

計畫編號：110 保發-8.1-保-01-06-001(21)

生物土壤技術應用於減緩土壤沖蝕試驗計畫(II)
Application of Biological Soil Crust in
Preventing Soil Erosion (II)

成果報告書

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

執行期間：110 年 1 月 27 日至 110 年 12 月 31 日

計畫主持人：賴文基 副研究員

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 110 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)

目次

目次.....	I
第一章 緒論.....	1-1
第一節 生物土壤技術 (Biological Soil Crust, BSC).....	1-3
第二節 土壤沖蝕減緩	1-5
第三節 BSC 工法的推動現況與討論.....	1-9
第二章 工作執行方法與初步結果	2-1
第一節 工作執行方法	2-1
第二節 工作執行步驟	2-15
第三節 初步結果	2-16
第三章 工作進度與交付項目	3-1
第一節 計畫甘特圖	3-1
第二節 計畫交付項目	3-3
第四章 執行成果及後續建議	4-1
第一節 執行成果	4-1
第二節 後續建議	4-4
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附錄-1
附錄一、服務建議書審查意見暨回覆辦理情形	附錄-1
附錄二、工作執行計畫書審查意見暨回覆辦理情形	附錄-3
附錄三、期中報告書審查意見暨回覆辦理情形	附錄-6
附錄四、期末報告書審查意見暨回覆辦理情形	附錄-11

第一章 緒論

台灣地處歐亞板塊與菲律賓海板塊交界，地質脆弱破碎，而近年氣候變遷使短延時強降雨變得更加頻繁，再加上坡地過度開發與超限使用，土壤沖蝕與土砂災害變得日益嚴重。除土壤流失外，失去了地表植被後將減少表土之附著強度，容易發生後續崩塌事件，而這些泥砂更可能沿著河道進入水庫，使得庫容急遽減少，進而導致水資源短缺之問題。為避免造成人民生命或財產損失，坡地保育與水土保持為目前當務之急。

生物土壤(Biological soil crusts, BSC) 最早由 Fritzsche 於 1907 年提出，為一種主要由生物組成的有機複合物，其內含多種細菌、放線菌、藍綠菌、藻類、真菌、地衣、蘚苔和原生動物等，在表土形成數公釐到數公分的集結團(Belnap et al., 2001)(圖 1-1)。與土壤團粒的差異，在於包含菌類及植物，這些生物繁殖快且數量大，會增生及擴大。

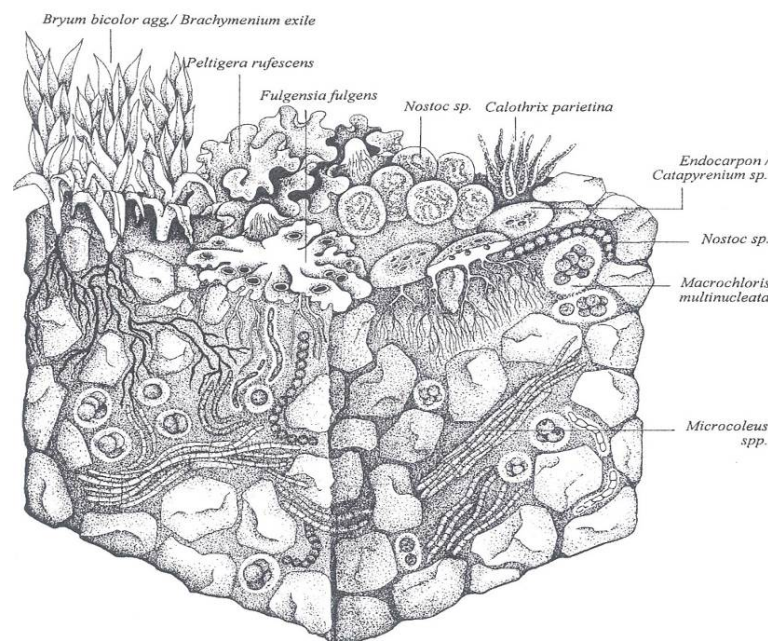


圖 1-1 生物土壤(BSC)內生物相的組成示意圖(Belnap et al., 2001)

日本工營研發中心(Nippon Koei Research & Development Center)日前研發出一新型技術，係利用微藻將土壤粒子連結成一體，於地表形成一保護層(Biological Soil Crust, BSC)，降低地表逕流造成之土壤沖蝕，使表土免於甫經生成即流失，使得先驅物種得以在此發展，進而演替出灌木、甚至是森林等植被演替世代(圖 1-2)。日本工營研發中心於氣候、降雨與台灣相似的日本沖繩進行現地試驗，相較於裸露地 1038 公克/平方公尺的土壤流失，實行 BSC 技術後土壤流失量降為 22 公克/平方公尺，僅有原先之 2%，可見 BSC 技術具減緩土壤沖蝕之成效。

若能將該技術引進臺灣並確切可行，不但能減緩土壤沖蝕、達到坡地保育等目標，更能減緩水庫淤積、避免洪水災害，以達永續發展之目標。本計畫將與日本工營研發中心洽談 BSC 技術授權並引進進至臺灣，評估該技術於臺灣之可行性及減緩土壤沖蝕之能力，以期日後做為坡地保育策略之一。

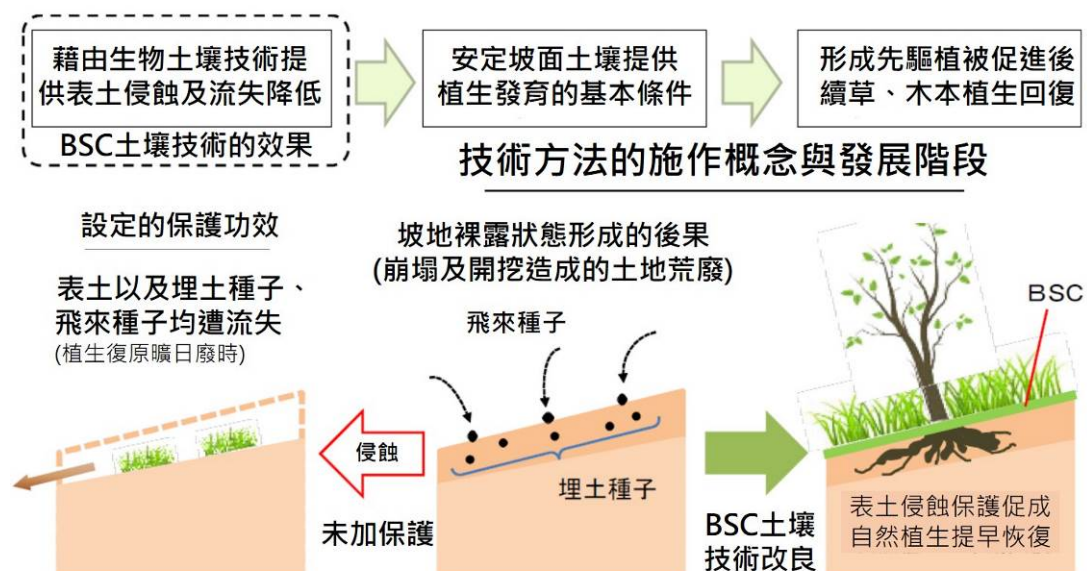


圖 1 -2 BSC 技術方法的施作概念與發展階段

(修改自日本工營 2018)

第一節 生物土壤技術 (Biological Soil Crust, BSC)

在日本南部離島地區，因為屬於高溫潮濕氣候，因為降雨所造成的表土侵蝕，將細微土壤藉由逕流沖蝕，造成大量的濁水流出（粘土等流出），同時也造成河川和沿岸地區的生態系、漁業、觀光資源等損失，更嚴重的造成環境退化問題。因此日本國立研究開發法人土木研究所和日本工營等技術研發單位，長期透過地表植生及生物土壤改良等方式，透過微藻類形成土壤保護的方式，進行對策工法的研究。

BSC 主要由糸狀菌類、土壤藻類、地衣等苔蘚類包覆於地表土粒或土塊等組成（圖 1-3），由於地表土壤受到覆蓋，能防止地表土壤的侵蝕與流失。也由於土壤表面受到菌類及藻類的覆蓋，能夠讓土壤環境受到改善，崩塌後的坡面草本植物能接續生長，並接續木本植物生長，整課被破壞的植被環境能夠逐漸的獲得改善（圖 1-4）。經過長期的室內及室外監測分析，佐證土壤流出量降低至 1/10 ~ 1/20 左右。

這些工業產製的藻類，依據現場施工的需求，縮短至從 2 星期到 1 個月的培植期，作為後續植生發展的先驅性植被，透過長期的技術演進與變遷，BSC 施工方法於 2009 年取得專利，正式投入現地施工並引進於日本各式植生保護及坡地沖刷保護的技術指引中。

與過去使用樹脂作為膠結劑，以及和原有的各種草仔噴植的施工方法相比，新的 BSC 工法以土壤藻類為主要資材，一方面能適用於各式各樣的地區生態系，二方面有容易施工且價格低廉的通用性，獲得現場施作單位的高評價，亦被國土交通省的新技術活用系統 (NETIS) 登錄為次世代的整治發展技術。該工法由日本國立研究開發法人土木研究所、日本工營以及藻類培養技術的日健總合公司共同發

展，進行推展為各項土木工法資材的量產製品，後續在各項土木水保領域的治水・治山工作進行活用、於農業領域及環境領域的應用也進行研討。

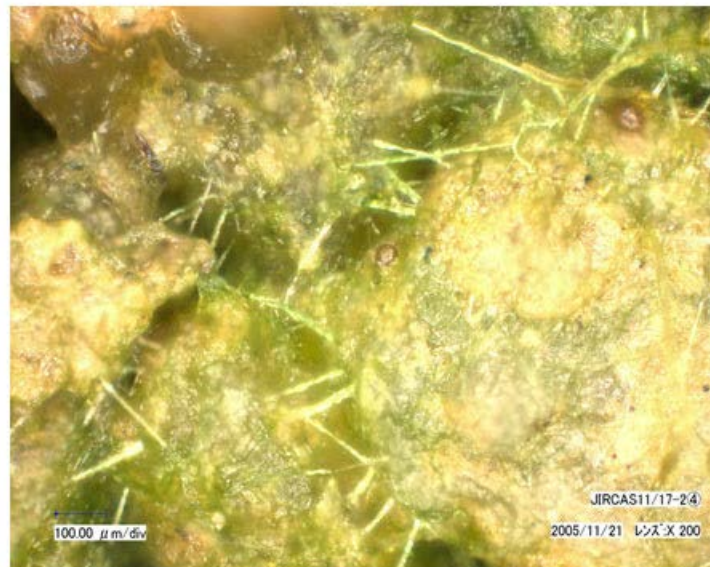


圖 1-3 生物土壤的主要組成-微藻顯微照片（日本工營提供）

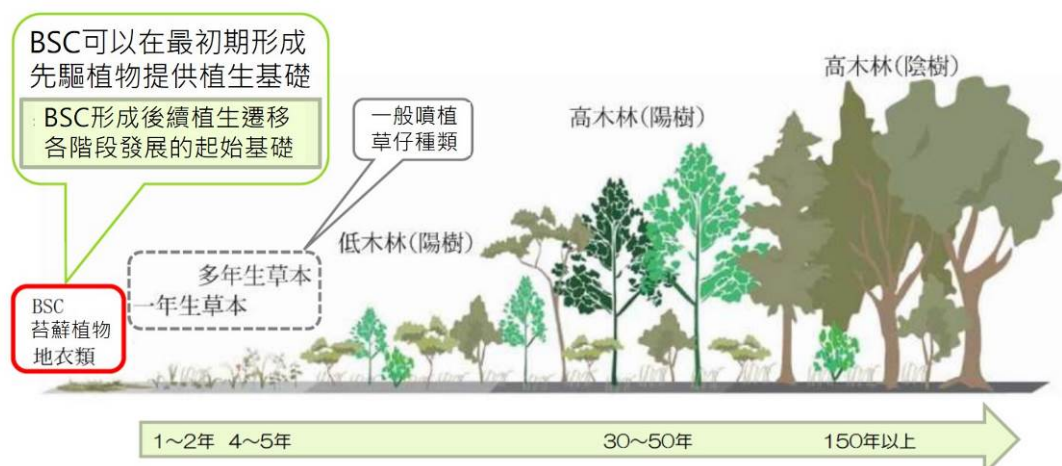


圖 1-4 BSC 可以在最初期形成先驅植物提供植生基礎

(修改自日本工營 2018)

