

泥岩邊坡紋溝發育過程與機制

楊啓見

國立臺灣大學地理環境資源學系碩士生

一、前言

受全球暖化影響，世界各地出現各種極端天氣，而極端降水即是其中之一，高強度降水的頻率增加，將加速土壤侵蝕，進而改變土壤沖蝕的範圍及頻率(Williams et al. 1996; Nearing 2001; Zhang et al. 2005; 范正成 2007)。百年來臺灣年降雨日數有下降趨勢，但是總降雨量卻沒有太大改變，換言之以降雨強度而言，這表示台灣的降雨強度正逐年增強。

臺灣雖然缺乏乾旱氣候區，無法取得天然的乾旱土壤，但在臺灣泥岩(Mudstone)地區的泥岩含水量低，對於模擬乾旱地區的降雨產流過程是絕佳場所。加上泥岩易受風化侵蝕的特性，得以快速觀察、量測侵蝕過程與地形變化。理解乾旱土壤對強降水的抗侵蝕能力與侵蝕過程，有益於評估臺灣土壤未來可能出現的侵蝕型態。在未來面臨氣候變遷與環境開發的雙重壓力下，土壤侵蝕問題會更加嚴重也將對生態環境與國人生命財產造成影響。

臺灣西南部淺山丘陵區為廣大的泥岩分布帶，北從新營龜重溪起，南達旗山阿公店。裸露面積高達一千餘平方公里，約占臺灣島面積之百分之三，隨著人口增加、產業發展，如何能夠有效利用廣大的泥岩區從事農耕或興建公共設施，成為當地居民、

政府部門與學界所關切的議題。泥岩區受到降雨侵蝕後容易形成紋溝(Rill)與蝕溝(Gully)，而蝕溝侵蝕是造成土壤侵蝕的主要來源(Wasson et al. 2002; Krause et al. 2003)。換言之，釐清蝕溝發育的機制與過程是理解泥岩邊坡演育與風化層流失的關鍵。此外泥岩表面遍布泥裂(Mud-cracks)等微地形，但過去文獻對於泥裂在水力侵蝕的影響卻並未受到討論，因此泥裂同樣是本研究的重要研究對象之一。

針對泥岩侵蝕研究而言，國內研究偏重在受降雨事件影響下所導致的泥岩沖蝕量，本研究藉由室外降雨實驗與室內水槽沖蝕實驗模擬降雨產流間的邊坡產沙過程。並利用地面光達(Terrestrial Laser Scanner)測繪高精度數值高程模型。過去受到測量技術的限制，因而無法記錄地形變化與重建逕流侵蝕過程。但是高精度的點雲資料不僅可以重建完整侵蝕過程與地形變化，同時可以量測侵蝕量，這對於國內土壤侵蝕或地形相關領域的實地調查或科學研究都是一大基石。

二、研究方法

本研究方法分為室外降雨實驗與室內水槽實驗，研究目的是模擬降雨產流過程中，泥岩的水力侵蝕過程並著重在重現紋溝發育過程，並以地面光達進行地形測繪，取得高精度的數值高程模型。

室外實驗由人工降雨機組成。人工降雨機組裝由三部分組成，支架、供水系統及噴灑系統，如圖1。

1. 支架

良好的人工降雨機必須考量可移動性，本研究使用輕量化材料，採用1吋鐵管做為主要結構的材料以及水流通路。利用鐵管搭成口字型高4.6公尺，寬2公尺的主支架。在主支架上方正中中間以鐵管加高2公尺後，呈直角向前延伸2公尺，呈現倒L型吊臂，如照片1。

2. 供水系統

降雨模擬需考慮降雨事件的連續性，所以必須要有充足的供水來源，試驗樣區旁有灌溉水塘可作為充足供水來源，但水塘與邊坡高差達3公尺，所以供水系統備有兩組，分別由兩組發電機與抽水馬達組成，其中一組供水系統負責抽水塘的水到蓄水槽，作為降雨機的供水來源。另一組供水系統負責製造降雨，可透過變頻控制器控制供水壓力，本研究所使用的降雨強度維持60公厘/小時。

