53	0.25	70.47	2.44	0.17	0.07	35.19
1.20	0.08	0.07	17.48	2.44	0.27	0.11	21.74
1.02	0.04	0.04	23.46	0.49	0.03	0.06	7.87
4.53	0.54	0.12	37.91	0.54	0.03	0.06	8.54
0.50	0.06	0.12	4.06	1.32	0.10	0.07	18.25
0.74	0.14	0.19	3.92	2.73	0.16	0.06	46.52
1.67	0.16	0.09	17.88	0.41	0.02	0.04	10.54
3.51	0.32	0.09	38.31	1.04	0.09	0.08	12.71
0.57	0.04	0.08	7.44	0.29	0.02	0.08	3.84
0.65	0.03	0.05	12.74	0.72	0.12	0.16	4.50
0.73	0.04	0.06	12.29	0.66	0.09	0.14	4.79
1.64	0.17	0.10	15.98	0.32	0.03	0.08	4.04

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比	紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
1.19	0.12	0.10	11.91	1.36	0.26	0.19	7.22
0.60	0.05	0.08	7.72	2.09	0.15	0.07	28.30
0.44	0.03	0.06	7.78	0.69	0.10	0.14	4.96
3.33	0.43	0.13	25.66	1.67	0.14	0.08	20.28
39.32	83.94	2.13	18.42	1.41	0.17	0.12	11.75
3.98	1.09	0.27	14.55	0.84	0.12	0.14	5.85
2.04	0.14	0.07	29.34	0.36	0.03	0.07	4.89
4.50	1.26	0.28	16.13	3.66	0.92	0.25	14.59
6.13	0.83	0.13	45.46	4.16	0.44	0.11	39.39
1.69	0.10	0.06	29.92	2.92	1.25	0.43	6.82
2.55	0.16	0.06	41.91	7.76	12.56	1.62	4.80
1.36	0.09	0.07	20.19	2.24	0.44	0.20	11.32

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比	紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
9.39	5.35	0.57	16.47	15.54	207.19	13.33	1.17
1.75	0.26	0.15	11.65				
38.85	272.72	7.02	5.53				
0.61	0.12	0.20	3.03				
0.55	0.17	0.30	1.84				
0.85	0.33	0.39	2.17				
0.93	0.36	0.39	2.40				
1.54	2.05	1.34	1.15				
6.13	17.01	2.77	2.21				
0.75	0.26	0.35	2.16				
0.97	0.33	0.34	2.81				
1.55	1.66	1.07	1.45				

四、Case_4

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
37.86	39.25	1.04	36.51
6.93	12.67	1.83	3.79
8.33	2.97	0.36	23.36
4.35	1.07	0.25	17.63
4.39	1.00	0.23	19.24
8.66	1.78	0.21	42.06
5.68	1.23	0.22	26.18
1.95	0.30	0.16	12.55
6.17	1.40	0.23	27.20
4.33	0.94	0.22	19.88
4.15	1.27	0.31	13.58

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
1.79	0.29	0.16	11.15
2.38	0.42	0.18	13.45
2.35	0.44	0.19	12.49
3.47	0.75	0.22	16.06
3.29	1.11	0.34	9.78
3.51	0.75	0.21	16.43
21.51	14.95	0.70	30.94
2.66	0.70	0.26	10.17
3.39	1.32	0.39	8.70
17.43	28.40	1.63	10.70
3.19	0.51	0.16	19.95

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
30.04	8.01	0.27	112.68
3.81	1.00	0.26	14.58
1.76	0.60	0.34	5.19
0.41	0.07	0.18	2.30
0.97	0.29	0.30	3.27
1.55	0.22	0.14	10.85
5.48	5.31	0.97	5.66
3.95	1.06	0.27	14.71
4.56	2.26	0.50	9.19
4.95	7.22	1.46	3.39
22.20	38.05	1.71	12.95
1.06	0.22	0.21	5.15

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
1.23	0.22	0.18	6.77
3.25	1.33	0.41	7.93
1.78	0.34	0.19	9.35
1.53	0.29	0.19	8.12
1.58	0.51	0.32	4.90
1.82	0.37	0.20	8.88
3.84	1.12	0.29	13.18
3.42	1.27	0.37	9.24
2.87	1.38	0.48	5.99
3.84	1.30	0.34	11.40
5.19	2.73	0.53	9.89
2.06	0.42	0.20	10.12

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
3.69	1.90	0.52	7.16
3.98	0.99	0.25	16.03
2.31	0.55	0.24	9.73
2.68	0.83	0.31	8.71
3.45	1.69	0.49	7.05
6.73	3.11	0.46	14.55
1.88	1.63	0.87	2.17
55.50	210.24	3.79	14.65
2.79	1.00	0.36	7.79
3.58	2.11	0.59	6.09
2.57	0.48	0.18	13.91
3.77	2.14	0.57	6.67