第二節 土壤沖蝕減緩

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 2500 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。

近幾十年間，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，其特性為坩砂含量略比粘土多，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。

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拮抗作用，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。

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 (soilerodibility 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，將生物炭添加至土壤表面，可針對影響 K 值之土壤性質做直接的改善，土壤沖蝕潛勢可立即獲得改善。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)。

第三節 BSC 工法的推動現況與討論

近幾年，BSC 工法廣泛的施作於日本各地，尤以颱風災害最為頻繁的沖繩地區，以及雪害最為嚴重的北海道地區，都利用 BSC 技術進行了各項的現地研究。

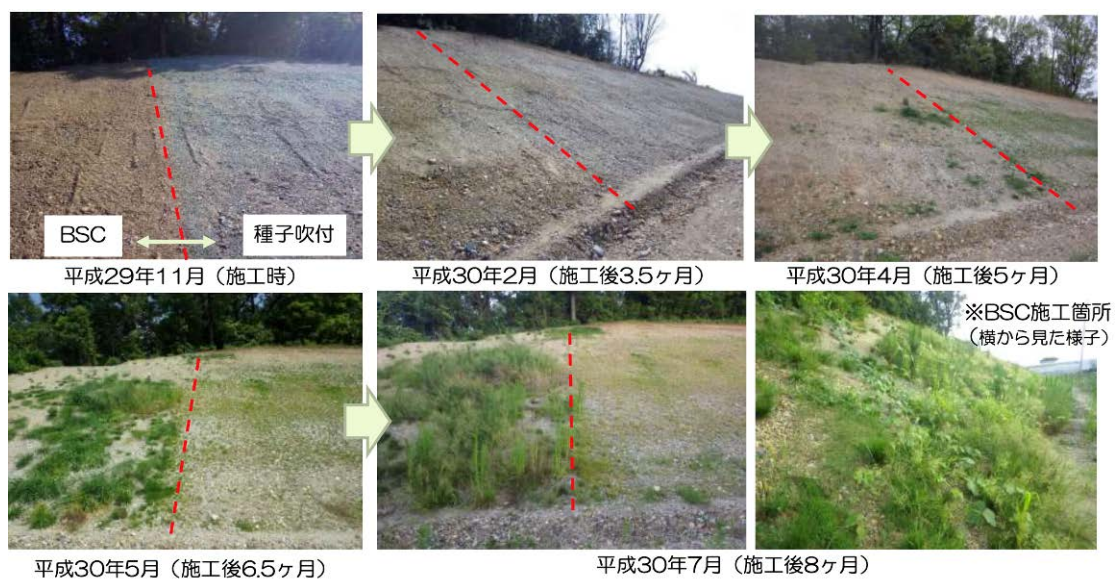


圖 1-5 沖繩縣 BSC 施作案例地點 (富坂峰人，2019)



圖 1-6 施作地點後續崩塌效果比較 (富坂峰人，2019)

經過近十年的試驗與實際施作，相關的成效追蹤與討論歸納了以下的要點：

一、BSC是屬於植被形成的先驅植物，由土壤藻類等帶來的BSC形成之後，後續的草本及木本植物較容易穩定的發展。

二、BSC有防止表土侵蝕的效果

在裸露表土所進行的BSC實驗，其實驗結果顯著的減少了土壤流失的速率與量體。所以，如果能及早形成BSC的效果，可以減緩或防止表土流失的現象，成為後續防範表土侵蝕的對策工法。

採用BSC工法還有以下優點：

1. 利用存在於各地，選擇當地形成BSC的土壤藻類也可以避免對原有品種等的環境影響（包括避免基因複製及基因擾亂的問題）。



圖 1-7 可資利用的BSC土壤藻類全球分布調查初步結果

(富坂峰人，2019)

2. 可透過藻類製造廠的合作，提供工業用大量培養及資材化的活用種仔。
3. 亦可利用將將種仔加上肥料、膠結料及黏著劑等，透過噴植的方法進行大面積施做。



圖 1-8 採用噴植方法施工的 BSC 土壤改良案例

(富坂峰人，2019)

三、與其他植生的工法具有施工簡易與成本較低的優勢

由於基本上屬於藻類・苔癬等植物是具有吸附功能，生長的環境儘管是斜坡，亦可以發育於 1: 0.5(60 °) 以下的斜坡，但土壤硬度需小於 30 mm(道路土木工程、災修工程及坡面穩定工程方針)。

四、可以施作於氣候嚴酷的條件

第二章 工作執行方法與初步結果

第一節 工作執行方法

因 2020 年度 COVID-19 疫情關係，影響到原有生物土壤(BSC)試驗資材的進口，改以取得試驗藻種提前進行對生物土壤(BSC)藻種及發展環境及型態的研究，本年度計畫已取得日本工營提供足量 BSC 工業生產製品，擬透過現地實驗提高生物土壤(BSC)本質的認識，更能掌握後續工業化生產生物土壤(BSC)的運用特性，以下針對本年度計畫擬解決的問題進行說明。

(一) BSC技術現地尺度施作工序及配合施工條件

BSC主要由糸狀菌類、土壤藻類、地衣等苔蘚類包覆於地表土粒或土塊等組成，由於地表土壤受到覆蓋，能防止地表土壤的侵蝕與流失。也由於土壤表面受到菌類及藻類的覆蓋，能夠讓土壤環境受到改善，崩塌後的坡面草本植物能接續生長，並接續木本植物生長，整個被破壞的植被環境能夠逐漸的獲得改善。經過長期的室內及室外監測分析，佐證土壤流出量降低至 1/10 ～ 1/20 左右。這些工業產製的藻類，依據現場施工的需求，縮短至從 2 星期到 1 個月的培植期，作為後續植生發展的先驅性植被，透過長期的技術演進與變遷，BSC施工方法於2009年取得專利，正式投入現地施工並引進於日本各式植生保護及坡地沖刷保護的技術指引中。與過去使用樹脂作為膠結劑，以及和原有的各種草仔噴植的施工方法相比，新的BSC工法以土壤藻類為主要資材，一方面能適用於各式各樣的地區生態系，二方面有容易施工

且價格低廉的通用性，獲得現場施作單位的高評價，亦被國土交通省的新技術活用系統 (NETIS) 登錄為次世代的整治發展技術。該工法由日本國立研究開發法人土木研究所、日本工營以及藻類培養技術的日健總合公司共同發展，進行推展為各項土木工法資材的量產製品，後續在各項土木水保領域的治水・治山工作進行活用、於農業領域及環境領域的應用也進行研討。但BSC技術在不同的氣候與施工條件時，仍有其施作工序及配合施工條件的調整，針對台灣示範場址亞熱帶-熱帶氣候與施工條件的考慮，是相關技術再推廣至東南亞、南亞或其他亞熱帶-熱帶氣候地區的重要參考依據，日本工營中央研究所也將全力支援針對實驗狀況，進行施作工序及配合施工條件調整與檢討的實施。

(二) BSC技術培養紀錄及施作速度

藻類發展及穩定是BSC技術施作的關鍵，在微生物族群的研究上，早期依賴直接以顯微鏡觀察或培養的方式，來檢測微生物的形態、生理生化、化學組成差異、生態特性等。但因微生物種類複雜，常有多樣的共生、寄生等關係和特殊的生存條件，且目前對於絕大部分微生物的生理需求與環境的交互作用瞭解相當有限，而微生物培養技術顯然具有嚴重的偏好性問題，因此有高達80-99%的環境微生物無法在實驗室中成功培養。2020年已針對日方提供的微藻樣品，透過熟悉臺灣土壤微藻類的林敬舒博士協助培養並全程觀察藻類成長狀態。本次取得BSC工業生產製品，得以實施現地場址培養及歷程紀錄，並透過調整基地條件、輔助營養料、供水及鋪襯等方式，紀錄(1) 微藻培養狀況、(2) 微藻成長速度及(3) 在表土上拓殖速度等三種特性，配合試驗場址

氣候條件的完整紀錄，清楚鑑別出BSC工法植生發展環境及型態變化。

(三) BSC試驗場址長期於自然降雨條件與對照組沖蝕量-逕流量監測與分析

本試驗為了瞭解土壤施用 BSC 後，微藻覆蓋於表土上是否能於降雨事件內減緩雨滴及飛濺對地表土壤的衝擊，提供地表保護作用；同時亦可評估微藻覆蓋是否可有效減緩地表逕流掏刷，以降低地表的土壤流失量。

本計畫以國立屏東科技大學水土保持系緩坡試驗區(22°38'41.7"N; 120°36'23.6"E)作為後續BSC生長覆蓋及觀測現地沖蝕試驗之場址。本試驗區乃根據通用土壤流失公式(Universal soil loss equation, USLE)之標準單位試區(standard erosion plot)設置，標準單位試區條件為水平投影長為 22.13 m、坡度為 9% (約 5°)之均勻坡面，且坡面保持連續兩年以上休耕和裸露。每一試區寬皆為 4 m，共有 8 個試區(圖 2-1)，沖蝕試驗區及收集槽規格如圖 2-2、表 2-1 所示。



圖 2-1 屏東科技大學水土保持系緩坡試驗區



圖 2-2 收集槽規格

表 2-1 屏東科技大學水土保持系緩坡試驗區規格

沖蝕試驗區規格			收集槽規格		
水平投影長(m)	寬(m)	坡度(%)	長(m)	寬(m)	深(m)
22.13	4.0	9.0	0.5	1.0	1.0

其中，試區內土壤屬高度風化土壤，分類上屬典型濕潤極育土(Typic Paleudults)，而土系則屬於老埤土系(Laopi series, Lo)，為紅棕色紅壤，主要分布於屏東縣三地門鄉及來義鄉之低標高臺地。而試驗區旁為屏東科技大學氣象站(A0R08)，可提供試驗期間之降雨、濕度及氣溫等氣候資料，依據中央氣象局氣象統計年報(2001~2020年)之氣候觀測資料，屏東科技大學之年平均雨量約為2847mm，年均溫則約24°C，乾濕季明顯屬熱帶氣候。本試驗之各工作項目之預計進度規劃如表2-2所示，