3. 噴灑系統

本研究設計在L型吊臂上配有兩個噴嘴，間隔1公尺，離地達高度6.6公尺。

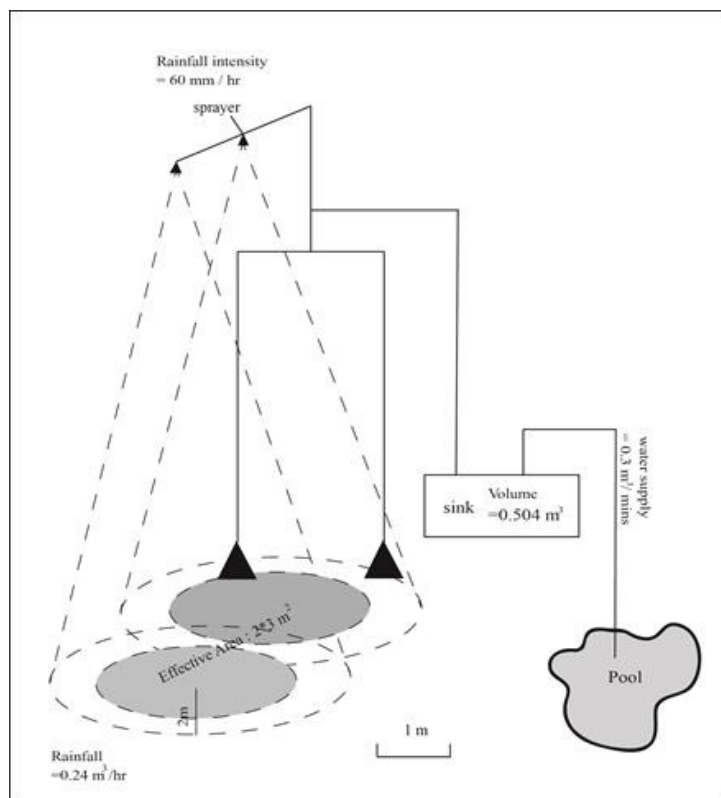


圖1 人工降雨機室外實驗配置示意圖

供水過程：一組抽水馬達至灌溉池塘汲水至蓄水箱，利用另一組抽水馬達將水輸送至噴頭形成雨滴。

室內實驗設備由有兩部分組成：1. 供水系統 2. 沖蝕槽，如圖2。

供水系統為非循環系統，目的在於釐清降雨到逕流過程中，逕流對於泥岩風化層的侵蝕過程，若使用循環系統，將導致逕流濃度隨實驗歷時提高，影響流體密度，而流體密度與侵蝕剪力成正比關係，為了保持流體密度，本研究以清水作為供水水源。本研究自行設計的定水頭水箱，可提供每秒0-100毫升的逕流量，經過實驗測試後，考量實驗效率與供水量穩定性決定以每秒50毫升作為試驗水量。

沖蝕槽為壓克力材質，壁厚1公分，可避免水壓導致的形變，尺寸長100公分，寬30公分，高10公分，沖蝕槽尾部設計為開放系統，逕流與泥沙會直接流入蓄水箱。此外為

了減低邊界效應產生，設計在沖蝕槽壁內糊上泥漿，待乾燥後即形成一層表面粗燥的泥土層。顏富士(1992)的研究指出，天然泥岩邊坡角度分布在40-50度，而超過40度以上，泥岩風化層的崩塌現象將會逐漸增加，邱創益(1999)亦發現在坡度35°的緩坡條件下，自然泥岩裸坡之沖蝕深度約10公分，且侵蝕溝狀呈上端淺、下端深之沖蝕形狀為典型的沖蝕溝發育環境，考量實驗設備與前人研究，實驗設計將水槽固定傾斜37度，旨在強調泥岩風化層的沖蝕地形演育，減少以崩塌為主的侵蝕型態。

實驗材料來自臺南市龍崎區牛埔泥岩水土保持教室，實驗前，為避免泥土結塊影響沖蝕結果，將土樣利用膠捶打碎，並過10號篩(篩孔2公厘)，接著將泥土鋪灑於沖蝕槽內，再利用膠槌夯實，土壤密度約為1.6-1.8克/立方公分，接著在夯實土樣表層噴灑清



