

利用生物炭改良泥岩惡地土壤沖蝕量

摘要

本計畫於行政院農業委員會畜產試驗所之泥岩地區，建置 3 個泥岩沖蝕標準試區(長 22.13 公尺、寬 4 公尺、坡度 9%)。三個試區為對照組(無施用任何改良劑)、施加 2%木炭及施加 2%稻殼炭，主要評估生物炭添加對泥岩侵蝕量之影響及其改善效益。

計畫結果顯示，標準樣區經養治 120 天後，對照組土壤流失量為 2,195 kg，添加 2%木炭處理之流失量為 1,345 kg，木炭添加可顯著降低 38.8%的土壤流失量；此外，添加 2%稻殼炭之流失量為 1,206 kg，土壤流失量顯著降低 45.1%。由分析結果顯示，添加生物炭可大幅提升團粒穩定度，並有效減少總體密度、使導水性或孔隙度增加進而達到土壤抗沖蝕之效果；雖 pH、電導度、無機氮、有效性磷及陽離子交換容量較無直接關係，但上述基本性質均可經由添加生物炭而使作物更易生長。

本計畫以原物料、人力、製備器具等納入計算，若以每單位面積需求費用來計算，稻殼炭防治沖蝕工法需要 445 元/m²，而木炭防治沖蝕工法需要 361 元/m²，相較於其他泥岩常見工法如“植生帶”與“土胎植生護坡”，生物炭工法的施工成本與維護成本低廉，因此，生物炭工法於泥岩緩坡之

可行性皆相當高。另外碳吸存方面，添加生物炭於泥岩土壤可增加單位體積土壤碳吸存量 $5\text{-}12\text{ kg/m}^2/50\text{ cm}$ ，亦即可增加 $0.7\text{-}1.7\%$ 的總碳於土壤中，可符合 2016 年巴黎協定之公約(每年需回復 0.4% 至土壤中)。

關鍵詞：泥岩、生物炭、土壤沖蝕量



Using biochar to improve the Soil erosion of mudstone

Abstract

This project aims to built three standard erosion plots (22.13 m in length, 4 m in width and 9% in slope gradient) in mudstone areas. The treatments in the three plots included control (without applying any improver), applying 2% wood biochar and applying 2% rice husk biochar. This study aims to evaluate the effects of biochar addition on soil loss of mudstone soils and the improvement benefits of biochar application.

After 120 days of incubation, the soil loss of the treatment of 2% wood biochar addition was about 1,345 kg, which was significantly lower than the control treatment (2,195 kg) by 38.8%. The soil loss of 2% rice hull biochar addition was about 1,206 kg, which was significantly lower than the control treatment by 45.1%. It is known from the soil loss amounts that the addition of biochar can greatly improved the stability of the aggregate, and effectively reduced the bulk density, increased the water conductivity or porosity and achieved the effects of soil erosion resistance;

The study also analyzed costs and compared with other techniques. If the cost per unit area is used to be calculated, the rice husk biochar method is 445 TWD/m², and wood biochar method requires 361 TWD/m². Compared with other techniques such as “vegetation belt placement” and “soil-tire-vegetation method”, the construction cost and maintenance cost of the biochar method are lower than both. Therefore, the biochar method is feasible for gentle slopes of mudstone areas. In terms of carbon sequestration, adding biochar to mudstone

soil can increase soil carbon sequestration per unit volume by 5-12 kg/m²/50 cm, and can also increase 0.7-1.7% of total carbon in the soil.

Keywords : mudstone, biochar, soil erosion.



目次

摘要.....	I
Abstract	III
目次.....	V
表次.....	VIII
圖次.....	XII
第壹章 前言	1-1
1.1 計畫目的.....	1-3
1.2 委託工作範圍.....	1-3
1.3 工作項目及內容.....	1-5
1.4 計畫工作組織.....	1-7
1.5 工作時程與預定進度.....	1-9
1.6 整體工作架構.....	1-12
第貳章 相關資料蒐集	2-1
2.1 相關文獻蒐集與彙整.....	2-1
2.2 研究區域基本資料	2-16

2.3 歷史降雨資料蒐集及特性分析	2-26
第參章 泥岩沖蝕標準試區建置與土砂流失量量測	3-1
3.1 至少建置 3 個泥岩沖蝕標準試區：長 22.13 公尺、寬 4 公尺、坡度 9%	3-1
3.2 生物炭及泥岩土壤之基本性質分析	3-14
3.3 至少每個月(5-10 月)蒐集土砂收集槽中之受沖蝕土砂	3-43
第肆章 泥岩沖蝕標準試區（未改善及以生物炭改良）土砂流失量與降雨特性分析	4-1
4.1 泥岩沖蝕標準試區（未改善及以生物炭改良）土砂流失量與降雨特性分析	4-1
4.2 以 USLE 分析之 K 值與實際沖蝕量推算之 K 值之差異判斷其合理性	4-19
第伍章 進行生物炭土壤改良後之效益與生物炭成本之比較分析	5-1
5.1 泥岩標準試區施用生物炭土壤改良後之效益	5-1
5.2 稻殼炭與廢棄枝條之成本分析	5-5
5.3 評估泥岩土壤因施用生物炭後所吸存之碳量，評估碳足跡	5-8

第陸章 執行期間相關配合事項 6-1

6.1 依臺南分局需要，會同出席相關計畫審查會議或現場會勘，並協助
準備相關會議(勘)資料 6-1

6.2 各期報告印刷、各期審查及相關會勘出席費用 6-5

第柒章 結論與建議 7-1

7.1 結論 7-1

7.2 建議 7-3

參考文獻 參-1

附錄 附-1

附錄一、期初報告書審查委員會議意見回覆表 附-1

附錄二、期中報告書審查委員會議意見回覆表 附-8

附錄三、期末報告書審查委員會議意見回覆表 附-17

附錄四、各期開會通知及會議記錄之公文 附-26

表次

表 1-1 利用生物炭改良泥岩惡地土壤沖蝕量預定進度表.....	1-9
表 1-2 利用生物炭改良泥岩惡地土壤沖蝕量合約工作項目與報告書章節對照表	1-11
表 2-1 本計畫研究區域高程分布表	2-18
表 2-2 本計畫研究區域坡度分布表	2-21
表 2-3 本計畫研究區域坡向分析表	2-21
表 2-4 崩塌深度估計參考表	2-25
表 2-5 本研究區域內 2007~2016 年崩塌地變化情形.....	2-25
表 2-6 臺南、高雄泥岩地區 24 個中央氣象局雨量站基本資料表	2-28
表 2-7 臺南、高雄泥岩地區 24 個雨量站(2002-2017)有效降雨事件分析結果	2-32
表 2-8 24 個中央氣象局雨量站不同重現期距年平均降雨沖蝕指數(Ry).....	2-34

表 2-9 土壤結構參數	2-36
表 2-10 土壤滲透性參數	2-36
表 2-11 土壤侵蝕強度分級標準	2-44
表 3-1 泥岩土壤之基本性質	3-33
表 3-2 生物炭之基本性質	3-34
表 3-3 泥岩土壤改良後之物化性質	3-34
表 3-4 5 月 29 日收集土砂量紀錄	3-44
表 3-5 第一週收集土砂量紀錄	3-44
表 3-6 第二週收集土砂量紀錄	3-45
表 3-7 第三週收集土砂量紀錄	3-45
表 3-8 第四週收集土砂量紀錄	3-46
表 3-9 第五週收集土砂量紀錄	3-46
表 3-10 第六週收集土砂量紀錄	3-47
表 3-11 第七週收集土砂量紀錄	3-47

表 3-12 第八週收集土砂量紀錄.....	3-48
表 3-13 第九週收集土砂量紀錄.....	3-48
表 3-14 第十週收集土砂量紀錄.....	3-49
表 3-15 第十一週收集土砂量紀錄.....	3-49
表 3-16 第十二週至第十四週收集土砂量紀錄.....	3-50
表 3-17 第十五週至第十七週收集土砂量紀錄.....	3-51
表 3-18 收集土砂流失量步驟.....	3-52
表 4-1 日降雨量及週降雨量之統計表.....	4-3
表 4-1 日降雨量及週降雨量之統計表(續).....	4-4
表 4-1 日降雨量及週降雨量之統計表(續).....	4-5
表 4-2 收集土砂量紀錄.....	4-9
表 4-3 七月份至今泥岩標準侵蝕試驗區之土砂流失量分析....	4-13
表 4-4 每週降雨驅動指標與土砂流失量之統計表.....	4-16
表 4-5 試驗區之土壤構造鑑定.....	4-19

表 4-6 試驗區之土壤質地分析	4-20
表 4-7 試驗區之土壤導水度測定	4-20
表 4-8 試驗區之土壤土壤有機質含量	4-21
表 4-9 土壤結構參數	4-22
表 4-10 土壤滲透性參數	4-22
表 4-11 試驗區之土壤沖蝕指數 K 值及參數	4-23
表 4-12 現地土壤沖蝕指數 K 推算	4-25
表 5-1 利用 ImageJ 分析植物生長覆蓋率	5-4
表 5-2 彙整生物炭法與其他工法之施工單價與適用坡度	5-7

圖次

圖 1-1 臺南及高雄泥岩地區	1-4
圖 1-2 計畫工作組織架構圖	18
圖 1-3 「利用生物炭改良泥岩惡地土壤沖蝕量」工作架構....	1-13
圖 2-1 添加生物炭後土壤構造與養份保持示意圖	2-13
圖 2-2 研究區域地理位置圖	2-17
圖 2-3 本計畫研究區域高程分布	2-19
圖 2-4 本計畫研究區域坡度分布圖	2-22
圖 2-5 本計畫研究區域坡向分布圖	2-23
圖 2-6 臺南、高雄泥岩地區 24 個中央氣象局雨量站分布位置	2-28
圖 2-7 臺南、高雄泥岩地區年平均降雨量空間分布圖	2-29
圖 2-8 臺南、高雄泥岩地區降雨沖蝕指數空間分布圖	233
圖 2-9 臺南及高雄地區土壤沖蝕性指數分布圖	2-37
圖 2-10 臺南及高雄地區土壤沖蝕性指數分布圖(大比例).....	2-38

圖 2-11 臺南及高雄泥岩地區山坡地之坡度坡長因子 LS 空間分布圖.....	2-40
圖 2-12 臺南及高雄泥岩地區山坡地之作物與管理因子 C 空間分布圖	2-42
圖 2-13 臺南及高雄泥岩地區山坡地之土壤沖蝕潛勢分布	2-45
圖 3-1 現地會勘.....	3-2
圖 3-2 現地會勘並更改試區地點	3-2
圖 3-3 第一次試區建置歷程	3-4
圖 3-4 日降雨量統計圖	3-5
圖 3-5 標準試區現況	3-5
圖 3-6 第二次試區建置歷程	3-7
圖 3-6 第二次試區建置歷程(續).....	3-8
圖 3-6 第二次試區建置歷程(續).....	3-9
圖 3-7 臺南分局人員試區會勘	3-9

圖 3-8 日降雨量統計圖	3-10
圖 3-9 標準試區現況	3-10
圖 3-10 第三次試區建置歷程	3-11
圖 3-10 第三次試區建置歷程(續)	3-12
圖 3-10 第三次試區建置歷程(續)	3-13
圖 3-11 將植物剷除並採集表土回實驗室	3-14
圖 3-12 將表土進行過篩(< 2mm)	3-14
圖 3-13 土壤構造描述	3-15
圖 3-14 土壤深度測定	3-15
圖 3-15 秤取風乾土於鋁盒內	3-16
圖 3-16 將風乾土移入烘箱中烘乾	3-16
圖 3-17 攪拌土樣	3-17
圖 3-18 pH 儀	3-17
圖 3-19 以硫酸亞鐵銨溶液滴定至終點之過程	3-19

圖 3-20 利用電動攪拌機進行攪拌	3-21
圖 3-21 以攪拌槳上下攪拌土壤溶液	3-21
圖 3-22 以 1 M 醋酸銨淋洗土樣	3-23
圖 3-23 將土環打入土中	3-24
圖 3-24 將土環中的土壤推入燒杯	3-24
圖 3-25 吸濕飽和	3-26
圖 3-26 飽和式水力傳導度測定儀	3-26
圖 3-27 利用抽氣裝置收集濾液	3-27
圖 3-28 以濾紙過濾溶液收集濾液	3-29
圖 3-29 蒸餾裝置加熱蒸餾	3-29
圖 3-30 以往復式震盪儀進行震盪	3-31
圖 3-31 濾紙過濾並收集濾液	3-31
圖 3-32 土壤總體密度與侵蝕量之關係圖	3-35
圖 3-33 土壤 pH 值與侵蝕量之關係圖	3-36

圖 3-34 土壤電導度與侵蝕量之關係圖	3-37
圖 3-35 土壤有機質與侵蝕量之關係圖	3-38
圖 3-36 土壤銨態氮與侵蝕量之關係圖	3-39
圖 3-37 土壤硝酸態氮與侵蝕量之關係圖	3-40
圖 3-38 土壤有效性磷與侵蝕量之關係圖	3-41
圖 3-39 土壤陽離子交換容量與侵蝕量之關係圖	3-42
圖 3-40 泥岩標準試區	3-43
圖 4-1 畜試所雨量站	4-2
圖 4-2 日降雨量統計圖	4-6
圖 4-3 週降雨量統計圖	4-7
圖 4-4 週降雨量與土砂流失量之分析	4-10
圖 4-5 累積降雨量與累積土砂流失量關係圖	4-10
圖 4-6 添加生物炭之後至今收集土砂流失量	4-12
圖 4-7 RTI(最大 1 小時之降雨強度)與土砂流失量之關係圖 ...	4-17

圖 4-8 RTI(最大 3 小時平均之降雨強度)與土砂流失量之關係圖4-17

圖 4-9 RTI(最大 1 日平均之降雨強度)與土砂流失量之關係圖 4-18

圖 4-10 累積土砂流失量與 RTI 之關係 4-18

圖 5-1 泥岩標準試區除草 5-2

圖 5-2 泥岩標準試區除草後 5-2

圖 5-3 泥岩標準試區植物生長情況 5-3

圖 5-4 ImageJ 操作介面..... 5-3





第壹章 前言

土壤侵蝕是全球最重要的土地退化(land degradation)問題之一(Mohammad and Adam, 2010)。目前全世界約 2,500 萬平方公里的土地正遭受土壤侵蝕威脅，占了陸地總面積的 16.7%，每年流失土壤 260 億噸，全球 83%的土地退化是由土壤侵蝕引起的(García-Ruiz, 2010)。臺灣水土資源不足，而水土資源時空分佈又不均勻，可利用的後備資源缺乏，土壤侵蝕導致土地退化、土地質量下降將更加劇水土資源的匱乏。因此，土壤侵蝕議題不僅是臺灣水土保持研究的重要內容，也是全球關注土地退化問題的核心之一。根據農委會水土保持局統計，山坡地超限利用，加上森林被伐除後，土壤流失率將增加 100 倍、每公頃將流失 160 噸土石。氣候變遷所引起的極端氣候事件增加，超過百年洪峰量的降雨事件顯著較以往頻繁；近年幾起極端降雨事件已造成臺灣地區多起嚴重土石流失災害，嚴重危害民眾生命安全。因此，改善土壤流失的方法或推估流失量則成為加強國土安全、土地管理利用、水土資源保育及維護人民生命財產之重要研究課題。

泥岩(mudstone)為臺灣地區土壤侵蝕最嚴重的地形，由濱海相沉積物所構成，面積約二千餘平方公里，約佔 5.5%之臺灣面積。泥岩主要分佈於臺灣西南地區、屏東及花東地區，其中又以西南地區之一千餘平方公里規模最廣，主要出露於西南部麓山帶、海岸山脈南端以及恆春半島等地。泥岩

土壤特性主要乃 pH 值高(≥ 8.0)、交換性鈉(Na^+)含量高，質地細緻、有機質含量低、氮及磷含量低而鉀含量高，因而土壤肥力差。由於鈉含量高之故，土壤易分散，因而土粒膠結不良，團粒穩定性差，遇水即迅速崩解，當受雨水洗淋或雨滴打擊時，雨水常由土壤裂隙向內部迅速滲入，使岩質軟化易造成嚴重侵蝕及崩塌。此外，泥岩裸露坡面之年侵蝕深度約為 7.5 公分至 9.5 公分，屬相當嚴重之土壤侵蝕狀況；由於嚴重侵蝕與迅速養分流失導致泥岩土壤上植物生長受阻；於是，在泥岩地形上進行植生復舊效益不彰，恢復生態功能亦極為不易。加上泥岩地區山坡地之農業以旱作為主，但由於泥岩土壤地力貧脊加上西南部乾旱時期較長，農民為提高生產力，積極開發整地拓展耕作面積或濫用農藥化肥，透過泥岩土壤之高侵蝕潛勢與強逕流作用，導致泥砂、農藥或化肥的流失，均可能造成集水區污染以及其它環境壓力；故致力於環境友善之地力提升與土壤可蝕性改善均應為優先進行之長期工作。

生物炭(biochar)為一高含碳物質($\geq 30\%$)，其特性為多孔性以及高比表面積，不同製備過程(包含熱裂解溫度或氧氣含量等因子)可影響最終炭化物質之特性，例如碳、氮含量、孔隙度與比表面積等性質。利用農業廢棄物製備生物炭，並將之作為土壤改良基材乃近年來新興之技術與方法，不僅可提高土壤中碳存量，亦可有效提升土壤保肥力與生產力。綜合以上之背

景說明，本計畫希望從廢棄物再利用的角度添加生物炭來探討泥岩惡地土壤侵蝕量流失之改善，嘗試建立其改善之效益。

1.1 計畫目的

臺灣南部最嚴重之非點源污染為泥岩(mudstone)地區。臺灣西南部泥岩分布遼闊，主要分布在曾文溪以南的臺南市及高雄市等丘陵地區的古亭坑層，其次則分布在卑南溪東側向北玉里東邊的利吉層、南部恆春半島的墾丁層，總面積達 1,000 平方公里。泥岩特色在於風化所形成的土壤膠結作用差，植被覆蓋不佳，降雨狀況下易造成嚴重侵蝕。南部泥岩地區土壤侵蝕率為 160 ton/ha/yr，屬極為嚴重之侵蝕等級。因此，本計畫擬利用生物炭添加至泥岩土壤中，評估是否能減少泥岩於降雨過程中產生之逕流水所夾帶損失之土砂量，評估生物炭添加對泥岩侵蝕量之影響及其之改善效益。

1.2 委託工作範圍

本計畫主要工作範圍為臺南及高雄泥岩地區，如圖 1-1。

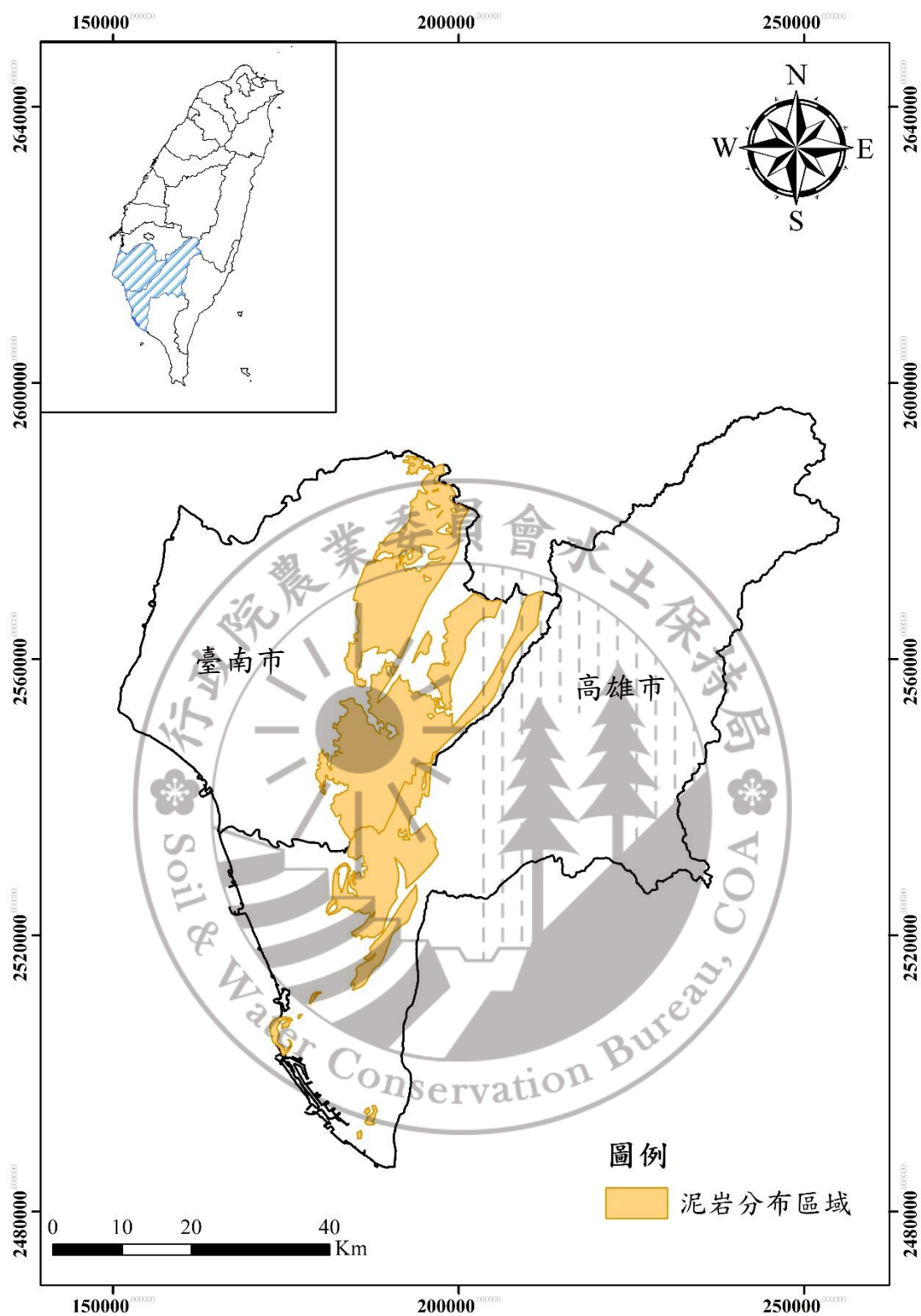


圖 1-1 臺南及高雄泥岩地區

1.3 工作項目及內容

本年度之工作項目及內容說明如下：

一、相關資料蒐集

(一) 相關文獻蒐集與彙整

本計畫將蒐集目前泥岩土壤侵蝕及改良技術與工法的相關文獻。

(二) 歷史降雨資料蒐集

蒐集鄰近計畫範圍中央氣象局雨量站 10 分鐘等間隔之降雨資料(2002 年至 2017 年)，作為後續各項分析之參考依據。

(三) 生物炭改良土壤特性之相關文獻彙整

本計畫將收集有關生物炭(稻殼及廢棄枝幹條以 700°C 熱裂解製備)對土壤改良之相關文獻及生物炭對侵蝕改良之文獻。

二、泥岩沖蝕標準試區建置與土砂流失量量測

(一)建置 3 個泥岩沖蝕標準試區：長 22.13 公尺、寬 4 公尺、坡度 9%。

(二)生物炭(700°C 熱裂解製備)及泥岩土壤之基本性質分析，含物理化學性質等分析。

(三)至少每個月(5-10 月)蒐集土砂收集槽中之受侵蝕土砂。

三、泥岩侵蝕標準試區（未改善及以生物炭改良）土砂流失量與降雨特性分析

(一) 每個月(5-10 月)降雨後，依據泥岩侵蝕標準試區蒐集之土砂收集槽中之受侵蝕土砂，分析生物炭改善前後土砂流失量之差異。

(二) 分析土砂收集槽中之土砂流失量與降雨特性(降雨強度、累積雨量集降雨延時等)之關係。

四、進行生物炭土壤改良後之效益與生物炭成本之比較分析

比較分析至少兩種以上(稻殼及廢棄枝幹條等)生物炭土壤改良後之效益與生物炭成本。

五、執行時期相關配合事項

(一) 依臺南分局需要，會同出席相關計畫審查會議或現場會勘，並協助準備相關會議(勘)資料。

(二) 各期報告印刷、各期審查及相關會勘出席費用。

1.4 計畫工作組織

本案「利用生物炭改良泥岩惡地土壤沖蝕量」服務工作組織，乃是由國立屏東科技大學水土保持系組成，工作團隊具備各項專長的工作人員，組成資歷豐富、技術完備的計畫工作組織團隊，經由組織方式，配合良好之協調與聯繫，共同完成本委託計畫之工作項目與要求成果。為達成本委託計畫之工作目標，本單位具備各項專長的工作人員，組成資歷豐富、技術完備的計畫工作組織團隊，經由組織方式，配合良好之協調與聯繫，完成本委託計畫之工作項目與要求成果。工作團隊中設置計畫主持人 1 人、共同主持人 1 人、碩士級計畫助理 4 人、研究生 9 人，並依各工作之性質分工合作，戮力完成計畫工作項目，組織架構圖如圖 1-2 所示。



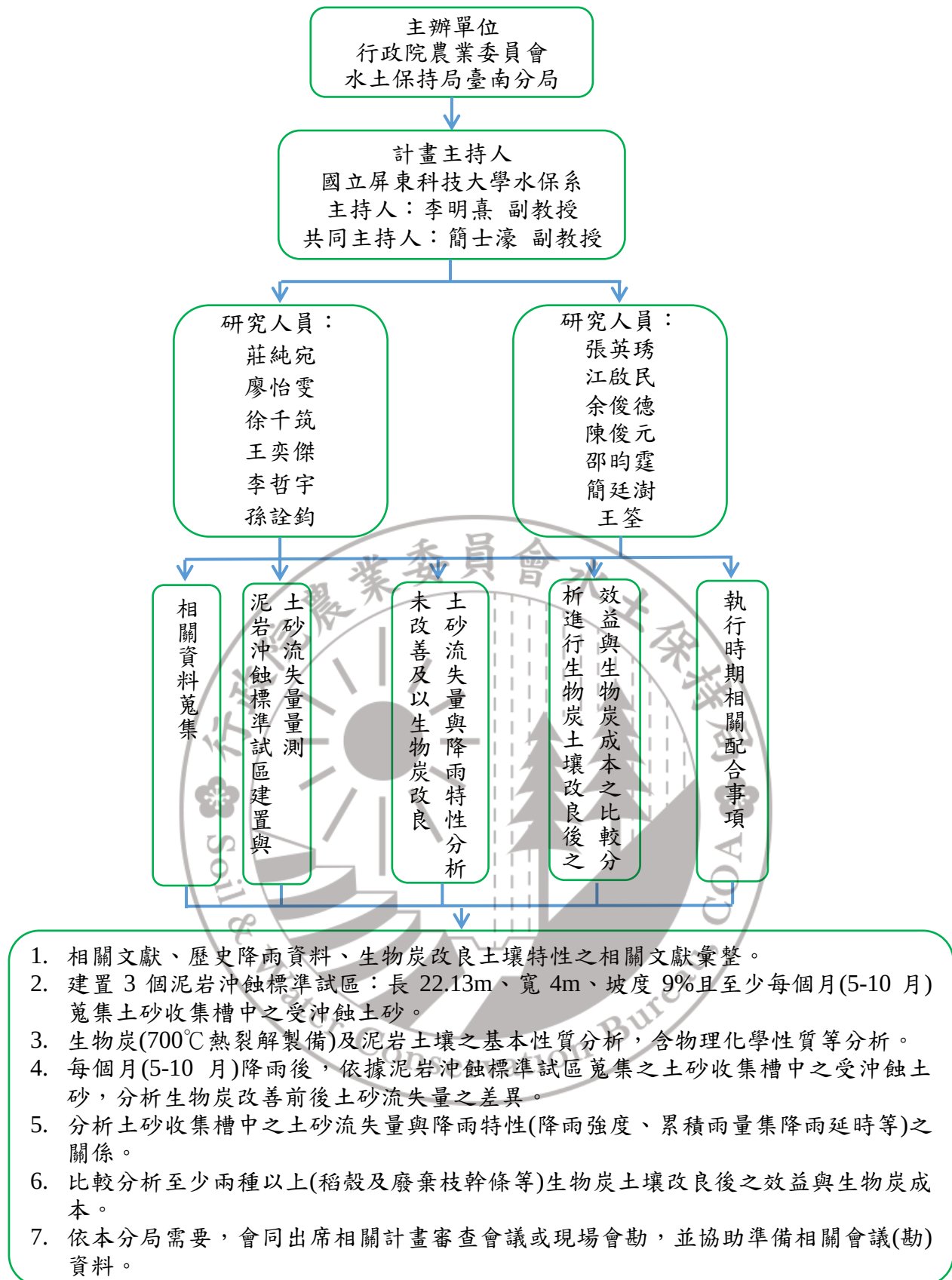


圖 1-2 計畫工作組織架構圖

1.5 工作時程與預定進度

本計畫工作期限為自決標日起至民國一〇七年十二月二十一日完成，並依農業委員會水土保持局臺南分局審查認可之工作計畫進度執行。計畫之各項工作預定進度如表 1-1 所示。

表 1-1 利用生物炭改良泥岩惡地土壤沖蝕量預定進度表

工作項目	期程	107 年											
	01 月	02 月	03 月	04 月	05 月	06 月	07 月	08 月	09 月	10 月	11 月	12 月	
相關資料蒐集													
泥岩侵蝕標準試區建置與土砂流失量量測													
泥岩侵蝕標準試區(未改善及以生物炭改良)土砂流失量與降雨特性分析													
進行生物炭土壤改良後之效益與生物炭成本之比較分析													
執行時期相關配合事項													
期初報告書提交													
期中報告書提交													
期末報告書提交													
成果報告書提交													
預定進度累計 (%)		4	13	24	34	44	54	64	75	85	95	98	100
各查核點工作進度		一、期初審查會： (一) 期初簡報時需完成工作：1.工作計畫項目內容；2.執行期程進度；3.工作組織成員；4.預定執行方式及構想。 (二) 自簽約日起 20 日曆天（以雙方發文日為準）內，以正式函文提送專案工作計畫書 12 份至臺南分局，並由臺南分局召開期初審查會。 (三) 自期初審查會審查通過後（以臺南分局函送會議紀錄之發文日為準）起 10 日曆天內依會議紀錄完成專案工作計畫書修正，並以正式函文提送專案工作計畫書修正版本。 二、期中審查會：											

	(一) 期中簡報時需完成工作：1.相關資料蒐集研析；2.完成生物炭 (700℃熱裂解製備)及泥岩土壤之基本性質分析，含物理化學性質等分析；3.完成所有標準侵蝕區之生物炭施用，並開始監測土砂流失量；4.初步分析土砂收集槽中之土砂流失量與降雨特性之關係。 (二) 於 107 年 8 月 31 日（以雙方發文日為準）前，以正式函文提送期中報告 12 份至臺南分局，並由臺南分局召開期中審查會。 (三) 自期中審查會審查通過後(以臺南分局函送期中審查會會議紀錄之發文日為準)起 10 日曆天內依會議紀錄完成期中報告修正，並以正式函文提送期中報告修正版本。 三、期末審查會： (一) 期末簡報時需完成所有工作。 (二) 於 107 年 11 月 30 日（以雙方發文日為準）前，以正式函文提送期末報告 12 份至臺南分局，並由臺南分局召開期末審查會。 (三) 自期末審查會審查通過後（以臺南分局函送期末審查會會議紀錄之發文日為準）起 10 日曆天內依會議紀錄完成期末報告修正，並以正式公函提送期末報告修正版本。 四、通案性要求： (一) 期末報告至契約完成期間，如委託機關發現問題仍需協助修正。 (二) 機關僅支付 1 次各期委員審查費用，倘需召開 1 次以上的審查會其委員審查費用則由廠商支付。 (三) 另雙方得視實際需要，召開工作會議，其時間、地點由機關訂定；若需委員審查則費用由廠商支付，其費用已計入契約金額內。
--	--

資料來源：本計畫彙整

表 1-2 利用生物炭改良泥岩惡地土壤沖蝕量合約工作項目與報告書章

節對照表

合約工作項目		對應章節	百分比 (%)
一、相關資料蒐集	相關文獻蒐集與彙整	2.1 (P2-1~15)	100
	歷史降雨資料蒐集	2.3 (P2-36~45)	100
	生物炭改良土壤特性之相關文獻彙整	2.1 (P2-8~10)	100
二、泥岩沖蝕標準試區建置與土砂流失量量測	至少建置 3 個泥岩沖蝕標準試區：長 22.13m、寬 4m、坡度 9%	3.1 (P3-1~13)	100
	生物炭(700℃熱裂解製備)及泥岩土壤之基本性質分析，含物理化學性質等分析	3.2 (P3-14~42)	100
	至少每個月(5-10 月)蒐集土砂收集槽中之受侵蝕土砂	3.3 (P3-43~53)	100
三、泥岩標準試區(未改善及以生物炭改良)土砂流失量與降	每個月(5-10 月)降雨後，依據泥岩侵蝕標準試區蒐集之土砂收集槽中之受侵蝕土砂，分析生物炭改善前後土砂流失量之差異。	4.1 (P4-11~13)	100

雨特性分析	分析土砂收集槽中之土砂流失量與降雨特性(降雨強度、累積雨量集降雨延時等)之關係	4.1 (P4-1~10)	100
四、進行生物炭土壤改良後之效益與生物炭成本之比較分析	比較分析至少兩種以上(稻殼及廢棄枝幹條等)生物炭土壤改良後之效益與生物炭成本	5.2 (P5-5~7)	100

資料來源：本計畫彙整

1.6 整體工作架構

本計畫「利用生物炭改良泥岩惡地土壤沖蝕量」工作內容主體分為五大項目，主要內容包含相關資料蒐集、泥岩侵蝕標準試區建置與土砂流失量量測、泥岩侵蝕標準試區（未改善及以生物炭改良）土砂流失量與降雨特性分析、進行生物炭土壤改良後之效益與生物炭成本之比較分析及執行時期相關配合事項等事項，組織架構圖如圖 1-3 所示。



圖 1-3 「利用生物炭改良泥岩惡地土壤沖蝕量」工作架構



第貳章 相關資料蒐集

2.1 相關文獻蒐集與彙整

本計畫將蒐集目前泥岩土壤侵蝕及改良技術與工法的相關文獻，文獻蒐集成果說明如下。

一、 泥岩之分布

臺灣南部泥岩區主要分布在西南部麓山帶、東部海岸山脈南端以及恆春半島等。西南部麓山帶其範圍北起嘉義、南至高雄、西起臺南市六甲、官田、新化、關廟以至高雄岡山、東緣則自臺南市之關子嶺、北寮、玉井、南化以至高雄旗山，涵蓋面積約 1,000 平方公里。泥岩為沿海沖積平原提供充足之沉積材料，由於西南部麓山帶是臺灣泥岩出露面積最廣之處，有嚴重之土壤沖蝕問題，西南部麓山帶地表多形成光禿之月世界景象，其中又以古亭坑層(南化泥岩)最為嚴重(中華民國環境綠化協會，1997；1998)。張(2004)曾指出，臺南地區附近之泥岩層厚度，最高可達 8,000 公尺，由於多為海相沉積物，故呈中鹼性、作物不易生長。近年來，由於土地不敷使用以及民眾休閒遊憩意識提昇，加上泥岩特殊景觀風貌的吸引力，故多有大型設施進入位於麓山地帶之泥岩區，進行大規模建置之文教或休閒遊憩場所。加上政府推動觀光休閒產業發展，不論公私部門均以觀光發展為未來泥岩地區為發展