表 2-2 土壤流失量監測與分析之預計進度表

工作項目	7 月		8 月		9 月		10 月	
	1 日~15 日	16 日~31 日	1 日~15 日	16 日~31 日	1 日~15 日	16 日~30 日	1 日~15 日	16 日~31 日
沖蝕試驗場址重新翻整								
清理收集槽			培養微藻				沖蝕試驗	
施用肥料								
施用 BSC 及 MSC								
收集降雨資料								
收集土壤流失量								
測定土壤含水量及溫度								
操作無人機拍設多光譜影像								
測定土壤總體密度、導水度及團粒穩定度								
數據整理								
mNDVI 及沖蝕與堆積計算								
預定進度累計 (%)	5	15	25	35	50	65	85	100
備註	1. 試驗第一天(7/29)，將肥料與 4g/m^2 的 BSC (或 10g/m^2 的 MSC) 及 10g/m^2 的副資材(MSC 則不用添加)之比例溶入 1L/m^2 的水中，並以手工方式均勻撒播於試驗地； 2. 試驗第一個月需鋪設帆布供培養微藻，需每 1 週施灑肥料 1 次，並每隔 3~4 天灑水至表層土壤飽和； 3. 第 2 個月後則開始進行沖蝕試驗，且調整為 1 個月施灑肥料 1 次(若發生強降雨或颱風，需於事件後適度追肥)； 4. 降雨資料與土壤流失量需蒐集兩個月(8/24~10/26)； 5. 土壤含水量及溫度以每隔 3~4 天進行測定(以每個禮拜二及禮拜五進行測定) 6. 土壤總體密度、導水度及團粒穩定度以試驗前、中及後期(7/29、9/14 及 10/26)採樣測定。							

8 月~10 月開始進行為期 3 個月的現地沖蝕試驗，而試驗期間收集及測定以下項目：

1. 收集試驗期間(8~10 月)之降雨資料；
2. 收集各試區之每場有效降雨場下泥砂；
3. 每隔 3~4 天測定試區上、中及下區之土壤含水量及溫度；
(以每個禮拜二及禮拜五進行測定)
4. 每隔 3~4 天利用無人機之多光譜相機拍攝各試區之正攝影像
及多光譜影像；
(以每個禮拜二及禮拜五進行測定)
5. 試驗前、中及後期(7/29、9/14 及 10/26)於試區上、中及下區
中隨機位置採集表土(0~5cm)攜回實驗室中，供測定土壤總體
密度、導水度及團粒穩定度以培養微藻及沖蝕試驗之採樣測定。

由上述所蒐集之資料以供以下分析使用：

I. 劃分有效雨場

利用屏東科技大學氣象站(A0R08)收集 10 分鐘雨量資料，以 Wischmeier and Smith(1958)之單場有效降雨事件定義為依據，進行單場有效降雨事件之雨場分割，其定義說明如下：

- (1) 單場降雨之累積降雨量須超過 12.7 mm，且該場降雨與前場降雨需間隔超過 6 小時以上。
- (2) 降雨若低於 12.7 mm，但於 15 分鐘內降下 6.35 mm 以上之雨量，仍具備有沖蝕之潛在能力，則該場降雨應視為有效降雨事件，其降雨總動能須列入降雨總動能之計算。

並採用 Wischmeier and Smith 依據 Laws 及 Parson (1943)對自然降雨實測資料推導之每公頃單位降雨量之降雨動能公式：

$$e_i = \begin{cases} 0.119 + 0.0873 \log_{10} I & ; I < 76 \text{ mm/hr} \\ 0.283 & ; I \geq 76 \text{ mm/hr} \end{cases} \quad (2-1)$$

式中： e_i = 每公頃單位降雨量之降雨動能(MJ/ha-mm)；

I = 降雨強度(mm/hr)。

根據 Wischmeier (Wischmeier and Smith, 1959) 提出的降雨沖蝕指數(Rainfall and runoff factor, R)公式，將該場降雨的降雨總動能與該場降雨最大 30min 降雨強度乘積代入，可推算單場降雨沖蝕指數，而月降雨沖蝕指數即為該月份內各場降雨之降雨沖蝕指數累積；而年降雨沖蝕指數即為該年內各場降雨之降雨沖蝕指數累積。

$$(EI)_{M/Y} = \sum_{i=1}^m (E \cdot I_{30})_i \quad (2-2)$$

式中： $(EI)_M$ = 月降雨沖蝕指數；

$(EI)_Y$ = 年降雨沖蝕指數；

E = 每公頃單位降雨動能(MJ/ha-mm)；

I_{30} = 最大30分鐘降雨強度(mm/hr)。

II. 推算土壤沖蝕指數(Soil erodibility factor, K)

本試驗於 8 個試區內逢機採集約 2 kg 表土(0-15cm)並均勻混合裝袋後，取部分土壤團粒進行土壤構造鑑定，其餘攜回實驗室風乾過篩(2mm)，並進行以下土壤基本性質分析，以供推算土壤沖蝕指數(K 值)。

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

(1) 秤取 50 g 已過篩(2 mm)之風乾土於燒杯中，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，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 g 的連二亞硫酸鈉($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$)粉末於土壤溶液中，將燒杯置於水域槽中加熱至 80 °C 並時而攪拌，約 15 min 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 hr 後倒入離心瓶中，利用離心機以 3000 rpm 之轉速離心 10 min，之後將上層溶液去除，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 hr；
- (4) 秤取烘乾土樣約 20 g 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，攪拌 10 min 後，將土壤溶液洗出並通過 325 mesh (0.05 mm)的篩網，殘留於篩網上者為砂粒部分，將其烘乾 24hr 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，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，以移液吸管於液面下 10 cm 處吸取黏粒懸浮液，將烘乾 24hr 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。

(7) 利用乾篩機分離極細砂(0.1-0.05 mm)並推算其含量。

2. 土壤有機碳：Walkley-Black 濕式氧化法(Nelson and Sommers (1996)

取 0.5 g 風乾土壤置於三角錐瓶中，並依序加入 20 mL 1 N $K_2Cr_2O_7$ 及 20 mL 95 % H_2SO_4 後，靜置約 30 min。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，以 0.5 N $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ 滴定至終點。

3. 土壤構造鑑定：

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, 2012)中規範(如圖 2-3 及圖 2-4 所示)，現地鑑定土壤構造與大小。

4. 土壤水力傳導度測定 (Campbell et al., 1986)：

以張力入滲計測定試區內土壤水力傳導度。

5. 土壤沖蝕性指數 K (Wischmeier and Smith, 1978)：

本試驗以 Wischmeier 公式(Wischmeier and Smith, 1978)推算試驗區內土壤沖蝕性指數(Soil erodibility factor, Km)。

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

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

式中： Km =土壤沖蝕性指數(ton-ha-hr-yr / ha-MJ-mm)；

M =粉粒與極細砂(0.002~0.1 mm)×(100 %-黏粒%)；

a =有機質含量(%)；

b =土壤結構參數(分級如表2-2所示)；

c =土壤滲透性參數(分級如表2-3所示)。

※當土壤之有機質含量超過4 %時仍以4 %計算。

表 2-2 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

表 2-3 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

III. 推算覆蓋與管理因子 (Crop and Management Factor, C)

將單場有效降雨場下收集到的各試區泥砂，放置 105°C 烘箱烘乾 24 小時後秤重，即可得到各試區之單場降雨之土壤流失量。本試驗將其結果代入 Wischmeier and Smith (1978) 所提出之通用土壤流失公式 (Universal Soil Loss Equation, USLE) 中的覆蓋與管理因子 (Crop and Management Factor, C) 中，以供評估實施 BSC 技術降低土壤流失之效益及可行性。

覆蓋與管理因子 C 值指種植某作物覆蓋 (草、木本植物) 或某種敷蓋材料 (無生命資料) 的耕地所產生之土壤流失量與相同降雨、土壤、地形與地勢 (坡度與坡長) 之連續休耕地 (裸露且上下行耕犁) 所產生之土壤流失量的比值，稱為「覆蓋與管理因子」。

$$C = \frac{ER_{crop}}{ER_{control}}$$

式中：C = 覆蓋與管理因子 (無因次)；

ER_{crop} = 某作物的土壤流失量；

$ER_{control}$ = USLE 標準試驗區的土壤流失量。

1. 利用植生覆蓋指數評估微藻之植生變化

本試驗於試驗期間每隔 3~4 天 (每個禮拜二及禮拜四) 操作 DJI 光譜無人機 P4 Multispectral (P4M) (如圖 3-所示) 於試驗區之空中拍攝可見光之正攝影像及藍光、綠光、紅光、紅邊與近紅外光之多光譜影像。本試驗將試驗期間所拍攝的多光譜影像推算得到常態化差異植生指數 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 後，再進行線性轉換為植生覆蓋指數 (Modified Normalized Difference Vegetation Index, mNDVI)，以供評估微藻於試驗期間之生長變化。其中，態化差異植生指數 (NDVI) 為多數研究調查

植被之植生指標 (值域: -1~1)，檢定地表植生覆蓋情況及植生健康狀況情形，其原理為在太陽輻射照射下，植物葉綠素吸收紅光 (R)波段，反射近紅外光 (NIR)，隨植物光合作用的旺盛，會吸收越多紅光，如黃國楨等(1996)採用法國 SPOT 衛星影像來推得 NDVI 之變化，進而分析評估前後兩期綠色植生量之變遷；而植生覆蓋指數(mNDVI)為以 NDVI 作線性轉換而得，使其值域由-1~1 轉換至 0~1 之間，其值越近 1 表示植生覆蓋相對良好，反之則越少。NDVI 及 mNDVI 計算式子如下：

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

$$mNDVI = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$

其中: NIR=近紅外光 (波長介於 750-1400nm)；

R=紅光 (波長介於 620–750 nm)

NDVI：各像元之原始 NDVI 值；

NDVImin：該影像所有像元 NDVI 之最小值；

NDVImax：該影像所有像元 NDVI 之最大值。



圖 2-3 DJI 光譜無人機 P4 Multispectral

2. 試驗資材對土壤性質之改良成效

本試驗於試驗前、中及後期逢機採集各試區內上、中及下區採集約 2 kg 表土(0-5cm)並均勻混合裝袋後，取部分土壤團粒進行土壤構造鑑定及測定土壤團粒穩定度，其餘攜回實驗室風乾過篩(2mm)，並進行以下土壤基本性質分析，以供判斷施灑 BSC 及 MSC 生物土壤後是否有改善土壤性質。

(1) 土壤反應(pH 值)：玻璃電極法 (McLean, 1982)

秤取 10 g 土壤，將土壤與去離子水以 1：2.5(w/v)比例混合製成懸浮液，運用玻璃攪拌棒攪拌間隔 15 min 攪拌 1 次，攪拌 3~4 次後，以玻璃電極測定。

(2) 土壤總體密度-土罐法(soil core)

利用已知體積之不銹鋼土罐，貫入土壤中，以不擾動土樣的方式將土罐及土樣帶回實驗室，將土樣以 $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 烘乾後並秤重，得到的乾土重與土壤體積之比即為土壤總體密度。

(3) 土壤有機質 Walkley-Black 濕式氧化法(Nelson and Sommers, 1996)

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

(5) 山中氏穿刺阻力

將山中氏土壤硬度計上之刻度調整為 0，以尖端刺入土壤中，將硬度計抽起後，其上方鐵片會向上推擠，而鐵片所停留之讀值，即該土壤之硬度(mm)；

(四) BSC運用於泥岩區復育效益與可行性評估。

搭配本年度單場或定期雨量紀錄，推算降雨強度、總降雨量與土壤沖蝕量之關係。並利用 USLE 公式反求 BSC 技術之水土保持處因子(P 值)，與現有之其他水土保持措施之 P 值及其它影響沖蝕因子(如 K 值)進行比較。並檢討 BSC 技術現地尺度施作工序及配合施工條件，針對西南部泥岩的特性，包括遇水易崩解、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等泥岩區防蝕抗沖的不利因素，討論運用 BSC 工法施作工序及配合施工條件的調整，討論及擬訂泥岩區植生復育的施作方法，以提供後續進行泥岩場址的現地實測。