照片1 人工降雨機結構示意圖

主支架為U字型，主支架正中間以鐵管加高後，向前延伸呈現倒L型吊臂。

水，使表層浸潤直到出滲，入滲深度約為5-8公分，樣本與沖蝕槽會放置在室外，再經過天然曬乾後，即會形成泥裂。

樣本種類分為兩類，有泥裂與無泥裂，目的在於比較風化泥岩層之微地形對於土壤侵蝕量與速率的影響，進一步討論微地形與紋溝發育的關聯性。

三、結果與討論

藉由室外降雨實驗與室內逕流沖蝕實驗之結果，比對各實驗間的侵蝕過程與侵蝕量變化後進行討論風化泥岩層之水力侵蝕過程與機制，進一步找出泥岩侵蝕地形與侵蝕

量的關係。討論項目包含風化層侵蝕型態轉變、泥裂與侵蝕量的關係、泥裂與侵蝕地形發育的關係及蝕溝之可能演育模式。

1. 風化泥岩層水力侵蝕過程

風化泥岩之水力侵蝕過程可視為一個土壤侵蝕系列，在侵蝕能量固定下，侵蝕時間與侵蝕量呈非線性成長，原因是侵蝕型態有階段關係，但侵蝕型態間又相互連結，侵蝕型態之所發生轉變取決於土壤性質隨侵蝕時間而變化。侵蝕階段依照侵蝕形貌與侵蝕量變化可分為五個階段，如圖3，第一階段：飛濺沖蝕期，由於風化泥岩層强度高，雨滴墜落動能對其影響小且不易現地量測，僅能就

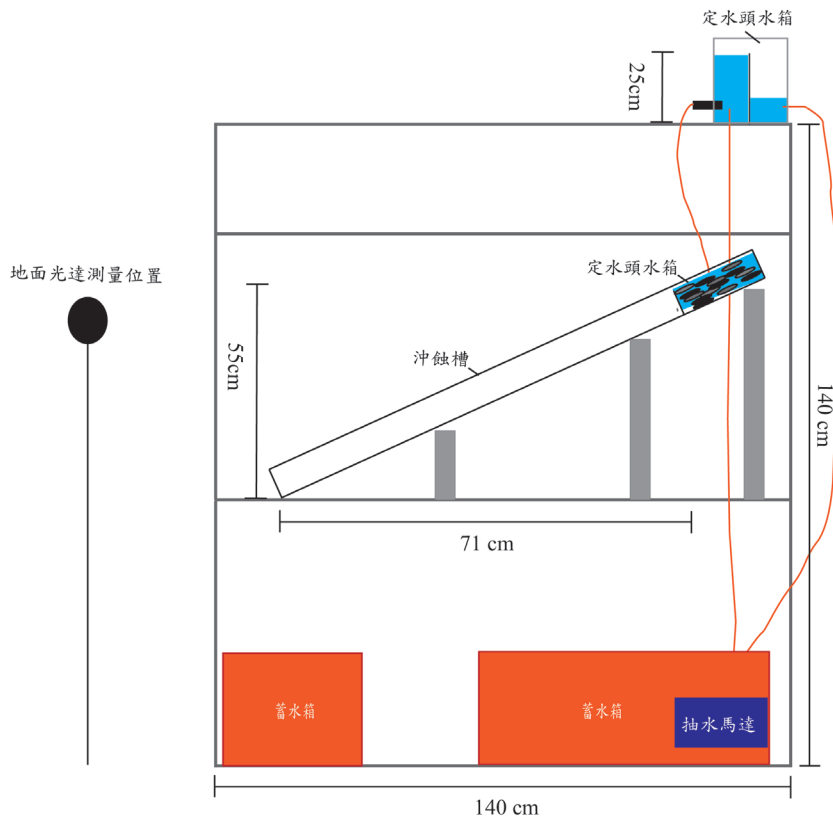


圖2 室內實驗設備示意圖

供水過程：抽水馬達從蓄水箱 A 抽水至定水頭水箱，定水頭水箱出水口分為兩路，一路傳導到沖蝕槽的定水頭水箱，另一路將過多的水傳導回蓄水箱。沖蝕槽的水頭溢淹後通過沖蝕槽回到蓄水箱 B。地面光達位置設置於沖蝕槽中心前 1 公尺處。