主軸，此舉因而為環境帶來壓力，災害問題想必更加嚴重。泥岩地質方面，根據王(1988)、陳(2000a、b、c；2002)定義，西南部泥岩包括的範圍以關廟、新化地區的六雙層、左鎮、南化、古亭、田寮等地區的下部及上部古亭坑層(Plg 與 Pug，上新世)、珊瑚潭地區的二重溪(Qec，更新世)、崁下寮、六重溪地層六雙層(Qls，更新世)以及高雄市、臺南市境內之北寮頁岩、茅埔頁岩(Mcma，中新世)、鹽水坑頁岩等地層。

學者名	發表年份	泥岩分布範圍
陳時祖	1994	台灣西南地區有一超過一千平方公旦之地表是被一些以泥(頁)岩為主之地層所覆蓋，在這個地區經常發生一些與坡地有關之地質災害，其中尤其是以南化泥岩範圍內之沖蝕災害為最嚴重且最不容易處理。
中華民國環境綠化協會	1997 1998	泥岩為沿海沖積平原提供充足之沉積材料，由於西南部麓山帶是臺灣泥岩出露面積最廣之處，有嚴重之土壤沖蝕問題，西南部麓山帶地表多形成光禿之月世界景象，其中又以古亭坑層(南化泥岩)最為嚴重
王鑫	1988	西南部泥岩包括的範圍以關廟、新化地區的六雙層、左鎮、南化、古亭、田寮等地區的下部及上部
陳時祖	2000a 2000b 2000c 2002	古亭坑層(Plg 與 Pug，上新世)、珊瑚潭地區的二重溪(Qec，更新世)、崁下寮、六重溪地層六雙層(Qls，更新世)以及高雄市、臺南市境內之北寮頁岩、茅埔

		頁岩(Mcma，中新世)、鹽水坑頁岩等地層。
黃國禎等人	2007	台南縣龍崎鄉牛埔村泥岩水土保持戶外教室之泥岩屬古亭坑層泥岩，為第三紀上新世地層。
簡士豪等人	2015	泥岩地點位於台灣南部田寮地區研究區域海拔約為 85 ~ 100 m，坡度約為 10 ~ 20 度，屬於新世晚期與更新世早期之古亭坑層；古亭坑層是台灣西南部泥岩之主要地層

資料來源：本計畫彙整

二、 泥岩土壤化育、分類與礦物特性相關文獻

泥岩雖較其它碎屑性岩石之膠結程度差，硬度也較砂頁岩要低，但萬與黃(1996)仍認為，泥岩不能視為土壤，應視為母岩之一種。然而，根據分析，月世界泥岩的質地組成主要為粉質壤土，其中主要含砂粒 5.0%、粉粒 60% 及粘粒 35%，且經野外現地判斷，泥岩土壤已有化育的證據，亦即土壤已有明顯的構造與化育 B 層(Bw 層)(許等人，2002)。根據張與黃(2001)統計，臺南與高雄地區泥岩母質石質土共有 15 個土系，且均為新成土(Entisols)或弱育土(Inceptisols)。臺灣地區西南部平均年雨量約為 1,800 公釐，多集中於夏季，自五月開始增加，八月達到最高，九月起驟減，平均年蒸發散量約 1,400 公釐，十月至次年四月為乾燥季節，雖然平均年雨量稍大於蒸發散量，但由於灌溉水源不足，難以耕作，因此土壤水分境況應屬於暫乾的(ustic)。此外，

年平均氣溫約 25℃，土壤溫度境況為炎熱的(hyperthermic)。由上述環境條件，許等人(2002)提出，月世界泥岩土壤可分類為典型簡育暫乾弱育土(Typic Haplustepts) (Soil Survey Staff, 2010)。岩性與土壤礦物組成方面，張(2000)發現，臺南地區泥岩的礦物組成均勻，沈積物由中央山脈的粘土質沈積岩、粘板岩、千枚岩或泥質片岩所提供，堆積可能是由於海底山崩發生的濁流所造成的，全厚可達 4,000 m 以上，故泥岩應為海相環境中沈積形成。顏等人(1985)分析六雙層、二重溪層、古亭坑層及茅埔坑層之大量土壤樣品後，指出泥岩主要是以伊萊石和綠泥石 2 種黏土礦物為主，而阿太堡限度實驗結果指出泥岩土壤之塑性指數是屬於中低塑性粘土。萬與黃(1996)亦針對臺灣兩種泥岩礦物成分進行分析，並指出月世界泥岩所含之粘土礦物以非膨脹性者為主，主要包括 25% 高嶺石、20% 白雲母及 15% 綠泥石，而膨脹性粘土礦物屬微量。

學者名	發表年份	泥岩土壤化育、分類與礦物特性
顏富士、蔡縊輝	1985	六雙層、二重溪層、古亭坑層及茅埔坑層之大量土壤樣品後，指出泥岩主要是以伊萊石和綠泥石 2 種黏土礦物為主，而阿太堡限度實驗結果指出泥岩土壤之塑性指數是屬於中低塑性粘土。
萬鑫森、黃瓊慧	1996	臺灣兩種泥岩礦物成分進行分析，並指出月世界泥岩所含之粘土礦物以非膨脹性者為主，主要包括 25

		% 高嶺石、20% 白雲母及 15% 綠泥石，而膨脹性粘土礦物屬微量。
張穗蘋	2000	臺南地區泥岩的礦物組成均勻，沈積物由中央山脈的粘土質沈積岩、粘板岩、千枚岩或泥質片岩所提供，堆積可能是由於海底山崩發生的濁流所造成的，全厚可達 4,000 m 以上，故泥岩應為海相環境中沈積形成。
許正一人	2002	根據分析，月世界泥岩的質地組成主要為粉質壤土，其中主要含砂粒 5.0%、粉粒 60% 及粘粒 35%，且經野外現地判斷，泥岩土壤已有化育的證據，亦即土壤已有明顯的構造與化育 B 層(Bw 層) 臺灣地區西南部平均年雨量約為 1,800 公釐，多集中於夏季，自五月開始增加，八月達到最高，九月起驟減，平均年蒸發散量約 1,400 公釐，十月至次年四月為乾燥季節，雖然平均年雨量稍大於蒸發散量，但由於灌溉水源不足，難以耕作，因此土壤水分境況應屬於暫乾的(ustic)。此外，年平均氣溫約 25°C，土壤溫度境況為炎熱的(hyperthermic)。由上述環境條件，月世界泥岩土壤可分類為典型簡育暫乾弱育土(Typic Haplustepts)。

資料來源：本計畫彙整

三、 泥岩土壤侵蝕及養分流失相關文獻

近十幾年間，臺灣西南部泥岩裸化面積有迅速增加之趨勢。航照調查資料顯示，泥岩裸化面積由 1967 年的 2,532 公頃增加到 1997 年的 11,179 公頃(周，1997)，30 幾年間迅速增加 5 倍之多，顯示泥岩裸露面積擴大有急速惡化之情形。此外，1999 年 921 大地震後，中北部更有大量之泥岩出露於地表，至 2001 年已更擴大為 15,539 公頃，幾為 30 年前的 6 倍以上。李德河等人(1994)指出，泥岩之特性為遇水易崩解、亦易風化、沖蝕率大，而土壤強度隨著含水量的增加而降低。此表示，泥岩如遇極端降雨事件，將引起表土大量流失或崩塌，而造成集水區含砂量激增、環境污染及土地劣化之農業生產損失等問題。除此之外，臺灣西南部泥岩地區由於近四十年來受到大量之山區產業道路之開闢與擾動破壞、坡地果園之不當經營與化學藥劑管理不當與河岸邊之養殖等土地不合理利用，已加速泥岩地區土地之荒漠化；同時，亦使得植生擴展困難與人工植生之不易。臺灣西南部泥岩地區，由於地力消耗與區域氣候型態之間的因果循環，在水土保持與景觀上形成不易植生綠化的地區及特殊之月世界地形，其特性為粉砂含量略比粘土多，砂之含量極少。此外，泥岩之 pH 值高、交換性鈉(Na^+)含量多，質地細、有機質少、N 及 P 含量低而 K 含量高，易引起分解作

用。其次，由於泥岩土壤膠結不良，遇水迅速崩解，受過度壓密作用，當壓力消除或受雨水洗淋時，雨水向土塊內部迅速滲入，使岩質軟化而使得容易造成土壤沖蝕及崩塌。張(1982)認為泥岩浸水時溶化呈泥漿狀態，易於流動；乾燥時堅硬如石，土壤構造多呈塊狀結構，下雨時逕流旺盛，土壤易受沖蝕。此外，泥岩土壤因含有多量之交換性鈉，易起分散作用，使土壤膠體易隨逕流水流失，因而造成所謂「淘空現象」，而此為構成嚴重沖蝕溝與崩塌之主因。又由於泥岩滲透性極低，若遇豪雨或久雨，易造成大量逕流進而淘刷坡腳，或雨水沿土壤裂縫滲入土體而降低抗剪強度，而導致崩坍。邱與陳(1996)指出，泥岩之抗蝕性弱，裸露地面之年沖蝕深度可達 6~8 公分，年表土流失量約為 140 t/ha-yr，逕流係數在 0.83 至 0.87 之間，屬臺灣地區最易沖蝕之土壤之一；而泥岩沖蝕之種類分為有剝落、層狀沖蝕、指狀沖蝕、溝谷沖蝕、崩落及崩塌等類型，該些災害常危害下游之農、住家之安全。

學者名	發表年份	泥岩土壤沖蝕及養分流失
張延光	1982	泥岩浸水時溶化呈泥漿狀態，易於流動；乾燥時堅硬如石，土壤構造多呈塊狀結構，下雨時逕流旺盛，土壤易受沖蝕。
陳時祖等人	1984	泥岩之抗蝕性弱，裸露地面之年沖蝕深度可達 6~8 公分，年表土流失量約為 140 t/ha-yr，逕流係數在 0.83 至 0.87 之間，屬臺灣地區最易沖蝕之土壤之

		一。
李德河等人	1994	泥岩之特性為遇水易崩解、亦易風化、沖蝕率大，而土壤強度隨著含水量的增加而降低
周天穎	1997	臺灣西南部泥岩裸化面積有迅速增加之趨勢。航照調查資料顯示，泥岩裸化面積由 1967 年的 2,532 公頃增加到 1997 年的 11,179 公頃

資料來源：本計畫彙整

四、生物炭改良土壤特性之相關文獻彙整

本計畫將收集有關生物炭(稻殼及廢棄枝幹條以 700℃ 熱裂解製備)對土壤改良之相關文獻及生物炭對沖蝕改良之文獻。相關文獻初步蒐集成果說明如下：

(一)生物炭改良土壤物理化學性質之相關文獻

邱創益(1985)提出，泥岩土壤中有效性磷及有效性氮不足，且鈉離子易對鉀離子產生頤抗作用，造成植物生長障礙。顏富士等人(1985)於台灣西南部主要泥岩坡地所含黏土之物化特性研究指出，因鈉離子遇水造成黏土礦物膠結力降低，且滲透率降低，坡面易滑動。黃國禎(2007)、陳時祖(1994)及簡士濠等人(2015)皆提出，台南泥岩之基本性質酸鹼度偏高(8.23 - 8.90)、陽離子交換能力偏低(4.3 - 7.1 cmol(+)/kg)、電導度偏高(6.31 dS/m)、水力傳導度偏低(1.80 cm/hr)、有機質含量偏低(0.92%)、全氮量不足(0.02 - 0.06%)及有效磷含量不足(0.04%)，

其基本性質皆屬不易於植物生長。

有鑒於廢棄物資源再利用的觀點，將廢棄物，包括農業廢棄物、廢水污泥或民生廢棄物等物質轉製為炭化物質，亦即稱為生物炭(biochar)，並使用為土壤改良劑為近年新興之方法。生物炭為目前廣泛為使用作為土壤穩定與肥性改良的土壤改良劑之一。生物炭為一富含碳之固形物質，由生物質(biomass)在一氧氣受限制之環境下熱裂解產生(Lehmann et al., 2003)。添加生物炭至土壤中可長期建立土壤中碳匯池(soil carbon sink)(Marris, 2006; Kuzyakov et al., 2009; Steinbeiss et al., 2009)，同時，亦可改善土壤的功能，例如可改善土壤構造、團粒穩定性、導水度；增加土壤中微生物活性及減少養份淋洗損失，進而促進植物生長及擴展(Lehmann and Joseph, 2009; Joseph et al., 2010)。生物炭對土壤之影響效果，目前仍尚待研究中。許多學者已指出由不同有機材料和不同條件下所製成之生物炭將具有不同屬性，例如 pH、碳、氮、磷、與陽離子含量等特性皆不同(Baldock and Smernik, 2002; Nguyen et al., 2004)。Chan et al. (2007b) 指出，生物炭與其它堆肥資材相較下，顯著為低養分含量及低氮含量之資材；然而，土壤經添加生物炭後，可有效改善土壤之保肥能力，並增加土壤固碳能力。Shinogi (2004)指出由動物排泄物所製成的生物炭有較高的養分和氮含量，但在作為土壤改良劑上的價值尚未確認，機制亦尚待釐清。Chan et al. (2008)利用家禽廢棄物製成之生物炭，以 10t/ha 的添加量下，發現可明顯改善地中海地區農地的生產量，主要乃由於生物炭可增加養分涵養量，尤其是含氮量的顯著增加。Laird et al. (2009)發現當土壤添

加生物炭後，能保持更多的水分，且具有較高之比表面積(約 18 %)；此外，pH 與陽離子交換容量皆明顯增加。Busscher et al. (2010)研究顯示，利用山核桃殼經過熱裂解所製造的生物炭，並添加磨碎的柳枝殘體將降低土壤的滲透性質。雖然添加非活性生物炭和柳枝殘體改善某些土壤物理性狀，但可能有其他添加生物炭的比例是對土壤性質更有影響。



(二)生物炭改良對土壤沖蝕與養份流失之相關文獻

土壤沖蝕潛勢通常與土壤特性有密切之關係；根據 Wischmeier and Smith (1978)所提出之通用土壤流失公式 (Universal Soil Loss Equation, USLE)中，土壤可蝕性因子(soil erodibility factor, K 值)係由土壤質地、有機質含量、土壤構造及土壤滲透性所決定，而這些因子為影響土壤沖蝕量的主要因子。利用生物炭高含碳量與高比表面積之特性，將之添加至土壤中可明顯改善土壤有機質含量、土壤構造以及土壤導水度(圖 2-1)。簡等人(2010；2011)以不同比例(2.5%及 5%)之木質生物炭(由銀合歡製成)添加至酸性紅壤中，孵育 3 個月後，結果發現，改良後紅壤之總體密度顯著由 1.4 Mg/m^3 降至 $<1.2 \text{ Mg/m}^3$ ；土壤團粒穩定度明顯提升至少 1 倍以上；此外，飽和水力傳導度顯著提升至少 2-4 倍，表示添加生物炭有效改善紅壤之滲透性；同時，經添加生物炭後，紅壤的有機質含量顯著增加 0.4% 以上、陽離子交換容量更增加至 $10 \text{ cmol}(+)/\text{kg}$ 以上以上；於 80mm/hr 降雨強度下，添加生物炭可明顯降低土壤沖蝕量至少 50%以上。針對影響 K 值之土壤性質做直接的改善，土壤沖蝕潛勢應可立即獲得改善。此外，由於土壤沖蝕量降低，土壤物理化學性質獲得改善，進而促使植生迅速擴展，亦可影響 USLE 公式中的地表覆蓋因子(C 值)，於是更進一步的降低土壤沖蝕量。自 1980 年開始，國內已有許多學者針對 K 值與土壤性質間的關係進行相關的探討(范，1997；萬與黃，1981；1983；1989)。黃與萬(1994)和黃(1986)持續利用 USLE 模式，推估山坡地 K 值及土壤流失量，並認為土壤有機質含量、團粒穩定度與飽和導

水度為影響 K 值最重要之土壤性質。針對該些因子著手改良土壤性質，可顯著降低土壤可蝕性。此外，國外亦有許多研究針對有機質含量進行研究，評估該性質對 K 值的影響(Imeson and Vis, 1984; Barthès and Roose, 2002)。Boix-Fayos et al. (2004)指出當林地或草生地轉變為農耕地時，有機質含量顯著減少而導致土壤沖蝕性增加。此外，Rodríguez et al. (2006)以火山灰土壤為研究對象，指出土壤團粒穩定度與土壤中的次生礦物(鋁英石)為影響火山灰土壤可沖蝕性的主要因子。張(2003)指出，改良泥岩土壤之首先應考慮增加有機質含量，將之形成較為穩固之團粒，改善泥岩土壤構造；同時增加陽離子交換容量，降低鹽分含量，進以增加植生機會。Tejada and Gonzalez (2007)以碎棉花籽堆肥、橄欖油萃取過程之副產物、都市民生廢棄物與下水污泥作為鹽土改良劑，結果發現，農業廢棄物可大幅提升團粒穩定性，並有效減少總體密度與土壤沖蝕量，主要原因為農業廢棄物含大量之腐植酸(humic acids)。



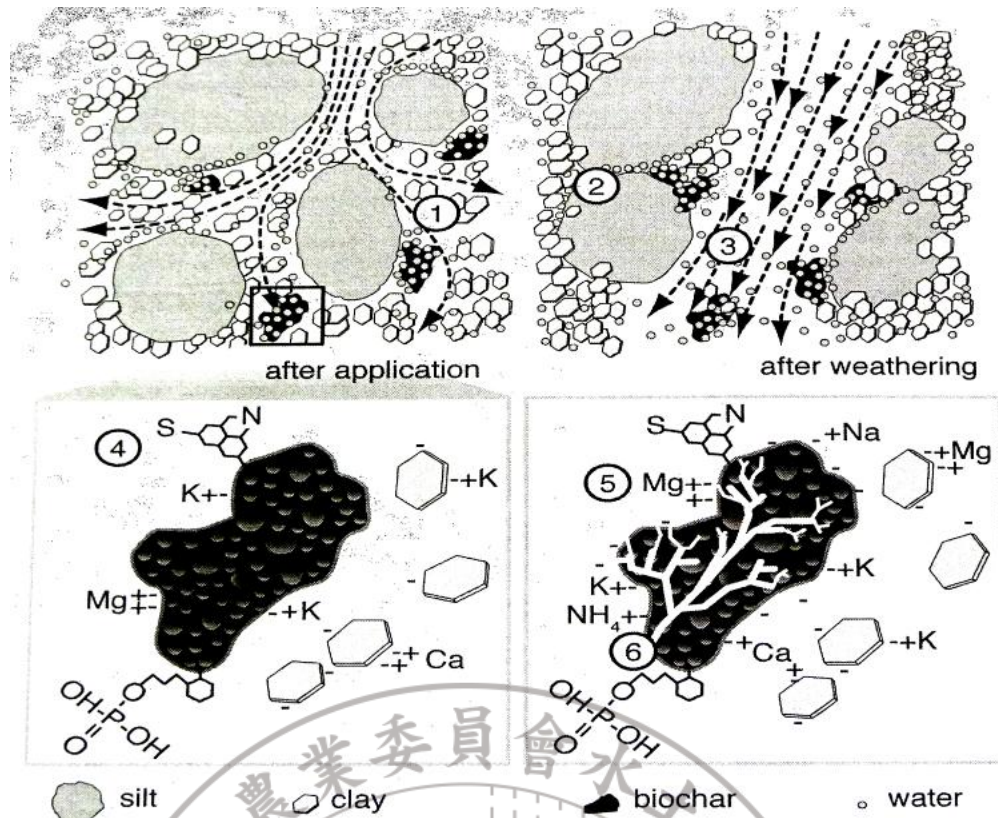


圖 2-1 添加生物炭後土壤構造與養份保持示意圖

(1: 生物炭添加初期，水分為生物炭所滯留；2 經風化後，生物炭膠結土壤，團粒穩定性漸佳；3: 優勢流產生，土壤導水性漸佳；4: 生物炭添加初期，吸附疏水性有機物與養份；5: 風化後，生物炭表面電荷增加，促使土壤保肥力增加，吸附更多鹽基離子；6: 微生物開始活躍生長。)(此圖摘自 Lehmann and Joseph(2009))。

學者名	發表年份	生物炭改良土壤特性
黃俊義	1986	利用 USLE 模式，推估山坡地 K 值及土壤流失量，並認為土壤有機質含量、團粒穩定度與飽和導水度為影響 K 值最重要之土壤性質。
黃俊義、萬鑫森	1994	
Baldock and Smernik	2002	不同有機材料和不同條件下所製成之生物炭將具有不同屬性，例如 pH、碳、氮、磷、與陽離子含量等特性皆不同。
Nguyen et al.	2004	
張俊斌	2003	改良泥岩土壤之首先應考慮增加有機質含量，將之形成較為穩固之團粒，改善泥岩土壤構造；同時增加陽離子交換容量，降低鹽分含量，進以增加植生機會。
Boix-Fayos et al.	2004	當林地或草生地轉變為農耕地時，有機質含量顯著減少而導致土壤沖蝕性增加。
Rodríguez et al.	2006	火山灰土壤為研究對象，指出土壤團粒穩定度與土壤中的次生礦物(鋁英石)為影響火山灰土壤可沖蝕性的主要因子。
Marris	2006	添加生物炭至土壤中可長期建立土壤中碳匯池(soil carbon sink)，同時，亦可改善土壤的功能，例如可改善土壤構造、團粒穩定性、導水度。
Kuzyakov et al.	2009	
Steinbeiss et al.	2009	
Tejada and Gonzalez	2007	碎棉花籽堆肥、橄欖油萃取過程之副產物、都市民生廢棄物與下水污泥作為鹽土改良劑，結果發現，農業廢棄物可大幅提升團粒穩定性，並有效減少總

		體密度與土壤沖蝕量，主要原因為農業廢棄物含大量之腐植酸(humic acids)。
Chan et al.	2007	土壤經添加生物炭後，可有效改善土壤之保肥能力，並增加土壤固碳能力。
Chan et al.	2008	利用家禽廢棄物製成之生物炭，以 10t/ha 的添加量下，發現可明顯改善地中海地區農地的生產量，主要乃由於生物炭可增加養分涵養量，尤其是含氮量的顯著增加。
Lehmann and Joseph	2009	增加土壤中微生物活性及減少養份淋洗損失，進而促進植物生長及擴展。
Joseph et al.	2010	增加土壤中微生物活性及減少養份淋洗損失，進而促進植物生長及擴展。

資料來源：本計畫彙整



2.2 研究區域基本資料

一、 研究區域概況-地理位置

台灣本島的泥岩惡地分布：一為曾文溪以南的臺南、高雄市境的古亭坑層泥岩；二為台東大橋以北，卑南溪以東的利吉層泥岩；三為恆春半島的墾丁層泥岩。

本計畫研究範圍為臺灣泥岩主要分部地區臺南及高雄地區，如圖 2-2，泥岩面積約 774.79 平方公里，厚度數千尺以上，泥岩主要成分含有伊來石、綠泥、石英、碳酸鈣……等；泥岩顆粒細小，且顆粒間的膠結性疏鬆，透水性低，濕則變得軟滑、黏稠狀，遇雨則順坡流下，形成雨溝及蝕溝。為此本計畫於此地區建置 USLE 公式之標準試區，以生物炭來改良其土砂流失量。

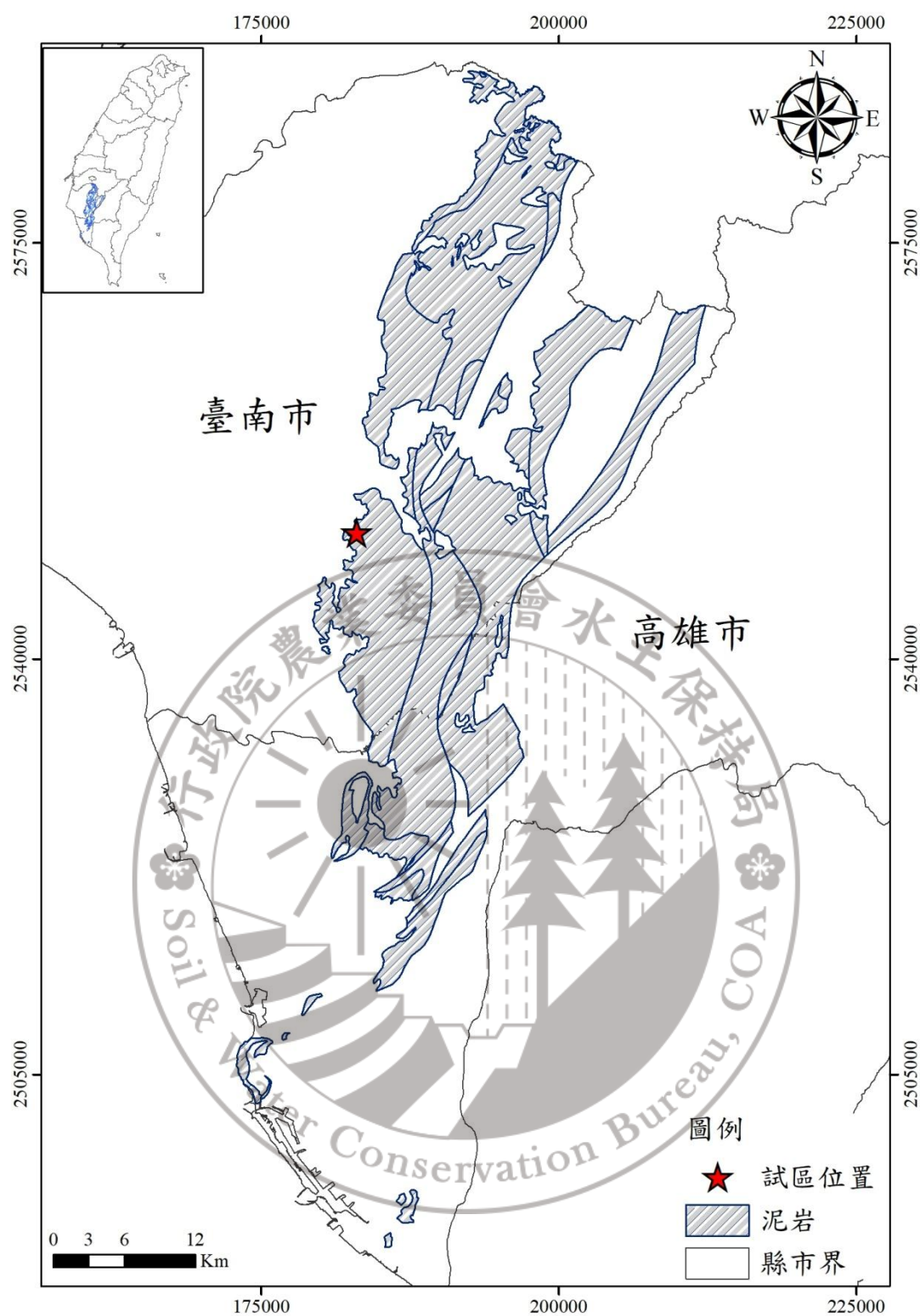


圖 2-2 研究區域地理位置圖

二、 基本資料蒐集

(一)地文資料

1. 高程

本計畫利用國土測繪中心所繪製 20 公尺×20 公尺的數值高程模型(DEM)地形資料，進行臺南、高雄泥岩地區之高程分析，高程分布與分析結果如圖 2-3。

從表 2-1 中可以看出高程在 100 公尺以下所涵蓋面積約為 456.23 平方公里，佔 58.88%；100 公尺至 500 公尺之間約為 312.92 平方公里，佔 40.39%；500 公尺至 1,000 公尺之間約為 5.64 平方公里，佔 0.73%。

表 2-1 本計畫研究區域高程分布表

高程(m)	面積(km ²)	百分比(%)
0 - 100	456.23	58.88
100 - 500	312.92	40.39
500 - 1,000	5.64	0.73
總計	774.79	100.00

資料來源：本計畫彙整

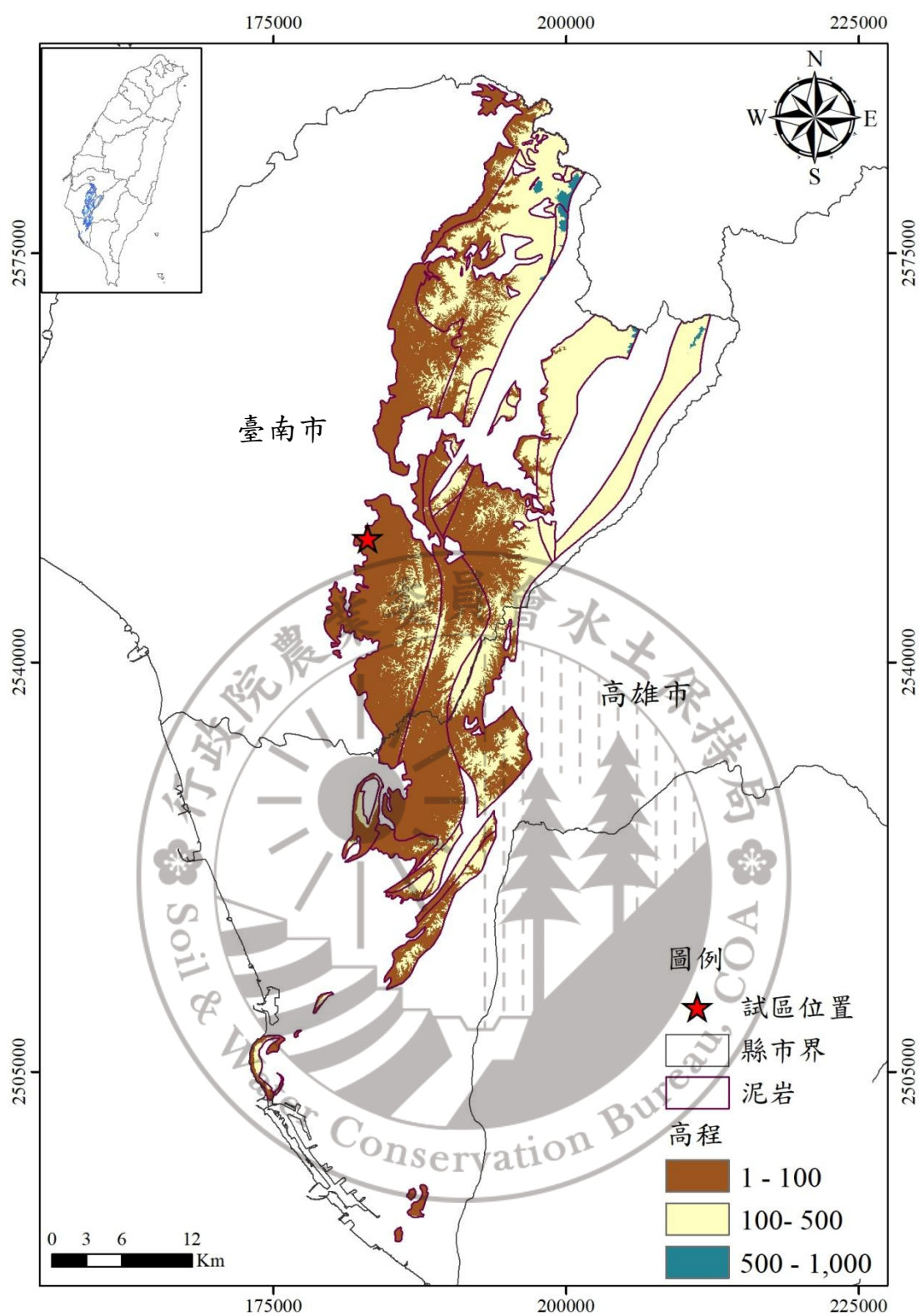


圖 2-3 本計畫研究區域高程分布

2. 地形與地勢

根據泥岩地區之 20 公尺×20 公尺 DEM 資料進行研究區域之坡度與坡向分析。坡度分析結果如表 2-2 所示，從表中可以得知研究地區主要以坡度介於 15%-30%所涵蓋面積佔最多，為 27.89%(216.10 平方公里)，其次為 5%-15%之間佔 18.92%(146.57 平方公里)。坡度三級坡(小於 30%)以下所含涵蓋面積約為 448.09 平方公里，佔 57.83%；坡度超過三級坡面積約為 326.7 平方公里，佔 42.17%。坡向分析結果如表 2-3 所示，從表中可以看出，研究區域內西方向的坡向佔的面積最多為 122.66 平方公里，佔 15.83%，其次為西北向坡向為 114.74 平方公里，佔 14.81%。坡度與坡向分布情形如圖 2-4 及圖 2-5 所示。從坡度圖中可以明顯看出，研究地區坡度變化較大在東半部地區。

表 2-2 本計畫研究區域坡度分布表

坡度(S)(%)	面積(km ²)	百分比(%)
$S \leq 5\%$ (一級坡)	85.42	11.02
$5\% < S \leq 15\%$ (二級坡)	146.57	18.92
$15\% < S \leq 30\%$ (三級坡)	216.10	27.89
$30\% < S \leq 40\%$ (四級坡)	131.76	17.01
$40\% < S \leq 55\%$ (五級坡)	127.11	16.41
$55\% < S \leq 100\%$ (六級坡)	66.00	8.52
$S > 100\%$ (七級坡)	1.84	0.24
總計	774.79	100.00

資料來源：水土保持技術規範及本計畫彙整

表 2-3 本計畫研究區域坡向分析表

坡向	面積(km ²)	百分比(%)
北	92.65	11.96
東北	75.18	9.70
東	81.44	10.51
東南	87.51	11.29
南	93.28	12.04
西南	107.33	13.85
西	122.66	15.83
西北	114.74	14.81
總計	774.79	100.00