第二節 工作執行步驟

- 一、生物土壤技術應用於減緩土壤沖蝕發展現況蒐集與彙整
- 二、利用現有之土壤沖蝕試驗場，使用不同土壤樣本種植BSC技術之微藻，並記錄其生長狀況。
- 三、於自然降雨或人工降雨期間，於實驗區之出流口定時測量逕流量及含砂量，推算該場降雨之土壤沖蝕量，並不同土壤樣區之成果與對照組(未實施BSC技術)進行比較。
- 四、搭配雨量紀錄，推算降雨強度、總降雨量與土壤沖蝕量之關係。並利用USLE公式反求BSC技術之水土保持處因子(P值)，與現有之其他水土保持措施之P值及其它影響沖蝕因子(如K值)進行比較。

第三節 初步結果

(一) BSC 試驗場址長期於自然降雨條件與對照組沖蝕量-逕流量監測與分析

1.前期準備與土壤沖蝕指數(Soil erodibility factor, K)

本試驗於雨季(7~10月)期間進行後續 BSC 及 MSC 施灑養護及現地沖蝕試驗，本試驗於 7 月 10 日至 22 日期間重新翻整沖蝕試驗場址，其過程需：①除去表土之雜草(如圖 2-18 所示)；②以中耕機上下行耕犁(如圖 2-19 所示)；③篩除表土之雜草及礫石(如圖 2-20 所示)；④整平坡面(如圖 2-21 所示)，試區翻整後成果如圖 2-22 所示，完成翻整後需鋪設帆布(如圖 2-23 所示)以防止沖蝕試驗前造成土壤沖蝕；並於 7 月 18 日至 24 日期間清理收集槽(如圖 2-24 所示)。



圖 2-18 試區除草



圖 2-19 上下行耕犁



圖 2-20 篩除表土雜草及礫石



圖 2-21 整平坡面



圖 2-22 試區除草



圖 2-23 鋪設帆布



圖 2-24 清理收集槽

前期準備已完成試驗區之土壤性質分析及推算土壤沖蝕性指數，其結果如表 2-7 所示。土壤 pH 為 4.5，屬極酸性；依據美國農部對土粒粒徑分級方式，可得到砂粒、粉粒及黏粒含量分別為 34.0 %、27.6 %及 38.4 %，其土壤質地屬於黏質壤土(Clay loam, CL)；而 K 值之參數，粉粒及極細砂 $\times(100\%-黏粒)M$ 、有機質含量 a、土壤結構參數及土壤滲透性參數分別為 2045、1.22、3 及 4，將其參數代入 Wischmeier 公式後，即可推得土壤沖蝕性指數 Km 為 0.02530 ton-ha-hr-yr/ha-MJ-mm。

表 2-7 標準沖蝕試驗區之土壤基本性質

項目	Soil
pH (1:2.5)	4.5 $\pm$ 0.3
砂粒含量 (%)	27.6
極細砂含量 (%)	5.6
粉粒含量 (%)	34.0
黏粒含量 (%)	38.4
土壤質地	Clay loam
粉粒及極細砂 $\times(100\%-黏粒)M$	2045
有機質含量 OM (%)	1.22
有機質含量 a	1.22
土壤主要構造	角塊狀 (2.0~10 mm)
土壤結構參數 b	3
水力傳導度 K_{sat} (mm hr ⁻¹)	8.6
土壤滲透性參數 c	4
土壤沖蝕性指數 Km (ton-ha-hr-yr/ha-MJ-mm)	0.02530

1.微藻之植生變化

本試驗於試驗期間每隔 3~4 天操作 DJI 無人機 P4M 於試驗區之空中拍攝正射影像及多光譜影像(圖 2-27 至 2-28)，若當天下雨或強風等因素使無人無法執行飛行任務，則當日不執行飛行任務。本試驗將試驗期間所拍攝的正射影像轉換為數值地表模型

(Digital Surface Model, DSM)，以供判視於試驗期間表土受雨水侵蝕後地形變化，其成果如圖 2-29 至 2-31 所示；而多光譜影像則推算得到 NDVI 值後，再進行線性轉換為 mNDVI，以供評估微藻於試驗期間之生長變化，其成果如圖 2-32 至 2-34 所示；並以 $mNDVI=0$ 視為裸土，供推算微藻覆蓋百分比，評估試驗期間微藻覆蓋情況，如表 2-8~2-19 所示。本試驗期間最大累積降雨量之單場有效降雨場分別發生於試驗第 20 天及第 50 天，在降雨結束後 BSC、MSC 及 CK 分別收集到 68.5 kg、70.0 kg 及 90.9 kg (如表 2-8 所示)，對照圖 2-33 (f)及(g)可發現，試驗區內之等高線接往山坡移動，表示表土受到相當嚴重的侵蝕，而覆蓋於表土的微藻更是如此，由試驗第 18 天 (圖 2-27)與第 23 天之正射影像 (圖 2-28，該天因風速過大，僅有拍攝正射影像)相較下，可明顯看出微藻大部分已流失。

本試驗在進行一個月微藻培養過程中，皆覆蓋帆布以防止雨水侵蝕，在培養結束後，BSC 及 MSC 之平均 mNDVI 值分別為 0.03 及 0.05，而覆蓋百分比則分別為 24.5%及 35.2%(如表 2-8 所示)，顯示 MSC 具有較快的初期生長速率，且生長情況較為良好，但由圖 2-32 可發現，微藻生長受到帆布鋪設位置影響，帆布重疊處之 mNDVI 明顯較低，推測原因可能為重疊處透光較差，因此 BSC 及 MSC 生長皆受到限制，表示陽光為微藻生長重要影響因子；由圖 2-35 及圖 2-36 可發現，試驗前 17 天前 MSC 之 mNDVI 及覆蓋百分比皆高於 BSC，但在試驗第 30 天開始後的連續無降雨時段(第 30-45 天及第 56-64 天)，BSC 及 MSC 之植生覆蓋指數及覆蓋百分比皆有顯著提升，其中以 BSC 提升最為顯著，顯示 BSC 在陽光充足時生長狀態最佳。圖 2-31(k)及(l)為試驗第 59

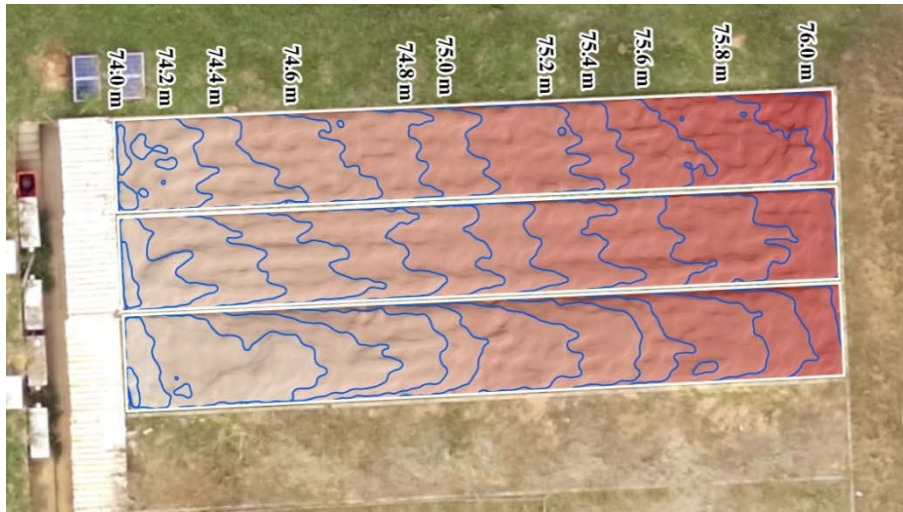
天至第 63 天之等高線分布圖，其中 BSC 及 MSC 上坡處各產生有一道寬約 0.5 m 至 1 m 之蝕溝，對照圖 2-34(k)及(l)之 BSC 及 MSC 上坡處可發現，蝕溝處之皆無微藻覆蓋 (裸土)，顯示逕流匯集處會造成微藻不易生長。