理論上推斷雨蝕存在，此階段泥岩吸水回脹現象明顯；第二階段：片狀侵蝕期，片狀侵蝕並非主要的水蝕方式，侵蝕以泥岩吸水崩解所致；第三階段：紋溝侵蝕期，紋溝會造成嚴重的土壤侵蝕，並且有效地搬運土體。紋溝密度與後續侵蝕程度成正比。此外，紋溝分配逕流分布，影響邊坡地形發育的位置與歷程；第四階段：崩塌期，崩塌是重要的侵蝕型態，不僅擴大紋溝規模且造成大量土壤流失，崩塌的發生位置、規模和紋溝密度

及泥裂分布有關；第五階段：穩定期，該期指的是侵蝕速率明顯下降且主要侵蝕方式以零星崩塌或紋溝側蝕為主，逕流含沙濃度低甚至可見到清水流出現。

2. 泥裂在侵蝕行為的影響機制

未來台灣將呈現氣候乾旱與極端降雨並存的氣候型態，在乾旱環境下，泥裂或土裂等微地形廣泛且密集的分佈，勢必會

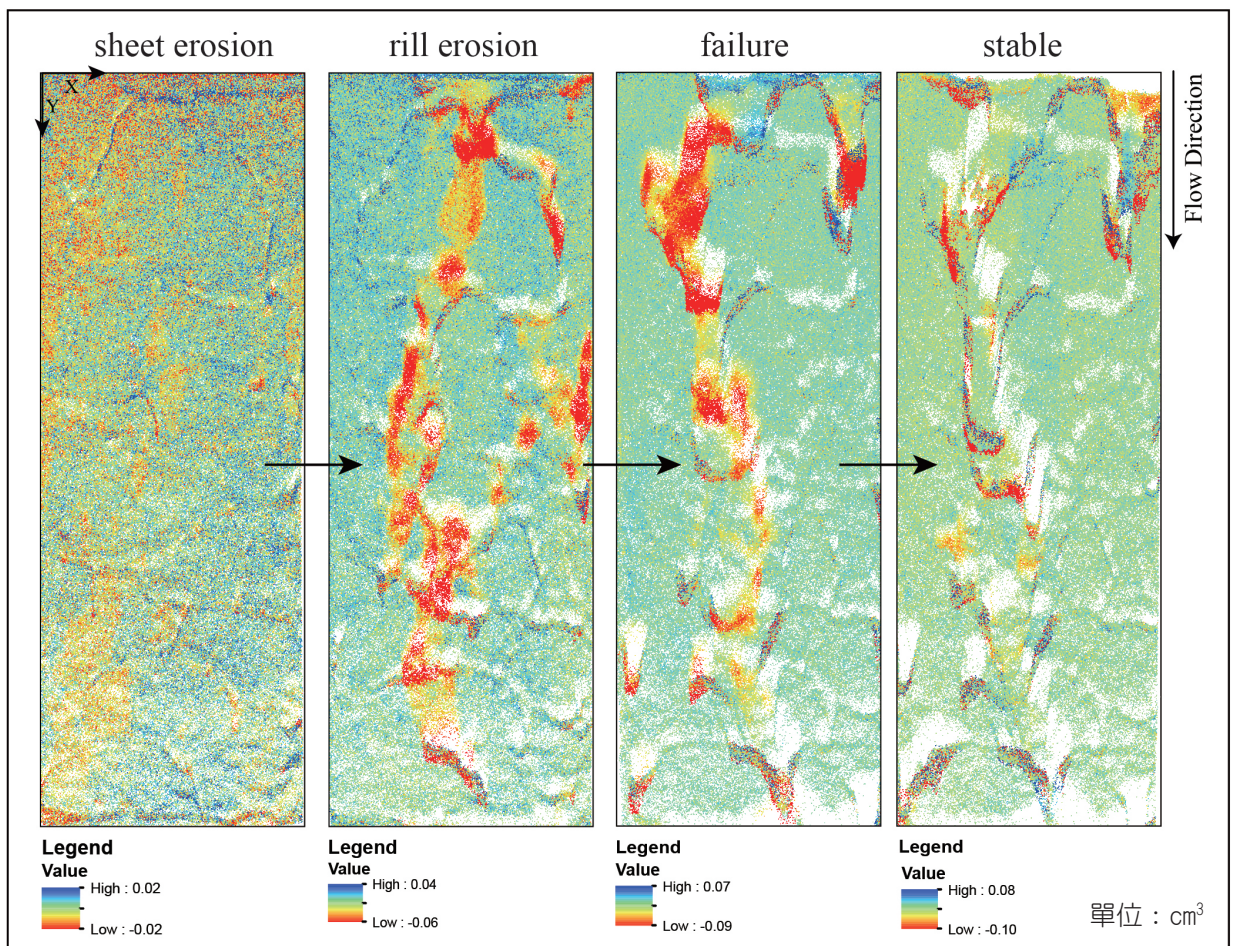


圖3 侵蝕階段示意圖

由左至右分別為片狀侵蝕、紋溝侵蝕、崩塌、穩定期。紅色區域代表侵蝕，藍色區域代表堆積，綠色區域代表不變。(此圖為室內實驗9的實驗結果，圖中並無飛濺沖蝕期。)

對土壤侵蝕機制造成變異。泥裂透過匯集薄膜流在土壤侵蝕前期即開始發育，逐漸發展成具規模的紋溝，而紋溝是泥岩風化層主要的侵蝕型態，在土壤侵蝕鏈的理論基礎下，裂隙發達的泥岩邊坡，紋溝侵蝕階段將提早出現且影響後續侵蝕型態發展，進而加快累積侵蝕總量。此外，泥裂是泥岩邊坡風化層的自由端與不連續面，當泥岩吸水負重後，極有可能出現崩塌侵蝕。泥裂或土裂是乾燥地區常見的地表微地形，其在水力侵蝕的影響性將可能逐漸提升，為防微杜漸，不能忽視泥裂或地表微地形在水力侵蝕過程的重要性。

3. 侵蝕地形演育模式

紋溝沖蝕或稱指狀沖蝕以寬100公分深30公分為限，超過者即列為蝕溝沖蝕。換言之，泥岩風化層厚度必須超過30公分才有足夠的空間供蝕溝發育。現地觀察結果顯示泥岩風化層厚度並不超過此限。

從實驗結果得知，泥岩邊坡侵蝕與一般土壤侵蝕或礫石型邊坡的侵蝕機制不同，差異在於泥岩邊坡侵蝕存在侵蝕限制，例如：室內外實驗出現清水流。侵蝕限制是因為泥岩風化層與泥岩母岩的物理性質差異，泥岩母岩抗侵蝕力高，因此在水力侵蝕過程中幾乎無體積耗損。

綜合以上所述，單一降雨事件所能夠造成的最大侵蝕量，即為泥岩風化層的體積。換言之，即便極端降雨事件也不能達成定義上的蝕溝地形，必須透過風化層侵蝕殆盡 > 新鮮母岩暴露 > 吸水膨脹 > 風化龜裂的過程，才能提供足夠厚的侵蝕材料。