資料來源：水土保持技術規範及本計畫彙整

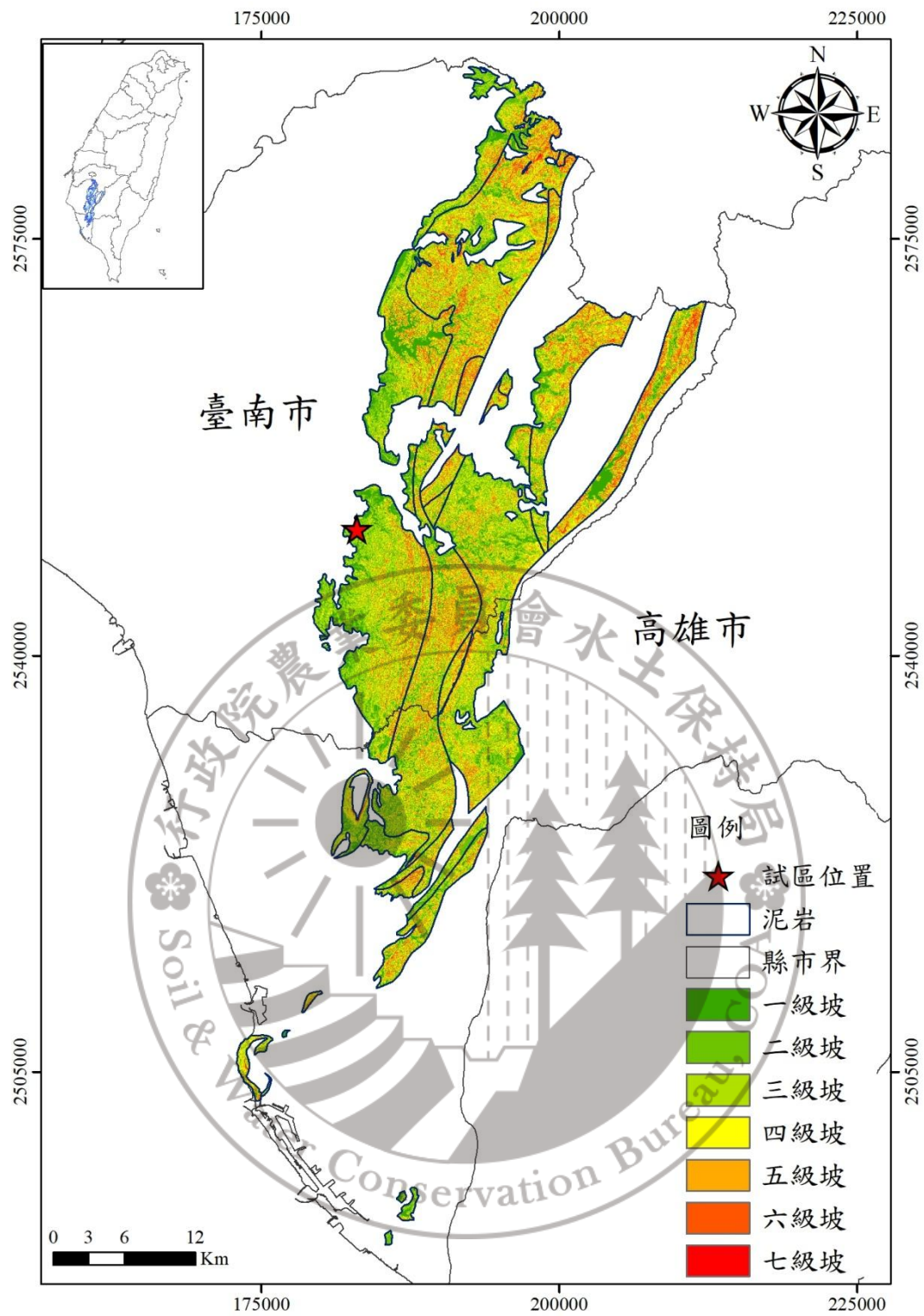


圖 2-4 本計畫研究區域坡度分布圖

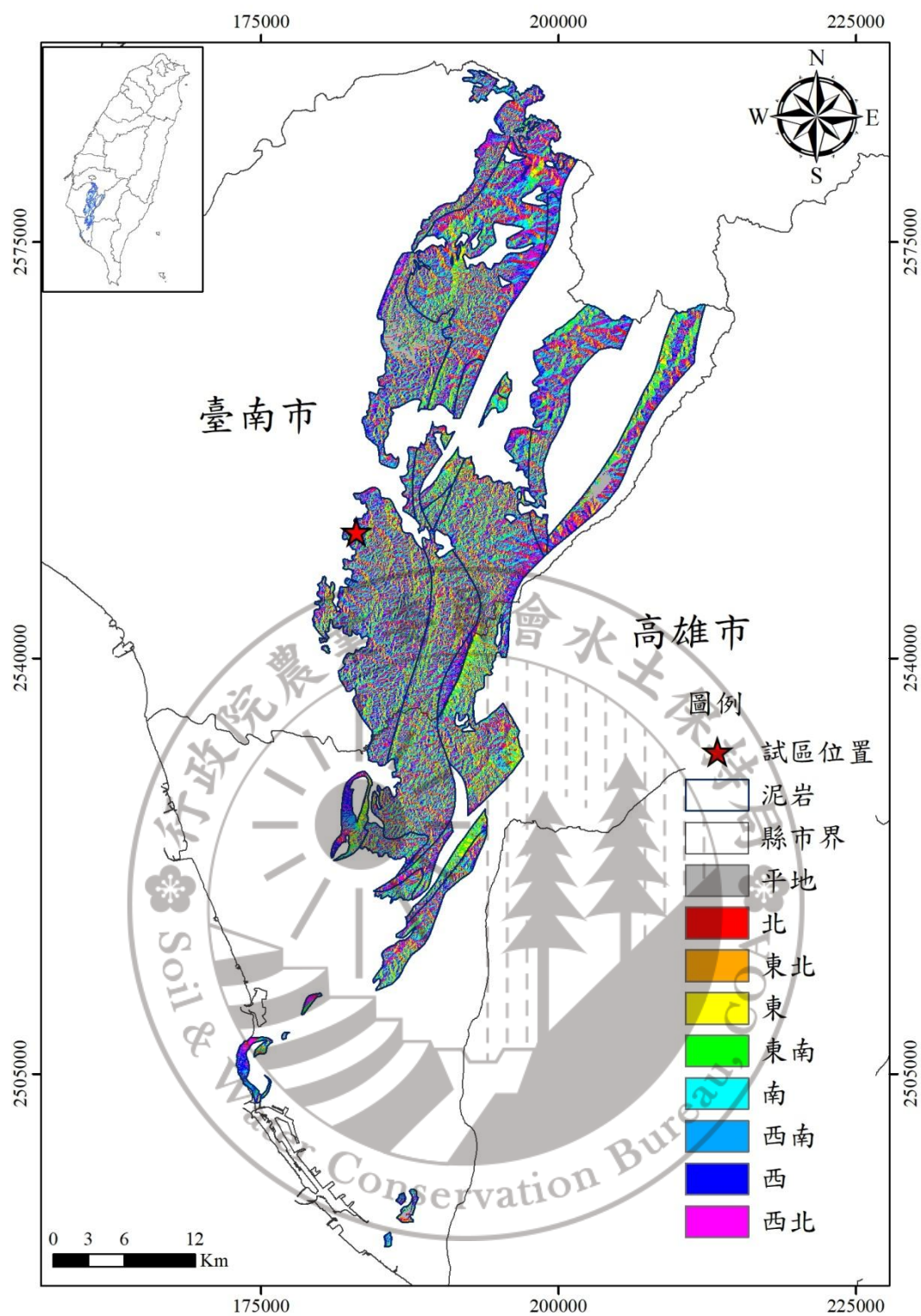


圖 2-5 本計畫研究區域坡向分布圖

三、 崩塌資料

本計畫蒐集泥岩地區歷年颱風事件後之衛星影像，由林務局委託成功大學，以當年度全島鑲嵌福衛二號衛星影像，建立自動判釋崩塌地作業標準，繪製崩塌地判釋最小面積為 0.1 公頃。本計畫根據所蒐集的歷年(2007-2016 年)衛星影像，利用 ArcGIS 進行研究區域崩塌地判釋，並採用 Khazai & Sitar(2000)所提出崩塌地坡度與崩塌深度的關係表，如表 2-4 所示，藉此推估崩塌地崩塌土方量。本計畫研究區域歷年崩塌地分析項目包含總崩塌面積、最大崩塌面積、崩塌個數與崩塌體積，透過此分析可得知近年來研究區域，在歷年風災過後之崩塌地變化情形，如表 2-5 所示。從表中顯示研究區域若以總崩塌面積與崩塌體積來衡量崩塌發生的嚴重性，則 2010 年為最嚴重的年份，其原因為 2009 年莫拉克颱風帶來豐沛的雨量，造成研究地區大面積的崩塌，各個崩塌相關資料快速攀升，其崩塌面積約為 1,638.77 公頃，最大崩塌面積約在 95.27 公頃，崩塌個數為 1,690 個，總崩塌體積 32,353,095 立方公尺；而從 2010 年至 2016 年總崩塌面積有減少現象，說明集水區內當年度之部分崩塌地可能已有植生復育，顯示出該年之邊坡狀況較上一年度來的穩定。

表 2-4 崩塌深度估計參考表

坡面坡度(°)	推估深度 (m)
	Khazai and Sitar(2000)
<30	2.0
30~40	1.5
40~60	1.0
>60	0.5

資料來源：Khazai and Sitar(2000)

表 2-5 本研究區域內 2007~2016 年崩塌地變化情形

年度	總崩塌面積 (ha)	最大崩塌面積 (ha)	崩塌 個數	崩塌體積(m^3)
2007	1,353.77	32.07	1,744	26,801,064
2008	763.13	18.45	790	15,113,589
2009	750.50	14.84	1,077	14,838,427
2010	1,638.90	95.27	1,690	32,353,095
2011	904.82	14.40	2,180	17,834,730
2012	659.93	12.67	1,152	12,949,798
2013	880.98	25.73	1,169	17,334,825
2014	807.37	16.61	1,608	16,437,191
2015	933.96	29.31	1,347	19,295,282
2016	862.24	33.88	1,415	17,012,212
資料來源：林務局及本計畫彙整				

2.3 歷史降雨資料蒐集及特性分析

一、 歷史降雨資料蒐集

蒐集鄰近計畫範圍臺南、高雄泥岩分布地區共 24 個中央氣象局雨量站，10 分鐘雨量資料(2002 年至 2017 年)及各雨量站設站(1992-1993)後至 2017 年之 60 分鐘等間隔降雨資料，做為後續各項分析之參考依據。各雨量站基本資料及分布位置如表 2-6 及圖 2-6 所示，而臺南、高雄泥岩地區年平均降雨量空間分布圖，如圖 2-7 所示。

從表 2-6 中可以看出，台南市有 17 個雨量站；高雄市有 7 個雨量站。雨量站海拔高度在 100 公尺以下者，有 17 個雨量站(70.83%)；100 公尺至 1,000 公尺者，有 6 個雨量站(25%)；1,000 公尺以上者，有 1 個雨量站(4.17%)。年平均雨量最大值發生在大棟山雨量站為 3,292 公釐，超過 2,000 公釐有 18 個雨量站(75%)；超過 3,000 公釐有 2 個雨量站(8.33%)。藉由研究區域內雨量站資料蒐集，以提供不同重現期距之重要計算依據，並可作為後續對泥岩潛勢分布圖之依據。

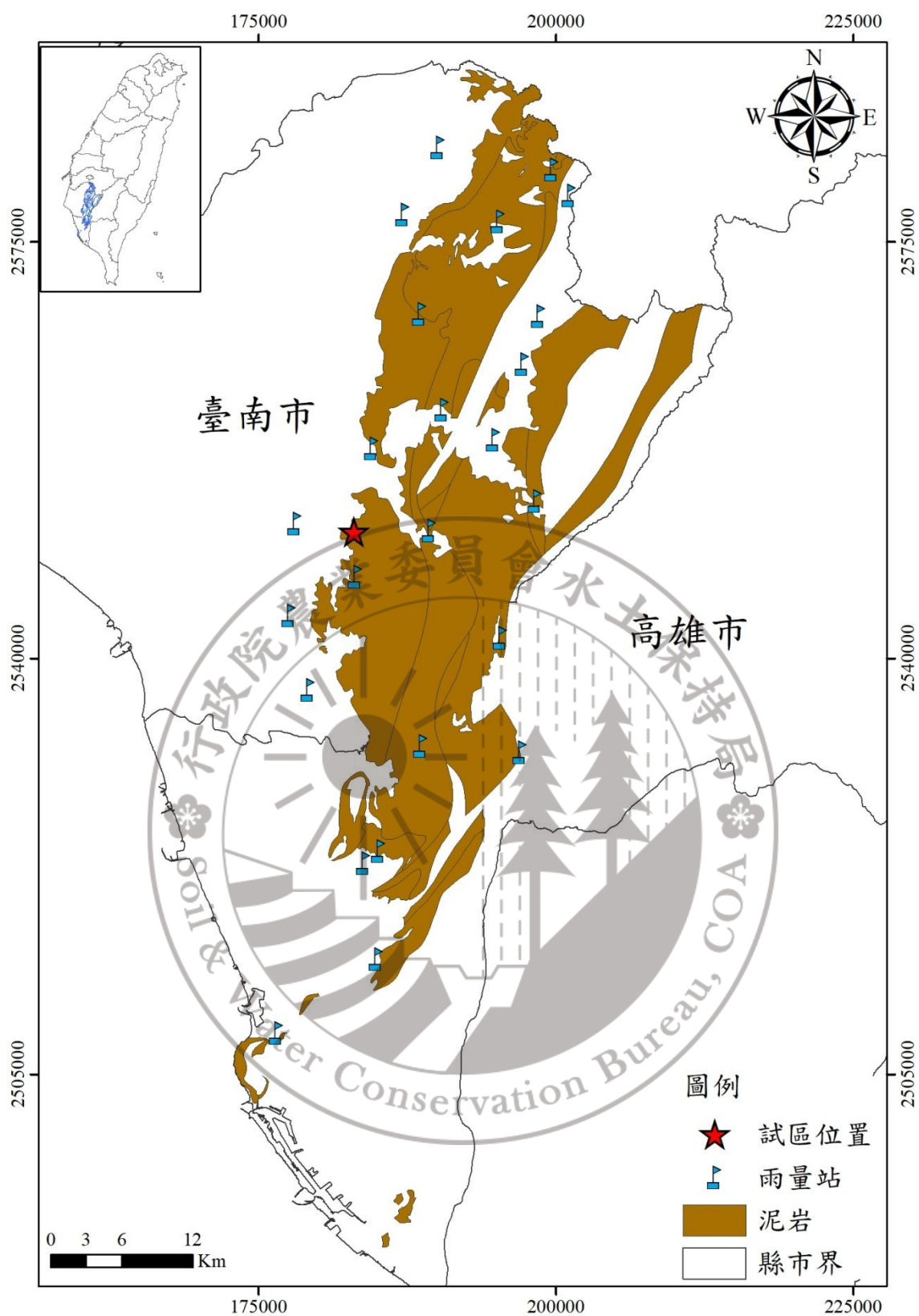


圖 2-6 臺南、高雄泥岩地區 24 個中央氣象局雨量站分布位置

表 2-6 臺南、高雄泥岩地區 24 個中央氣象局雨量站基本資料表

站名	站碼	縣市	鄉鎮區	TWD97 坐標系統		高度 (m)	年平均降雨 量(mm)
				X97	Y97		
大內	C1O860	臺南市	大內區	184595	2557734	61	2,098
大棟山	C1O870	臺南市	白河區	201139	2578865	1,246	3,292
王爺宮	C1O840	臺南市	六甲區	188511	2568853	144	2,088
左鎮	C1O820	臺南市	左鎮區	188946	2550456	30	2,231
玉井	C0O930	臺南市	玉井區	194754	2558308	42	2,481
白河	C1X030	臺南市	白河區	191599	2580346	33	2,158
東河	C1X050	臺南市	東山區	187125	2577288	19	2,026
東原	C1X040	臺南市	東山區	195107	2576641	232	2,432
虎頭埤	C1O970	臺南市	新化區	183151	2546789	60	2,139
曾文	C0O810	臺南市	楠西區	198603	2568630	174	2,998
媽祖廟	C1O990	臺南市	歸仁區	177554	2543524	23	1,945
新市	C1O980	臺南市	新市區	178133	2551335	76	1,947
楠西	C1O920	臺南市	楠西區	197224	2564667	150	2,497
環湖	C1O850	臺南市	大內區	190440	2560817	44	2,277
關子嶺	C0X020	臺南市	白河區	200065	2580591	403	3,193
北寮	C1O830	臺南市	南化區	198207	2553189	105	2,605
沙崙	C1N000	臺南市	歸仁區	179148	2537333	25	1,807
木柵	C1V360	高雄市	內門區	195290	2541633	94	2,498
古亭坑	C0V370	高雄市	田寮區	188644	2532585	30	2,211
左營	C1V430	高雄市	左營區	177585	2508702	13	1,900
尖山	C1V390	高雄市	燕巢區	185100	2523741	60	2,175
竹子腳	C1V400	高雄市	燕巢區	182591	2523721	51	2,078
旗山	C1V330	高雄市	旗山區	198100	2530857	63	2,504
鳳雄	C1V420	高雄市	大社區	183473	2516827	55	2,080

資料來源：中央氣象局及本計畫彙整

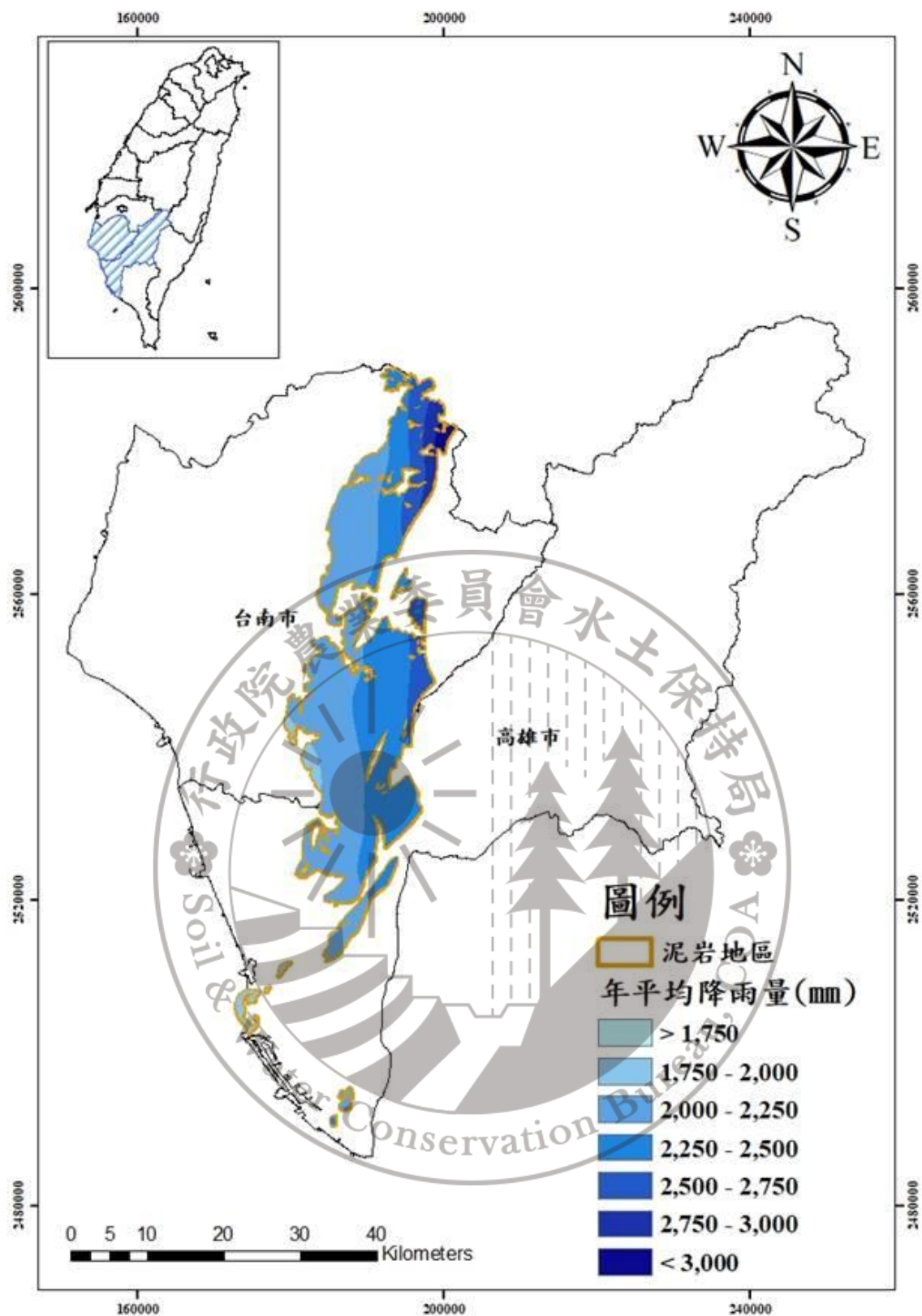


圖 2-7 臺南、高雄泥岩地區年平均降雨量空間分布圖

二、 降雨特性分析

蒐集鄰近計畫範圍臺南、高雄泥岩分布地區共 24 個中央氣象局雨量站，10 分鐘雨量資料(2002 年至 2017 年)，以 Wischmeier and Smith(1958)之單場有效降雨事件定義，進行雨場分割後，各雨量站有效降雨事件之降雨特性分析結果如表 2-7 所示。

表中顯示，有效降雨事件共有 11,123 場，各站範圍介於 235~744 場之間，平均為 463 場，最多發生在大凍山雨量站 744 場；單場平均降雨量範圍介於 57~70 公釐之間，平均約 65 公釐；單場平均降雨延時範圍介於 10~16 小時之間，平均約 13 小時，平均值最大出現在左營雨量站；在平均降雨動能方面，其範圍介於 13~17 MJ/ha 之間，平均約 15 MJ/ha；單場平均降雨沖蝕指數範圍介於 670~1,133 MJ mm /ha hr 之間，平均約 867 MJ mm /ha hr，平均值最大為曾文雨量站；年平均降雨沖蝕指數範圍介於 17,723~41,432 MJ mm /ha hr yr 之間，平均值為 26,874 MJ mm /ha hr。臺南、高雄泥岩地區年平均降雨沖蝕指數空間分布圖，如圖 2-8 所示。

另外，本計畫目前以水文統計方法計算臺南及高雄地區 24 個雨量站不同重現期距之年平均降雨沖蝕指數值，並列出各雨量站

之最佳水文統計方法，如表 2-8 所示，此結果未來可提供相關單位作為研究或應用之參考依據。



表 2-7 臺南、高雄泥岩地區 24 個雨量站(2002-2017)有效降雨事件分析結果

雨量站	單場有效 降雨事件 (場)	單場平均 降雨量 (mm)	單場平均 降雨延時 (hr)	單場平均 降雨動能 (MJ/ha)	單場平均 降雨沖蝕 指數(a)	年平均降雨 沖蝕指數 (b)
大內	422	65	13	15	839	23,616
大棟山	744	61	12	14	750	34,873
王爺宮	460	61	12	14	797	24,449
左鎮	471	64	12	15	824	24,255
玉井	532	66	12	16	886	29,466
白河	489	57	11	13	700	22,056
東河	415	60	15	14	670	17,723
東原	590	58	11	14	749	27,611
虎頭埤	410	66	13	15	867	23,706
曾文	585	70	11	17	1,133	41,432
媽祖廟	390	65	13	15	842	21,897
新市	401	67	13	16	816	21,825
楠西	547	65	12	15	913	31,169
環湖	454	64	12	15	811	24,565
關子嶺	707	61	10	15	927	40,961
北寮	451	63	12	15	902	33,905
沙崙	235	65	14	15	877	22,900
木柵	476	70	13	16	952	30,213
古亭坑	427	70	14	16	875	23,344
左營	346	66	16	15	892	22,021
尖山	412	69	15	16	912	23,475
竹子腳	382	69	15	16	1,009	25,720
旗山	469	70	15	17	901	28,983
鳳雄	308	69	14	16	967	24,815
平均	463	65	13	15	867	26,874

註：(a)表示單位：MJ-mm/ha-hr；(b)表示單位：MJ-mm/ha-hr-yr

資料來源：本計畫彙整

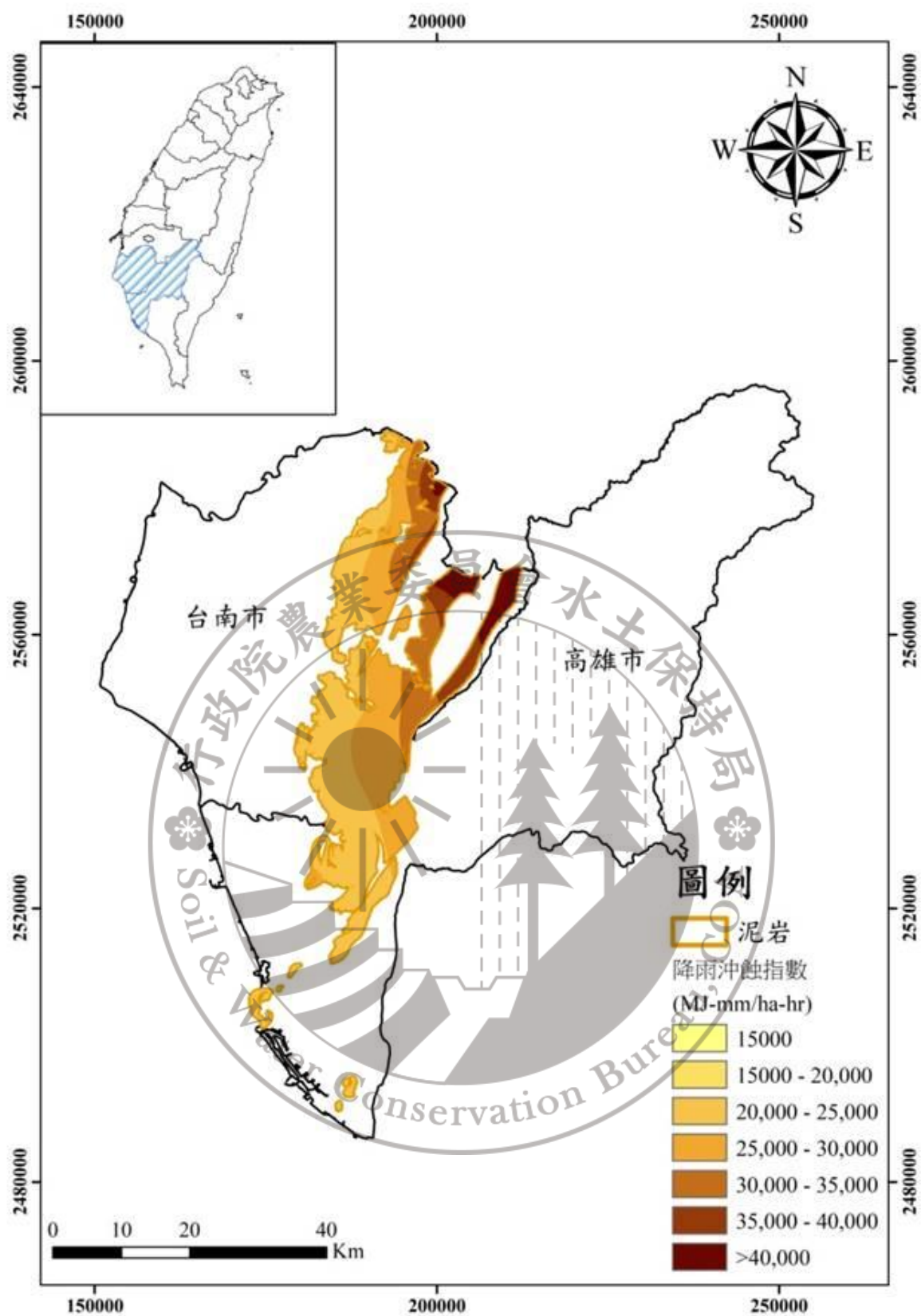


圖 2-8 臺南、高雄泥岩地區降雨沖蝕指數空間分布圖

表 2-8 24 個中央氣象局雨量站不同重現期距年平均降雨沖蝕指數(Ry)

縣市	雨量站	不同重現期距之年降雨沖蝕指數 (MJ-mm/ha-hr-yr)				統計分析方法
		2 年	5 年	20 年	100 年	
台南市	大內	22,352	37,407	56,937	78,588	極端值 I
	大棟山	34,102	49,135	68,635	90,253	極端值 I
	王爺宮	23,229	37,270	55,484	75,677	極端值 I
	左鎮	22,369	36,478	54,780	75,069	極端值 I
	玉井	28,008	47,068	71,792	99,202	極端值 I
	白河	20,016	35,130	54,735	76,470	極端值 I
	新市	11,884	20,025	32,964	50,304	對數常態 II
	沙崙	13,274	21,409	31,962	43,661	極端值 I
	東河	15,491	23,705	34,360	46,173	極端值 I
	東原	24,981	40,281	60,128	82,131	極端值 I
	虎頭埤	15,793	25,791	43,292	69,950	對數皮爾遜 III
	曾文	39,298	63,632	95,197	130,190	極端值 I
	媽祖廟	17,614	28,875	43,484	59,680	極端值 I
	楠西	26,479	41,259	68,359	112,202	對數皮爾遜 III
	環湖	22,623	38,016	57,983	80,119	極端值 I
	關子嶺	36,705	63,253	97,689	135,866	極端值 I
	北寮	31,201	53,890	82,631	114,827	極端值 I
高雄市	木柵	32,050	41,763	50,168	56,656	皮爾遜 III
	古亭坑	21,698	32,407	46,299	61,699	極端值 I
	左營	22,186	28,130	33,808	38,623	常態分佈
	尖山	22,055	37,327	57,137	79,098	極端值 I
	竹子腳	25,657	40,657	60,114	81,685	極端值 I
	旗山	21,292	35,095	53,001	72,851	極端值 I
	鳳雄	25,675	40,573	50,437	62,901	極端值 I

資料來源：本計畫彙整

三、土壤沖蝕性指數 K_m 蒐集分析

依據「106 年度氣候變遷下開發行為土砂估算模式之探討」中，蒐集臺南和高雄地區山坡地各 30 大土系作為基標土系，於野外進行土壤結構鑑定、且使用現地土壤導水裝置測定土壤導水度。土壤採樣後攜回實驗室進行土壤性質分析。將其分析結果代入 Wischmeier 公式進行推算並繪製成空間分布圖，其結果如圖 2-9 及圖 2-10 所示。

Wischmeier (Wischmeier and Smith, 1984)

$$K_m(\text{公制}) = 0.1317 \times K(\text{英制})$$

$$K_m = 0.1317 \times \frac{2.1M^{1.14}(10^{-4})(12-a) + 3.25(b-2) + 2.5(c-3)}{100}$$

其中：M=坞粒與極細砂(0.002~0.1mm)×(100%-黏粒%)；

a=有機質含量(%)；

b=土壤結構參數(如表 6.2)；

c=土壤滲透性參數(如表 6.3)。

※當土壤之有機質含量超過 4%時仍以 4%計算。

表 2-9 土壤結構參數

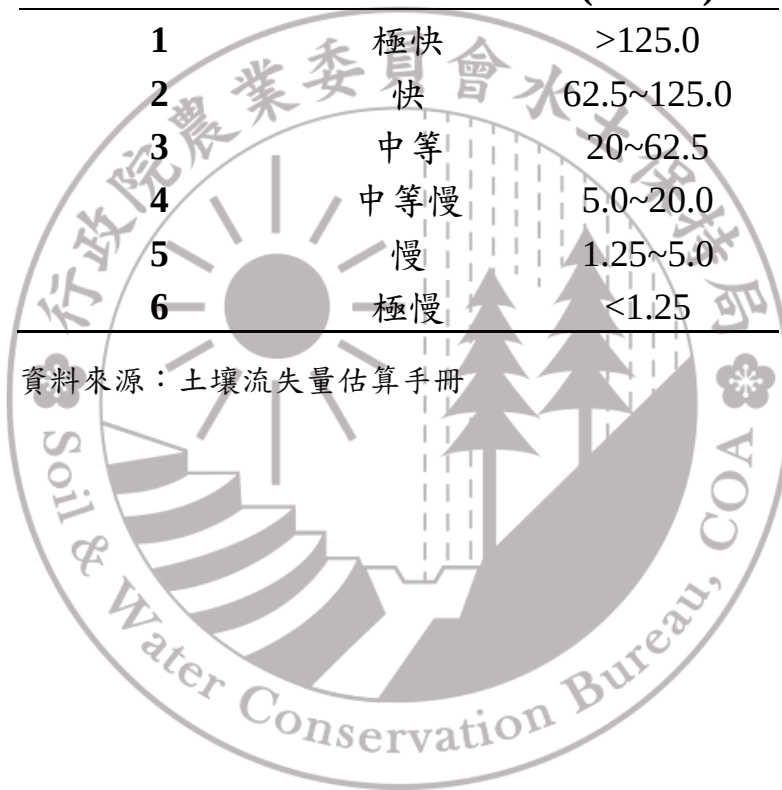
結構參數值	土壤結構	粒徑大小 (mm)
1	極細顆粒	<1.0
2	細顆粒	1.0~2.0
3	中或粗顆粒	2.0~10.0
4	塊狀、片狀或粗顆粒	>10.0

資料來源：土壤流失量估算手冊

表 2-10 土壤滲透性參數

滲透性參數值	滲透性	滲透速率 (mm/hr)
1	極快	>125.0
2	快	62.5~125.0
3	中等	20~62.5
4	中等慢	5.0~20.0
5	慢	1.25~5.0
6	極慢	<1.25

資料來源：土壤流失量估算手冊



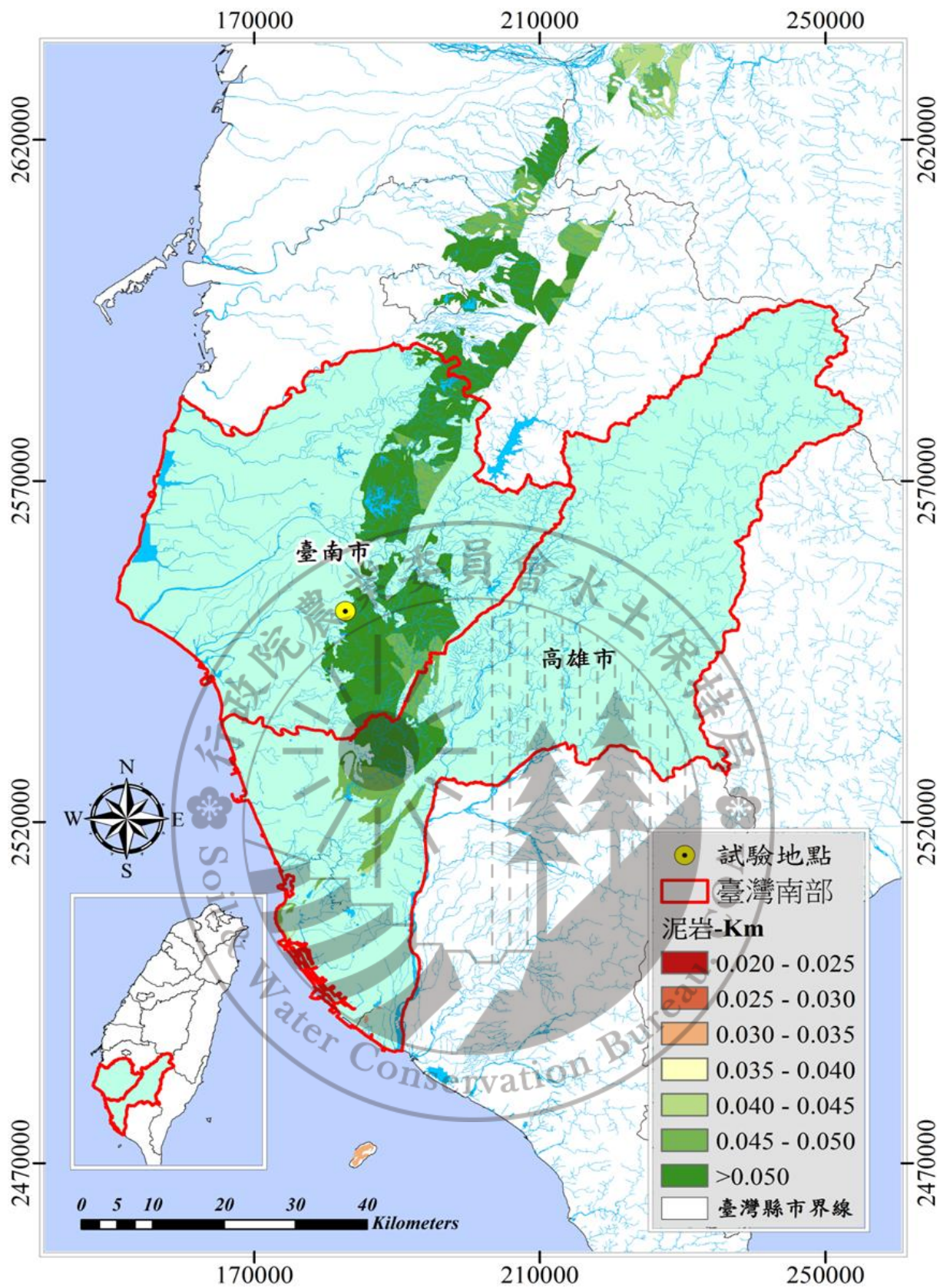


圖 2-9 臺南及高雄地區土壤沖蝕性指數分布圖

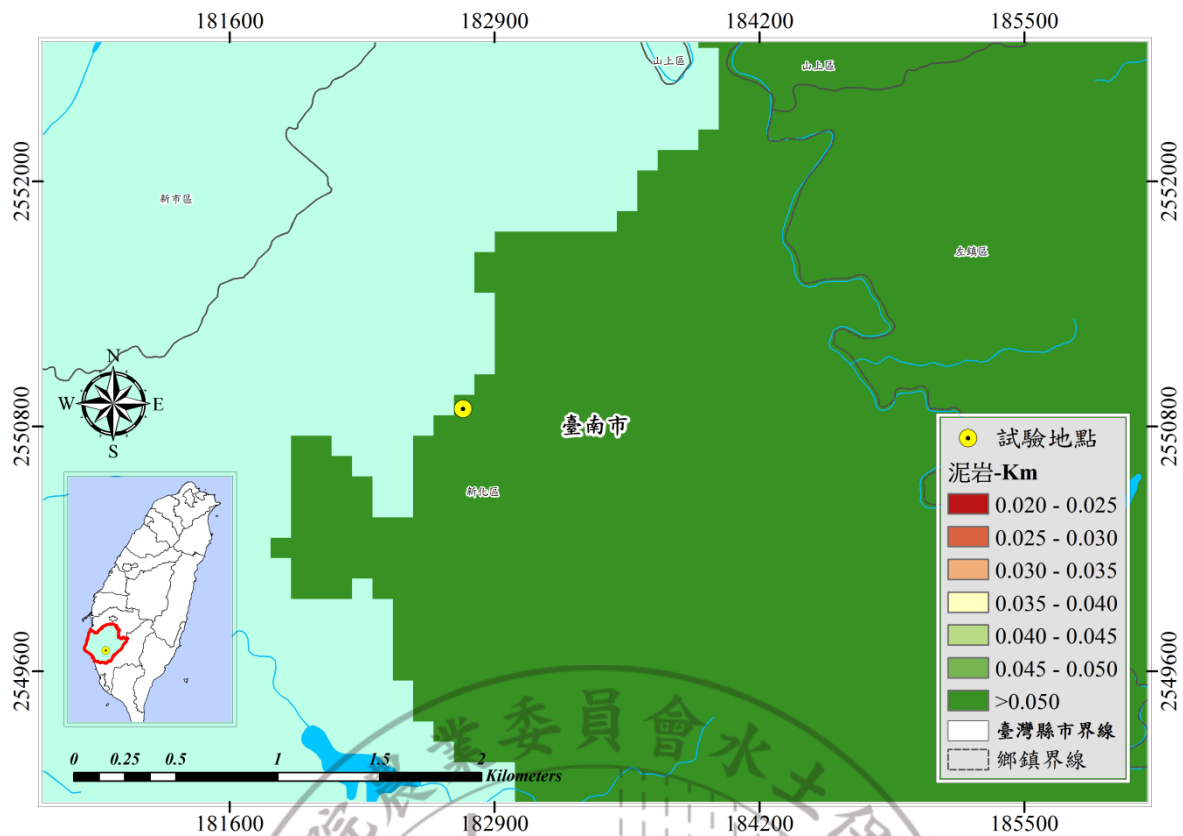


圖 2-10 臺南及高雄地區土壤沖蝕性指數分布圖(大比例)