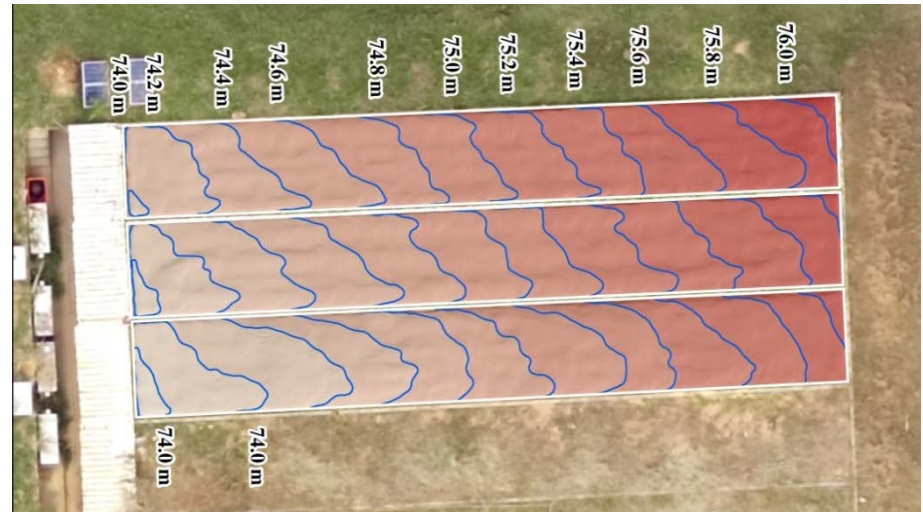
圖 2-27 沖蝕試驗第 18 天(9/10)之正射影像



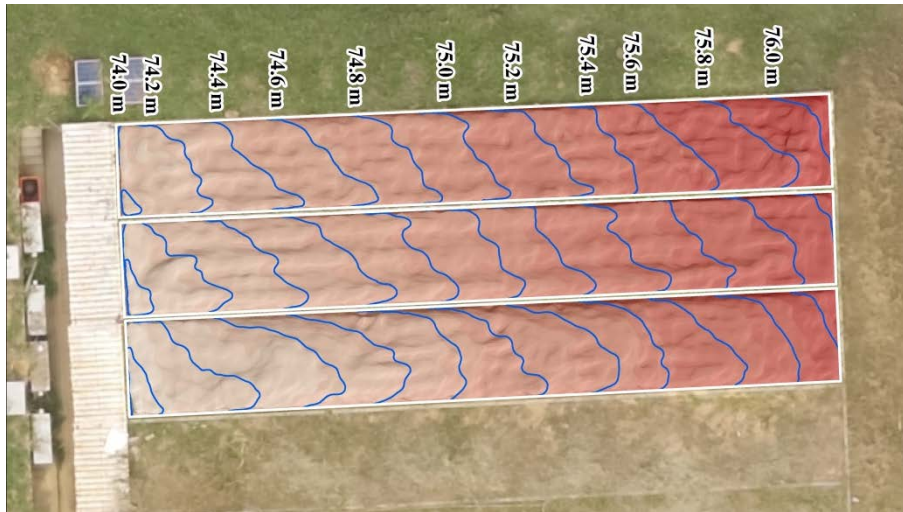
圖 2-28 沖蝕試驗第 23 天(9/15)之正射影像



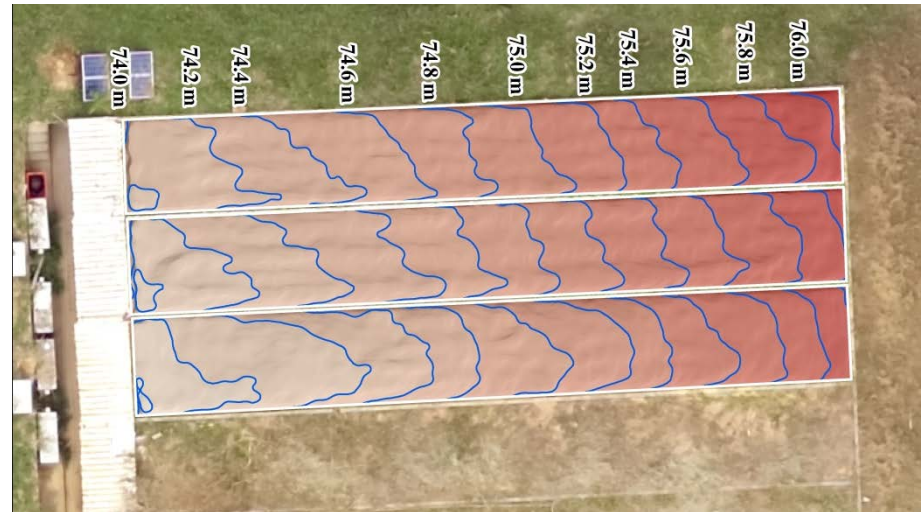
(a) 試驗第 0 天



(b) 試驗第 3 天

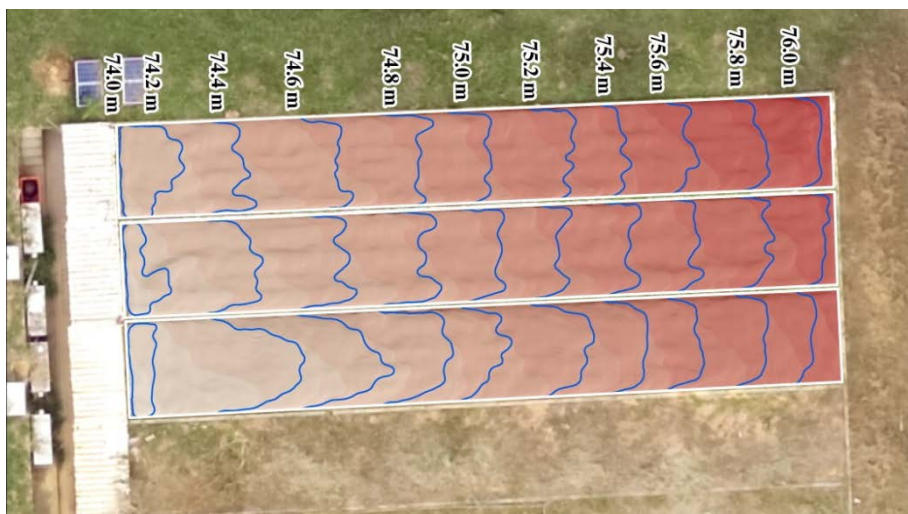


(c) 試驗第 7 天

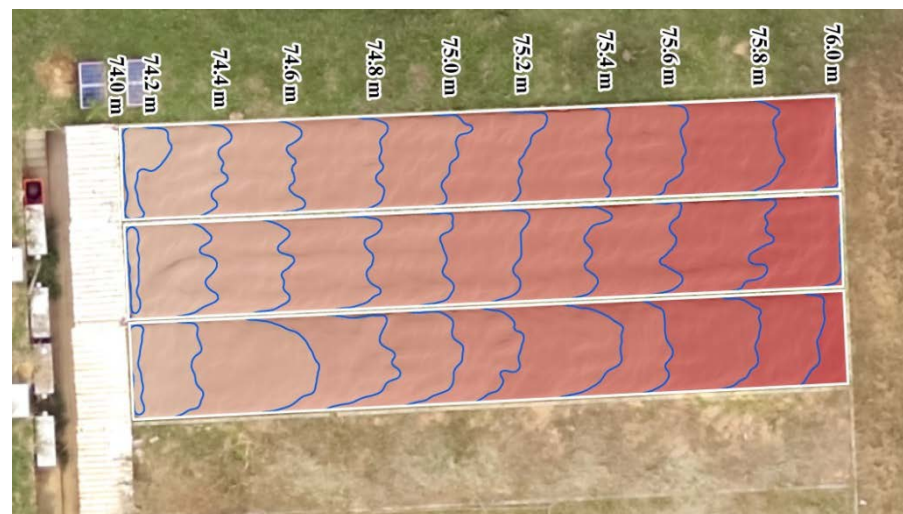


(d) 試驗第 10 天

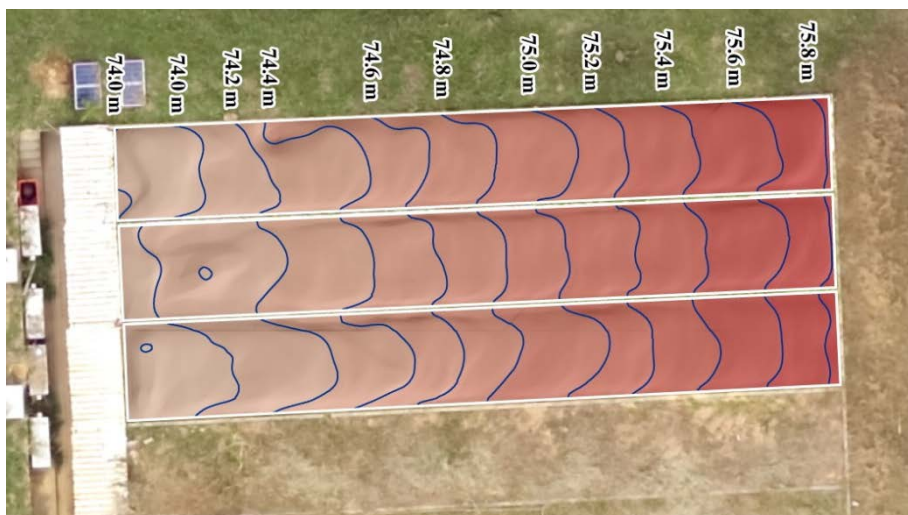
圖 2-29 各試驗區於不同試驗期間之高程變化圖(1)



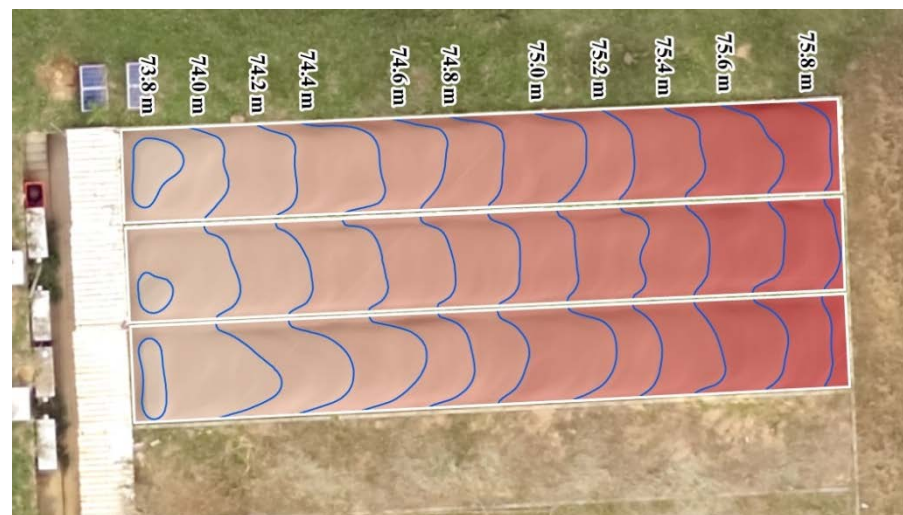
(e) 試驗第 14 天



(f) 試驗第 17 天

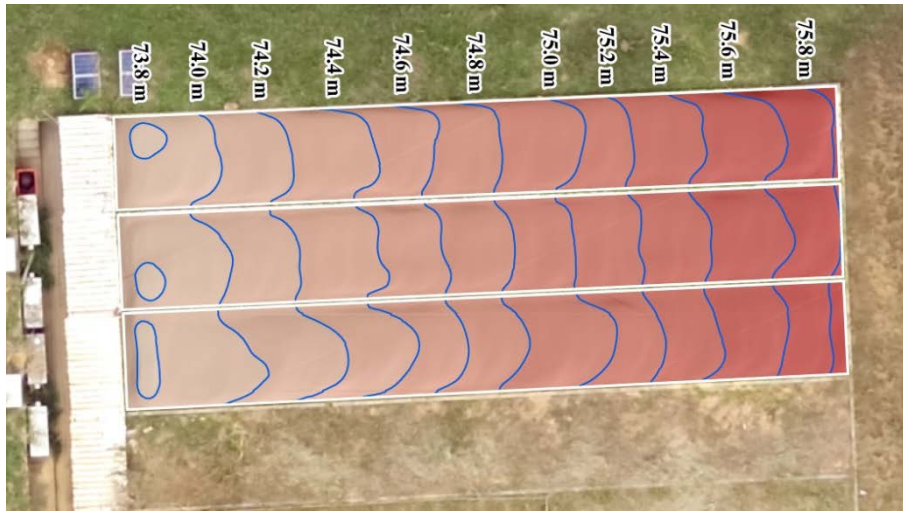


(g) 試驗第 36 天

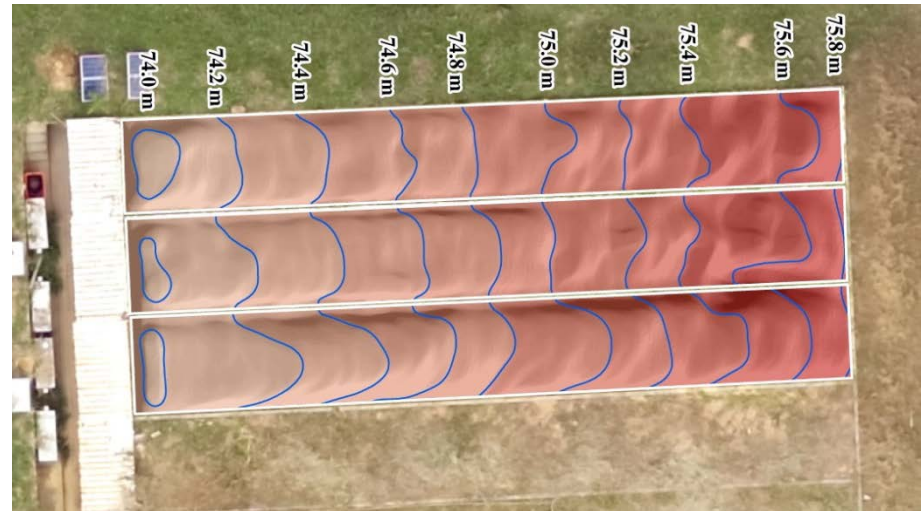


(h) 試驗第 38 天

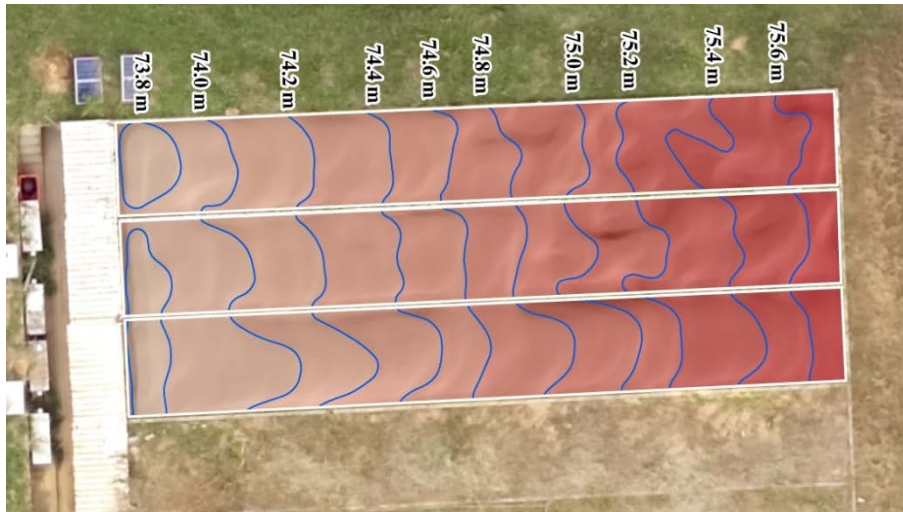
圖 2-30 各試驗區於不同試驗期間之高程變化圖(2)