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
3.09	0.74	0.24	12.99
4.99	1.54	0.31	16.15
4.79	1.20	0.25	19.03
7.70	5.79	0.75	10.23
2.66	0.36	0.14	19.65
5.38	2.16	0.40	13.38
11.61	9.35	0.81	14.41
0.85	0.16	0.19	4.57
2.49	0.42	0.17	14.74
0.61	0.12	0.20	3.08
5.78	1.95	0.34	17.16
5.25	3.06	0.58	9.01

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
6.02	2.24	0.37	16.19
4.76	0.90	0.19	25.16
37.43	78.32	2.09	17.89
6.77	2.10	0.31	21.89
6.05	4.26	0.70	8.58
1.73	0.44	0.25	6.88
0.37	0.04	0.10	3.72
4.45	1.09	0.25	18.13
7.42	1.90	0.26	28.96
2.90	1.06	0.36	7.97
2.75	0.89	0.32	8.52
6.01	4.06	0.68	8.88

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
1.91	1.10	0.57	3.33
6.96	2.07	0.30	23.42
0.73	0.09	0.13	5.59
0.50	0.07	0.14	3.52
1.72	0.33	0.19	9.07
1.50	0.33	0.22	6.82
0.81	0.15	0.19	4.36
12.09	5.21	0.43	28.01
5.04	1.91	0.38	13.29
2.20	0.47	0.21	10.38
4.02	1.07	0.27	15.09
4.73	2.58	0.55	8.66

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
8.72	4.68	0.54	16.22
2.32	0.64	0.28	8.39
3.11	0.88	0.28	11.00
3.27	0.97	0.30	11.02
4.40	6.58	1.50	2.94
2.54	0.56	0.22	11.57
2.93	0.56	0.19	15.33
2.13	0.66	0.31	6.91
1.00	0.24	0.25	4.06
3.63	0.94	0.26	13.94
4.52	0.88	0.19	23.16
5.62	1.47	0.26	21.46

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
6.45	1.93	0.30	21.53
3.74	0.90	0.24	15.52
4.41	1.10	0.25	17.76
11.78	5.22	0.44	26.59
0.48	0.07	0.14	3.40
3.14	2.46	0.79	4.00
1.02	0.31	0.31	3.31
2.63	0.51	0.19	13.69
1.70	0.29	0.17	9.79
4.46	0.85	0.19	23.37
1.80	0.64	0.35	5.08
2.46	0.58	0.24	10.43

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
1.15	0.19	0.17	6.87
2.25	0.40	0.18	12.75
3.21	0.83	0.26	12.45
1.32	0.22	0.16	8.04
2.66	1.05	0.39	6.76
3.11	0.69	0.22	13.94
5.41	1.07	0.20	27.48
7.02	1.24	0.18	39.83
6.29	1.49	0.24	26.51
4.02	0.77	0.19	21.09
2.16	0.45	0.21	10.39
5.71	0.96	0.17	34.02

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
2.51	0.51	0.20	12.36
13.97	19.50	1.40	10.01
27.07	55.93	2.07	13.10
3.06	0.66	0.22	14.20
1.76	8.24	4.68	0.38
5.90	10.78	1.83	3.23
7.75	2.97	0.38	20.25
7.90	1.11	0.14	56.45
5.28	1.07	0.20	26.08
1.58	2.07	1.31	1.21
3.22	2.07	0.64	5.01
4.62	0.88	0.19	24.34

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
2.06	0.47	0.23	9.02
1.64	0.34	0.21	7.95
2.41	1.20	0.50	4.84
0.97	0.20	0.21	4.70
1.89	0.60	0.32	5.98
9.69	2.79	0.29	33.58
0.72	0.12	0.17	4.31
1.30	1.19	0.92	1.41
1.26	0.30	0.24	5.30
2.58	0.53	0.21	12.53
16.36	13.70	0.84	19.55
3.14	0.75	0.24	13.11

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
3.18	0.71	0.22	14.18
1.79	0.29	0.16	11.11
2.08	0.55	0.26	7.85
4.09	0.81	0.20	20.74
4.10	0.81	0.20	20.90
5.44	9.32	1.71	3.18
1.14	0.22	0.19	5.99
4.53	2.87	0.63	7.15
1.99	0.41	0.21	9.65
15.63	43.01	2.75	5.68
2.50	0.83	0.33	7.60
1.09	0.36	0.34	3.23

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
1.94	0.83	0.43	4.56
6.41	2.22	0.35	18.49
5.02	3.55	0.71	7.11
2.70	2.47	0.92	2.95
1.13	0.49	0.44	2.59
8.51	1.86	0.22	38.86
0.74	0.18	0.25	2.98
1.04	0.21	0.20	5.09
1.22	0.27	0.22	5.45
2.67	1.17	0.44	6.09
3.73	1.21	0.33	11.48
1.21	0.27	0.22	5.49

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
2.67	0.66	0.25	10.87
4.22	0.91	0.22	19.47
38.30	50.82	1.33	28.87
3.14	4.66	1.48	2.12
8.17	18.97	2.32	3.52
9.03	52.92	5.86	1.54
1.09	0.29	0.26	4.13
2.37	0.55	0.23	10.26
2.02	0.43	0.22	9.38
8.87	3.90	0.44	20.14
2.25	0.66	0.29	7.71
1.42	0.44	0.31	4.57