四、 坡度坡長因子 LS 蒐集分析

本計畫採用 20 公尺×20 公尺網格大小進行 L 因子推算，因本計畫為標準試區(坡度為 9%、長度為 22.13 公尺)坡度坡長因子為 1，使用 20 公尺網格大小較接近標準試區長度，以增加準確性。S 因子採用 20 公尺×20 公尺網格大小進行坡度計算，再將資料帶入 S 因子的公式進行推算。S 因子之公式如下，而結果如圖 2-11 所示。

$$LS = \left(\frac{x}{22.13} \right)^m \times (10.8 \sin \theta + 0.03, \theta < 9\%)$$

$$LS = \left(\frac{x}{22.13} \right)^m \times \left(\left(\frac{\sin \theta}{0.0896} \right)^{0.6}, \theta \geq 9\% \right)$$

式中：X = 坡長的水平投影距離(m)； m 隨坡度變化，當 S < 1% 為 0.2；當 1% < S < 3% 為 0.3；當 3% < S < 5% 為 0.4；當 S > 5% 為 0.5；
 θ = 坡度(°)。

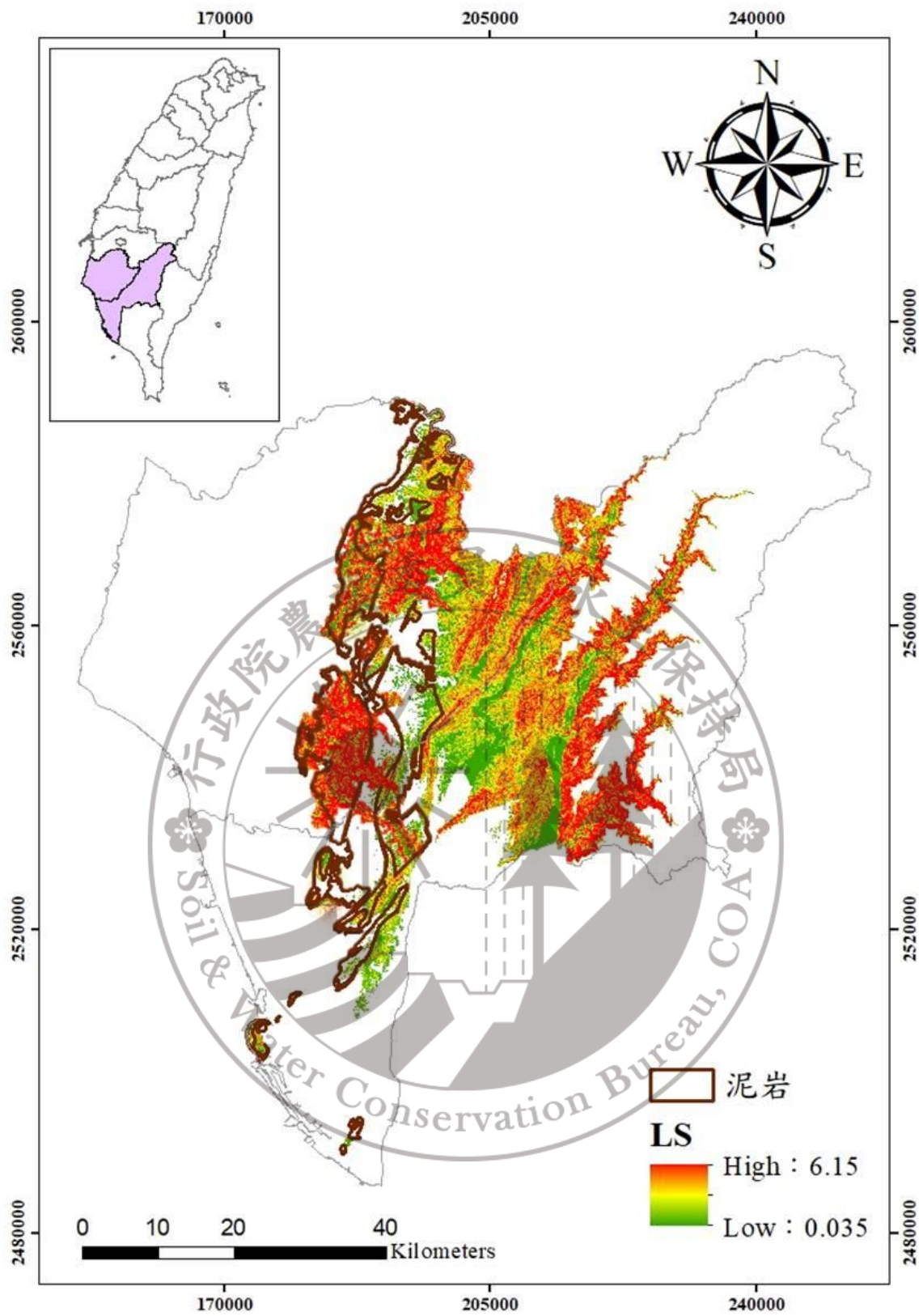


圖 2-11 臺南及高雄泥岩地區山坡地之坡度坡長因子 LS 空間分布圖

五、 作物與管理因子 C 蒐集分析

本計畫利用國立中央大學太空及遙測研究中心資源衛星接收站配合政府資料，運用法國 SPOT 5 衛星影像中 NDVI 值(值域-1~1)反向配置求取作物管理因子 C 值；NDVI 的定義為近紅外光波段與紅光段的差值除以兩者之和，NDVI 的數值在 0.1 到 0.6 之間變動，其數值取決於植物頂部的密度與綠度。當 NDVI 小於 0 時，表示地表為非植生情況下之土地利用，如裸露地、水體以及建屋用地等，其結果如圖 2-12 所示。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

式中，NIR，近紅外光；R，紅外光。



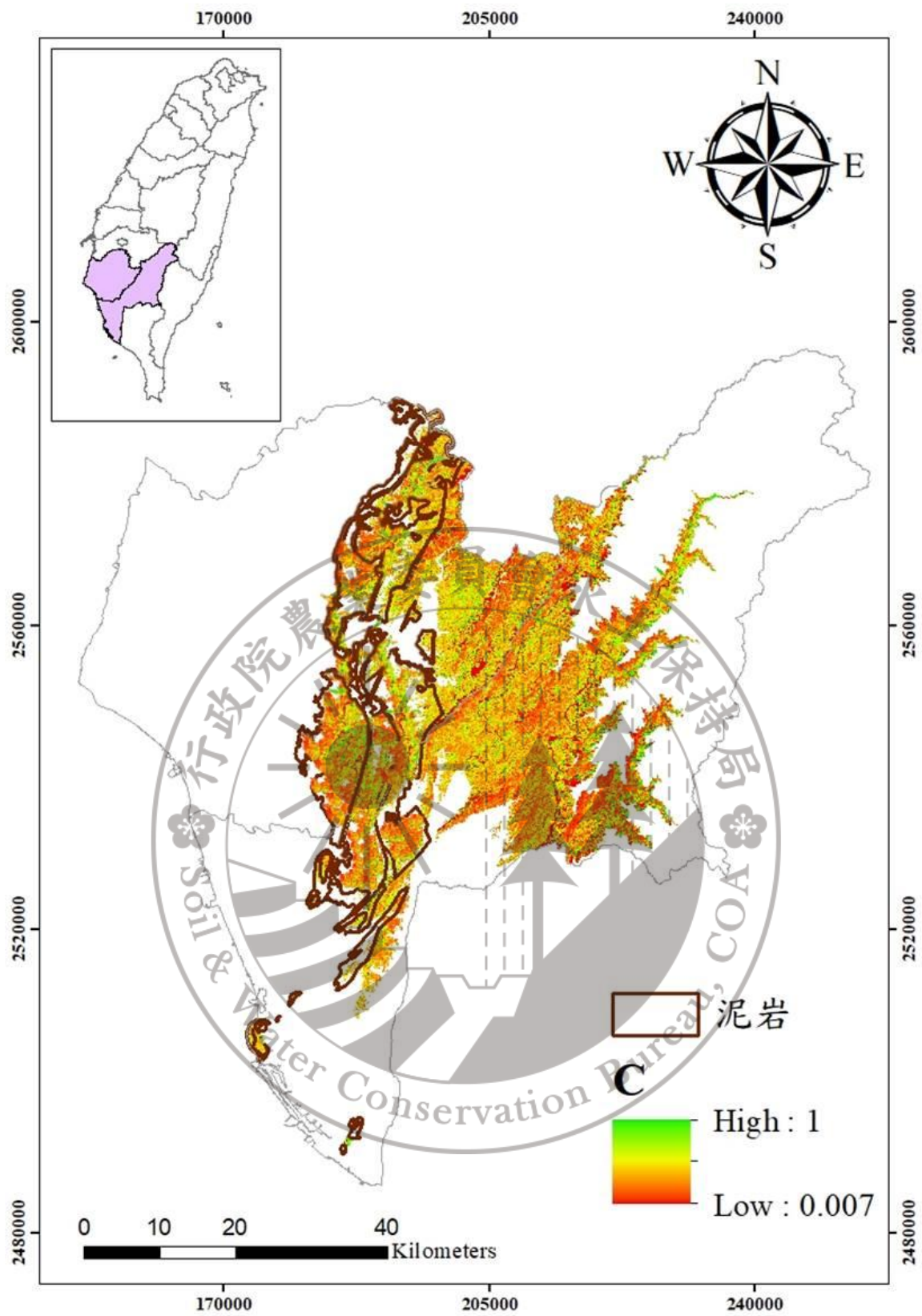


圖 2-12 臺南及高雄泥岩地區山坡地之作物與管理因子 C 空間分布圖

六、 水土保持處理因子 P 分析

水土保持處理因子為某特定水土保持處理下之土壤侵蝕量與處理前之土壤侵蝕量的比值。水土保持手冊[74](95)指出，對無任何水土保持處理場、棄土場或路砂及農地砂石開採處，P 值為 1.0，故本計畫將 P 值設定為 1.0。

七、 臺南及高雄泥岩地區土壤沖蝕潛勢分布

本計畫利用上述分析結果進行臺南及高雄地區的土壤沖蝕量潛勢之預測，亦繪製其土壤沖蝕潛勢分布圖。其中空間分布資料皆為 20 公尺×20 公尺網格資料，再利用 ArcGis 內的網格資料計算，最後使用 USLE 公式計算出土壤沖蝕量，以一般克利金 (ordinary Kriging) 法繪製土壤沖蝕量之分布圖，其結果如圖 2-13 所示。依據土壤沖蝕潛勢分布，FAO 分級標準(如表 2-11)，該地區的侵蝕量為極嚴重侵蝕。

表 2-11 土壤侵蝕強度分級標準

Severity class	Soil loss($\text{t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)
Low	0–5
Moderate	5–20
High	20–50
Very high	50–100
Severe	100–150
Extreme	150–716

資料來源：FAO (1986)土壤侵蝕強度分級標準



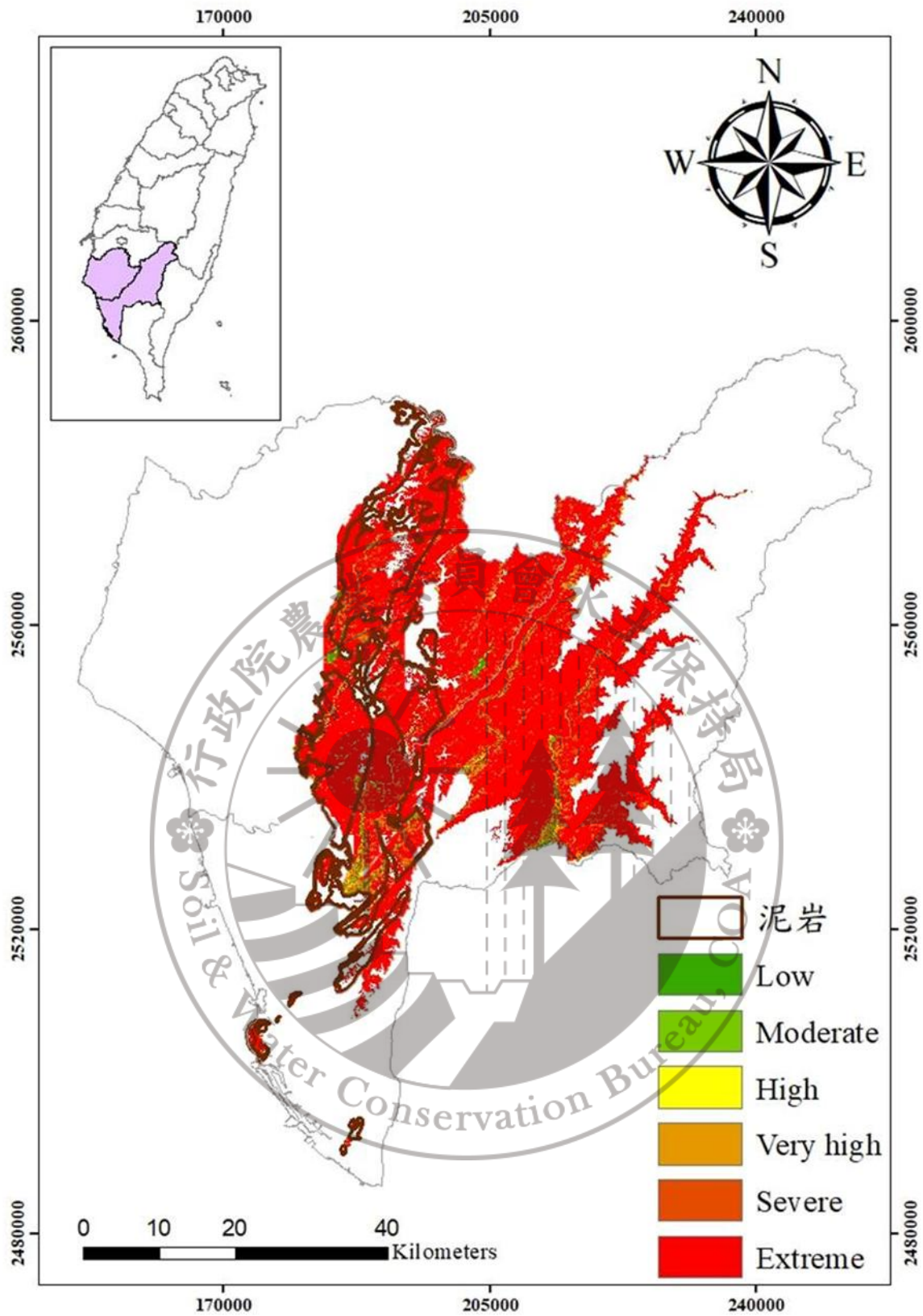


圖 2-13 臺南及高雄泥岩地區山坡地之土壤沖蝕潛勢分布



第參章 泥岩沖蝕標準試區建置與土砂流失量量測

3.1 至少建置 3 個泥岩沖蝕標準試區：長 22.13 公尺、寬 4 公尺、坡度 9%

本計畫於行政院農業委員會畜產試驗所之泥岩地區，建置 3 個泥岩侵蝕標準試區(長 22.13 公尺、寬 4 公尺、坡度 9%)，實際進行土砂流失量測定。

三個試區主要為對照組(無施用任何改良劑)、2% (w/w)木炭施用及 2% (w/w)稻殼炭施用。木炭及稻殼炭為 700℃ 以上的溫度熱裂解燒製。現地侵蝕標準試區下方設置收集槽，以供量測自然降雨之土砂流失量。本團隊於 2018 年 01 月 04 日與王仕賢場長一同前往現地會勘並選定合適地點，如圖 3-1。於 2018 年 04 月與畜產所的張世融先生和農改場的黃靜枝小姐一同前往現地會勘並更改試區地點，如圖 3-2，於 4 月 28 日將試區建置完成，並從五月份開始收集土砂收集槽之受侵蝕土砂，但因 6 月 14 日的大雨導致試區及土壤收集槽毀損，於 6 月 15 日進行第二次試區建置，但又因 7 月 2 日的豪雨導致試區的收集槽受水壓力而浮起，於 7 月 3 日進行第三次試區建置，最後於 7 月 8 日將試區建置完成。



圖 3-1 現地會勘



圖 3-2 現地會勘並更改試區地點



一、第一次試區建置

本團隊於4月27日至畜產試驗所建置泥岩侵蝕標準試區(長22.13公尺、寬4公尺、坡度9%)，首先標定試區範圍並進行除草，如圖3-3(a)，接著將泥岩地區之表土翻鬆，如圖3-3(b)，再將厚0.1公分的鋼板插入土中，如圖3-3(c)，最後將2%稻殼炭與2%木炭分別加入試區中，並設置土砂收集槽，於4月28日將試區建置完成，5月份開始監測土砂流失量，如圖3-3(d)。

水土保持局臺南分局陳慧玲工程員於6月12日至現場會勘，建議更換土砂收集槽及改善收集土砂方式，如圖3-3(e)，而本團隊立即於6月13日至試區將土砂收集槽更換成圓形普力桶(尺寸：上部直徑119公分、底部直徑111公分、高度59公分、厚度0.4公分)，並改善土砂收集方式，如圖3-3(f)。





圖 3-3(a) 標定試區範圍



圖 3-3(b) 將表土翻鬆



圖 3-3(c) 將鋼板插入土中



圖 3-3(d) 試區建置完成



圖 3-3(e) 承辦現場會勘



圖 3-3(f) 更換收集槽

圖 3-3 第一次試區建置歷程

二、 第二次試區建置

泥岩標準試區於4月28日完成，並於5月份開始監測土砂流失量，但因6月14日的降雨量達74公釐，導致試區內嚴重積水、收集槽受水壓力而浮起、鋼板也因土壓力而變形，如圖3-4及圖3-5所示，於6月15日進行第二次試區建置。

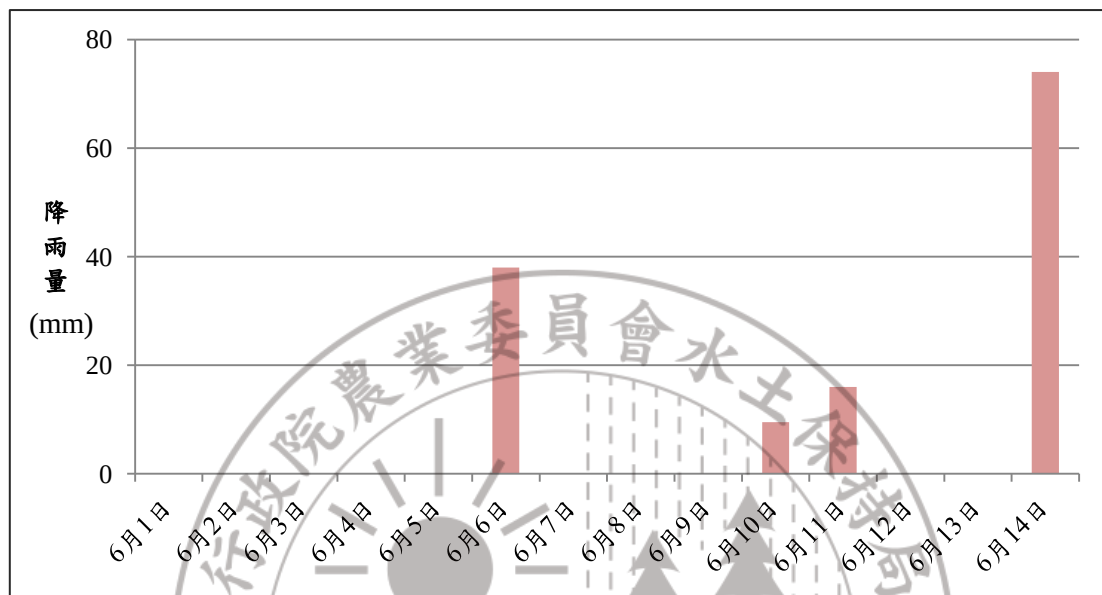


圖 3-4 日降雨量統計圖



圖 3-5 標準試區現況

本團隊於 6 月 16 日進行第二次試區建置，首先將原本的鋼板(厚度 0.1 公分)移除，重新設置較厚的鋼板(厚度 0.6 公分)，如圖 3-6(a)及圖 3-6(b)，再將試區整個往上移 5 公尺，並重新標定試區範圍，如圖 3-6(c)，接著將鋼板重疊處以鋼釘固定，使鋼板較不容易因土壓力而變形，如圖 3-6(d)。於 6 月 25 日將圓形塑膠普力桶之土砂收集槽更換成方形鋼桶(尺寸：2m*1m*1.5m)，如圖 3-6(e)，再將土回填至土砂收集槽兩側，如圖 3-6(f)，接著重新施加稻殼炭及木炭，如圖 3-6(g)，並運用耕犁機將生物炭均勻攪拌，如圖 3-6(h)。因標準試區位置高於試區外，覆蓋帆布為防止雨水沖刷，使試區外土壤的邊坡穩定並防止區外雨水流入試區，如圖 3-6(i)，最後於試區兩側挖出一條淺溝，讓水往下排出，避免試區內淹水，如圖 3-6(j)，於 6 月 27 日將試區重新建置完成，如圖 3-6(k)。

水土保持局臺南分局洪政義秘書、林瑞仁課長及陳慧玲工程員也於 6 月 27 日至台南泥岩標準試區會勘，如圖 3-7。

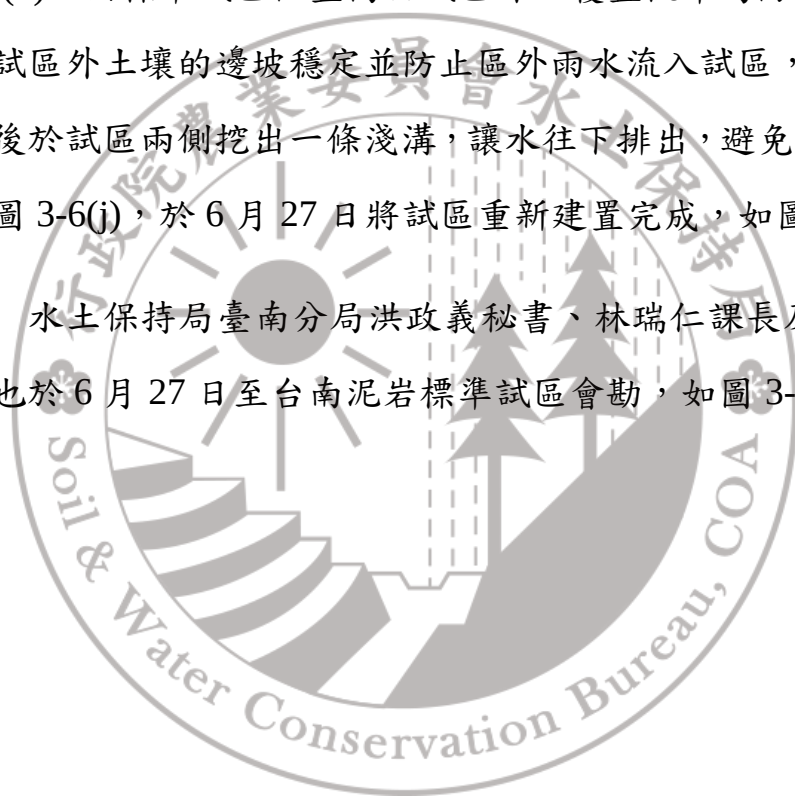




圖 3-6(a) 移除鋼板



圖 3-6(b)重新設置較厚的鋼板



圖 3-6(c) 重新標定試區範圍



圖 3-6(d)鋼板交接處以鋼釘固定



圖 3-6(e) 更換收集槽



圖 3-6 第二次試區建置歷程



圖 3-6(f) 將土回填



圖 3-6(g) 施加生物炭



圖 3-6(h) 運用耕犁機將生物炭均勻攪拌



圖 3-6(i) 將試區最上方以防水帆布覆蓋避免土壤流失



圖 3-6 第二次試區建置歷程(續)



圖 3-6(j) 試區兩側挖出一條淺溝

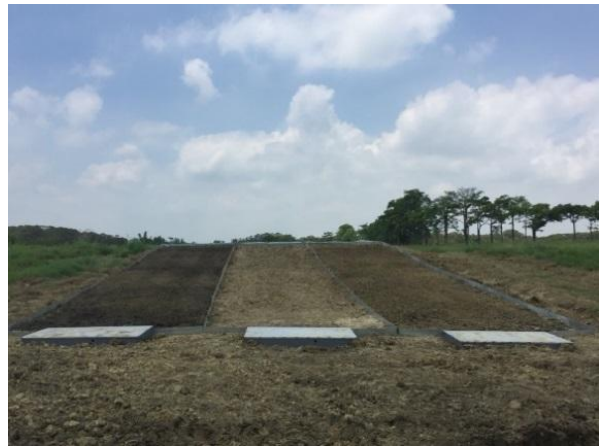


圖 3-6(k) 第二次試區建置完成

圖 3-6 第二次試區建置歷程(續)



圖 3-7 臺南分局人員試區會勘

三、第三次試區建置

第二次建置泥岩標準試區於6月27日完成，但又因7月2日的日降雨量達216.5公釐，導致試區的土壤收集槽受水壓力而浮起，試區外積水嚴重，如圖3-8及圖3-9，於7月3日進行第三次試區建置，改善試區外積水，並將土壤收集槽底部澆置混凝土，使鋼桶與混凝土連接。在澆置混凝土前，先計算混凝土塊體積，避免土壤收集槽受浮力而破壞。

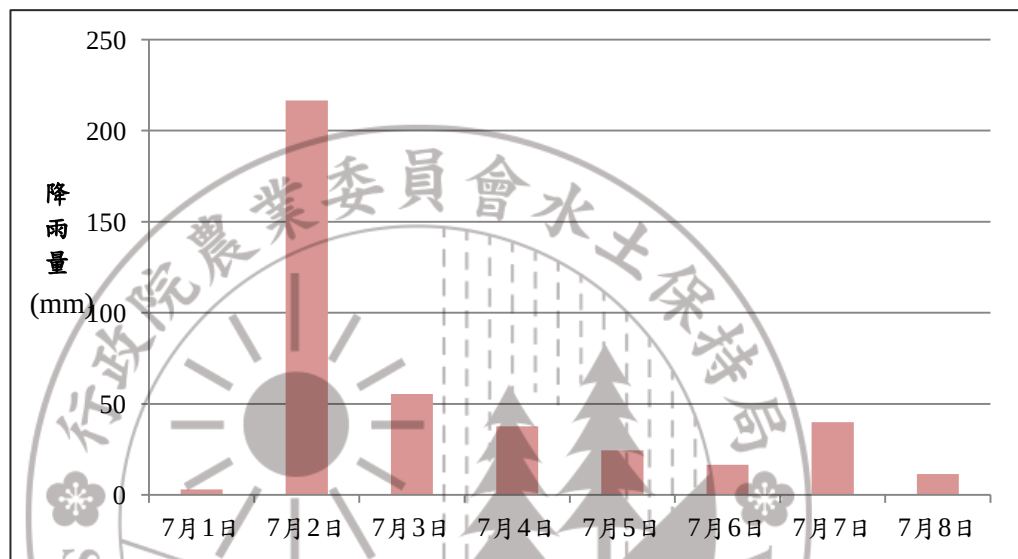


圖 3-8 日降雨量統計圖



圖 3-9 標準試區現況

本團隊於 7 月 3 日進行第三次試區建置，首先利用挖土機挖一條溝將試區外的積水導至試區附近的排水溝，如圖 3-10(a)，接著清理土壤收集槽內的水及土，如圖 3-10(b)，再利用水準儀定位，讓土壤收集槽高度平均，如圖 3-10(c)，接著在土壤收集槽底部澆置混凝土塊(體積：200 公分*15 公分*50 公分)並插入欲固定土壤收集槽之鐵棒，如圖 3-10(d)，再放置土壤收集槽，如圖 3-10(e)，接著將鐵棒與鋼桶焊接固定並將土回填，如圖 3-10(f)，最後本團隊將現地土進行篩分析，土壤顆粒均在 2mm 以下，土砂收集槽寬為 200cm 並設置兩個收集口長 30cm、寬 10cm、斜邊 20cm，確保試區流失之土砂均可進入收集槽，如圖 3-10(g)，第三次試區建置於 7 月 8 日完成，如圖 3-10(h)。



圖 3-10(a) 將試區外的積水排掉

圖 3-10(b) 清理土壤收集槽

圖 3-10 第三次試區建置歷程



圖 3-10(c) 利用水準儀定位，使土壤收集槽高度平均



圖 3-10(d) 澆置混凝土塊



圖 3-10(e) 放置土壤收集槽

圖 3-10 第三次試區建置歷程(續)



圖 3-10(f) 鐵棒與鋼桶焊接固定並將土回填

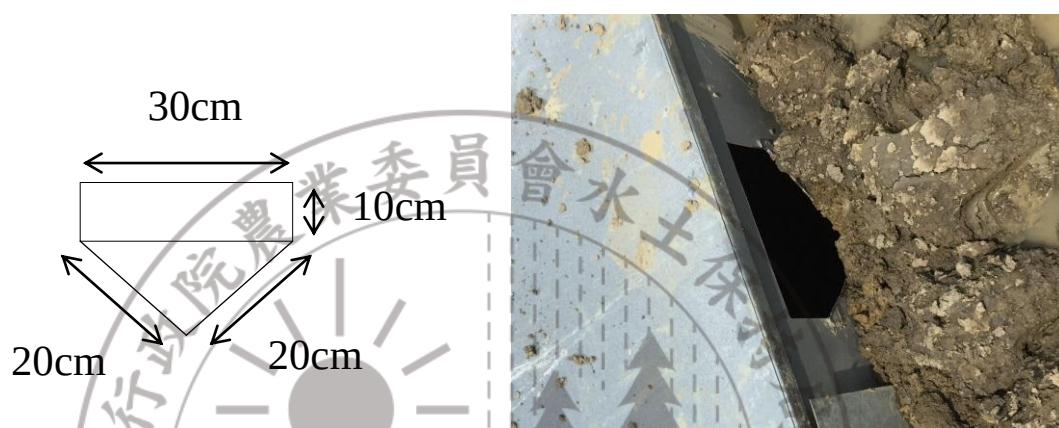


圖 3-10(g) 將土壤收集口加大



圖 3-10(h) 第三次試區建置完成

圖 3-10 第三次試區建置歷程(續)

3.2 生物炭及泥岩土壤之基本性質分析

三個侵蝕試驗區分別為對照組、2%木炭施用及 2%稻殼炭施用，木炭及稻殼炭為 700°C 以上的溫度熱裂解燒製。

一、泥岩土壤及生物炭物理化學分析項目

(一)供試土壤選定與樣品採集

本計畫以農業改良場內泥岩土壤為研究對象。泥岩土壤分類為典型簡育暫乾弱育土(Typic Haplustepts) (Soil Survey Staff, 2010)。本計畫將採集約 5 公斤之泥岩土壤表土(0-20 公分)(如圖 3-11 所示)，攜回實驗室後經風乾、磨碎及過篩(< 2mm)(如圖 3-12 所示)後儲存以備後續分析之用。



圖 3-11 將植物剷除並採集表土回實驗室



圖 3-12 將表土進行過篩(< 2mm)

(二)土壤調查、描述與土壤深度估算

本計畫於現地進行土壤構造描述，並依土壤流失估算手冊(1996)將之分級，以利未來土壤沖蝕因子(K 值)計算及土砂流失量估計，其中土壤構造敘述方式如圖 3-13 所示。其土壤深度以螺旋式土鑽往下鑽探測定，而以土鑽測定土壤深度方式如圖 3-14 所示)。



圖 3-13 土壤構造描述



圖 3-14 土壤深度測定

(三)土壤基本性質分析

本計畫採集泥岩表土 0-20 公分之土壤帶回實驗室，土壤經風乾後，將土壤混合均勻，取部份土壤磨碎及過篩(10 mesh)後，進行土壤基本性質分析。所分析之土壤性質包含：

1. 土壤水分含量:重量法 (Gardner, 1986)

秤取約 20 公克之風乾土(Air dry, AD)於已知重量鋁盒內(如圖 3-15 所示)後，置於烘箱中以 105-110℃ 烘乾 24 小時(如圖 3-16 所示)，再將燒杯取出冷卻後，秤取鋁盒及烘乾土(Over dry, OD)重量以計算其重量變化求得水分含量。

$$W.C.(\%) = MF - 1 = \frac{AD}{OD} - 1 = \frac{AD}{OD} - \frac{OD}{OD} = \frac{W}{OD} \times 100 \%$$

其中: W.C.=水分含量 (%)；

MF=水分係數 (Soil moisture factor)；

AD=風乾土重(g)；

OD=烘乾土重(g)；

W=土壤水分(g)。



圖 3-15 秤取風乾土於鋁盒內



圖 3-16 將風乾土移入烘箱中烘乾

2. 土壤 pH 值：玻璃電極測定 (McLean, 1982) (1: 2.5(w/v))

- (1) 秤取 10 公克過 10 mesh 篩網(<2 公釐)的風乾土壤置燒杯中，加入 25mL 去離子水；
- (2) 以玻璃攪拌棒間隔 15 分鐘攪拌 1 次，持續 1 小時共計 5 次，如圖 3-17 所示；
- (3) 於施測前靜置 15 分鐘；
- (4) 將 pH 儀溫機 15 分鐘後，以標準溶液 (pH4、pH7 及 pH10) 進行 pH 測定儀校正，以蒸餾水清洗玻璃電極棒並擦拭乾淨，在進行測定。