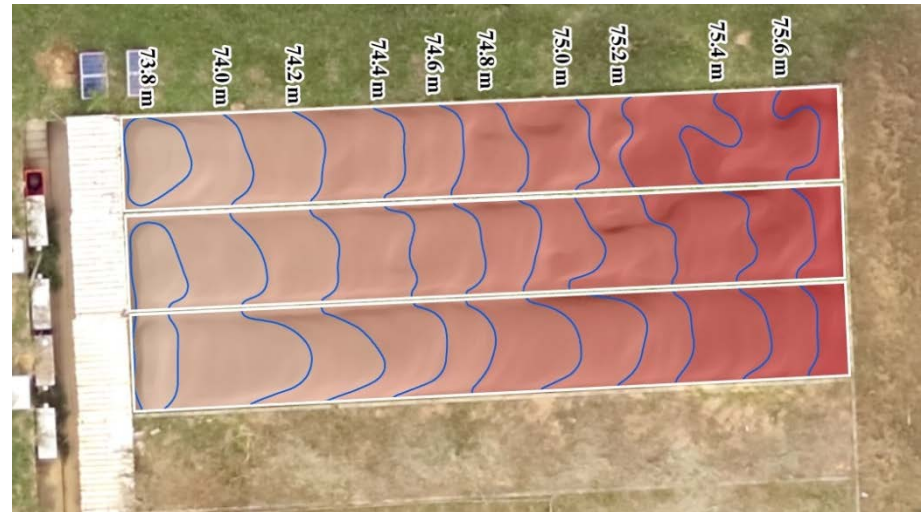
(i) 試驗第 42 天



(j) 試驗第 52 天

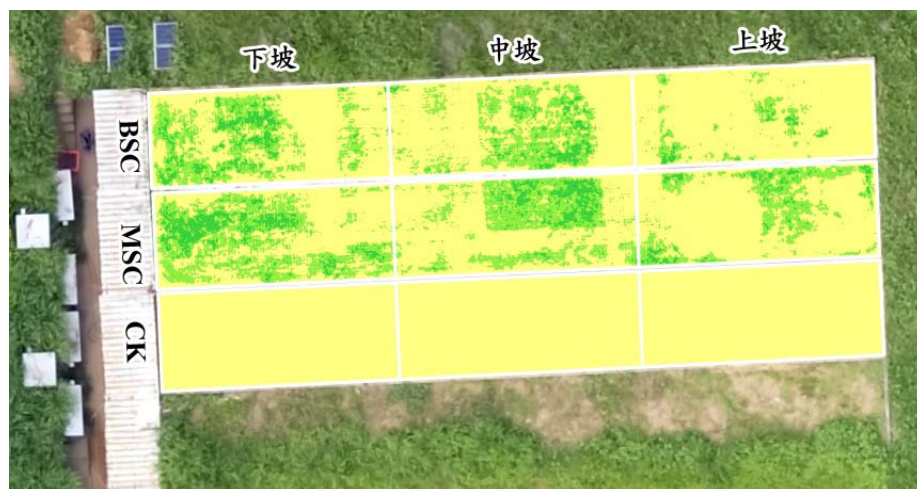


(k) 試驗第 59 天

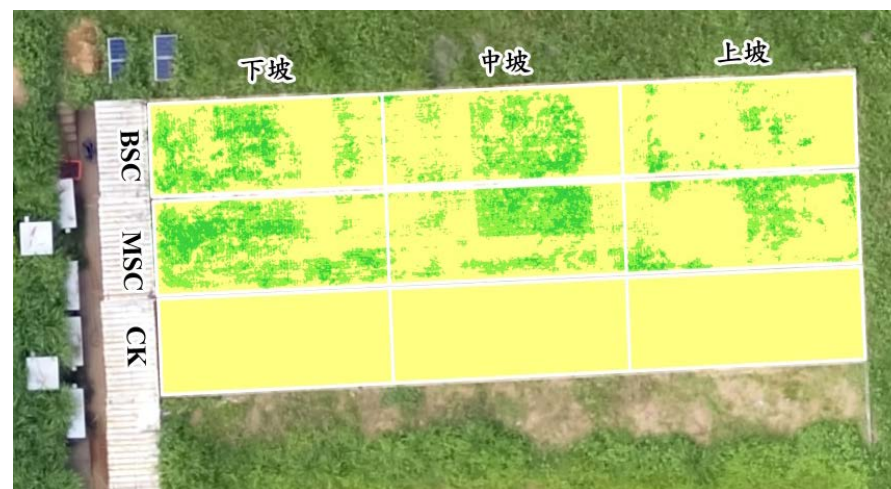


(l) 試驗第 63 天

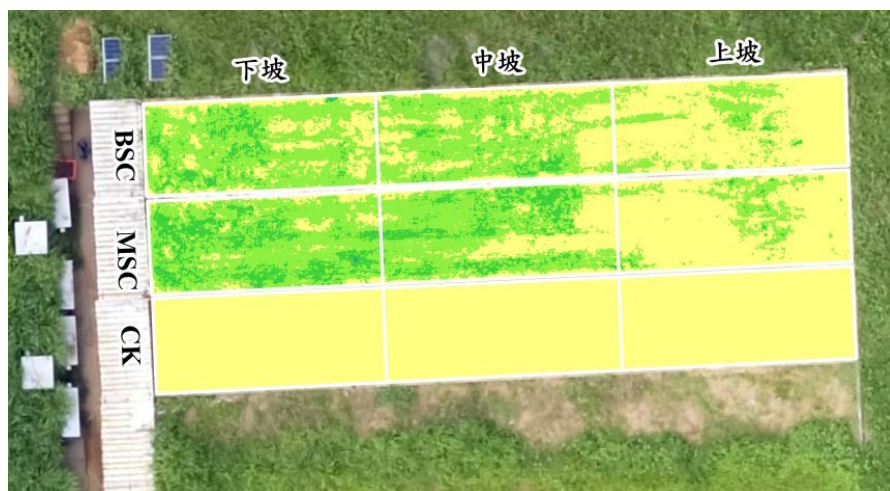
圖 2-31 各試驗區於不同試驗期間之高程變化圖(3)



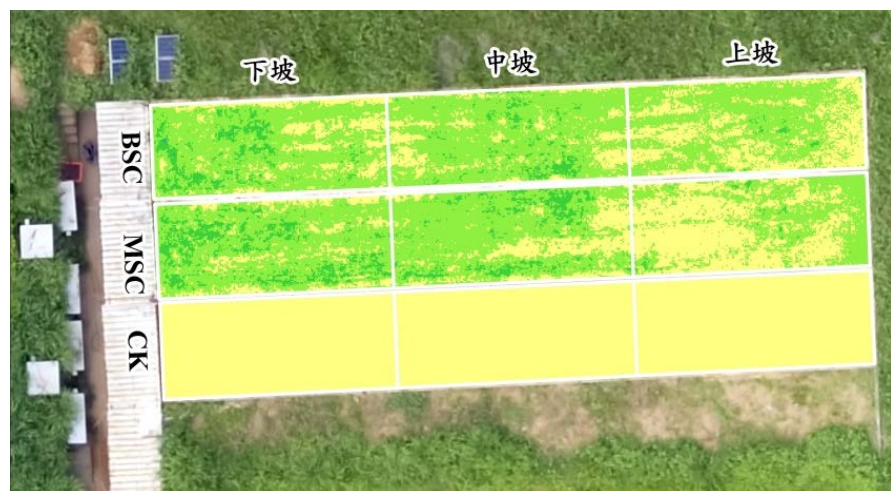
(a) 試驗第 0 天



(b) 試驗第 3 天



(c) 試驗第 7 天



(d) 試驗第 10 天

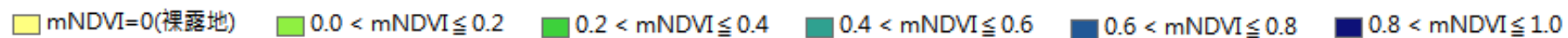
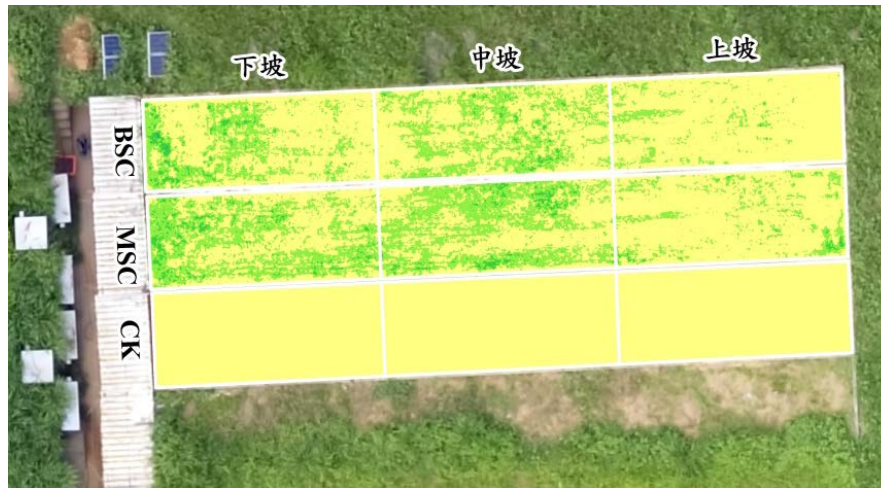
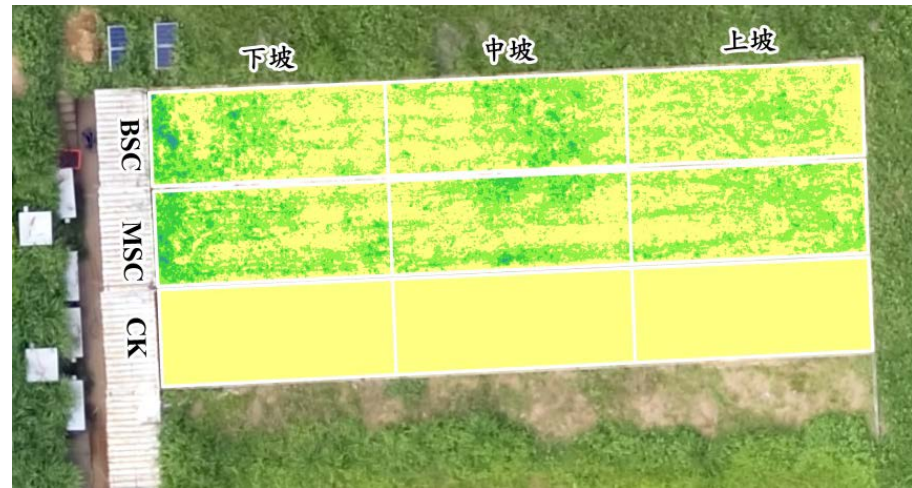