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
17.99	98.61	5.48	3.28
1.87	0.40	0.22	8.68
5.66	1.51	0.27	21.21
1.53	0.37	0.24	6.23
3.91	0.99	0.25	15.38
1.50	0.33	0.22	6.90
4.10	2.02	0.49	8.30
2.81	0.93	0.33	8.52
1.88	0.49	0.26	7.24
15.74	41.91	2.66	5.91
6.09	4.63	0.76	8.02
1.90	0.35	0.19	10.20

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
1.42	0.59	0.42	3.38
6.04	2.08	0.34	17.53
4.52	2.21	0.49	9.26
2.59	1.73	0.67	3.86
6.10	1.39	0.23	26.67
8.78	2.78	0.32	27.76
3.60	0.77	0.21	16.83
1.50	0.32	0.21	6.96
7.42	9.06	1.22	6.07
2.84	1.33	0.47	6.08
8.32	3.57	0.43	19.36
6.99	1.72	0.25	28.40

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
12.15	19.54	1.61	7.55
1.84	0.40	0.22	8.50
0.84	0.24	0.28	2.96
18.26	24.23	1.33	13.76
1.75	1.84	1.05	1.67
50.50	1037.21	20.54	2.46
0.94	0.14	0.15	6.49
0.80	0.14	0.18	4.50

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
1.73	0.61	0.35	4.89
1.35	0.12	0.09	15.22
9.47	1.74	0.18	51.45
7.09	2.26	0.32	22.22
33.07	14.50	0.44	75.43
0.71	0.20	0.28	2.52
20.54	15.33	0.75	27.53
1.99	0.80	0.40	4.92

五、Case_5

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
0.33	0.02	0.06	5.50
0.25	0.02	0.07	3.69
2.26	0.24	0.10	21.62
0.73	0.07	0.10	7.11
1.53	0.23	0.15	10.05
0.62	0.09	0.15	4.05
2.90	0.82	0.28	10.26
0.62	0.08	0.12	5.05
3.87	1.30	0.34	11.54
2.69	0.44	0.16	16.52
1.15	0.14	0.12	9.72

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
0.72	0.12	0.16	4.43
0.35	0.03	0.10	3.71
4.23	0.71	0.17	25.30
3.39	0.39	0.12	29.19
3.68	0.73	0.20	18.68
1.13	0.14	0.12	9.44
2.78	0.32	0.12	24.12
6.23	7.55	1.21	5.14
1.69	0.13	0.08	22.50
0.83	0.08	0.10	8.33
1.68	0.17	0.10	16.62

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比	紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
0.88	0.08	0.10	9.10	1.39	0.14	0.10	13.44
0.52	0.06	0.11	4.78	8.00	0.91	0.11	70.50
3.12	0.76	0.24	12.88	4.77	0.65	0.14	35.03
4.19	0.67	0.16	26.29	0.87	0.08	0.09	9.32
10.59	2.50	0.24	44.85	1.44	0.17	0.12	12.36
1.08	0.16	0.15	7.13	1.51	0.12	0.08	18.41
0.98	0.11	0.11	8.91	1.42	0.11	0.08	18.75
2.69	0.32	0.12	22.38	1.05	0.15	0.15	7.12
6.98	0.89	0.13	54.77	0.79	0.06	0.07	10.75
0.90	0.09	0.10	8.87	1.06	0.10	0.09	11.30
4.15	0.45	0.11	38.10	0.26	0.02	0.06	4.15
1.32	0.12	0.09	14.61	6.45	3.37	0.52	12.33

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
12.39	8.78	0.71	17.49
1.84	0.26	0.14	13.18
2.79	0.33	0.12	23.53
0.28	0.02	0.06	4.84
0.97	0.11	0.11	8.56
1.53	0.21	0.14	11.00
1.75	0.31	0.18	9.89
0.48	0.06	0.13	3.77
1.46	0.38	0.26	5.58
0.79	0.10	0.13	5.91
9.48	0.98	0.10	91.88
2.84	0.26	0.09	30.79

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
5.52	1.54	0.28	19.86
1.70	0.38	0.22	7.66
12.30	7.15	0.58	21.15
1.86	0.93	0.50	3.71
1.68	0.13	0.08	21.92
9.11	8.11	0.89	10.23
2.94	0.50	0.17	17.34
11.77	17.33	1.47	8.00
1.78	0.54	0.30	5.89
0.85	0.17	0.20	4.30
1.32	0.17	0.13	10.19
5.37	0.97	0.18	29.63

紋溝長(cm)	紋溝面積(cm ²)	平均寬度(cm)	長寬比
15.12	31.57	2.09	7.24
4.15	0.52	0.13	32.81
0.68	0.08	0.12	5.77
0.22	0.02	0.11	2.08
0.30	0.04	0.14	2.09
1.12	0.67	0.60	1.89
0.17	0.02	0.11	1.56
27.99	631.89	22.58	1.24
29.21	267.16	9.15	3.19