圖 3-17 攪拌土樣

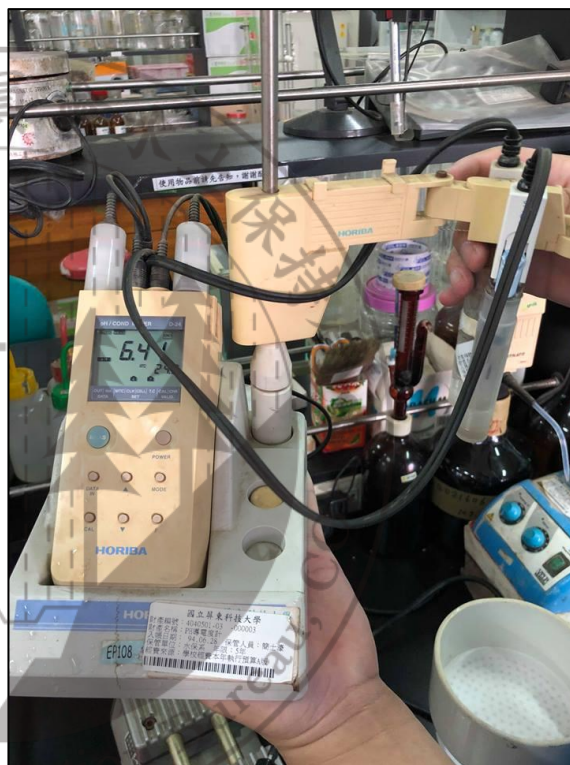


圖 3-18 pH 儀

3. 土壤有機質:Walkley-Black 濕式氧化法 (Nelson and Sommers, 1982)

- (1) 秤取 0.25 公克過 10 mesh 篩網(<2 公釐)的風乾土置於三角錐瓶中，加入 20 mL 1.0 N 的重鉻酸鉀溶液，並充分搖晃使土壤與溶液混和；
- (2) 以量筒量取 20 mL 的 95 %濃硫酸，加入三角錐形瓶中，並充分搖晃後靜置冷卻 30 分鐘；
- (3) 加入 100 mL 的去離子水及 5 mL 的濃磷酸(H_3PO_3)後，並加入 3~4 滴的菲羅琳指示劑；
- (4) 以 0.5 N 硫酸亞鐵銨溶液滴定至終點(如圖 3-19 所示)；
- (5) 須另操作空白試驗求得土壤有機質含量。

$$OC(\%) = \frac{N \times V \times \left(1 - \frac{S}{B}\right) \times \frac{12}{4} \times \frac{1}{1000} \times 1.3 \times MF}{W} \times 100\%$$

$$OM(\%) = 1.724 \times OC(\%)$$

其中: OC=土壤有機質含量(%);

N=重鉻酸鉀濃度(N 或 mole/L 或 eq/L);

V=重鉻酸鉀添加量(mL);

S=土壤樣本之硫酸亞鐵銨溶液滴定量(mL);

B=空白試驗之硫酸亞鐵銨溶液滴定量(mL);

12=碳原子量(12 g/mole 或 g/eq);

$\frac{12}{4}$ =碳的當量(g/mole 或 g/eq) ;

$\frac{1}{1000}$ =體積單位轉換(1L/1000 mL);

1.3=回收率轉換因子；

W=風乾土重(g)；

MF=水分係數；

OM=土壤有機物含量(%)；

1.724=有機質與有機物轉換係數。

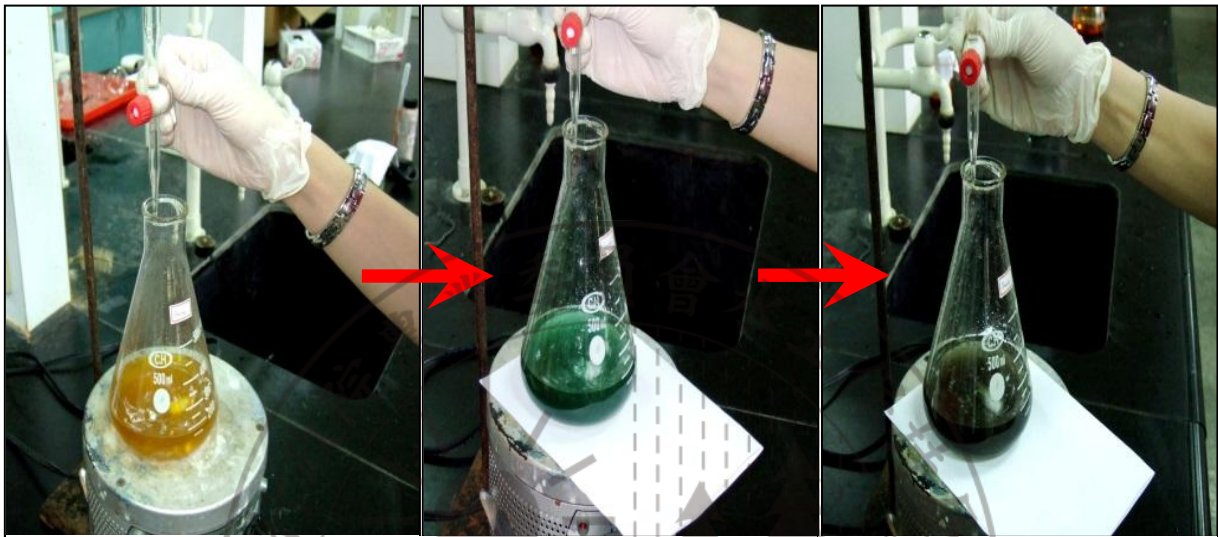


圖 3-19 以硫酸亞鐵銨溶液滴定至終點之過程

4. 土壤質地(texture):吸管法 (Gee and Bauder, 1986)

- (1) 秤取 50 公克已過篩(< 2 公釐)之風乾土於 500 mL 燒杯中，以少量蒸餾水潤濕後，加入 10 mL 30% 雙氧水(H_2O_2)，並置於加熱器上以 70-80 °C 加熱處理，以分解並去除土壤中之有機質，反覆此步驟直至土壤溶液中無氣泡產生；
- (2) 加入 200 mL 0.3 M 的檸檬酸鈉溶液、25 mL 1.0 M 的碳酸氫鈉溶液及 3 公克的連二亞硫酸鈉($Na_2S_2O_4$)粉末於土壤溶液中，將燒杯置於 80 °C 水域槽中加熱並時而攪拌，約 15 分鐘

後土樣會呈灰白色，若未呈灰白色則重複此步驟；

- (3) 將土壤溶液靜置冷卻 3-4 小時後倒入離心瓶中，利用離心機以 3000 rpm 的轉速離心 10 分鐘，之後以移液管將上層溶液去除，再加入 100 mL 的蒸餾水重複離心動作，將上層溶液去除，利用蒸餾水將土壤洗至燒杯中，並將土壤溶液放置 105 °C 烘箱烘乾 24 小時；
- (4) 秤取其烘乾土樣約 20 公克至攪拌杯中，加入適量的蒸餾水濕潤土樣後，再加入 10 mL 分散劑，以電動攪拌機攪拌 10 分鐘(如圖 3.20 所示)後，將土壤溶液洗出並通過 325 mesh (0.05 公釐)的篩網，下方須先放置 1 L 量筒裝置通過的土壤溶液，殘留於篩網上者為砂粒部分，將其洗入燒杯中，並放入 105°C 烘箱烘乾 24 小時後秤重，即得到砂粒含量；
- (5) 將其量筒加入蒸餾水定量至 1 L，以攪拌槳上下攪拌土壤溶液 10 次(如圖 3-21 所示)，依據 Stokes' law 定律推算試驗環境的溫度下，土壤溶液內的粉粒沉降所需要的時間，並於該時間後，以 50 mL 的定量移液吸管於液面下 10 公分處吸取 50 mL 黏粒懸浮液，將其懸浮液放入 105°C 烘箱烘乾 24 小時後秤重；
- (6) 將數據代入公式中推算砂粒、粉粒及黏粒含量，並參考美國農部(USDA)土壤調查手冊之土壤質地三角圖，求得土壤質地等級名稱。

$$Clay(\%) = \frac{W \times V}{v}$$

$$Silt(\%) = 100\% - Sand(\%) - Clay(\%)$$

其中: Clay=土壤黏粒含量(%);

Silt=土壤粉粒含量(%);

Sand=土壤砂粒含量(%);

W=液面下 10 公分處吸取的黏粒懸浮液烘乾重(g);

V=總溶液體積量(mL);

v=液面下 10 公分處吸取的黏粒懸浮液體積量(mL)。



圖 3-20 利用電動攪拌機進行攪拌



圖 3-21 以攪拌槳上下攪拌土壤溶液

5. 陽離子交換容量(Cation Exchange Capacity, CEC):以 1M 醋酸銨法 (pH 7.0)分析 (Rhoades, 1982)

- (1) 裁減適當大小的濾紙(Whatman No. 42)於玻璃管柱中，秤取 5 g 土壤加入管柱中，倒入 100 mL 1 M 醋酸銨於分液漏斗中，打開分液漏斗開關開始淋洗，土面上保持 3 mm 的淋洗液，如圖 3-22 所示；
- (2) 將分液漏斗以蒸餾水沖洗乾淨後，倒入 100 mL 95 %乙醇進行淋洗殘留於土壤樣品裡的醋酸銨溶液。
- (3) 倒入 100 mL 10 %酸化氯化鈉((5.04 M HCl+10 % NaCl)/ 1 L)溶液於分液漏斗內，進行淋洗以交換出土壤粒子表面所吸附之 NH_4^+ ，並收集淋洗液。
- (4) 淋洗液取 10 mL 加入 5 mL 10 N NaOH 進行蒸餾(Kjeldahl 蒸餾法)，以 10 mL 的硼酸指示劑吸收蒸餾液約 5 分鐘(蒸餾管口需完全沒入於硼酸指示劑中)
- (5) 以標定過的標準硫酸溶液進行滴定。
(滴定時顏色之變化為：綠色→ 磚酒紅色)
(紀錄滴定時所用標準硫酸溶液量，再依下列公式計算 CEC 之值，並以 $\text{cmol}(+)/\text{kg soil}$ 為單位表示之)

$$\text{CEC}(\text{cmol}(+)/\text{kg soil}) = \frac{N \times \left(\frac{S - B}{A} \right) \times 100}{2 \text{ g}} \times 100 \times (1 + \text{土壤水分})$$

其中：N=硫酸的標準濃度(0.02 N)；

S=樣品的滴定體積(mL)；

B=空白的滴定體積(mL)；

A = 蒸餾時所取的萃取液體積(mL)。



圖 3-22 以 1 M 醋酸銨淋洗土樣

6. 總體密度(Bulk density): 土罐法(Blake and Bauder, 1986)

將表土 2~3 公分剷除並修平後，將土環(Core)打入土中(如圖 3-23 所示)，再將土環完整的取出。將土環中土壤移置已知空重之燒杯(如圖 3-24 所示)後，量測土環體積，再將燒杯置於烘箱中以 105-110°C 供乾 24 小時。取出燒杯後冷卻再秤重。

$$BD(g/cm^3) = \frac{OD}{V}$$

其中: BD=總體密度(g/cm^3) ;

OD=烘乾土重(g) ;

V=土環內土壤體積(cm^3)



圖 3-23 將土環打入土中



圖 3-24 將土環中的土壤推入燒杯

7. 土壤導水度:土壤導水度測定裝置(Eijkelkamp BV.-09.02.02.10, Netherland)

- (1) 將現地表土 2~3 公分剷除並修平後，將土環打入土中，再完整的將土環取出；
- (2) 將土環進行吸濕飽和 2~3 天(如圖 3-25 所示)，細質地土壤則需濕潤更久，使土壤呈現飽和狀態；
- (3) 將已濕潤的土環組裝至導水架，並放置定水頭式的「飽和式水力傳導度測定儀」的水槽中將水緩緩注入水槽中，並固定其水頭高度，使導水架內外產生一水位差後放置一天，因水位差的關係，水會緩緩溢滿土環內的土壤；
- (4) 將連通管橫置於導水架與集流管之間，使通過土層的水能透過連通管流入集流管內，再流入滴定管中，並等待滴定管水流穩定；
- (5) 量測導水架內外頭差，並於單位時間內紀錄滴定管內收集的流量。

$$K_T = \frac{QL}{A\Delta H t}$$

$$K_{20} = K_T \frac{\mu_T}{\mu_{20}}$$

其中: $K_T=W$ 特定溫度下的水力傳導度(cm/s)；

Q =流量(cm^3)；

L =土環高(cm)；

A =土環截面積(cm^2)；

ΔH =水頭差(土環內外水位差)(cm)；

T =單位時間(s)；

K_{20} =修正之水力傳導度(cm/s)；

μ_T =特定溫度下之黏滯係數(poise or dynes s/cm²)；

μ_{20} =水溫 20°C 時之黏滯係數(poise or dynes s/cm²)。

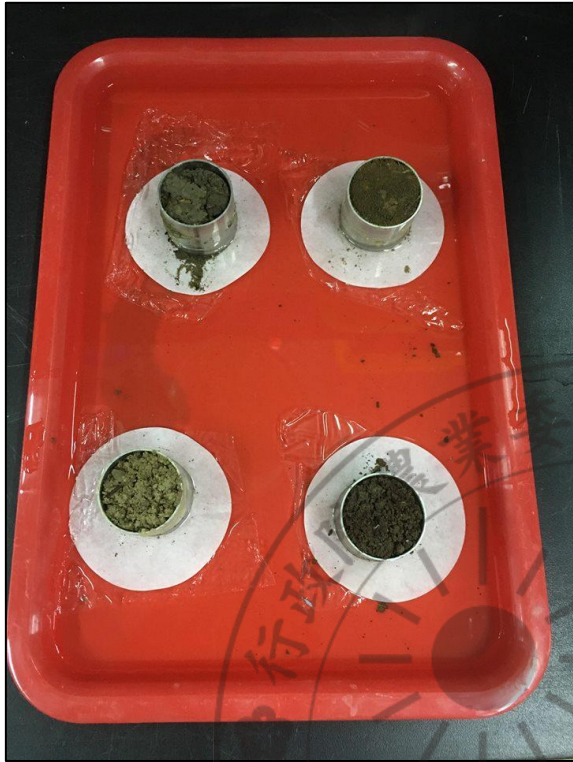


圖 3-25 吸濕飽和



圖 3-26 飽和式水力傳導度測定儀

8. 電導度:飽和土糊抽出法 (Rhoades, 1982b)

- (1) 根據供試土壤之質地性質，秤取 200 - 400 公克過 10 mesh 篩網(<2 公釐)的風乾土置於燒杯中；
(粗質地土壤可酌予增加，細質地壤則可酌予減少)
- (2) 加入適量去離子水於杯中，並以玻璃棒充分攪拌使水土均勻，直至全部土壤已成濕潤狀態時，成為水飽和土糊，靜置平衡 30 分鐘，檢視此壤是否仍為飽和狀態；
- (3) 將飽和土糊再次充分攪拌後，將其倒入已鋪放濾紙的布氏漏斗中，下方裝儲存土壤溶液的三角錐瓶；
- (4) 運用抽氣裝置將土糊中溶液抽出過濾並收集濾液體，如圖 3-27 所示；
- (5) 運用電導度測定儀測定其電導度。



圖 3-27 利用抽氣裝置收集濾液

9. 銨態氮與硝酸態氮含量: 2M KCl 萃取, 以凱氏氮方法分析氮含量 (Mulvaney, 1996)

- (1) 秤取 5 公克過 10 mesh 篩網(<2 公釐)的風乾土於 100 mL 小白瓶中, 並加入 50 ML 的 2 M 氯化鉀溶液, 以 180 rpm 的轉速往復振盪 1 小時, 並等待其靜置沉澱後, 以 5 號濾紙過濾溶液, 並收集其濾液(如圖 3-28 所示);
- (2) 吸取 10 mL 的過濾液於定氮瓶中, 並加入約 0.2 公克的氧化鎂(MgO)粉末, 以半微量凱達式蒸餾裝置加熱蒸餾, 取 10 mL 的硼酸指示劑於 50 mL 的燒杯中, 置於冷凝管出口, 收集冷凝液至燒杯 40 mL 的刻度為止;
- (3) 以標定過的 0.01N 鹽酸溶液(HCl)滴定冷凝液至淡葡萄色, 計算後即可得到土壤交換性銨態氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)的含量;
- (4) 取下定氮瓶後, 加入 0.2 公克的 Devarda 合金粉, 以半微量凱達式蒸餾裝置加熱蒸餾, 取 10 mL 的硼酸指示劑於 50 mL 的燒杯中, 置於冷凝管出口, 收集冷凝液至燒杯 40 mL 的刻度為止;
- (5) 重複步驟(3), 計算後即可得到土壤交換性硝酸態氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)的含量;
- (6) 測定樣本前, 需另測定 100ppm N 標準液及空白對照組的回收率, 其回收率需達 90~105%間方可繼續檢測。

$$NH_4^+ - N = \frac{(S - B) \times N \times u_N \times V_{KCl} \times MF \times 1000}{V \times W}$$

$$NO_3^- - N = \frac{(S - B) \times N \times u_N \times V_{KCl} \times MF \times 1000}{V \times W}$$

其中: $NH_4^+ - N$ = 土壤交換性銨態氮含量(mg/kg 或 ppm) ;

$NO_3^- - N$ = 土壤交換性硝酸態氮含量(mg/kg 或 ppm) ;

S=樣本滴定量(mL) ;

VKCl=氯化鉀過濾量(mL) ;

MF=水分係數 ;

1000=重量單位轉換(1000g/kg) ;

V=樣本吸取量(mL) ;

W=土壤樣本重量(g) 。

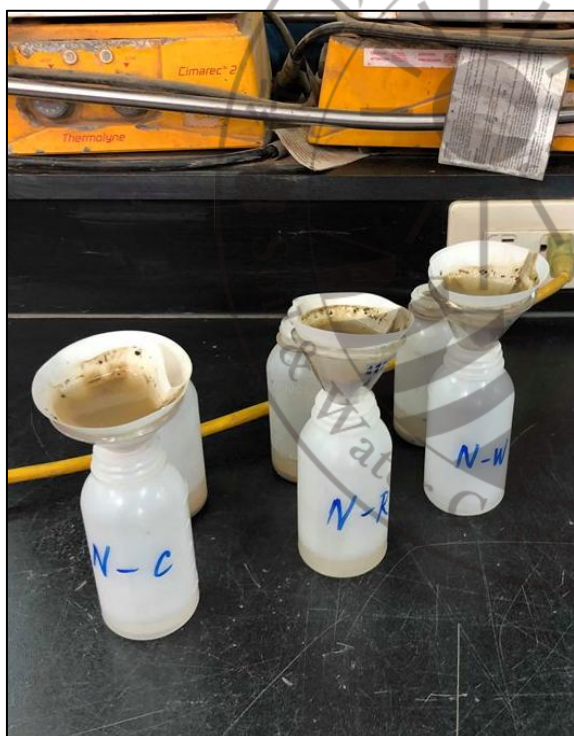


圖 3-28 以濾紙過濾溶液收集濾液

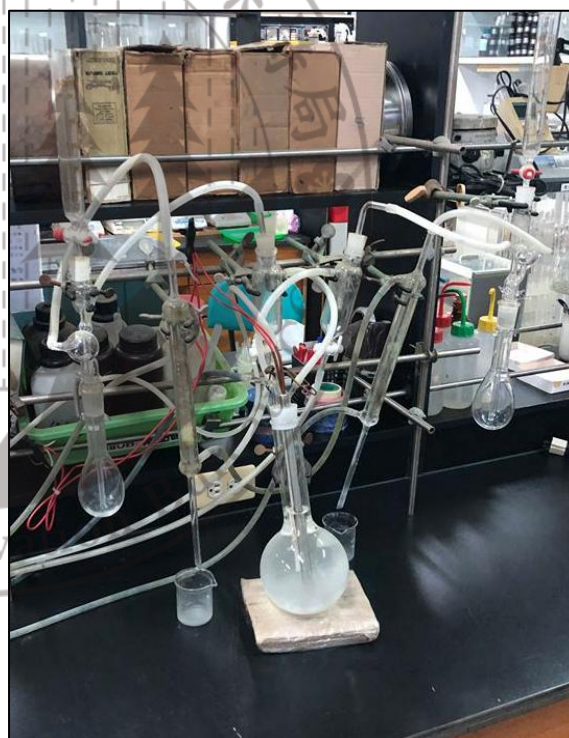


圖 3-29 蒸餾裝置加熱蒸餾

10. 有效磷含量:土壤 Bray No. 1 磷 (Kuo, 1996)

(1) 秤取 2 公克過 10 mesh 篩網(< 2 公釐)的風乾土，於小白瓶中，加入 20 mL 萃取溶液後，將小白瓶置於往復式震盪儀劇烈震盪 5 分鐘後(如圖 3-30 所示)，以 Whatman No. 42 濾紙過濾，並收集其濾液(如圖 3-31 所示)。

(2) 以單一呈色試劑法(Single solution reagent method) (Murphy and Riley, 1962)測定磷含量。取適量(2-5 mL)的萃取液於 50 mL 定量瓶中，若超過 10 mL 則需要加入 4 mL 的 0.5 M 硼酸，以降低氟離子所造成的干擾，以稀氫氧化鈉溶液調整溶液 pH 恰好由無色轉變為黃色後，加入 8 mL 混和呈色試劑，再以去離子水定量至 50 mL，搖晃均勻後靜置 30 分鐘，調整分光光度計之吸光度為 882 nm，進行磷含量測定。濾液以鉬藍法定量磷含量。

(3) 需要測定樣本前，需利用 50 ppm 的磷標準液配置檢量線，濃度為 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 ppm，各標準液於定量前，需先加入 8 mL 混合呈色試劑後再定量。其檢量線回收率需達 0.95 以上方可繼續檢測。

$$a.v.P = \frac{Conc. \times \frac{50\text{ mL}}{V_1} \times \frac{L}{1000\text{ mL}} \times V_2 \times MF \times 1000\text{g/kg}}{W}$$

其中: a.v.P = 土壤有效磷含量(mg/kg 或 ppm)；

Conc. = 濾液測定之磷含量(mg/L 或 ppm)；

MF = 水分係數；

W = 土壤樣本重量(g)；

V_1 ：2 ~ 5 mL 萃取液；

V_2 ：萃取液 15 mL。



圖 3-30 以往復式震盪儀進行震盪



圖 3-31 濾紙過濾並收集濾液

(四)生物炭基本性質分析

本研究之生物炭基本性質皆採用土壤的分析方法進行分析，其中，pH 值分析以 1:10(w/v)比例進行測定。其所分析之土壤性質包含：

1. pH 值：玻璃電極測定 (McLean, 1982) (1: 10(w/v))；
2. 有機質：Walkley-Black 濕式氧化法 (Nelson and Sommers, 1982)；
3. 陽離子交換容量(CEC): 以 1M 醋酸銨法 (pH 7.0) 分析 (Rhoades, 1982)，以火燄式原子吸光儀(Hitachi Z-2300, Japan) 測定之；
4. 電導度:飽和土糊抽出法 (Rhoades, 1982b)；
5. 銨態氮與硝酸態氮含量: 2M KCl 萃取，並以凱氏氮方法分析氮含量 (Mulvaney, 1996)；
6. 有效磷含量: Bray No. 1 磷 (Kuo, 1996)。



(五)基本性質分析結果

1. 泥岩土壤基本性質分析

表 3-1 泥岩土壤之基本性質

性質	泥岩土壤
質地	Silty clay loam
砂粒 (%)	16
粉粒 (%)	54
黏粒 (%)	30
總體密度 (g cm^{-3})	1.52
pH	7.09
電導度 (dS m^{-1})	3.56
有機質 (%)	1.23
銨態氮 (mg kg^{-1})	16.5
硝酸態氮 (mg kg^{-1})	36.0
Bray No. 1 磷 (mg kg^{-1})	4.19
CEC (cmol kg^{-1})	12.8
總氮 (mg kg^{-1})	648

CEC: 陽離子交換容量 cation exchange capacity.

資料來源：本計畫彙整

2. 生物炭基本性質分析

表 3-2 生物炭之基本性質

性質	生物炭	
	木炭(700 ℃)	稻殼炭(700 ℃)
pH	7.79	8.86
電導度 (dS m ⁻¹)	0.15	0.10
有機質 (%)	43.4	47.1
銨態氮 (mg kg ⁻¹)	36.0	4.50
硝酸態氮 (mg kg ⁻¹)	49.5	18.0
Bray No. 1 磷 (mg kg ⁻¹)	28.4	25.7
CEC (cmol kg ⁻¹)	13.5	14.6
總氮(mg kg ⁻¹)	418	357

CEC: 陽離子交換容量 cation exchange capacity.

資料來源：本計畫彙整

3. 泥岩土壤改良後之物化性質

表 3-3 泥岩土壤改良後之物化性質

性質	對照組		木炭		稻殼炭	
BAR	-	-	2%	2%	2%	2%
試驗時間(day)	0	120	0	120	0	120
總體密度 (g cm ⁻³)	1.23	1.55	1.20	1.29	1.21	1.32
pH	7.09	7.08	7.19	7.14	7.26	7.20
電導度 (dS m ⁻¹)	3.56	3.10	3.47	3.48	3.44	3.46
有機質(%)	1.23	1.20	2.09	1.32	2.17	1.32
銨態氮 (mg kg ⁻¹)	16.5	18.0	20.5	22.5	9.00	15.0
硝酸態氮 (mg kg ⁻¹)	36.0	16.5	42.0	19.5	28.0	15.0
Bray No. 1 磷 (mg kg ⁻¹)	4.19	2.16	4.12	2.36	4.11	2.45
CEC (cmol kg ⁻¹)	12.8	12.7	13.0	12.9	13.2	13.0
總氮(mg kg ⁻¹)	648	472	637	548	614	521

BAR：生物炭添加量；CEC: 陽離子交換容量 cation exchange capacity.

資料來源：本計畫彙整

(六)分析土壤理化性質與侵蝕量間之關係

1. 總體密度與侵蝕量之關係

Tejada and Gonzalez (2007)提出，生物炭可大幅提升團粒穩定度，並有效減少總體密度與土壤侵蝕量，主要原因為農業廢棄物含大量之腐植酸(humic acids)。與本計畫相符，第 0 天時之泥岩總體密度為 1.23 g/cm^3 、添加改良資材木炭 WB 及稻殼炭 RB 總體密度分別下降至為至 1.20 及 1.21 g/cm^3 ；經過 120 天後，各處理均有上升趨勢（分別提高 0.32 、 0.09 及 0.11 ），可能之原因為土砂沉陷自然夯實導致密度提高。養治 120 天後仍以生物炭添加處理之泥岩土壤總體密度顯著較控制組低（圖 3-32）。添加生物炭能有效減少侵蝕量，可能因為生物炭添加可使總體密度降低，使導水性或孔隙度增加而導致。

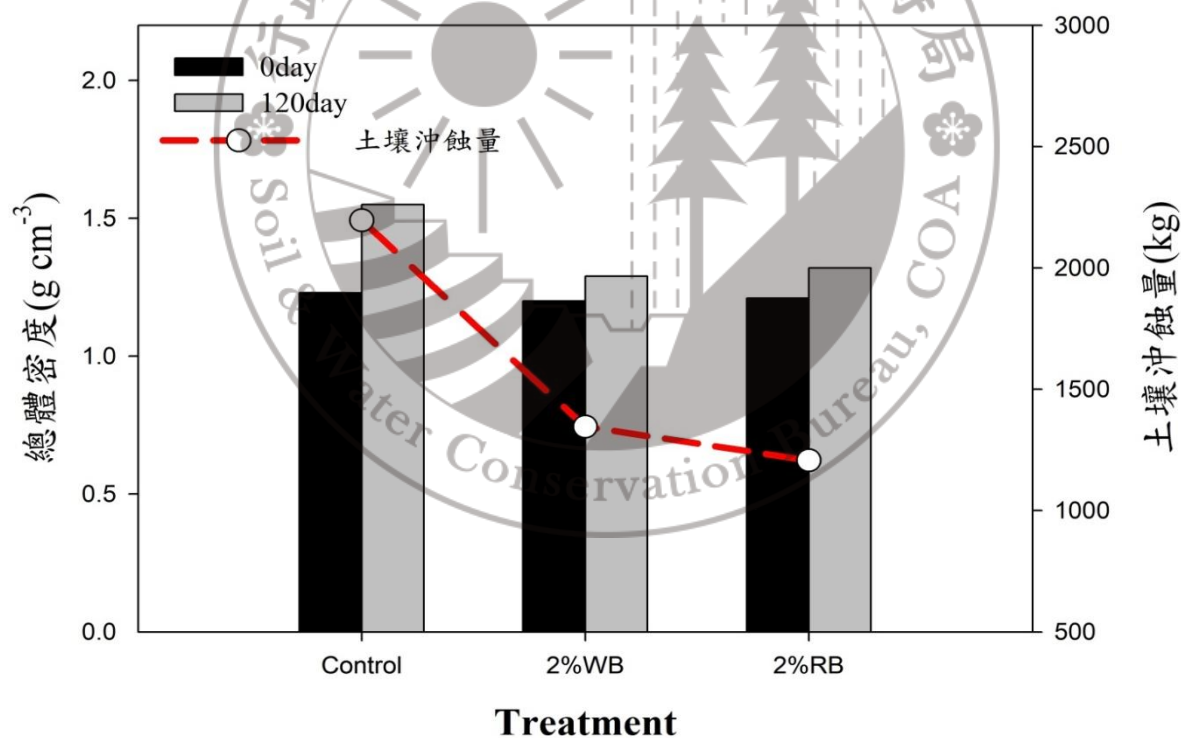


圖 3-32 土壤總體密度與侵蝕量之關係圖

2. pH 值與侵蝕量之關係

由於本計畫之改良資材木炭 WB 及稻殼炭 RB 酸鹼度分別為 7.79 及 8.86，如圖 3-33 所示，將 0 天之泥岩添加生物炭後 pH 顯著的由 7.09 上升至 7.19 及 7.26，養治 120 天後各處理均有下降之趨勢(降低 0.01、0.05 及 0.06)，可能為雨水侵蝕後將混合於土壤之生物炭量減少，導致 pH 降低，與侵蝕量無直接關係。

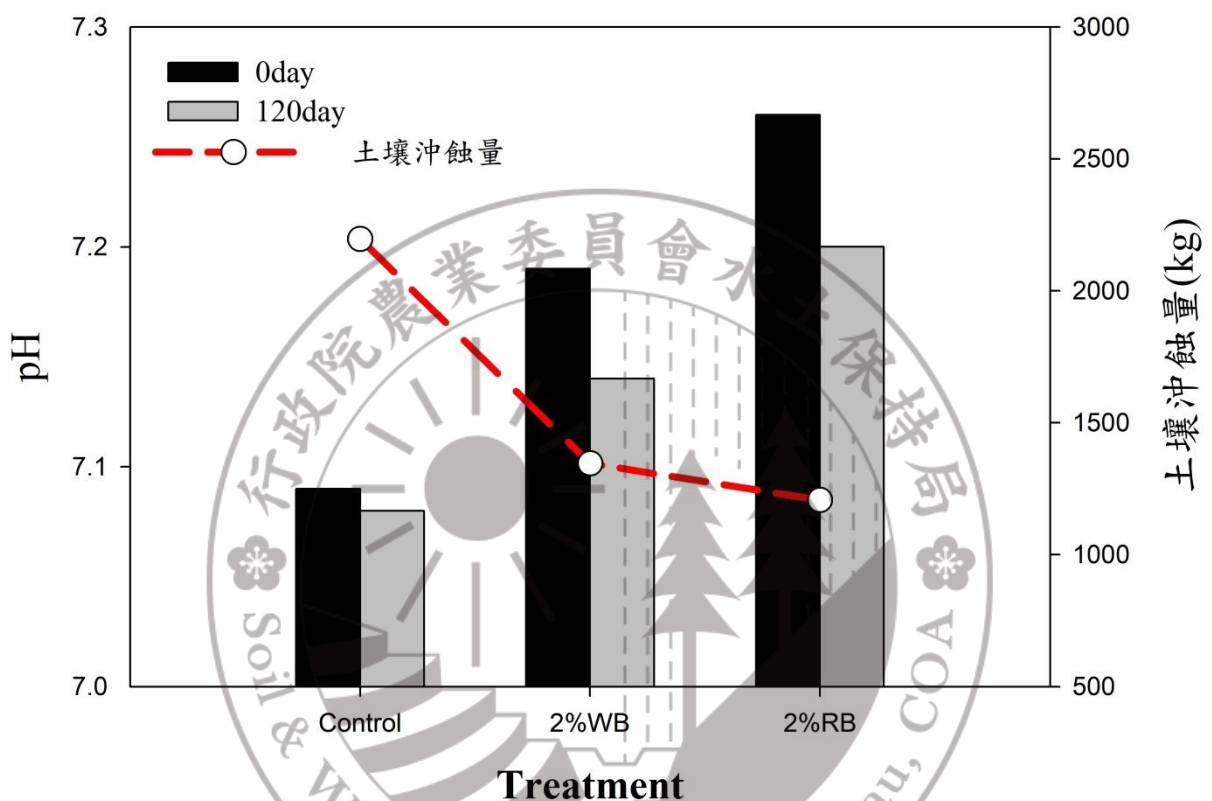


圖 3-33 土壤 pH 值與侵蝕量之關係圖

3. 電導度與侵蝕量之關係

本計畫之泥岩電導度為 3.57 dS/m，添加改良資材木炭 WB 及稻殼炭 RB 後之導電度下降至 3.47 及 3.44，無顯著差異，但養治 120 天侵蝕後添加生物炭後之電導度均有上升之趨勢，可能之原因為生物炭被雨水侵蝕後，導致流失進而使得電導度上升。