圖 2-32 各試驗區於不同試驗期間之 mNDVI 分布圖 (0-10 天)



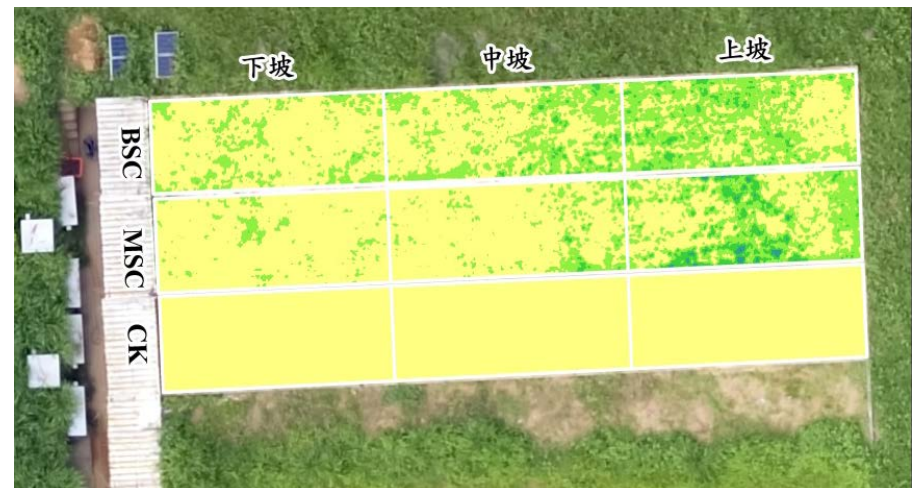
(e) 試驗第 14 天



(f) 試驗第 17 天



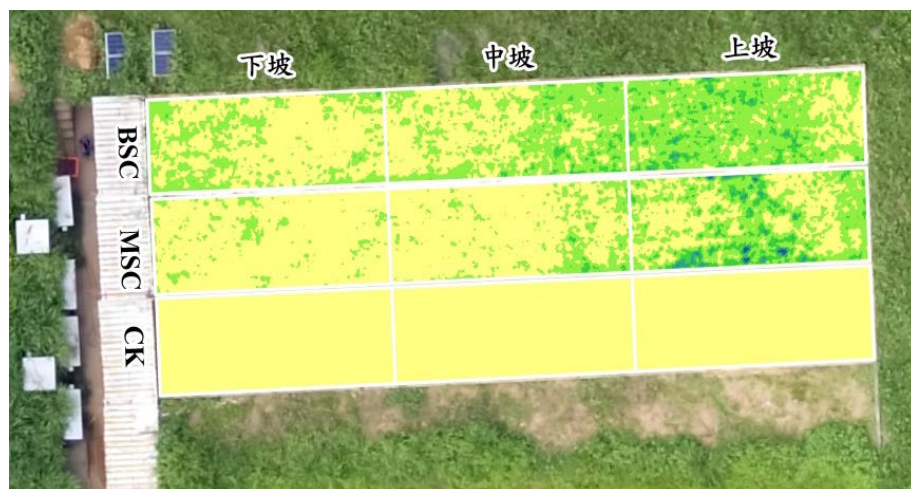
(g) 試驗第 36 天



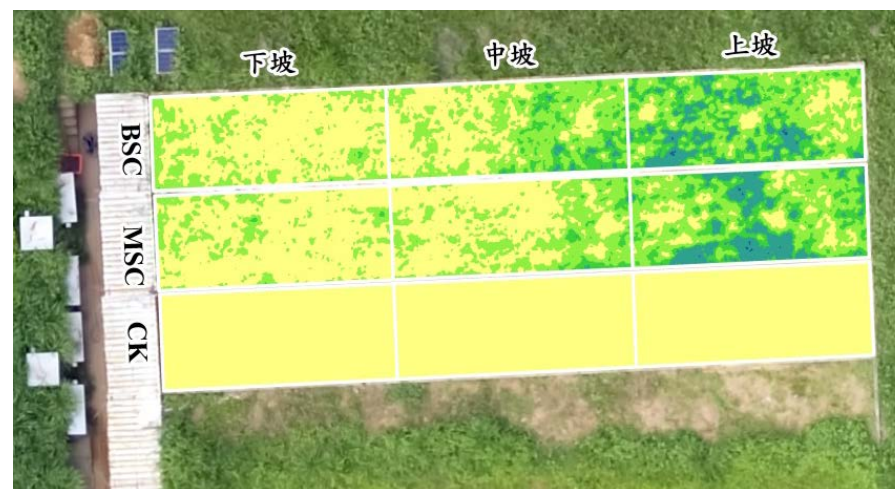
(h) 試驗第 38 天



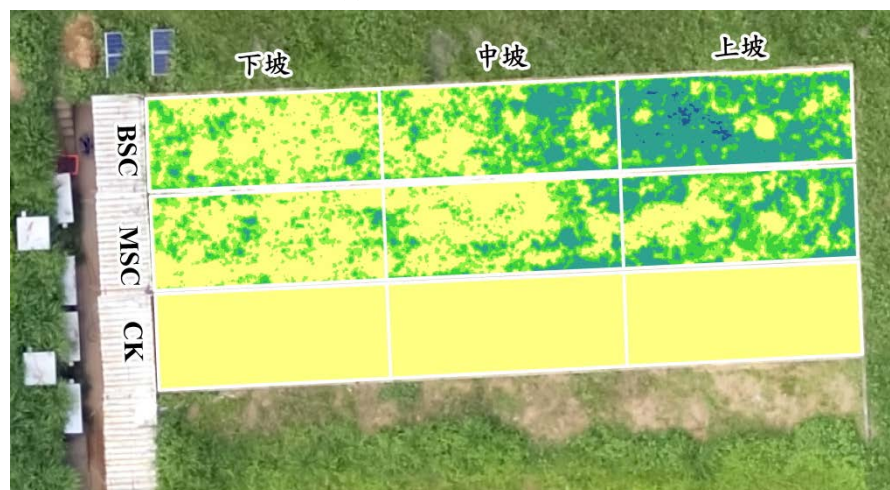
圖 2-33 各試驗區於不同試驗期間之 mNDVI 布圖 (10-38 天)



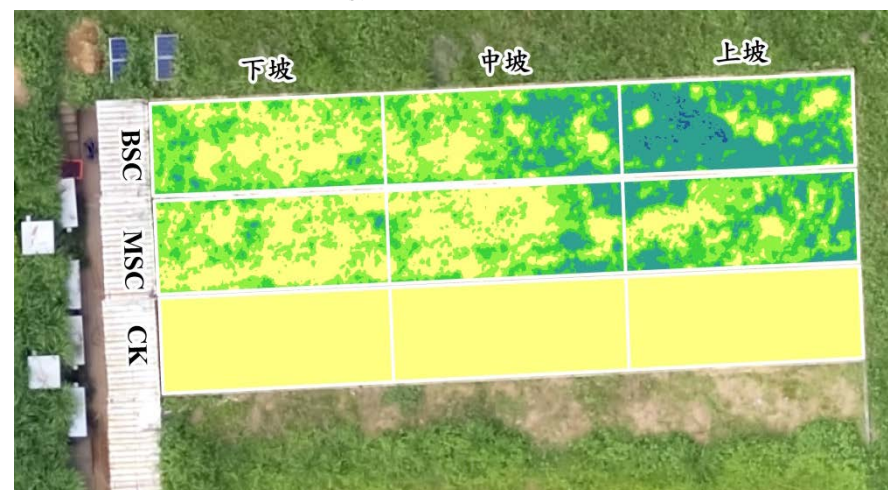
(i) 試驗第 42 天



(j) 試驗第 52 天



(k) 試驗第 59 天



(l) 試驗第 63 天

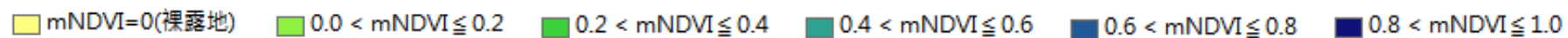


圖 2-34 各試驗區於不同試驗期間之 mNDVI 分布變化圖(38-63 天)

表 2-8 試驗第 0 天之 mNDVI 面積等級百分比與數蓋面積統計表

mNDVI 等級	BSC				MBC			
	上坡	中坡	下坡	平均	上坡	中坡	下坡	平均
mNDVI=0(裸露地)	91.4	70.1	65.0	75.5	76.0	64.1	54.3	64.8
$0.0 < \text{mNDVI} \leq 0.2$	7.24	24.9	26.8	19.7	20.5	28.2	34.5	27.7
$0.2 < \text{mNDVI} \leq 0.4$	1.34	4.99	8.17	4.83	3.56	7.66	11.24	7.48
$0.4 < \text{mNDVI} \leq 0.6$	-	0.002	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01
$0.6 < \text{mNDVI} \leq 0.8$	-	-	-	-	-	-	-	-
$0.8 < \text{mNDVI} \leq 1.0$	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.01	0.04	0.05	0.03	0.03	0.05	0.07	0.05
裸土面積(%)	91.4	70.1	65.0	75.5	76.0	64.1	54.3	64.8
覆蓋百分比(%)	8.57	29.9	35.0	24.5	24.0	35.9	45.7	35.2

表 2-9 試驗第 3 天之 mNDVI 等級百分比與數蓋面積統計表

mNDVI 等級	BSC				MBC			
	上坡	中坡	下坡	平均	上坡	中坡	下坡	平均
mNDVI=0(裸露地)	91.1	69.5	64.4	75.0	75.6	63.5	53.4	64.2
$0.0 < \text{mNDVI} \leq 0.2$	7.49	25.3	27.3	20.0	20.6	28.5	34.9	28.0
$0.2 < \text{mNDVI} \leq 0.4$	1.46	5.28	8.32	5.02	3.81	7.95	11.8	7.84
$0.4 < \text{mNDVI} \leq 0.6$	-	0.003	0.01	0.01	-	0.03	0.01	0.01
$0.6 < \text{mNDVI} \leq 0.8$	-	-	-	-	-	-	-	-
$0.8 < \text{mNDVI} \leq 1.0$	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.01	0.04	0.05	0.04	0.03	0.05	0.07	0.05
裸土面積(%)	91.1	69.5	64.4	75.0	75.6	63.5	53.4	64.2
覆蓋百分比(%)	8.95	30.5	35.6	25.0	24.4	36.5	46.6	35.8