參考文獻

1. 中文文獻

邱創益 1999。泥岩植生復育法。泥岩地區整治與植生綠化研討會論文集。p. 64-70。

范正成 2007。未來氣候變遷對臺灣地區短中長期降雨沖蝕指數之影響分析。國家科學委員會專題研究計畫報告。p. 2。

顏富士 1992。臺灣西南部泥岩坡地自然岩坡穩定過程之研究，行政院國家科學委員會防災科技研究報告。80-44號: 1-28。

2. 英文文獻

Kasanin-Grubin, M. 2008. Badlands and environmental change. *Geographica Helvetica*. 63:15-25.

Nearing, M. A. 2001. Impacts of Climate Change on Erosivity in the United States: 2000-2050. *Soil Erosion Research for the 21st Century*. Proc. 268-270.

Wasson, R. J., G. Caitcheon, A. S. Murray, M. M. Culloch, J. Quade. 2002. Sourcing sediment using multiple tracers in the catchment of Lake Argyle, Northwestern Australia. *Environmental Management*. 29(5): 634 - 646.

William, J., M. A. Nearing, A. Nicks, E. Skidmore, C. Valentine, K. King, R. Savabi. 1996. Using soil erosion models for global change studies. *Soil and Water Conserv*. 51(5): 381-385.

Zhang, G. H., M. A. Nearing, B. Y. Liu. 2005. Potential effects of climate change on rainfall erosivity in the yellow river basin of China. *Trans. ASAE*. 48(2): 511-517.