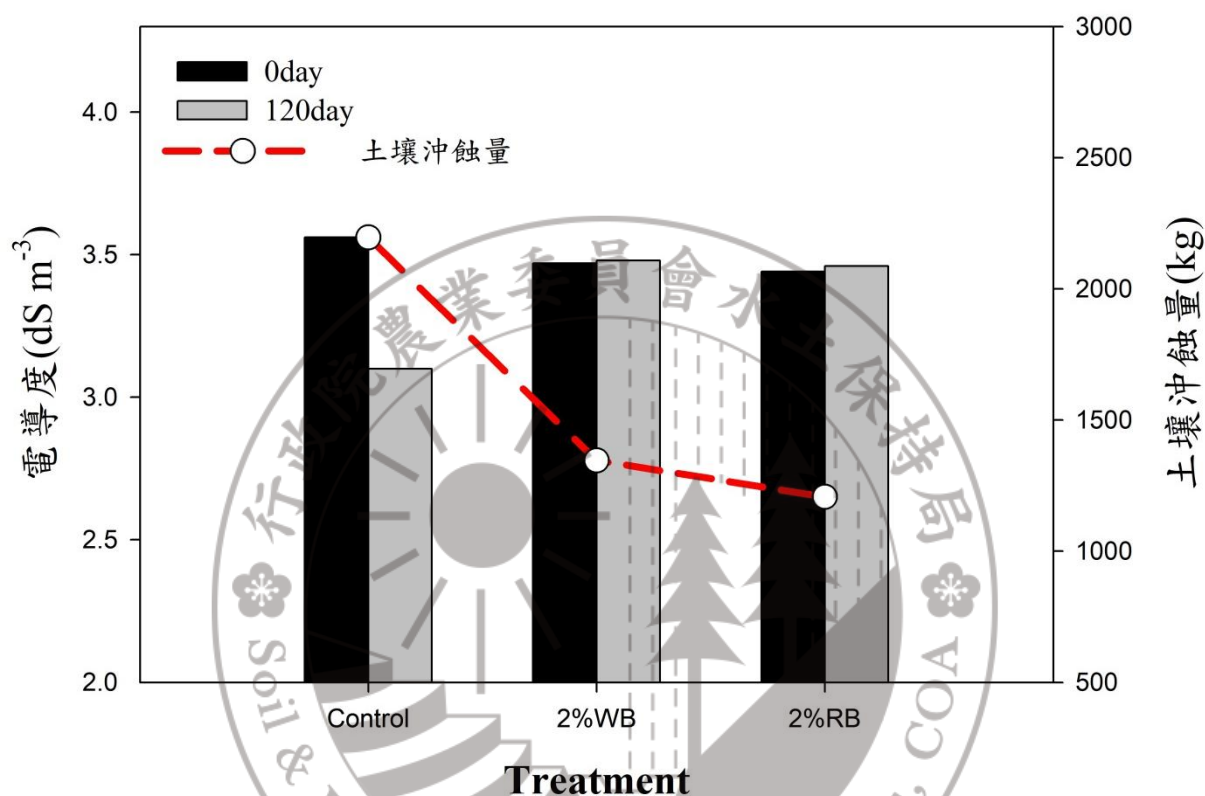


圖 3-34 土壤電導度與侵蝕量之關係圖

4. 有機質與侵蝕量之關係

本計畫之改良資材木炭 WB 及稻殼炭 RB 之有機質分別為 43.4 及 47.1%，如圖 3-35 所示，泥岩土壤添加生物炭後有機質含量由 1.23% 顯著上升至 2.09% 及 2.17% (上升 0.86 及 0.94%)，但經 120 天侵蝕後添加生物炭之處理均顯著下降至 1.32% (降低 0.77% 及 0.85)，原因可能為養治 120 天侵蝕後土壤中之生物炭被侵蝕，導致有機質含量降低，而收集改良後的泥岩土壤的 120 天侵蝕總量顯著低於未改良的泥岩土壤，其原因可能為 WB 及 RB 於初期為高有機質含量，可提供微生物作用進而促進團粒絮聚，方可具有較高的抗侵蝕能力(張俊斌，2003；Boix-Fayos et al., 2004)。

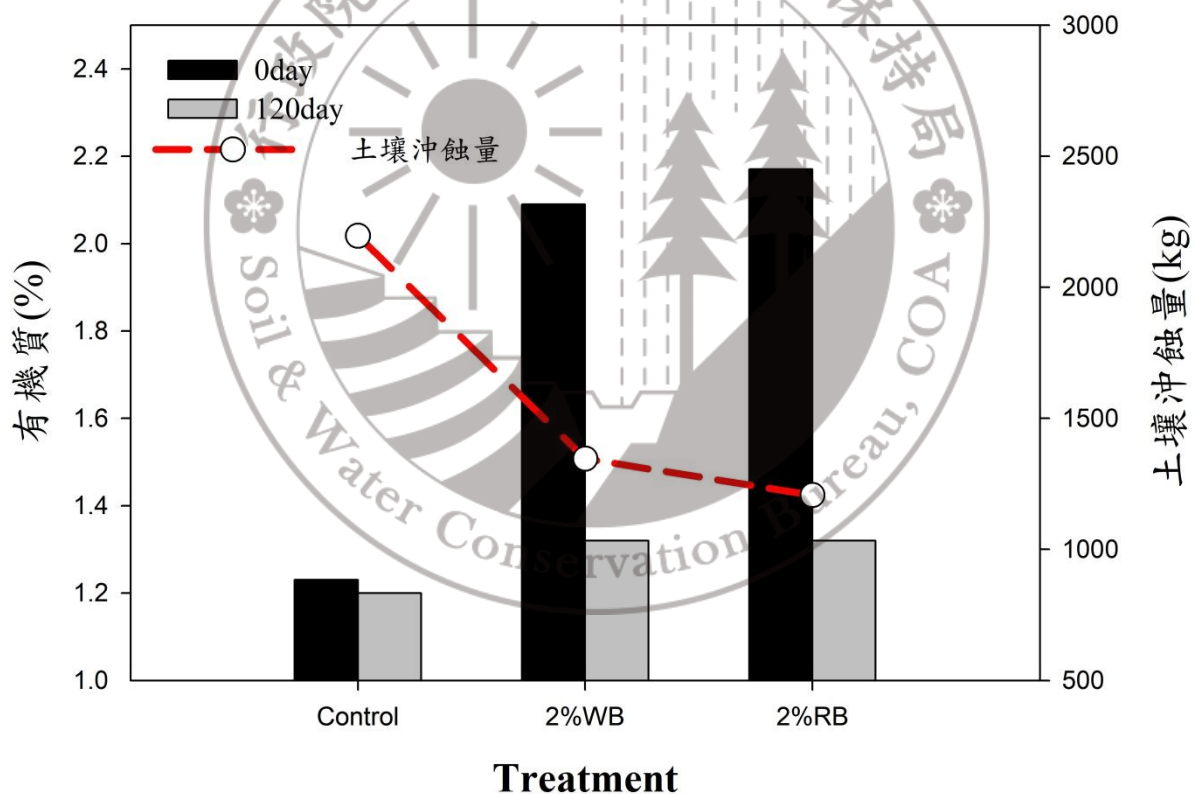


圖 3-35 土壤有機質與侵蝕量之關係圖

5. 礦化氮與侵蝕量之關係

本計畫之改良資材木炭 WB 之氨態氮及硝酸態氮均高於泥岩、稻殼炭 RB 之氨態氮及硝酸態氮均低於泥岩，以致於添加生物炭至泥岩後呈現 WB>泥岩(控制組)>RB(圖 3.36 及圖 3.37)，原因可能為本計畫所購置之稻殼炭 RB 為燒製溫度 $>700^{\circ}\text{C}$ ，其養分已氧化殆盡緣故(氨態氮為 4.5 mg kg^{-1} 、硝酸態氮 18.0 mg kg^{-1})。

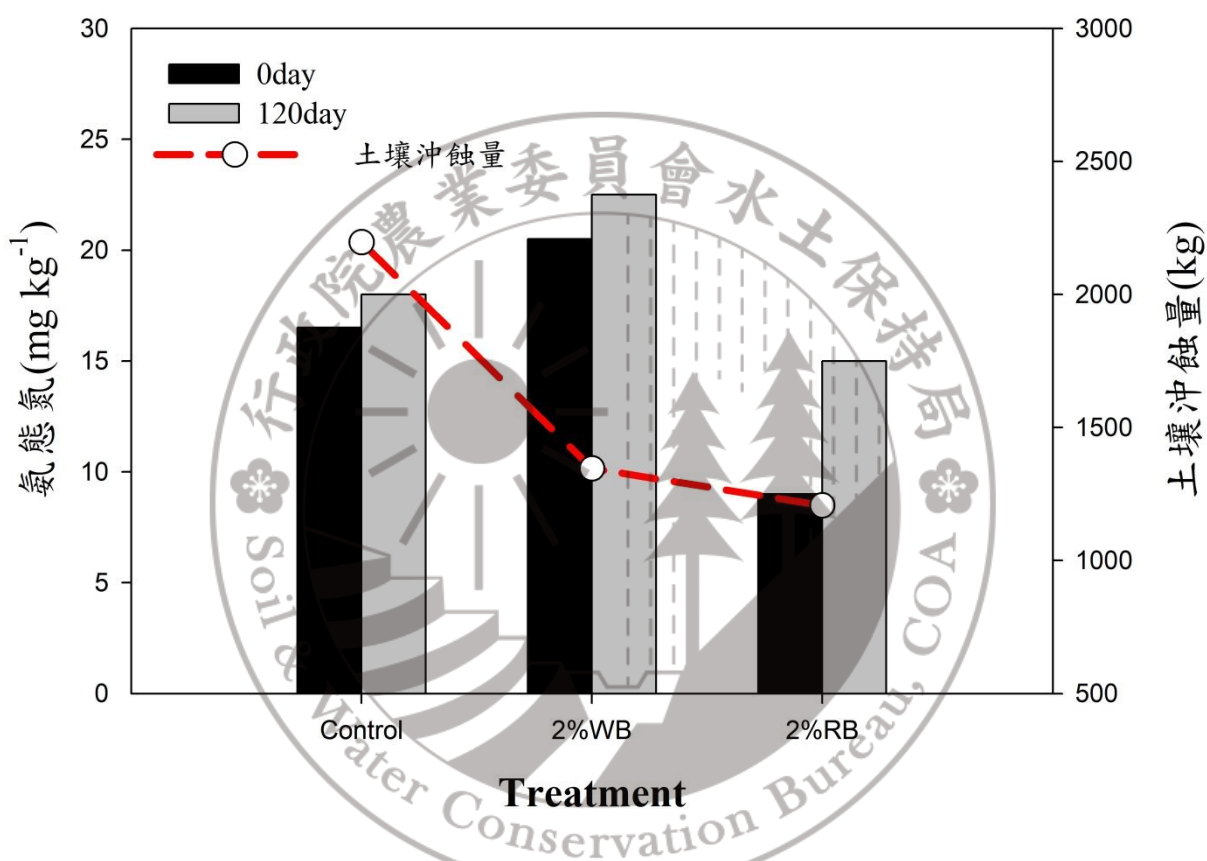


圖 3-36 土壤銨態氮與侵蝕量之關係圖

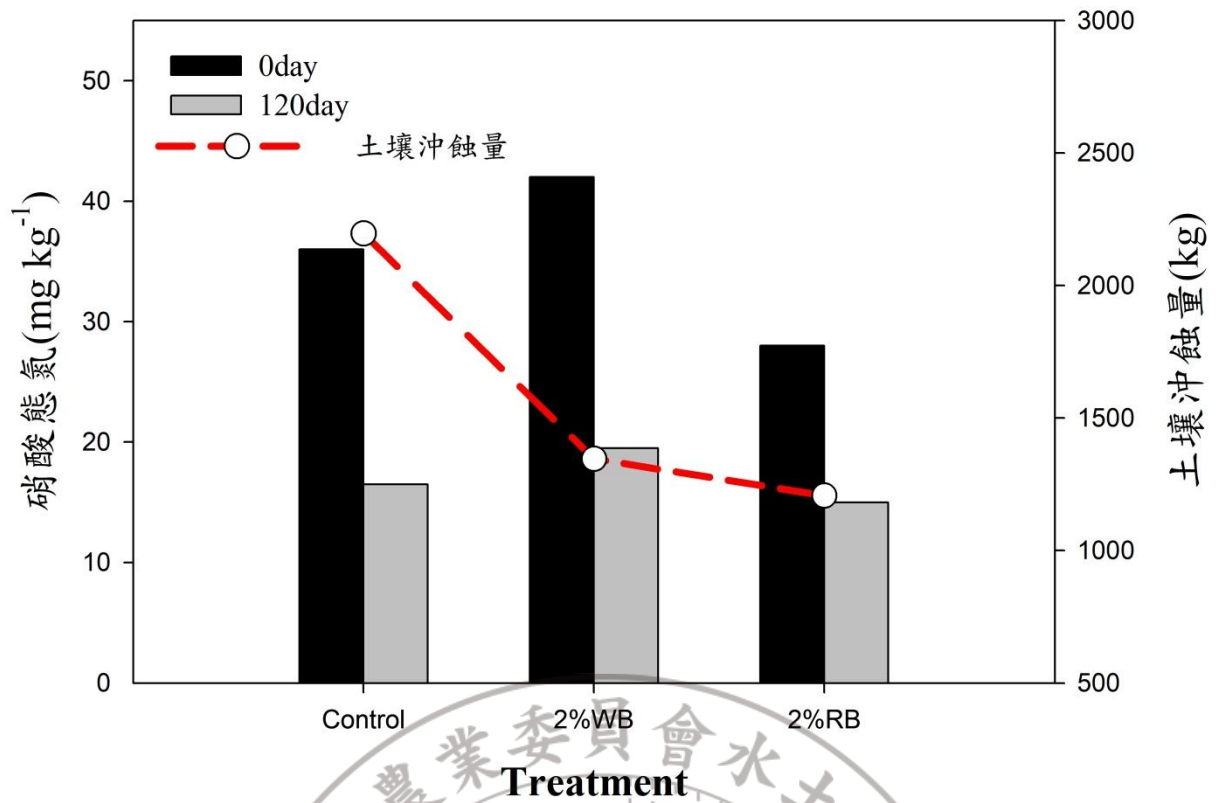


圖 3-37 土壤硝酸態氮與侵蝕量之關係圖



6. 有效性磷與侵蝕量之關係

本計畫結果與 Chan et al. (2008)相似。然而，本研究亦發現，經 120 天侵蝕後，無論無添加生物炭的泥岩或經改良之土壤中有有效磷的損失達 50%以上。長期的生物炭添加下，雖土壤中累積過多的磷並不會對作物造成危害，然而，當土壤中累積過多的磷，使其所能吸附的磷達飽和後，生物炭添加於土壤後有效磷的淋洗損失風險於未來仍需特別注意。

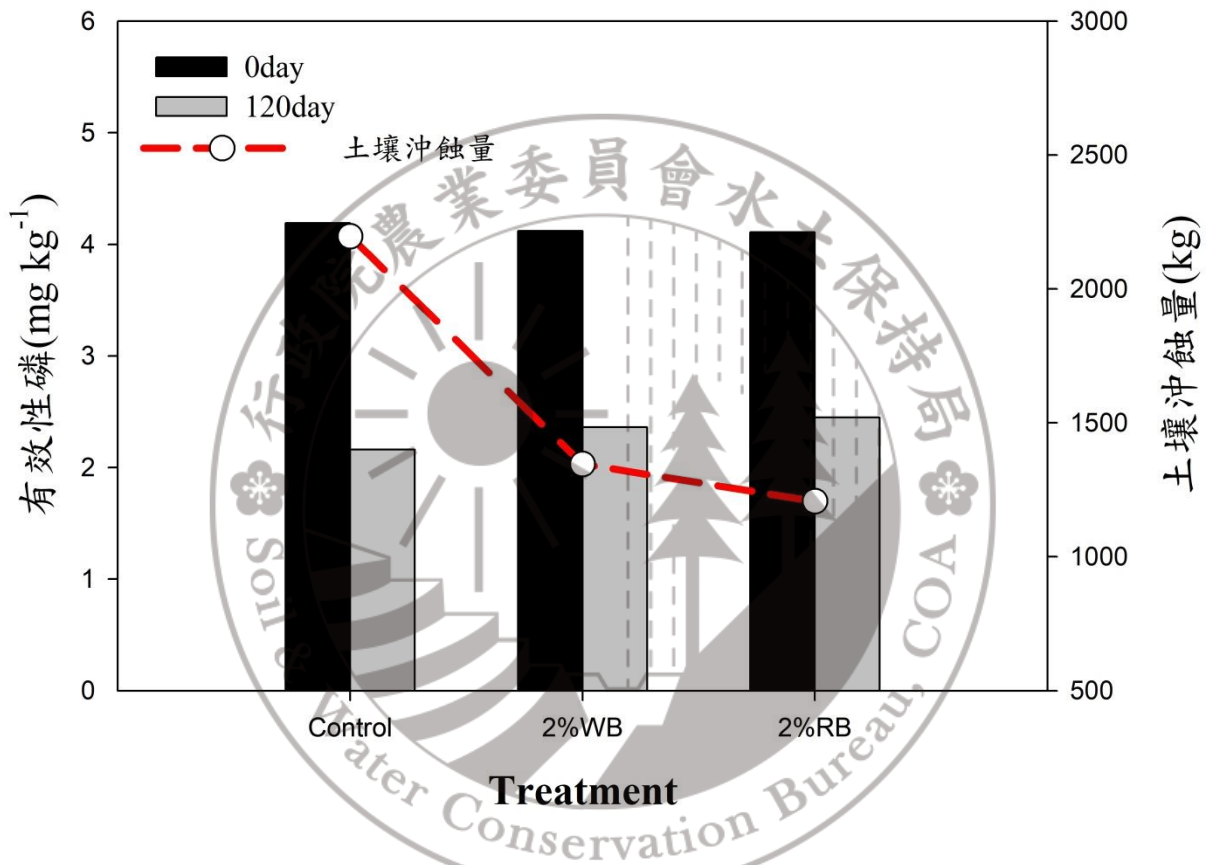


圖 3-38 土壤有效性磷與侵蝕量之關係圖

7. 陽離子交換容量與侵蝕量之關係

本計畫結果與張俊斌(2003)相同，添加生物炭能增加陽離子交換容量，降低電導度。本計畫泥岩之陽離子交換容量為 $12.8 \text{ cmol kg}^{-1}$ ，添加改良資材木炭 WB 及稻殼炭 RB 後之陽離子交換容量為上升至 13.0 及 13.2，但養治 120 天侵蝕後各處理均有降低之趨勢，可能之原因為生物炭被雨水侵蝕後，導致流失進而使得陽離子交換容量下降。

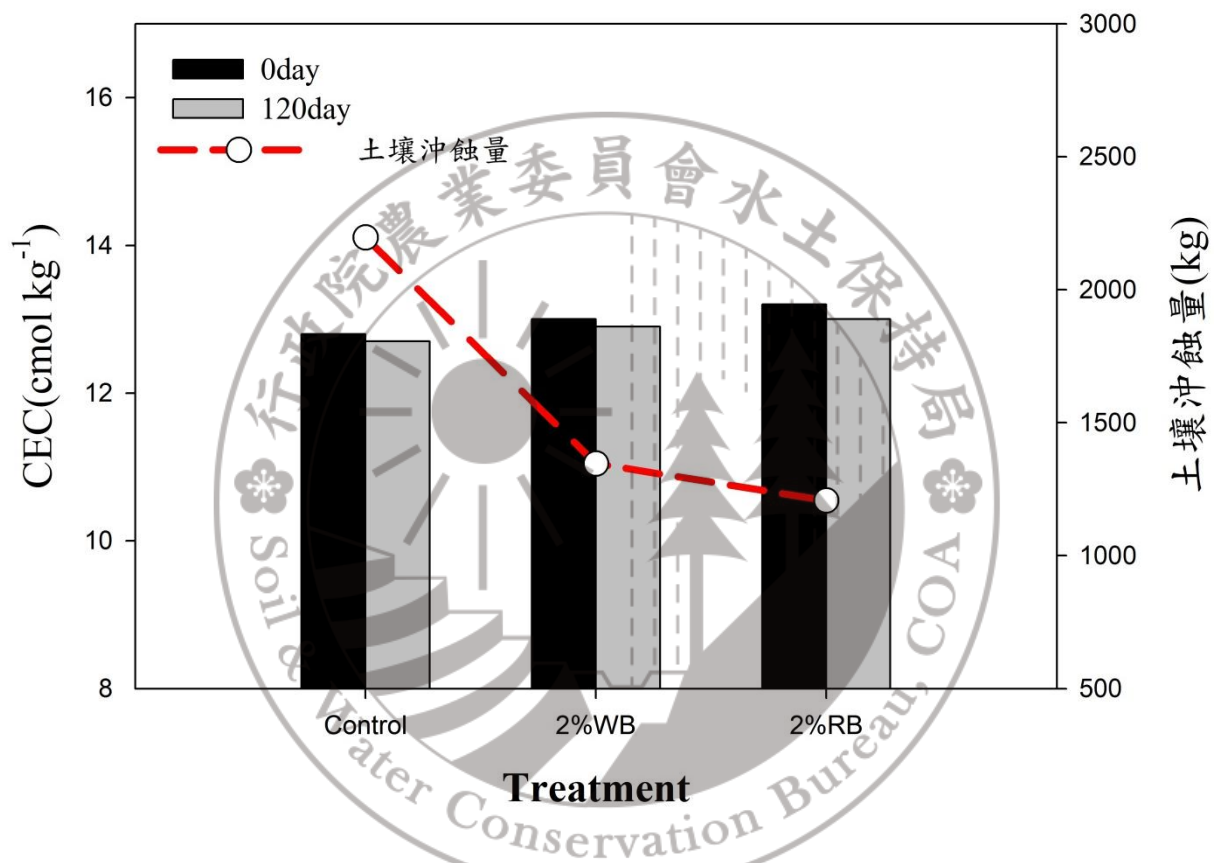


圖 3-39 土壤陽離子交換容量與侵蝕量之關係圖

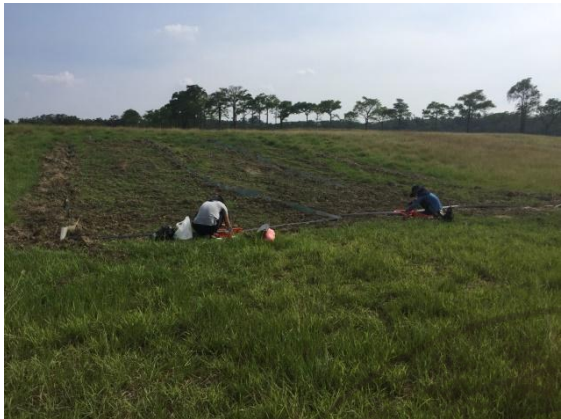
3.3 至少每個月(5-10 月)蒐集土砂收集槽中之受沖蝕土砂

本計畫於「行政院農業委員會畜產試驗所」設置的 3 個泥岩標準試驗區，如圖 3-40，由左到右分別為施用稻殼炭、未改善(對照組)及施用木炭之標準試區。原預計從 2018 年 5 月至 10 月每個月量測一次侵蝕槽之土砂量，進行後續未改善(對照組)及以生物炭(2%木炭施用及 2%稻殼炭施用)改良之泥岩土壤流失量分析，於 5 月 29 日收集到第一場土砂流失量，但因泥岩標準試區於 6 月時毀損，因此無法收集土砂量，而無法收集土砂流失量，已於 7 月份將試區重新建置完成，並於每週(7-10 月)至畜產試驗所視察試區狀況並收集受侵蝕之土砂，如表 3-4 至表 3-17；而收集土砂流失量步驟，如表 3-18。



圖 3-40 泥岩標準試區

表 3-4 5 月 29 日收集土砂量紀錄

收集日期	5 月 29 日	收集人員	純宛、秉銓、庭佑、奕傑
土砂流失量(kg)			
稻殼炭	對照組	木炭	
13.9	18.5	9.9	
			

資料來源：本計畫彙整

表 3-5 第一週收集土砂量紀錄

收集日期	7 月 13 日	收集人員	純宛、秉銓、庭佑、奕傑
土砂流失量(kg)			
稻殼炭	對照組	木炭	
199.8	259.9	166.3	
			

資料來源：本計畫彙整

表 3-6 第二週收集土砂量紀錄

收集日期	7 月 20 日	收集人員	純宛、奕傑、昀萱、仕程
土砂流失量(kg)			
稻殼炭	對照組	木炭	
104.7	179.0	126.2	
			

資料來源：本計畫彙整

表 3-7 第三週收集土砂量紀錄

收集日期	7 月 27 日	收集人員	純宛、秉銓、仕程
土砂流失量(kg)			
稻殼炭	對照組	木炭	
127.3	216.9	119.3	
			

資料來源：本計畫彙整

表 3-8 第四週收集土砂量紀錄

收集日期	8 月 3 日	收集人員	純宛、秉銓、庭佑、仕程
土砂流失量(kg)			
稻殼炭	對照組	木炭	
154.8	351.8	223.4	
			

資料來源：本計畫彙整

表 3-9 第五週收集土砂量紀錄

收集日期	8 月 10 日	收集人員	純宛、秉銓、庭佑、仕程
土砂流失量(kg)			
稻殼炭	對照組	木炭	
102.2	219.4	91.3	
			

資料來源：本計畫彙整

表 3-10 第六週收集土砂量紀錄

收集日期	8 月 17 日	收集人員	純宛、千筑、秉銓、奕傑
土砂流失量(kg)			
稻殼炭	對照組	木炭	
107.6	213.3	136.1	
			

資料來源：本計畫彙整

表 3-11 第七週收集土砂量紀錄

收集日期	8 月 24 日	收集人員	純宛、秉銓、庭佑、奕傑
土砂流失量(kg)			
稻殼炭	對照組	木炭	
218.7	354.2	246.5	
			

資料來源：本計畫彙整

表 3-12 第八週收集土砂量紀錄

收集日期	8 月 31 日	收集人員	純宛、秉銓、庭佑、奕傑
土砂流失量(kg)			
稻殼炭	對照組	木炭	
149.2	241.6	168.1	
			

資料來源：本計畫彙整

表 3-13 第九週收集土砂量紀錄

收集日期	9 月 7 日	收集人員	純宛、秉銓、庭佑、奕傑
土砂流失量(kg)			
稻殼炭	對照組	木炭	
165.2	346.4	191.0	
			

資料來源：本計畫彙整

表 3-14 第十週收集土砂量紀錄

收集日期	9 月 14 日	收集人員	秉銓、庭佑、澤宜、維志
土砂流失量(kg)			
稻殼炭	對照組	木炭	
36.0	76.7	37.4	
			

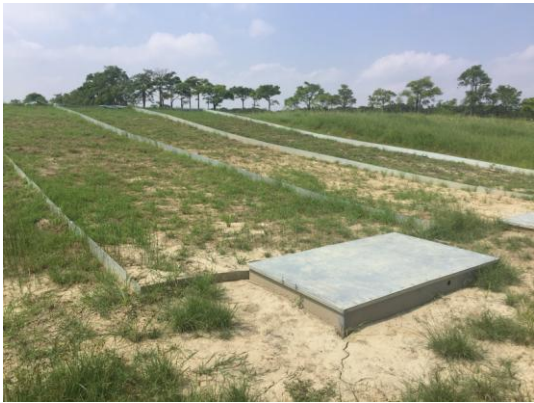
資料來源：本計畫彙整

表 3-15 第十一週收集土砂量紀錄

收集日期	9 月 21 日	收集人員	純宛、秉銓、庭佑、奕傑
土砂流失量(kg)			
稻殼炭	對照組	木炭	
0	0	0	
			

資料來源：本計畫彙整

表 3-16 第十二週至第十四週收集土砂量紀錄

收集日期	土砂流失量(kg)			照片
	稻殼炭	對照組	木炭	
9 月 28 日 (第十二週)	0	0	0	
10 月 5 日 (第十三週)	0	0	0	
10 月 12 日 (第十四週)	0	0	0	

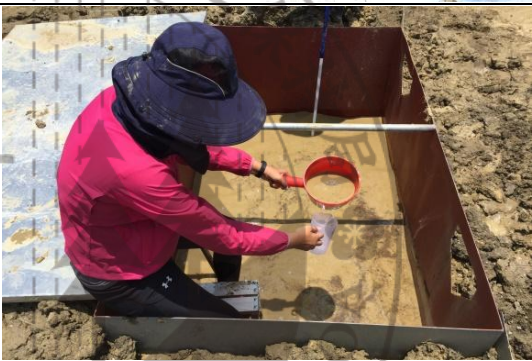
資料來源：本計畫彙整

表 3-17 第十五週至第十七週收集土砂量紀錄

收集日期	土砂流失量(kg)			照片
	稻殼炭	對照組	木炭	
10 月 19 日 (第十五週)	0	0	0	
10 月 26 日 (第十六週)	0	0	0	
11 月 2 日 (第十七週)	0	0	0	

資料來源：本計畫彙整

表 3-18 收集土砂流失量步驟

步驟	過程	照片	資料來源：本計畫彙整
1	量測水深		
2	攪拌五分鐘		
3	收集懸浮水及沉積土砂		
4	利用沉水泵浦 將收集槽清理乾淨	 	





第肆章 泥岩沖蝕標準試區（未改善及以生物炭改良）土砂 流失量與降雨特性分析

4.1 泥岩沖蝕標準試區（未改善及以生物炭改良）土砂流失量與降 雨特性分析

一、 泥岩標準試驗區之降雨特性

本計畫為瞭解泥岩標準試驗區之降雨特性，首先於鄰近試驗區之「行政院農業委員會畜產試驗所」所屬氣象站蒐集時雨量資料，如圖 4-1，再分別將所蒐集之時雨量資料按照土砂量收集週次進行統計分析，如表 4-1 所示，其中日降雨量統計圖如圖 4-2 所示，由表 4-1 及圖 4-3 可看出日降雨量最大值出現在第七週(8月23日)為 319.5 公釐，根據中央氣象局所發布之豪雨特報顯示，是因受到熱帶性低氣壓與西南氣流影響，而熱帶性低氣壓雖未完全發展成為颱風，但低壓中心伴隨的組織性對流雨而降下短延時強降雨，加上熱帶低壓移動速度緩慢，導致雨量值快速累積，使臺南市發生大雨或豪雨；而週降雨量之統計圖如圖 4-3 所示，可看出週降雨量最大值亦發生在第七週(8月18日至8月24日)，為 692.5 公釐。



圖 4-1 畜試所雨量站



表 4-1 日降雨量及週降雨量之統計表

第一週		第二週		第三週	
日期	雨量 (mm)	日期	雨量 (mm)	日期	雨量 (mm)
7 月 9 日	0.0	7 月 14 日	19.0	7 月 21 日	73.5
7 月 10 日	0.0	7 月 15 日	0.0	7 月 22 日	34.5
7 月 11 日	3.0	7 月 16 日	0.0	7 月 23 日	0.5
7 月 12 日	3.5	7 月 17 日	0.0	7 月 24 日	1.0
7 月 13 日	0.5	7 月 18 日	0.0	7 月 25 日	9.0
		7 月 19 日	33.0	7 月 26 日	0.0
		7 月 20 日	43.5	7 月 27 日	59.0
週降雨量 (mm)	7.0	週降雨量 (mm)	95.5	週降雨量 (mm)	177.5
第四週		第五週		第六週	
日期	雨量 (mm)	日期	雨量 (mm)	日期	雨量 (mm)
7 月 28 日	4.5	8 月 4 日	1.0	8 月 11 日	0.0
7 月 29 日	0.0	8 月 5 日	41.0	8 月 12 日	0.0
7 月 30 日	0.0	8 月 6 日	37.0	8 月 13 日	66.0
7 月 31 日	0.0	8 月 7 日	29.0	8 月 14 日	21.5
8 月 1 日	0.0	8 月 8 日	0.0	8 月 15 日	3.5
8 月 2 日	16.5	8 月 9 日	0.0	8 月 16 日	9.0
8 月 3 日	15.5	8 月 10 日	8.0	8 月 17 日	18.0
週降雨量 (mm)	36.5	週降雨量 (mm)	116.0	週降雨量 (mm)	118.0

資料來源：畜試所雨量站及本計畫彙整

表 4-1 日降雨量及週降雨量之統計表(續)

第七週		第八週		第九週	
日期	雨量 (mm)	日期	雨量 (mm)	日期	雨量 (mm)
8 月 18 日	37.0	8 月 25 日	27.0	9 月 1 日	18.5
8 月 19 日	4.5	8 月 26 日	2.0	9 月 2 日	0
8 月 20 日	9.0	8 月 27 日	50.5	9 月 3 日	0
8 月 21 日	2.0	8 月 28 日	117.5	9 月 4 日	0.5
8 月 22 日	42.5	8 月 29 日	107.0	9 月 5 日	0.5
8 月 23 日	319.5	8 月 30 日	17.5	9 月 6 日	2.0
8 月 24 日	278.0	8 月 31 日	1.5	9 月 7 日	5.0
週降雨量 (mm)	692.5	週降雨量 (mm)	323.0	週降雨量 (mm)	26.5
第十週		第十一週		第十二週	
日期	雨量 (mm)	日期	雨量 (mm)	日期	雨量 (mm)
9 月 8 日	7.5	9 月 15 日	0.5	9 月 22 日	0
9 月 9 日	0	9 月 16 日	1.0	9 月 23 日	0
9 月 10 日	1.0	9 月 17 日	4.0	9 月 24 日	0
9 月 11 日	0	9 月 18 日	0	9 月 25 日	17.5
9 月 12 日	1.0	9 月 19 日	0	9 月 26 日	0.5
9 月 13 日	0	9 月 20 日	0	9 月 27 日	0
9 月 14 日	0	9 月 21 日	0	9 月 28 日	0
週降雨量 (mm)	9.5	週降雨量 (mm)	5.5	週降雨量 (mm)	18.0

資料來源：畜試所雨量站及本計畫彙整

表 4-1 日降雨量及週降雨量之統計表(續)

第十三週		第十四週		第十五週	
日期	雨量 (mm)	日期	雨量 (mm)	日期	雨量 (mm)
9 月 29 日	0	10 月 6 日	0	10 月 13 日	0
9 月 30 日	0	10 月 7 日	0	10 月 14 日	0
10 月 1 日	0	10 月 8 日	0	10 月 15 日	0
10 月 2 日	0	10 月 9 日	0	10 月 16 日	0
10 月 3 日	0	10 月 10 日	16.5	10 月 17 日	0
10 月 4 日	0	10 月 11 日	0	10 月 18 日	0
10 月 5 日	0	10 月 12 日	0.5	10 月 19 日	0.5
週降雨量 (mm)	0	週降雨量 (mm)	17.0	週降雨量 (mm)	0.5
第十六週		第十七週			
日期	雨量 (mm)	日期	雨量 (mm)		
10 月 20 日	0	10 月 27 日	0		
10 月 21 日	0	10 月 28 日	0		
10 月 22 日	0	10 月 29 日	0		
10 月 23 日	0	10 月 30 日	0		
10 月 24 日	0	10 月 31 日	1.0		
10 月 25 日	0	11 月 1 日	0.5		
10 月 26 日	0	11 月 2 日	0		
週降雨量 (mm)	0	週降雨量 (mm)	1.5		

資料來源：畜試所雨量站及本計畫彙整

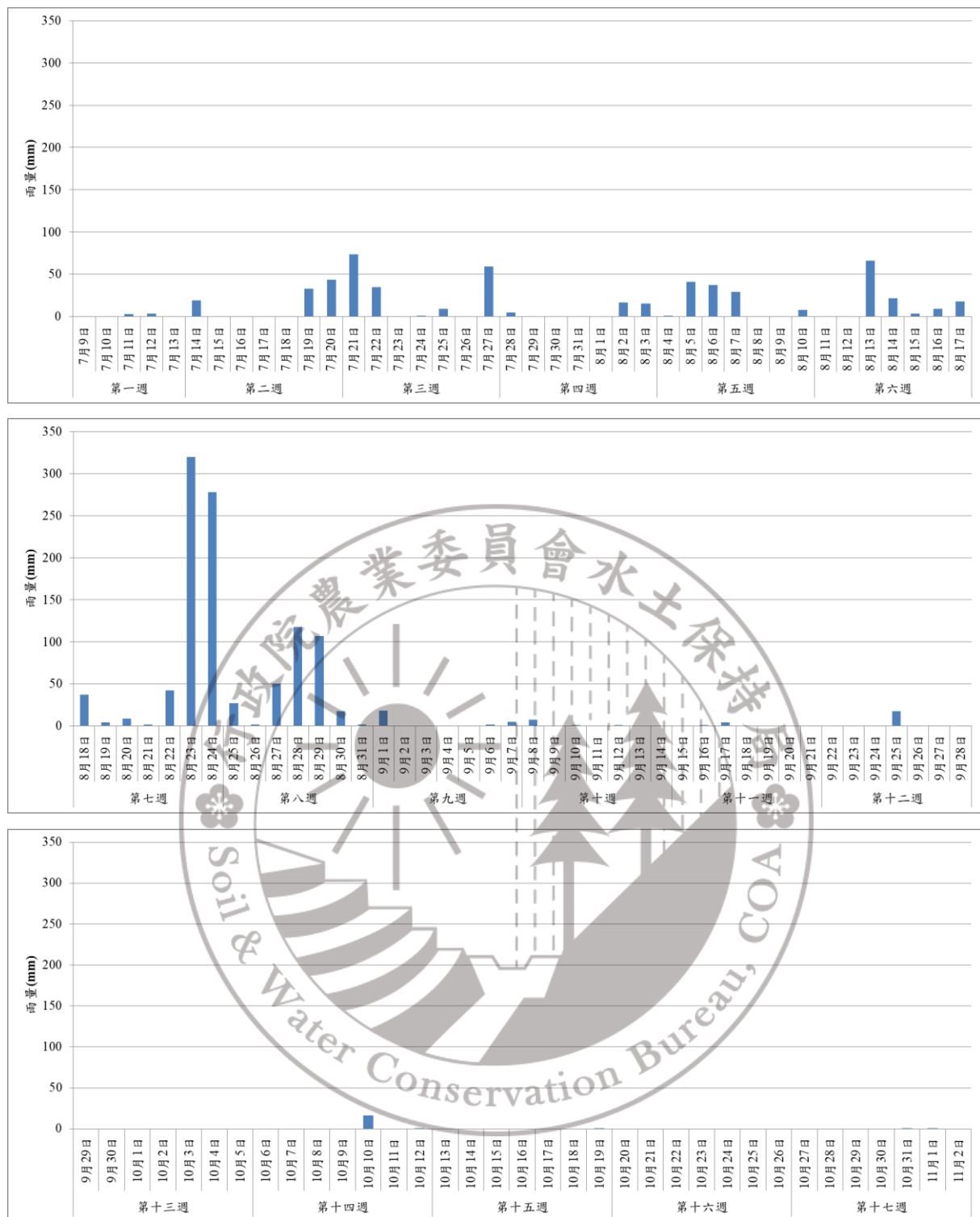


圖 4-2 日降雨量統計圖

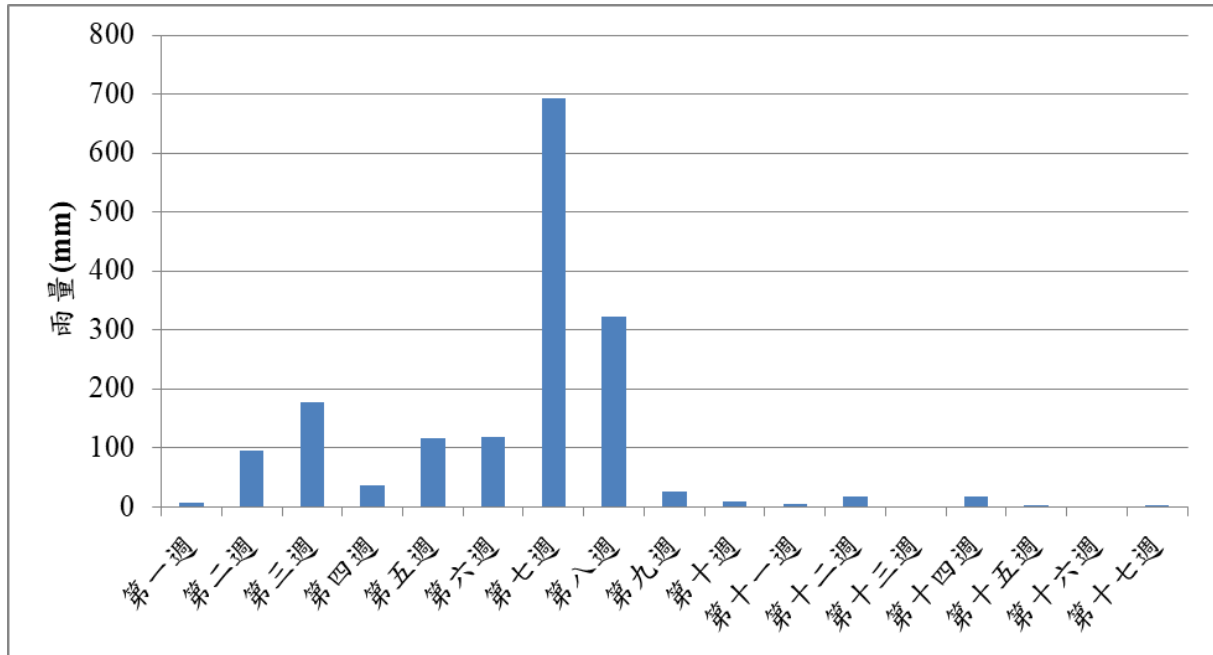


圖 4-3 週降雨量統計圖



二、 土砂流失量及降雨量分析

本計畫利用 Wischmeier and Smith(1958)之標準試區及中央氣象局畜試所之雨量站，蒐集土砂流失量及降雨量進行分析，土砂流失量收集紀錄，如表 4-2。

從週降雨量及 3 種不同土砂流失量可看出，第一週(7/9-7/13)時因泥岩標準試驗區剛建置完畢，土壤仍為不穩定且鬆動的狀態，極易因降雨造成大量侵蝕；第三週及第八週之週降雨量分別為 177.5mm 及 323mm，因土壤孔隙水達到飽和，因此第四週及第九週不需要太大的降雨量就能造成較大的土壤流失量，如圖 4-4 所示；而 10 月時，標準侵蝕試驗區已進入乾季，因此降雨量偏低，試驗區之土壤未達到侵蝕狀態。本計畫另探討七月份至十月份累積降雨量與累積土砂流失量進行分析，如圖 4-5 所示，從圖中亦可得知，累積降雨量與累積土砂流失量呈正相關。

目前只蒐集 4 個月份(7-10 月)之資料，故未來蒐集較長時間資料，以利判定土砂流失量及降雨量之相關性。

表 4-2 收集土砂量紀錄

週次	日期	土砂流失量(kg)			週降雨量 (mm)	收集人員
		稻殼炭	對照組	木炭		
-	5/23-5/29	13.9	18.5	9.9	5.0	純宛、秉銓、庭佑、奕傑
一	7/9-13	199.8	259.9	166.3	7.0	純宛、秉銓、庭佑
二	7/14-20	104.7	179.0	126.2	95.5	純宛、奕傑、昀萱、仕程
三	7/21-27	127.3	216.9	119.3	177.5	純宛、秉銓、仕程
四	7/28-8/3	154.8	351.8	223.4	36.5	純宛、秉銓、庭佑、仕程
五	8/4-10	102.2	219.4	91.3	116.0	純宛、秉銓、庭佑、奕傑
六	8/11-17	107.6	213.3	136.1	118.0	純宛、千筑、秉銓、奕傑
七	8/18-24	218.7	354.2	246.5	692.5	純宛、秉銓、庭佑、奕傑
八	8/25-31	149.2	241.6	168.1	323.0	純宛、秉銓、庭佑、奕傑
九	9/1-7	165.2	346.4	191.0	26.5	純宛、秉銓、庭佑、奕傑
十	9/8-14	36.0	76.7	37.4	9.5	秉銓、庭佑、澤宜、維志
十一	9/15-21	0	0	0	5.5	純宛、秉銓、庭佑、奕傑
十二	9/22-28	0	0	0	18.0	純宛、秉銓、庭佑、奕傑
十三	9/29-10/5	0	0	0	0	純宛、秉銓、庭佑、奕傑
十四	10/6-12	0	0	0	17.0	純宛、秉銓、庭佑、奕傑
十五	10/13-19	0	0	0	0.5	純宛、秉銓、奕傑
十六	10/20-26	0	0	0	0	純宛、秉銓、庭佑、奕傑
十七	10/27-11/2	0	0	0	1.5	純宛、秉銓、庭佑、奕傑

資料來源：本計畫彙整

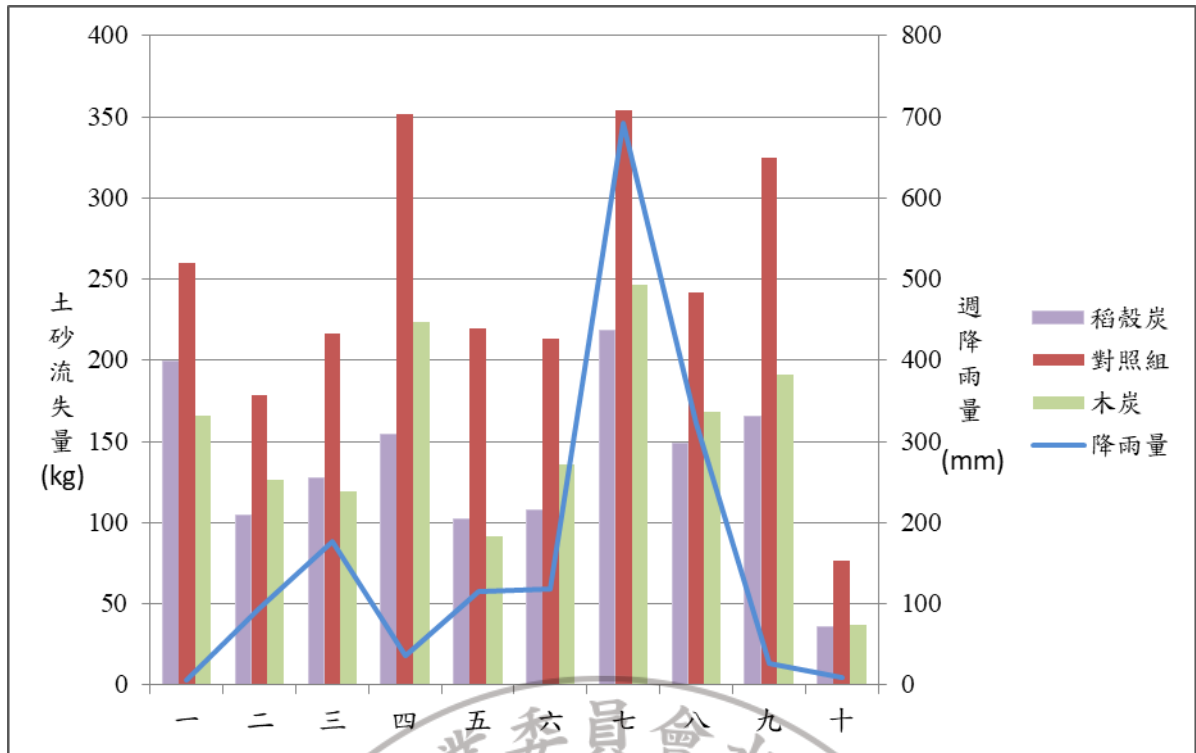


圖 4-4 週降雨量與土砂流失量之分析

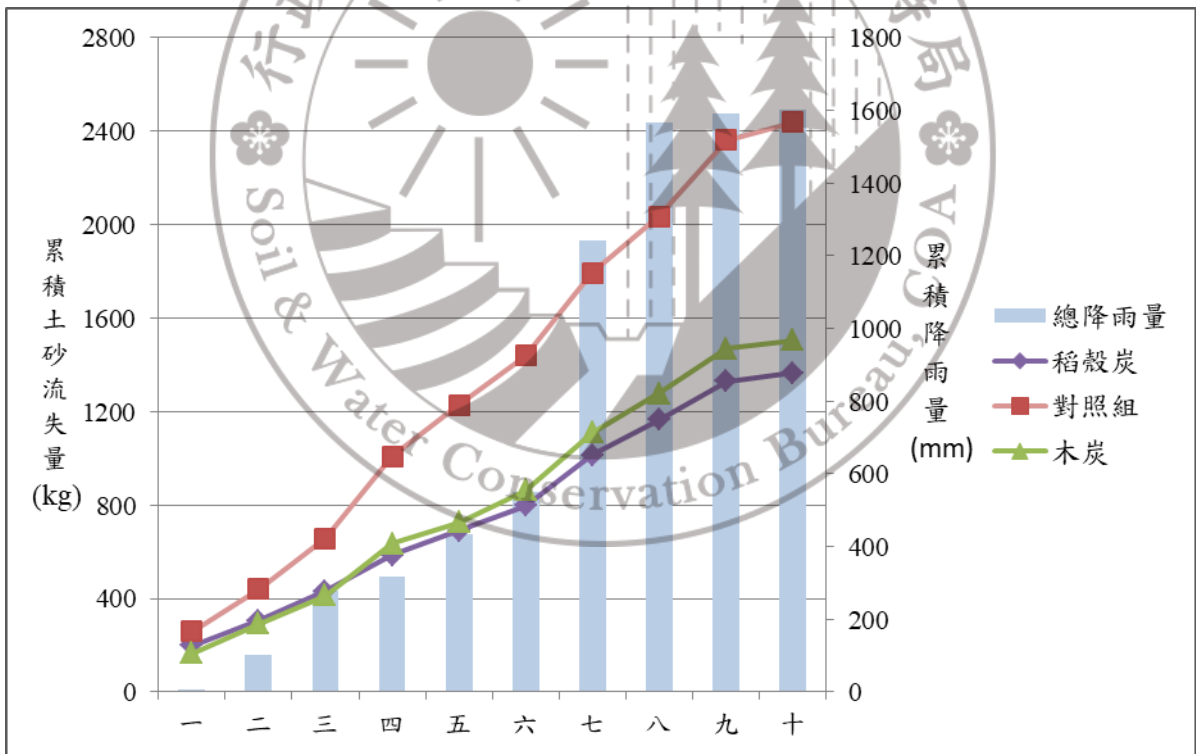


圖 4-5 累積降雨量與累積土砂流失量關係圖

三、生物炭改善前後土砂流失量之差異分析

依據每週(7-10 月)於「行政院農業委員會畜產試驗所」設置之泥岩標準試驗區土砂收集槽中之受侵蝕土砂，分析未改善(對照組)及以生物炭(2%木炭施用及 2%稻殼炭施用)改良前後之泥岩土砂流失量之差異，本計畫將使用誤差百分比法進行差異性分析，方法說明如下：

相對誤差指的是測量所造成的絕對誤差與被測量真值之比乘以 100%所得的數值，以百分數表示，相對誤差更能反映測量的可信程度。以未添加生物炭之泥岩土砂量為真值來計算相對誤差百分比，如公式 4-1 所示。

$$R = \left| \frac{A-B}{B} \right| \times 100\% \quad (4-1)$$

式中，A 為添加生物炭泥岩土砂流失量，B 為對照組泥岩土砂流失量。

期末進度之七月份至十月份每週的土砂流失量分析已完成。泥岩標準侵蝕試驗區之土砂流失量分析結果如表 4-3 所示，其中施用改良資材後土砂流失量之差異，本計畫將使用誤差百分比法進行差異分析。經過土壤流失分析後可發現，泥岩土壤施用 2%生物炭後可顯著降低土砂流失量，而第二週後，減少的土砂流失量可提升至 40%；施用稻殼炭的第一週，僅可降低 23 % 的土壤流失，而施用木炭降低的土砂流失量則是第一週即可達到 36%，顯示施用木炭比稻殼炭能更快達到降低土壤流失的效果(如圖 4-6 所示)。

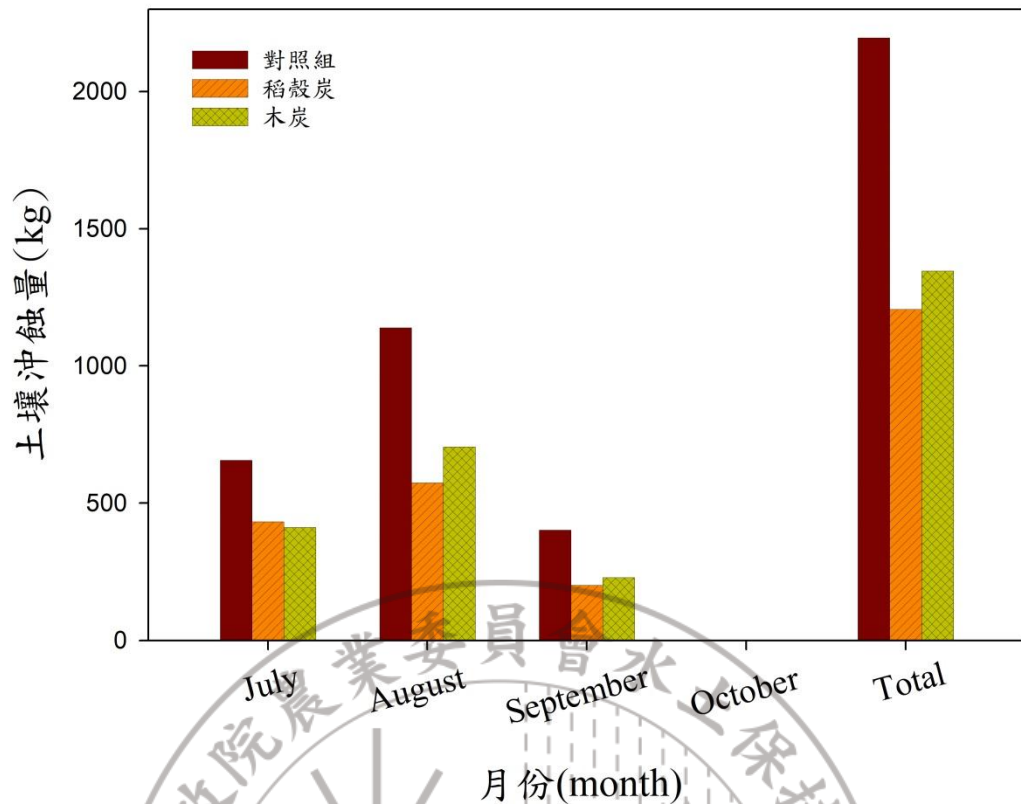


圖 4-6 添加生物炭之後至今收集土砂流失量

由圖 4-6 可得知，高侵蝕潛勢的泥岩風化土砂流失量因生物炭的添加而顯著減少，尤其以雨量高的月份(八月)，原因也可能為添加後已經過 30 天以上，生物炭土壤顆粒結合，形成更穩定之團粒，進而使得改良後之泥岩土壤抗侵蝕性更佳。

表 4-3 七月份至今泥岩標準侵蝕試驗區之土砂流失量分析

月份	試驗時間	處理	土砂流失量 (kg)	差異分析 (%)
7	7 月 09 日至 31 日	對照組 CK	655.8	-
		木炭 WB	411.8	37.2
		稻殼炭 RB	431.8	34.2
8	8 月 01 日至 31 日	對照組 CK	1,139.0	-
		木炭 WB	705.2	38.1
		稻殼炭 RB	573.4	49.7
9	9 月 01 日至 30 日	對照組 CK	401.3	-
		木炭 WB	228.4	43.1
		稻殼炭 RB	201.2	49.9
10	10 月 01 日至 31 日	對照組 CK	0	-
		木炭 WB	0	-
		稻殼炭 RB	0	-
七月份至十月份土砂流失量 比較		對照組 CK	2,196	-
		木炭 WB	1,345	38.8
		稻殼炭 RB	1,206	45.1

資料來源：本計畫彙整

四、 降雨驅動指標(RTI)

本計畫參考李明熹(2006)及行政院農業委員會水土保持局應用於土石流警戒基準值之降雨驅動指標(RTI)，探討泥岩標準試驗區之土砂流失量是否因不同降雨條件(如累積降雨 R 、降雨延時 T 、降雨強度 I 及前期降雨 P 等)而有所變化，瞭解土砂流失量與降雨特性之關係。降雨驅動指標(RTI)之定義如公式(4-2)所示，其中 RTI 為降雨驅動指標； I 為本計畫定義該週之平均降雨強度(mm/hr)； R_{te} 為該週之總有效累積降雨量(mm)。

$$RTI = I \times R_{te} \quad (4-2)$$

公式(1)中影響土砂流失發生之該週總有效降雨量(R_{te})(mm)為該週降雨累積雨量(R_0)(mm)及該週前期降雨量(P)(mm)之和，如公式(4-3)所示。

$$R_{te} = R_0 + P \quad (4-3)$$

而該週前期降雨量(P)之計算方式如公式(4-4)所示，其中 α^i 為日雨量加權係數，本計畫考量該週降雨開始時刻前七天雨量並取 $\alpha = 0.8$ ，前第八天後雨量的權重小於 0.17，予以忽略不計； R_i 為該週降雨開始時刻前 i 天之日雨量(mm)。

$$P = \sum_{i=1}^7 \alpha^i R_i \quad (4-4)$$

依據上述之計算方法，本計畫首先以有收集土砂之週次為一單位，接著定義降雨驅動指標(RTI)中的降雨強度(I)(mm/hr)，分別為最大 1 小時、最大 3 小時平均及最大 1 日平均之降雨強度，計算出不同降雨強度之 RTI 後，再將 RTI 與未改善(對照組)及以生物炭(2%木炭施用及 2%稻殼炭施用)改良之泥岩土砂流失量進行分

析，數據經統計整理如表 4-4 所示。

為探討不同降雨條件與泥岩土砂流失量之關係，依據表 4-4 中數據繪製 XY 散佈圖，如圖 4-7 至圖 4-9 所示，X 軸為不同降雨強度之 RTI，Y 軸為土砂流失量(kg)，藍色菱形代表稻殼炭，紅色正方形代表對照組，綠色三角形代表木炭。從圖 4-7 至圖 4-9 中可得知於第一週時因泥岩標準試驗區剛建置完畢，土壤仍為不穩定且鬆動的狀態，極易因降雨造成大量侵蝕，因此 RTI 值雖然較低，但土砂流失量卻相較前期其他週來的高。此外，本計畫另探討累積土砂流失量與 RTI 之關係，如圖 4-10 所示，由圖中可看出 RTI 與土砂流失量在整體上較無明顯之關係，本計畫推測其主要原因為樣本數不足，使得統計上之不確定性增加，建議未來若能進行長時間之降雨資料及土壤流失量蒐集，將有助於瞭解兩者間之關係與變化趨勢。整體而言，在相同降雨驅動指標下，對照組之土砂流失量皆大於以生物炭改良之土砂流失量。



表 4-4 每週降雨驅動指標與土砂流失量之統計表

週次	日期	降雨驅動指標(RTI)			土砂流失量(kg)		
		最大 1 小時平均	最大 3 小時平均	最大 1 日平均	稻殼炭	對照組	木炭
一	7/9-13	265.0	88.3	19.3	199.8	259.9	166.3
二	7/14-20	2,277.1	1,203.4	201.3	104.7	179.0	126.2
三	7/21-27	6,647.3	3,798.5	727.1	127.3	216.9	119.3
四	7/28-8/3	793.4	283.3	77.9	154.8	351.8	223.4
五	8/4-10	5,176.4	1,725.5	239.0	102.2	219.4	91.3
六	8/11-17	5,896.3	2,151.4	438.2	107.6	213.3	136.1
七	8/18-24	38,734.0	26,071.0	9,916.3	218.7	354.2	246.5
八	8/25-31	20,785.2	10,065.8	3,840.0	149.2	241.6	168.1
九	9/1-9/7	3,044.1	1,014.7	126.8	165.2	324.6	191.0
十	9/8-14	105.2	35.1	6.0	36.0	76.7	37.4
十一	9/15-21	15.8	7.9	1.3	0	0	0
十二	9/22-28	216.5	72.2	14.3	0	0	0
十三	9/29-10/5	0	0.0	0	0	0	0
十四	10/6-12	229.5	76.5	11.9	0	0	0
十五	10/13-19	4.7	1.6	0.2	0	0	0
十六	10/20-26	0	0.0	0	0	0	0
十七	10/27-11/2	0.8	0.5	0.1	0	0	0

資料來源：本計畫彙整

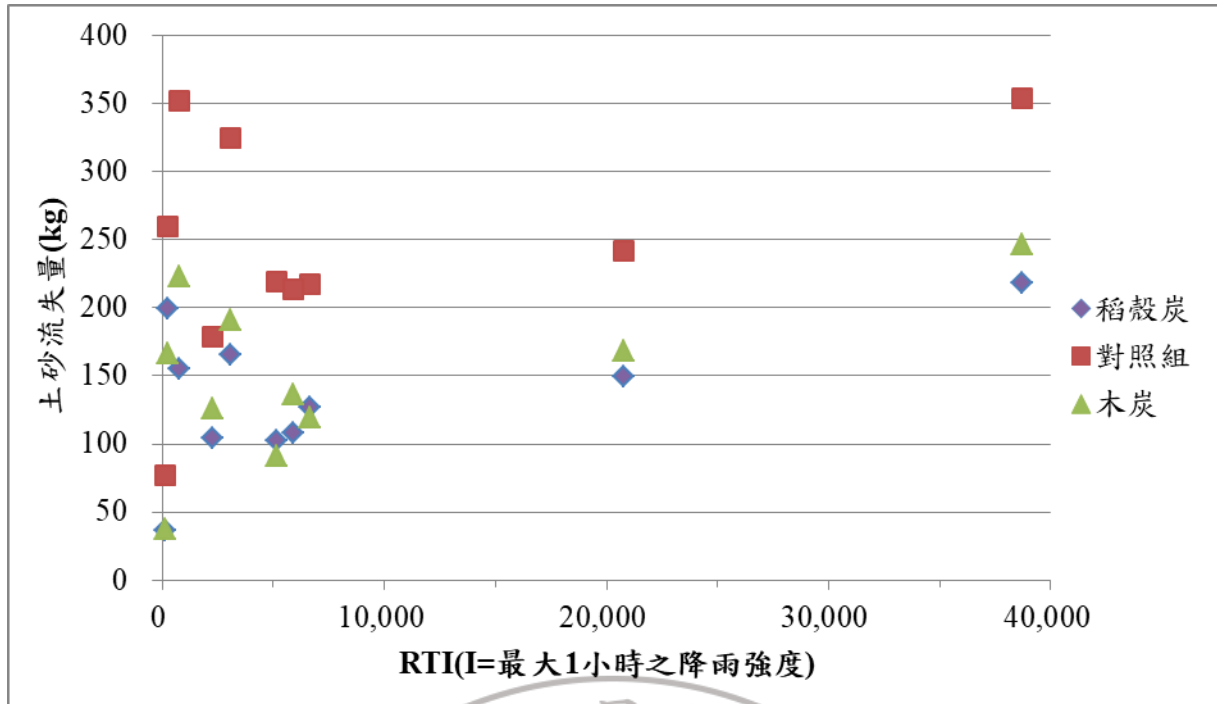


圖 4-7 RTI(最大 1 小時之降雨強度)與土砂流失量之關係圖

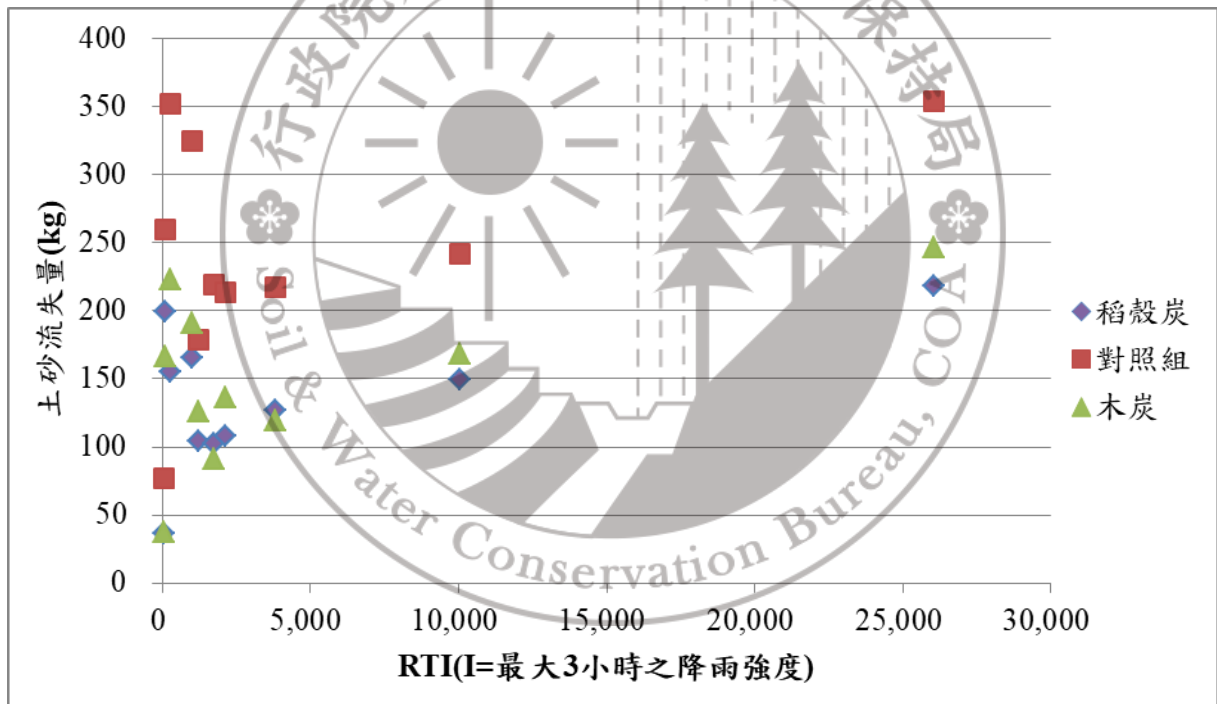


圖 4-8 RTI(最大 3 小時平均之降雨強度)與土砂流失量之關係圖

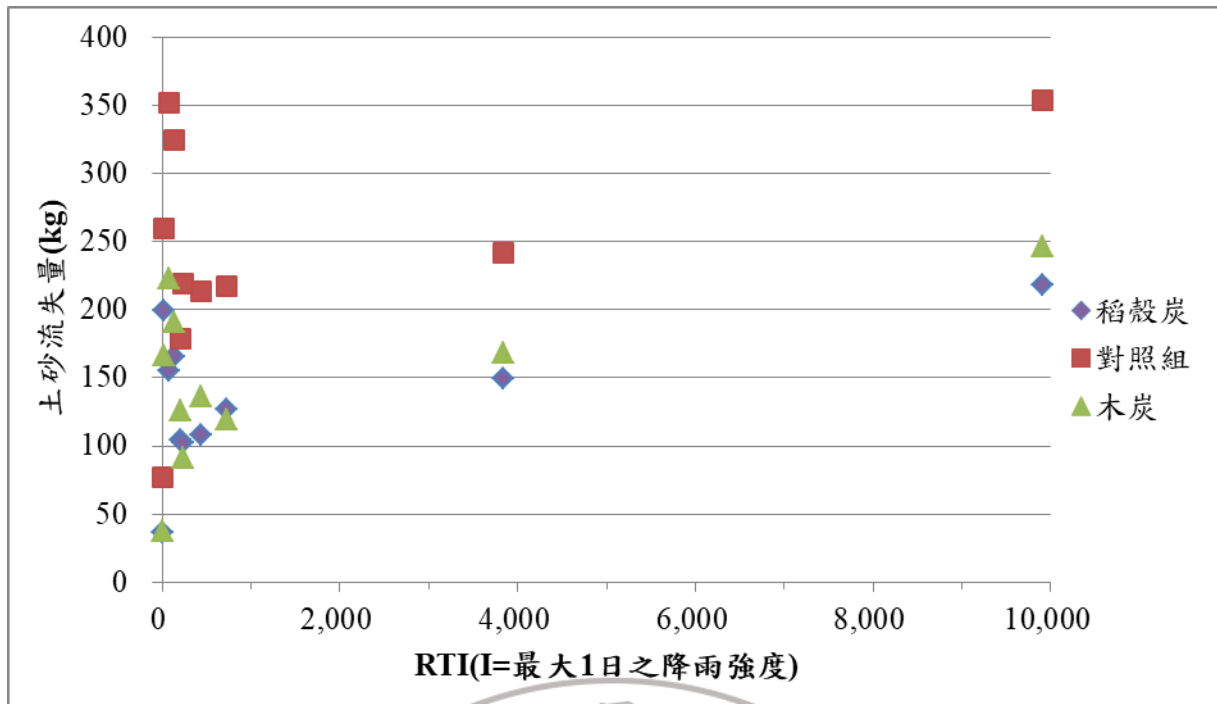


圖 4-9 RTI(最大 1 日平均之降雨強度)與土砂流失量之關係圖

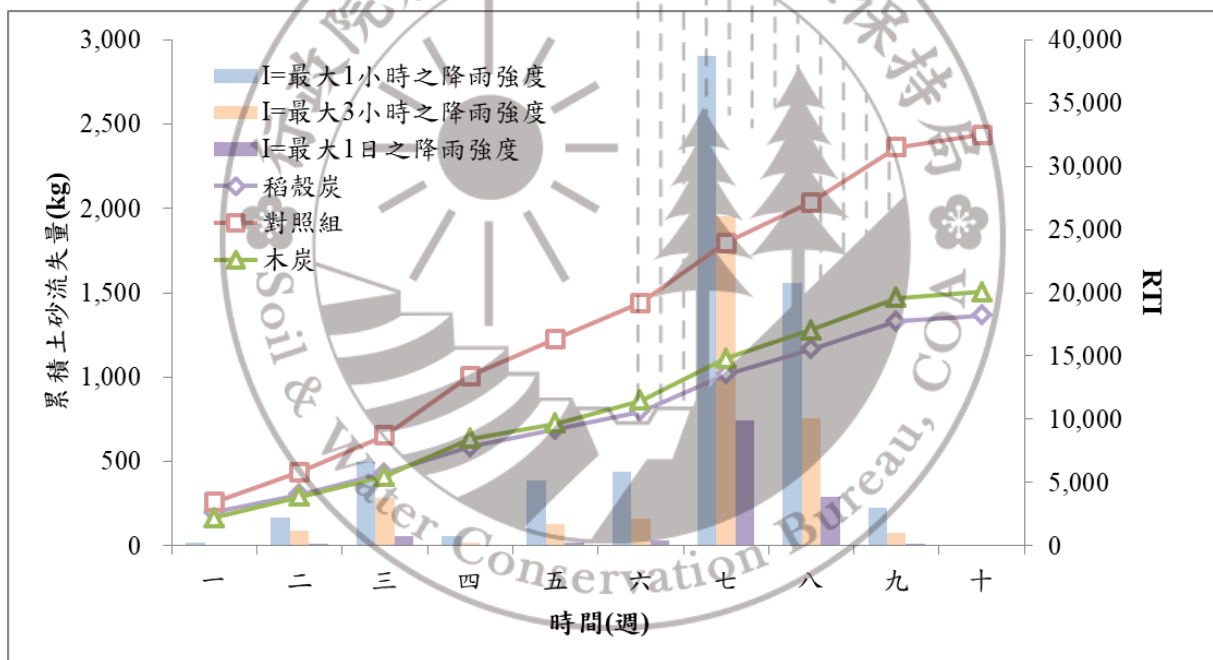


圖 4-10 累積土砂流失量與 RTI 之關係

4.2 以 USLE 分析之 K 值與實際沖蝕量推算之 K 值之差異判斷其合理性

一、以標準侵蝕試驗區之分析結果套用 USLE 公式推算其 K 值

本計畫於 11 月初至畜試所泥岩標準試驗區進行土壤結構鑑定，並於現地以張力入滲計測定土壤導水度，且採集 0-20 公分之表土作為分析樣本，攜回實驗室後測定各項土壤性質分析。將獲得之土壤參數計算 K 值。其 K 值之土壤參數分析項目如下：

(一) 土壤構造鑑定：現地鑑定土壤構造與大小

依美國農部(USDA)國家土壤調查中心(National Soil Survey Center)出版之土壤調查描述手冊(Field Book for Describing and Sampling Soils, 2014)中之規範，現地鑑定土壤構造與大小。泥岩標準侵蝕試驗區各處理之之土壤構造鑑定皆已全部完成，其成果如表 4-5 所示。

表 4-5 試驗區之土壤構造鑑定

處理	土壤代表性構造	代表性構造尺寸 (mm)	代表性構造比例 (%)
對照組 CK	Gr(團粒狀)	<1 mm	40
木 炭 WB	Sbk(鈍角狀)	1~2 mm	35
稻殼炭 RB	Sbk(鈍角狀)	1~2 mm	40

資料來源：土壤調查描述手冊及本計畫彙整

(二) 土壤質地分析：比重計法

利用比重計法測定土壤砂粒(2-0.05 mm)、粉粒(0.05-0.002 mm)及

粘粒(< 2 μ m)之組成比例。利用乾篩機分離粗砂(2-0.5 mm)、中砂(0.5-0.25 mm)、細砂(0.25-0.1 mm)、極細砂(0.1-0.05 mm)。泥岩標準侵蝕試驗區各處理之質地分析結果如表 4-6 所示。

表 4-6 試驗區之土壤質地分析

處理	砂粒含量 (%)	粉粒含量 (%)	黏粒含量 (%)	極細砂含量 (%)	土壤質地分類
對照組 CK	16.0	54.0	30.0	17	粉質壤土
木 炭 WB	20.0	51.0	29.0	9.7	粉質壤土
稻殼炭 RB	18.0	52.0	30.0	9.2	粉質壤土

資料來源：土壤調查描述手冊及本計畫彙整

(三)土壤水力傳導度測定：張力入滲計

以張力入滲計測定現地土壤導水度。如遇無法利用張力入滲計之地形位置，則利用既定體積之不銹鋼土罐(soil core)，貫入土壤，攜回實驗室，以定水頭法測定壤飽和導水度。泥岩標準侵蝕試驗區各處理之導水度成果如表 4-7 所示。其中，添加生物炭進行改良的處理之水力傳導度。

表 4-7 試驗區之土壤導水度測定

處理	平均水力傳導係數 K_T (mm/hr)	土壤導水度等級
對照組 CK	0.025	極慢
木 炭 WB	0.272	極慢
稻殼炭 RB	0.237	極慢

資料來源：本計畫彙整

(四)土壤有機質含量 - 濕式氧化法 (Nelson and Sommers, 1982)

取 0.5 g 風乾土壤置於 500 ml 三角錐瓶中，於抽氣櫃中依序加入 20 ml 1 N 重鉻酸鉀 ($K_2Cr_2O_7$)及 20 ml 95 %濃硫酸 (H_2SO_4)，充分震盪使土壤與溶液混合後，靜置約 30 分鐘。加入 100 ml 去離子水、5 ml 98% 濃磷酸 (H_3PO_3) 及 4 滴菲羅琳指示劑 (o-phenanthroline indicator)，以 0.5 N 硫酸亞鐵銨溶液($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$)滴定至終點。泥岩標準侵蝕試驗區各處理之有機質試驗成果如表 4-8 所示。

表 4-8 試驗區之土壤有機質含量

處理	有機質含量 OM	腐植質含量
	(%)	等級
對照組 CK	1.20	中腐植質
木 炭 WB	1.32	中腐植質
稻殼炭 RB	1.32	中腐植質

資料來源：本計畫彙整

本計劃將標準侵蝕試驗區之對照組(CK)、添加 2%木炭(WB)及 2%稻殼炭(RB)分析結果代入 Wischmeier (Wischmeier and Smith, 1984)公式 4-5 進行推算得到的土壤侵蝕性指數(K 值)，其結果如表 4-11 所示。

Wischmeier (Wischmeier and Smith, 1984)

$K(\text{公制}) = 0.1317 \times K(\text{英制})$

$$K = 0.1317 \times \frac{2.1M^{1.14}(10^{-4})(12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3)}{100} \quad (4-5)$$

其中：M= 粉粒與極細砂(0.002~0.1mm)×(100%-黏粒%)；

a=有機質含量(%)；

b=土壤結構參數；

c=土壤滲透性參數。

※當土壤之有機質含量超過 4%時仍以 4%計算。

表 4-9 土壤結構參數

結構參數值	土壤結構	粒徑大小 (mm)
1	極細顆粒	<1.0
2	細顆粒	1.0~2.0
3	中或粗顆粒	2.0~10.0
4	塊狀、片狀或粗顆粒	>10.0

資料來源：土壤流失量估算手冊

表 4-10 土壤滲透性參數

滲透性參數值	滲透性	滲透速率 (mm/hr)
1	極快	>125.0
2	快	62.5~125.0
3	中等	20~62.5
4	中等慢	5.0~20.0
5	慢	1.25~5.0
6	極慢	<1.25

資料來源：土壤流失量估算手冊

表 4-11 試驗區之土壤沖蝕指數 K 值及參數

處理	粉粒及極細砂 (100%-黏粒)M	有機質含量 a (%)	土壤結構參數 b	滲透性參數值 c	土壤沖蝕性指數 Km (t·ha·yr·ha ⁻¹ ·MJ ⁻¹ ·mm ⁻¹)
對照組 CK	4991.0	1.20	1.0	6	0.0547
木炭 WB	4309.7	1.32	2.0	6	0.0510
稻殼炭 RB	4284.0	1.32	2.0	6	0.0507

資料來源：本計畫彙整



二、 利用標準侵蝕試驗區之實際侵蝕量推算 K 值

本計畫於「行政院農業委員會畜產試驗所」設置的 3 個泥岩標準試驗區，試驗區分別為未改善(對照組)及以生物炭(2%木炭施用及 2%稻殼炭施用)改良之泥岩土壤，並於 7 月至 10 月期間每週前往現地收集侵蝕槽中之受侵蝕土砂，已進行土壤流失量分析。本團隊亦於監測期間利用中央氣象局畜試所之雨量站，蒐集降雨量進行分析，並推算該月份之降雨沖蝕指數 R。

由於本計畫所建置之侵蝕試區為標準試驗區(長 22.13 公尺、寬 4 公尺、坡度 9%)，因此試驗區之坡度坡長因子 LS 為 1；而試驗區每個月會進行除草作業以維持試驗區裸露狀態，因此試驗區之作物與管理因子 C 為 1；而試驗區為平整坡面，無水土保持設施或工法，因此水土保持處理因子 P 為 1；本計畫將試驗區每個月之實際土砂流失量 A、降雨沖蝕指數 R、坡度坡長因子 LS、作物與管理因子 C 及水土保持處理因子 P 代入 Wischmeier 之(Wischmeier and Smith, 1984)USLE 公式中，以推算出土壤沖蝕指數 K 值，如表 4-12。

表 4-12 現地土壤沖蝕指數 K 推算

月份	處理	土砂流失量 A (kg)	總降雨量 P (mm)	降雨沖蝕性指數 R (MJ-mm/ha-hr)	土壤沖蝕性指數 K (t·ha·yr·ha ⁻¹ ·MJ ⁻¹ · mm ⁻¹)
7	對照組 CK	655.8	690	3,784	0.1733
	木炭 WB	411.8			0.1088
	稻殼炭 RB	431.8			0.1141
8	對照組 CK	1139	1,282	15,705	0.0725
	木炭 WB	705.2			0.0449
	稻殼炭 RB	573.4			0.0365
9	對照組 CK	401.3	60	1,602	0.2505
	木炭 WB	228.4			0.1426
	稻殼炭 RB	201.2			0.1256
10	對照組 CK	0	19	47	-
	木炭 WB	0			-
	稻殼炭 RB	0			-

-：無法推算

資料來源：本計畫彙整

三、 USLE 分析之 K 值與實際侵蝕量推算之 K 值之合理性

本計畫之第二次泥岩標準侵蝕試驗區於 6 月 27 日完成建置，因此試驗區之 7 月份所推算的現地土壤沖蝕指數 K 會顯著高於 USLE 公式所推算之 K 值；其中，8 月份所推算出來的現地土壤沖蝕至數 K 與 USLE 公式推算之 K 值較為相近；而進入 9 月份時，因 8 月底持續大雨，試驗區內的土壤水分仍趨近飽和，因此 9 月份之降雨沖蝕指數較低的情況下，收集到的土壤侵蝕量會有偏高的情形，進而導致推算的 K 值顯著提高；而 10 月時，標準侵蝕試驗區已進入乾季，因此降雨量偏低，在低降雨侵蝕指數下，試驗區之土壤未達到侵蝕狀態，故無法推算現地土壤沖蝕指數。



第伍章 進行生物炭土壤改良後之效益與生物炭成本之比較分析

5.1 泥岩標準試區施用生物炭土壤改良後之效益

生物炭用於土壤改良為近年來新興之技術與方法，不僅可提高土壤中碳存量，亦可有效提升土壤保肥力與生產力。於土壤中施用生物炭後，能使植物快速生長，提高葉面覆蓋速率以保護地表及阻檔雨滴打擊，並可減緩地表逕流之流速，有效防止土壤侵蝕。

本計畫為瞭解於泥岩標準試區施加生物炭之土壤改良效益，在土砂流失量試驗結束後，進行泥岩標準試區植物生長覆蓋率之初步研究。本團隊於 11 月 1 日至試區進行除草，如圖 5-1 及 5-2 所示，並於 11 月 18 日至試區拍攝植物生長情形，由左到右分別為施用稻殼炭、未改善(對照組)及施用木炭之標準試區，如圖 5-3 所示。接著以影像處理軟體 ImageJ 判釋植物生長面積佔泥岩標準試區面積之像素百分比(植物覆蓋面積像素除以泥岩標準試區面積像素)，估算出植物生長之覆蓋率，如表 5-1 所示，施加稻殼炭的覆蓋率為 62%、未改善(對照組)的覆蓋率為 30.5%及施加木炭的覆蓋率為 53.5%。由表可知，於泥岩地區施加生物炭可有效促進植物生長及擴展，且以施加稻殼炭之效果為更佳。



圖 5-1 泥岩標準試區除草



圖 5-2 泥岩標準試區除草後



圖 5-3 泥岩標準試區植物生長情況

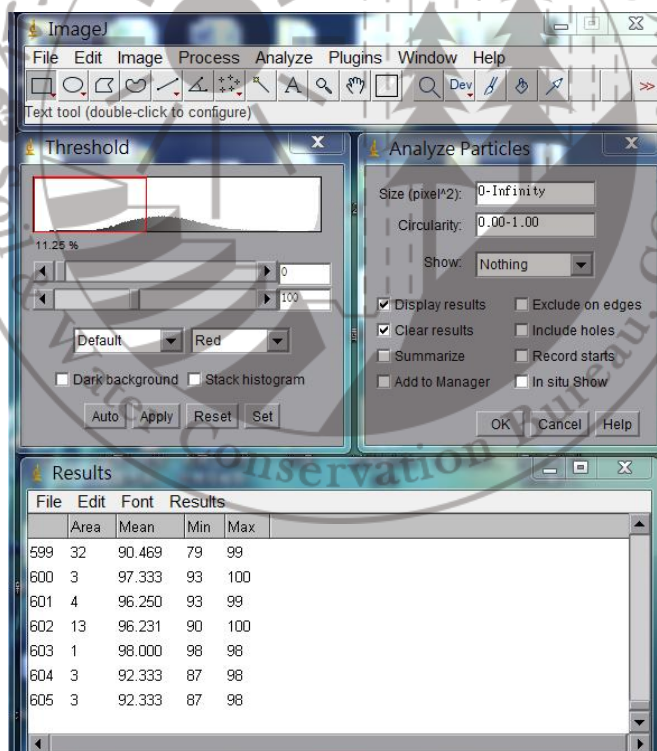
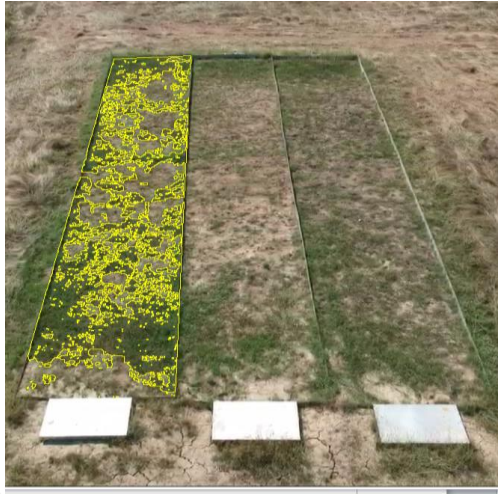
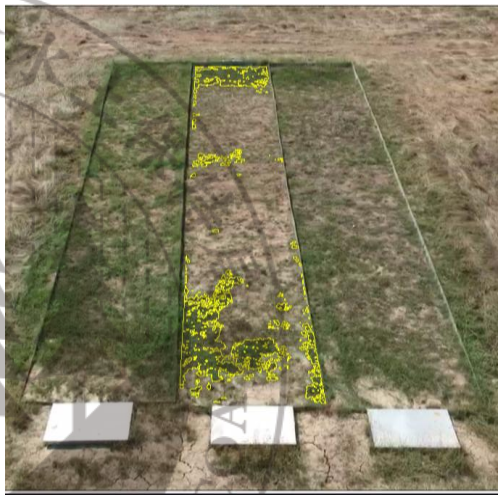


圖 5-4 ImageJ 操作介面

表 5-1 利用 ImageJ 分析植物生長覆蓋率

泥岩標準試區	覆蓋率(%)	照片
稻殼炭	62.0	
未改善(對照組)	30.5	
木炭	53.5	

資料來源：本計畫彙整

5.2 稻殼炭與廢棄枝條之成本分析

本計畫採用之稻殼炭與木炭皆為利用金字塔爐自行燒製，僅購買新鮮稻殼與自養工處索取行道樹廢棄枝條。稻殼由碾米廠購買，費用為 5 元/公斤；廢棄枝條免費。如依標準侵蝕試區面積(21 公尺*4 公尺)與施用深度(0.15 公尺)計算，加上泥岩土壤總體密度為 1.40 Mg/m^3 ；如以施用率為 2% (w/w)來計算，則一標準侵蝕樣區需要稻殼炭 353 公斤，標準侵蝕試區需要木炭 353 公斤。

以目前的碳化技術來說，燃燒 10 公斤的生物質，大約可以產生 2.5 公斤的生物炭。因此，本計畫需要每種生物質的總量為 353 公斤*4=1,412 公斤。據此，所需購買稻殼經費為 $1,412*5=7,060$ 元，購買廢棄枝條經費仍為 0 元。

製備器具方面，燒製金字塔爐為四片不銹鋼製成，器具工資製作成本為 7,000/具，本計畫需要 5 具同時燒製製備生物炭。前已述明，燃燒 10 公斤的生物質，約可以產生 2.5 公斤的生物炭。每具金字塔爐每次可填裝約 10 公斤生質料，並產生約 2.5 公斤的生物炭。每天每具爐可燒製 4 次，五具金字塔爐同時燒製，每日可產生 50 公斤生物炭。五具金字塔爐共需 35,000 元，兩種不同資材生物炭均可使用同一具製備器具，故 $35,000/2=17,500$ 元。

人力方面，每天需要 2 人燒製生物炭。依據本計畫所需的生物炭量為 353 公斤，因此，生物炭製備時間需要 8 日。如以每人每日 800 元工資計算，因此工資需要 $800*2*8=12,800$ 元。兩種不同材料生物炭，因此需要 $12,800*2=25,600$ 元。

施工費用方面，運用曳引機將泥岩土壤與生物炭拌勻，依據行政

院農業委員會畜產試驗所收費標準，租借曳引機 1,600 元/每公頃。

本計畫若以每單位面積需求費用來計算，則生產稻殼炭需要 445 元/m²，而生產木炭需要 361 元/m²。若生物炭全數改為使用購置，經詢問廠商後：碳化稻殼 353 公斤為 6,414 元(含運費)；木炭則為 6,900 元(含運費)。稻殼炭需要 76.4 元/m²，而生產木炭需要 82.1 元/m²。

本計畫參考陳盟文(2006)研究結果，彙整各護坡施工之單位造價與適用坡度，如表 5-2 所示。由該表得知，利用泥岩常見的“植生帶”與“土胎植生護坡”每平方公尺造價分別為 1,500 元與 2,080 元。適用於中高坡度以上之護坡工法造價約介於 1,200 元/m² 至 2,100 元/m² 之間。本計畫之生物炭工法的施工成本與維護成本低廉，若長遠觀之，生物炭工法於泥岩緩坡之可行性皆相當高，因此彙整出表 2-5，提供未來相關單位施工之參考依據。



表 5-2 彙整生物炭法與其他工法之施工單價與適用坡度

項次	護坡工法	單價 (元/ m ²)	適用坡度	說明
1	土胎植生工法 (培地茅)	2,080	-	* 僅施工約 180 m ²
2	自由樑框工法	2,048	<60 °	*
3	格框客土袋粹 草護坡	1,570	<60 °	*
4	土胎植生工法 (植生帶)	1,500	-	* 僅施工約 180 m ²
5	掛網噴粹法	1,300	35 °-60 °	*
6	布袋模毯工法	1,285	<40 °	*
7	肥束網帶法	360	<35 °	*
8	粹生帶法	345	-	*
9	自然邊坡	285	-	*
10	生物炭(稻殼)	445	<20 °	-
11	生物炭(廢棄 枝條)	361	<20 °	-
資料來源：陳盟文 (2006)及本計畫彙整				

5.3 評估泥岩土壤因施用生物炭後所吸存之碳量，評估碳足跡

本計畫以兩部分來評估碳足跡，一為土壤中的碳吸存量，二為工法釋放之二氧化碳。

碳吸存方面，無添加任何改良劑的泥岩(對照組)的土壤有機碳含量為 12.2 g kg^{-1} ，總碳約為 34.2 g kg^{-1} 。若以總體密度 1.4 Mg m^{-3} 計算，泥岩土壤深度 50 cm 計算，則單位體積之土壤重量為 700 公斤，而單位體積總碳吸存量為 $23.94 \text{ kg/m}^2/50 \text{ cm}$ 。稻殼炭之總碳含量為 463 g kg^{-1} ，木炭之總碳含量為 840 g kg^{-1} ，如以相同的單位體積計算，以生物炭之施用率 2% (w/w) 來計算，則稻殼炭處理之泥岩土壤總碳吸存量為 $30.42 \text{ kg/m}^2/50 \text{ cm}$ ，而木炭處理之泥岩土壤總碳吸存量為 $35.70 \text{ kg/m}^2/50 \text{ cm}$ 。綜觀而言，添加生物炭於泥岩土壤可增加單位體積土壤碳吸存量 5-12 $\text{kg/m}^2/50 \text{ cm}$ ，亦即可增加 0.7-1.7% 的總碳於土壤中，如未來每年添加相同量之生物炭，則可符合 2016 年巴黎協定之工約內容 (每年需回復 0.4% 至土壤中)。

以釋放二氧化碳方面，國家政策研究基金會(2007)指出，若根據本計畫兩種生物質的總碳含量計算，燃燒 1 公斤木炭約會排放 3.7 公斤之二氧化碳，而燃燒 1 公斤稻殼炭約會排放 2.1 公斤之二氧化碳。以上述單位土壤體積(0.5 m^3)以及製備生物炭之產率 25% 來計算，則燒製單位土壤體積所需生物炭所釋放之二氧化碳分別為：木炭為 $207 \text{ kg/m}^2/50 \text{ cm}$ ；稻殼炭為 $117.6 \text{ kg/m}^2/50 \text{ cm}$ 。

Jien et al. (2018) 指出，相較於控制組 (無添加任何改良資材)，添加生物炭可有效減低土壤中 22% 的二氧化碳釋放量。生物炭的存在可有效減緩土壤二氧化碳之釋出。

第陸章 執行期間相關配合事項

6.1 依臺南分局需要，會同出席相關計畫審查會議或現場會勘，並協助準備相關會議(勘)資料

一、第一次工作會議

(一)時間：107 年 02 月 08 日(星期四)上午 10 時 00 分

(二)地點：行政院農業委員會水土保持局臺南分局

(三)主持人：林課長瑞仁

(四)出席人員：林瑞仁課長、陳慧玲工程員、李明熹副教授、莊純宛



二、期初審查會議

(一)時間：107 年 03 月 29 日(星期四)上午 10 時 30 分

(二)地點：行政院農業委員會水土保持局臺南分局

(三)主持人：林課長瑞仁

(四)出席人員：林瑞仁課長、陳慧玲工程員、李明熹副教授、簡士濠副教授、林德貴教授、宋國柱副分局長、莊純宛

三、陳慧玲工程員至泥岩試區現場會勘

(一)時間：107 年 06 月 12 日(星期二)下午 16 時 00 分

(二)地點：畜產試驗所泥岩標準試區



四、洪政義秘書、林瑞仁課長及陳慧玲工程員至泥岩試區現場會勘

(一)時間：107 年 06 月 27 日(星期三)下午 13 時 00 分

(二)地點：畜產試驗所泥岩標準試區



五、期中審查會議

(一)時間：107 年 09 月 17 日(星期一)上午 10 時 30 分

(二)地點：臺南區農業改良場作物改良課二樓會議室

(三)主持人：邱副分局長啓芳

(四)出席人員：林瑞仁課長、陳慧玲工程員、李明熹副教授、簡士濠副教授、林俐玲教授、臧運忠主任、宋國柱委員、莊純宛



6.2 各期報告印刷、各期審查及相關會勘出席費用

一、 第一次工作會議簡報(107 年 02 月 08 日)

優質、效率、團隊

利用生物炭改良泥岩惡性地土壤沖蝕量

工作會議



國立屏東科技大學
水土保持系
計畫主持人：李明熹 副教授
共同主持人：簡士濠 副教授
國立屏東科技大學 水土保持系 中華民國 107 年 2 月 8 日 1

二、 期初審查會議(107 年 03 月 29 日)

優質、效率、團隊

利用生物炭改良泥岩惡地土壤沖蝕量

期初簡報



國立屏東科技大學
水土保持系
計畫主持人：李明熹 副教授
共同主持人：簡士濠 副教授
國立屏東科技大學 水土保持系 中華民國 107 年 3 月 29 日 1

利用生物炭改良泥岩惡地 土壤沖蝕量 工作計畫書



三、 工作進度簡報(107 年 06 月 20 日)

優質、效率、團隊

利用生物炭改良泥岩惡地土壤沖蝕量

工作進度報告



國立屏東科技大學
水土保持系

計畫主持人：李明熹 副教授
共同主持人：簡士濠 副教授

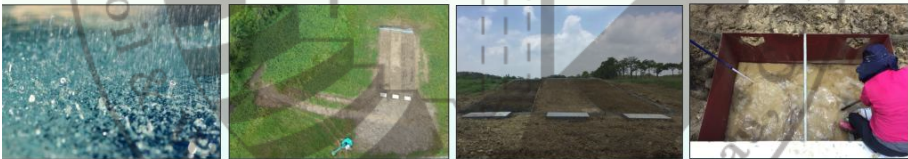
國立屏東科技大學 水土保持系 中華民國 107 年 06 月 20 日 1

四、 期中審查會議(107 年 09 月 17 日)

優質、效率、團隊

利用生物炭改良泥岩惡地土壤沖蝕量

期中簡報



國立屏東科技大學
水土保持系

計畫主持人：李明熹 副教授
共同主持人：簡士濠 副教授

國立屏東科技大學 水土保持系 中華民國 107 年 9 月 17 日 1

利用生物炭改良泥岩惡地 土壤沖蝕量 期中報告



五、 期末審查會議(107 年 12 月 10 日)

優質、效率、團隊

利用生物炭改良泥岩惡地土壤沖蝕量

期末簡報

國立屏東科技大學

水土保持系

計畫主持人：李明熹 副教授

共同主持人：簡士濠 副教授

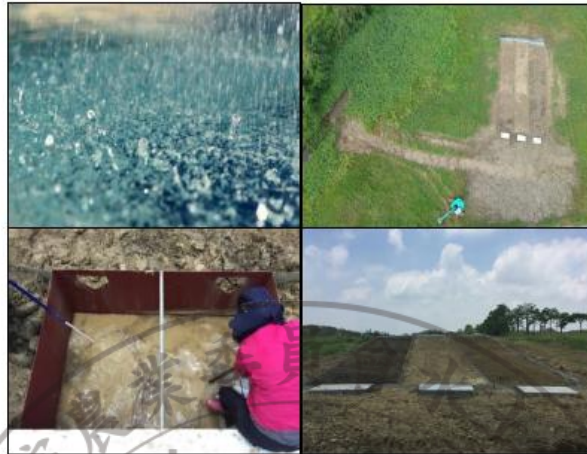
國立屏東科技大學 水土保持系

中華民國 107 年 12 月 10 日

1



利用生物炭改良泥岩惡地 土壤沖蝕量 期末報告書



執行單位：國立屏東科技大學
中華民國107年11月

第柒章 結論與建議

7.1 結論

- (一) 添加生物炭可大幅提升團粒穩定度，並有效減少總體密度、使導水性或孔隙度增加並且進而達到土壤抗侵蝕之效果；雖 pH、電導度、無機氮、有效性磷及陽離子交換容量較無直接關係，但上述基本性質均可經由添加生物炭而使作物更易生長。
- (二) 本計畫施用生物炭進行改良泥岩土壤，養治 120 天後之結果顯示對照組之流失量為 2,195 kg；添加 2%改良資材木炭之流失量為 1,345 kg，顯著降低 38.8%的土壤流失量；添加 2%改良資材稻殼炭之流失量為 1,206 kg 顯著降低 45.1%的土壤流失量。
- (三) 土壤流失量因生物炭的添加而顯著減少，尤其以雨量高的月份(八月)，原因可能為添加後已經過 30 天以上，生物炭土壤顆粒結合，形成更穩定之團粒，進而使得改良後之泥岩土壤抗侵蝕性更佳。
- (四) 本計劃將標準侵蝕試驗區之對照組(CK)、添加 2%木炭(WB)及 2%稻殼炭(RB)基本性質分析結果代入 Wischmeier 公式進行推算得到的土壤沖蝕性指數(K 值)，得知添加 2%木炭(WB)及 2%稻殼炭(RB)之 K 值(0.0510 及 0.0507 $t \cdot ha \cdot yr \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$)均低於 CK 之 K 值 0.0547 $t \cdot ha \cdot yr \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ ，結果顯示添加生物炭確實能減少土壤流失

量。

(五) 本計畫利用標準侵蝕試驗區之實際侵蝕量推算 K 值，試驗區之 7 月份所推算的現地土壤沖蝕指數 K 會顯著高於 USLE 公式所推算之 K 值，可能為 6 月底本試驗區建置完成，生物炭混入且經翻耕後導致；8 月份所推算出來的現地土壤沖蝕指數 K 與 USLE 公式推算之 K 值較為相近；而進入 9 月份時，因 8 月底持續大雨，試驗區內的土壤水分仍趨近飽和，因此 9 月份之降雨沖蝕指數較低的情況下，收集到的土壤流失量會有偏高的情形，進而導致推算的 K 值顯著提高。

(六) 本計畫以原物料、人力、製備器具等納入計算，若以每單位面積需求費用來計算，則生產稻殼炭需要 445 元/m²，而生產木炭需要 361 元/m²。

(七) 碳吸存方面，添加生物炭於泥岩土壤可增加單位體積土壤碳吸存量 5-12 kg/m²/50 cm，亦即可增加 0.7-1.7% 的總碳於土壤中，如未來每年添加相同量之生物炭，則可符合 2016 年巴黎協定之公約內容（每年需回復 0.4% 至土壤中）。

7.2 建議

- (一) 降雨量與土壤流失量在整體上較無明顯之關係，因本計畫為第一年之基礎研究，建議未來能進行長時間之降雨資料及土壤流失量蒐集，將有助於瞭解兩者間之關係與變化趨勢。
- (二) 本計畫今年度僅針對生物炭施用於土壤抗侵蝕能力之評估，對於植物根系生長於侵蝕量抑制成效，有機會可於其它年度進行設計評估。





參考文獻

1. 中華民國環境綠化協會，2006，泥岩地區保育與社區整體景觀規劃模式之建置，水土保持局第四工程所。
2. 王鑫，1988，泥岩惡地地景保留區之研究，行政院農業委員會和臺灣大學地理學系合作計劃，77年生態研究第004 號。
3. 行政院農業委員會水土保持局，1996，土壤流失量估算手冊，行政院農業委員會水土保持局編印。
4. 李德河、紀雲曜、田坤國，1994，泥岩之基本特性及泥岩邊坡之保護措施，地工技術雜誌，48：35-47。
5. 林俐玲、杜怡德、王仲豪，2001，土壤質地與K 值相關性及空間變異性之探討—以東勢、國姓區塊為例，水土保持學報33：105-122。
6. 林昭遠、林文賜、王清賢、陳素珠，2000，專家系統應用於土壤沖蝕推估之研究，中華水土保持學報31：291-300。
7. 林昭遠，1997，集水區泥岩裸露邊坡植生復育之研究，水土保持學報，29：169-181。
8. 林信輝，1999，泥岩集水區治理策略之探討，泥岩地區整治與植生綠化研討會論文集，pp2-3。
9. 張俊斌，2003，西南部泥岩景觀生態結構與變遷之研究，中興大學水

- 土保持系博士論文，臺中，臺灣。
10. 張穗蘋，2000，臺南地區泥地帶的植物相，臺灣南部泥岩生態研討會論文集，pp.13-14。
 11. 陳時祖，2000b，臺灣西南部泥岩地區環境地質災害之調查分析，集水區土砂災害防治與資料庫技術應用推廣研討會論文集，pp.128-142。
 12. 陳時祖，2002，臺灣西南部地區泥岩之地質災害及防治方法，臺灣西南地區地質災害研討會論文集，pp.7-1~7-9。
 13. 陳時祖、李元富、劉裕聰，1984，臺灣西南部泥岩坡地沖蝕特性之研究（1），國科會防災報告，73-07 號。
 14. 萬鑫森、黃俊義，1983，臺灣南部土壤沖蝕性及流失量之估算，中華水土保持學報，14:21-28。
 15. 盧光輝，1997，土壤沖蝕模式之建立，85 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，pp. 1-19。
 16. 邱創益，1985，台灣西南部青灰岩（泥岩）裸露地植生復原之研究，屏東農專學報，26（3），pp. 59~86。
 17. 邱盈達、黃國禎、吳昌翰，2007，不同草類覆蓋下泥岩土壤與紅壤理化性質之探討，水土保持學報 39 (4)，pp. 355 - 369。
 18. 簡士濠、陳俊元、簡廷澍，2015，生物炭添加對泥岩地區非點源污染

- 之改善，土壤及地下水污染整治2卷4期，pp. 317 - 327。
19. 顏富士、蔡縊輝。1985，台灣西南部主要泥岩坡地所含粘土之物化特性研究，行政院國家科學委員會防災科技研究報告73-26 號。
20. 萬鑫森、黃瓊慧，1996，台灣兩種泥岩礦物成分及其性質之研究，農林學報45(1)，pp. 55-62。
21. 許正一、賴美君、林盈成、駱佩如，2002，台灣南部泥岩惡地形土壤之化育作用與分類，土壤與環境 5(4)，pp. 323-330。
22. 張延光，1982，穩定藥劑對地滑地之效果，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
23. 周天穎，1997，泥岩裸露地監測調查及資料庫建置，台灣省政府農林廳水土保持局，pp 54。
24. 陳時祖、李元富、楊嘉國，1984，台灣西南部地區泥岩坡地沖蝕特性之研究(1)，國科會防災研究報告，pp. 73-75。
25. 黃俊義 (1986)，「臺灣坡地土壤沖蝕性及流失量之推估」，中華水土保持學報 17，pp.139-154。
26. 黃俊義、萬鑫森 (1994)，「臺灣坡地土壤沖蝕」，海峽兩岸農地水土保持學術研討會論文集，pp.186-213。
27. 陳盟文，2006，土胎植生工法於泥岩護坡成效之研究，成功大學土木工程

程學系學位論文 pp. 1-124。

28. Baldock, J.A, Smernik, R.J. 2002. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. *Organic Geochemistry* 33, pp. 1093–1109. doi: 10.1016/S0146-6380(02)00062-1.
29. Nguyen, B.T., Lehmann, J., Kinyangi, J., Smernik, R., Riha, S.J., Engelhard, M.H. 2009. Long-term black carbon dynamics in cultivated soil. *Biogeochemistry* 92, pp. 163–176.
30. Boix-Fayos, C., Martínez-Mena, M., Arnau-Rosalén, E., Calvo-Cases, A., Castillo, V., Albaladejo, J. 2006. Measuring soil erosion by field plots: understanding the sources of variation. *Earth Science Reviews* 78:267–285.
31. Tejada, M., Gonzalez, J. L. 2007. Influence of organic amendments on soil structure and soil loss under simulated rain. *Soil and Tillage Research*, 93, pp. 197-205.
32. Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., Joseph, S., 2007. Agronomic values of green waste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research* 45, pp. 629–634.
33. Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Dowie, A., Joseph, S., 2008. Using poultry litter biochars as soil amendments. *Australian Journal of Soil Research* 46, pp. 437–444.
34. Lehmann, J. and Joseph, S.D. 2009. *Biochar for environmental management. Science and technology.* Earthscan, London.
35. Joseph, S D, Camps-Arbestain, M, Lin, Y et al. 2010. An investigation

- into the reactions of biochar in soil [J]. *Austra. J. Soil Res.*, 48: pp. 501-515.
36. Barthès, B., Roose, E. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena* 47:133-149.
 37. Boix-Fayos, C., Martínez-Mena, M., Arnau-Rosalén, E., Calvo-Cases, A., Castillo, V., Albaladejo, J. 2006. Measuring soil erosion by field plots: understanding the sources of variation. *Earth Science Reviews* 78:267–285.
 38. Chen, Y, Shinogi, Y, Taira, M. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality [J]. *Austra. J. Soil Res.*, 2010, 48:526-530.
 39. DeOña, J., Osorio, F., Garcia, P.A. 2009. Assessing the effects of using compost-sludge mixtures to reduce erosion in road embankments. *Journal of Hazardous Materials* 164:1257-1265.
 40. García-Ruiz, J.M. 2010. The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. *Catena* 81:1-11.
 41. Glaser B, Lehmann J, Steiner C, Nehls T, Yousaf M, Zech W (2002b), Potential of pyrolyzed organic matter in soil amelioration. In ‘12th ISCO Conference’. Beijing 2002, pp. 421–427.
 42. Imeson, A., Vis, M. 1984. Assessing soil aggregate stability by water-drop impact and ultrasonic dispersion. *Geoderma* 34:185-200.
 43. Laird, D, Fleming, P, Wang, B Q et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010, 158:436-442.
 44. Lehmann, J. and Joseph, S.D. (2009), *Biochar for environmental*

- management. Science and technology. Earthscan, London.
45. Mohammad, A.G., Adam, M.A. 2010. The impact of vegetation cover type on runoff and soil erosion under different land uses. *Catena* 81:97-103.
 46. Rodríguez, A.R., Arbelo, C.D., Guerra, J.A., Mora, J.L., Notario, J.S., Armas, C.M. 2006. Organic carbon stocks and soil erodibility in Canary Islands andosols. *Catena* 66:228-235.
 47. Shinogi Y (2004) Nutrient leaching from carbon products of sludge. In 'ASAE/CSAE Annual International Meeting'. Paper No. 044063, Ottawa, Ontario, Canada.
 48. Shirazi, M.A. and L. Boersma., 1984, A unifying quantitative analysis of soil texture, *Soil Science Society of American Journal*, 48 : 142-147.
 49. Soil Survey Staff. 2010. Soil Taxonomy. USDA-NRCS, Agricultural Handbook No. 436, 11th ed., U.S. Gov. Print. Office, Washington, D.C.
 50. Wischmeier, W. H. and J. V. Mannering. 1969. Relation of soil properties to its erodibility, *Soil Sci. Soc. Am. Pro.* 33 : 131-137.
 51. Wischmeier, W.H., Smith, D.D. 1978, Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning, USDA-SEA Agriculture Handbook 537. U. S. Department of agriculture. 58pp.
 52. Yuan, J H, Xu, R K, Chang, H. 2011. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*. 102:3488-3497.
 53. Yuan, J H, Xu, R K, Wang, N et al. Amendent of acid soils with crop residues and biochars [J]. *Pedosphere*, 2011, 21(3):302-308.
 54. Zhang, K., Li, S., Peng, W., Yu, B. 2004. Erodibility of agricultural soils
-

- on the loess plateau of China. *Soil Tillage Research* 76:157-165.
55. Marris, E., 2006. Putting the carbon back: black is the new green. *Nature* 442, 624–626.
56. Kuzyakov, Y., Subbotina, I., Chen, H.Q., Bogomolova, I., Xu, X.L., 2009. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ^{14}C labeling. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 210–219.
57. Steinbeiss, S., Gleixner, G., Antonietti, M., 2009. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 1301–1310.