表 2-10 試驗第 7 天之 mNDVI 等級百分比與數蓋面積統計表

mNDVI 等級	BSC				MBC			
	上坡	中坡	下坡	平均	上坡	中坡	下坡	平均
mNDVI=0(裸露地)	81.4	38.5	28.9	49.6	84.1	29.9	14.6	42.9
$0.0 < \text{mNDVI} \leq 0.2$	18.1	56.8	61.7	45.5	15.1	54.4	61.4	43.6
$0.2 < \text{mNDVI} \leq 0.4$	0.53	4.68	9.28	4.83	0.78	15.7	23.9	13.5
$0.4 < \text{mNDVI} \leq 0.6$	-	-	0.07	0.02	-	-	0.11	0.04
$0.6 < \text{mNDVI} \leq 0.8$	-	-	-	-	-	-	-	-
$0.8 < \text{mNDVI} \leq 1.0$	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.02	0.07	0.09	0.06	0.02	0.10	0.13	0.08
裸土面積(%)	81.4	38.5	28.9	49.6	84.1	29.9	14.6	42.9
覆蓋百分比(%)	18.6	61.5	71.1	50.4	15.9	70.1	85.4	57.1

表 2-11 試驗第 10 天之 mNDVI 等級百分比與數蓋面積統計表

mNDVI 等級	BSC				MBC			
	上坡	中坡	下坡	平均	上坡	中坡	下坡	平均
mNDVI=0(裸露地)	41.8	19.4	21.9	27.7	58.0	20.8	17.2	32.0
$0.0 < \text{mNDVI} \leq 0.2$	57.4	74.7	68.2	66.8	41.1	16.9	67.3	41.8
$0.2 < \text{mNDVI} \leq 0.4$	0.79	5.85	9.89	5.51	0.83	21.6	15.6	12.7
$0.4 < \text{mNDVI} \leq 0.6$	-	0.06	-	0.02	-	36.3	-	12.1
$0.6 < \text{mNDVI} \leq 0.8$	-	-	-	-	-	4.48	-	1.49
$0.8 < \text{mNDVI} \leq 1.0$	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.06	0.09	0.10	0.08	0.04	0.29	0.11	0.15
裸土面積(%)	41.8	19.4	21.9	27.7	58.0	20.8	17.2	32.0
覆蓋百分比(%)	58.2	80.6	78.1	72.3	42.0	79.2	82.8	68.0

表 2-12 試驗第 14 天之 mNDVI 等級百分比與數蓋面積統計表

mNDVI 等級	BSC				MBC			
	上坡	中坡	下坡	平均	上坡	中坡	下坡	平均
mNDVI=0(裸露地)	91.7	66.0	69.3	75.7	86.0	52.8	53.6	64.1
$0.0 < \text{mNDVI} \leq 0.2$	8.23	32.6	27.2	22.7	13.3	43.6	41.8	32.9
$0.2 < \text{mNDVI} \leq 0.4$	0.05	1.41	3.47	1.64	0.68	3.57	4.7	2.98
$0.4 < \text{mNDVI} \leq 0.6$	-	0.001	0.08	0.03	-	0.01	0.001	0.002
$0.6 < \text{mNDVI} \leq 0.8$	-	-	-	-	-	-	-	-
$0.8 < \text{mNDVI} \leq 1.0$	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.01	0.04	0.04	0.03	0.02	0.05	0.06	0.04
裸土面積(%)	91.7	66.0	69.3	75.7	86.0	52.8	53.6	64.1
覆蓋百分比(%)	8.28	34.0	30.7	24.3	14.0	47.2	46.4	35.9

表 2-13 試驗第 17 天之 mNDVI 等級百分比與數蓋面積統計表

mNDVI 等級	BSC				MBC			
	上坡	中坡	下坡	平均	上坡	中坡	下坡	平均
mNDVI=0(裸露地)	55.7	55.1	65	58.6	56.6	56	45.2	52.6
$0.0 < \text{mNDVI} \leq 0.2$	34.5	40.3	34.6	36.5	42.1	38.3	41.5	40.6
$0.2 < \text{mNDVI} \leq 0.4$	8.75	4.54	0.42	4.57	1.32	5.57	12.8	6.56
$0.4 < \text{mNDVI} \leq 0.6$	1.06	0.07	-	0.37	-	0.17	0.43	0.2
$0.6 < \text{mNDVI} \leq 0.8$	-	-	-	-	-	-	-	-
$0.8 < \text{mNDVI} \leq 1.0$	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.07	0.05	0.04	0.05	0.05	0.06	0.08	0.06
裸土面積(%)	55.7	55.1	65	58.6	56.6	56	45.2	52.6
覆蓋百分比(%)	44.3	44.9	35	41.4	43.4	44	54.8	47.4

表 2-14 試驗第 35 天之 mNDVI 等級百分比與數蓋面積統計表

mNDVI 等級	BSC				MBC			
	上坡	中坡	下坡	平均	上坡	中坡	下坡	平均
mNDVI=0(裸露地)	44.8	54.0	84.4	61.1	49.2	86.5	97.0	77.6
$0.0 < \text{mNDVI} \leq 0.2$	51.2	31.0	15.6	32.6	39.1	13	3.00	18.4
$0.2 < \text{mNDVI} \leq 0.4$	3.96	7.98	-	3.98	9.65	0.54	-	3.39
$0.4 < \text{mNDVI} \leq 0.6$	0.03	6.97	-	2.33	1.98	-	-	0.66
$0.6 < \text{mNDVI} \leq 0.8$	-	-	-	-	-	-	-	-
$0.8 < \text{mNDVI} \leq 1.0$	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.06	0.09	0.02	0.06	0.08	0.01	0.00	0.03
裸土面積(%)	44.8	54.0	84.4	61.1	49.2	86.5	97.0	77.6
覆蓋百分比(%)	55.2	46.0	15.6	38.9	50.8	13.5	3.00	22.4

表 2-15 試驗第 38 天之 mNDVI 等級百分比與數蓋面積統計表

mNDVI 等級	BSC				MBC			
	上坡	中坡	下坡	平均	上坡	中坡	下坡	平均
mNDVI=0(裸露地)	43.2	60.3	79.9	61.1	46.0	85.9	93.4	75.1
$0.0 < \text{mNDVI} \leq 0.2$	50.8	37.0	19.8	35.9	39.9	13.3	6.58	19.9
$0.2 < \text{mNDVI} \leq 0.4$	5.99	2.62	0.25	2.95	12.4	0.80	0.02	4.42
$0.4 < \text{mNDVI} \leq 0.6$	0.03	0.01	-	0.01	1.66	-	-	0.55
$0.6 < \text{mNDVI} \leq 0.8$	-	-	-	-	-	-	-	-
$0.8 < \text{mNDVI} \leq 1.0$	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.07	0.04	0.02	0.04	0.09	0.02	0.01	0.04
裸土面積(%)	43.2	60.3	79.9	61.1	46.0	85.9	93.40	75.1
覆蓋百分比(%)	56.8	39.7	20.1	38.9	54.0	14.1	6.60	24.9

表 2-16 試驗第 42 天之 mNDVI 面積百分比與數蓋面積統計表

mNDVI 等級	BSC				MBC			
	上坡	中坡	下坡	平均	上坡	中坡	下坡	平均
mNDVI=0(裸露地)	21.5	49.5	68.3	46.4	40.2	82.2	91.3	71.2
$0.0 < \text{mNDVI} \leq 0.2$	65.6	46.6	31.2	47.8	44.6	17.0	8.66	23.4
$0.2 < \text{mNDVI} \leq 0.4$	12.2	3.9	0.43	5.51	12.1	0.86	-	4.32
$0.4 < \text{mNDVI} \leq 0.6$	0.76	0.005	-	0.25	2.64	-	-	0.88
$0.6 < \text{mNDVI} \leq 0.8$	-	-	-	-	0.45	-	-	0.15
$0.8 < \text{mNDVI} \leq 1.0$	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.11	0.06	0.03	0.07	0.1	0.02	0.01	0.04
裸土面積(%)	21.5	49.5	68.3	46.4	40.2	82.2	91.3	71.2
覆蓋百分比(%)	78.5	50.5	31.7	53.6	59.8	17.8	8.70	28.8

表 2-17 試驗第 52 天之 mNDVI 面積百分比與數蓋面積統計表

mNDVI 等級	BSC				MBC			
	上坡	中坡	下坡	平均	上坡	中坡	下坡	平均
mNDVI=0(裸露地)	12.9	40.0	72.9	41.9	14.1	59.4	80.9	51.5
$0.0 < \text{mNDVI} \leq 0.2$	44.8	46.1	26.9	39.3	44.3	36.0	18.9	33.0
$0.2 < \text{mNDVI} \leq 0.4$	27.6	12.3	0.22	13.3	22.7	4.31	0.30	9.10
$0.4 < \text{mNDVI} \leq 0.6$	14.5	1.66	-	5.40	18.7	0.22	-	6.31
$0.6 < \text{mNDVI} \leq 0.8$	0.18	-	-	0.06	0.16	-	-	0.05
$0.8 < \text{mNDVI} \leq 1.0$	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.20	0.09	0.03	0.11	0.21	0.05	0.02	0.09
裸土面積(%)	12.9	40.0	72.9	41.9	14.1	59.4	80.9	51.5
覆蓋百分比(%)	12.9	40.0	72.9	41.9	14.1	59.4	80.9	51.5

表 2-18 試驗第 59 天之 mNDVI 面積百分比與數蓋面積統計表

mNDVI 等級	BSC				MBC			
	上坡	中坡	下坡	平均	上坡	中坡	下坡	平均
mNDVI=0(裸露地)	9.50	32.2	55.4	32.4	26.9	53.0	66.4	48.8
$0.0 < \text{mNDVI} \leq 0.2$	11.4	24.7	29.6	21.9	24.5	22.1	24.2	23.6
$0.2 < \text{mNDVI} \leq 0.4$	22.5	25.1	13.1	20.3	28.6	15.2	8.20	17.4
$0.4 < \text{mNDVI} \leq 0.6$	54.8	18.0	1.91	24.9	20.0	9.66	1.18	10.3
$0.6 < \text{mNDVI} \leq 0.8$	1.76	-	-	0.59	-	-	-	-
$0.8 < \text{mNDVI} \leq 1.0$	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.37	0.19	0.08	0.21	0.21	0.12	0.05	0.13
裸土面積(%)	9.50	32.2	55.4	32.4	26.9	53.0	66.4	48.8
覆蓋百分比(%)	90.5	67.8	44.6	67.6	73.1	47.0	33.6	51.2

表 2-19 試驗第 63 天之 mNDVI 面積百分比與數蓋面積統計表

mNDVI 等級	BSC				MBC			
	上坡	中坡	下坡	平均	上坡	中坡	下坡	平均
mNDVI=0(裸露地)	7.10	21.5	38.3	22.3	19.7	44.4	52.4	38.8
$0.0 < \text{mNDVI} \leq 0.2$	13.0	36.3	43.6	30.9	21.4	32.7	39.9	31.3
$0.2 < \text{mNDVI} \leq 0.4$	21.7	26.0	16.9	21.5	35.1	14.6	7.00	18.9
$0.4 < \text{mNDVI} \leq 0.6$	58.3	16.3	1.21	25.2	23.9	8.27	0.64	10.9
$0.6 < \text{mNDVI} \leq 0.8$	-	-	-	-	-	-	-	-
$0.8 < \text{mNDVI} \leq 1.0$	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.37	0.20	0.10	0.22	0.25	0.12	0.06	0.14
裸土面積(%)	7.10	21.5	38.3	22.3	19.7	44.4	52.4	38.8
覆蓋百分比(%)	92.9	78.5	61.7	77.7	80.3	55.6	47.6	61.2

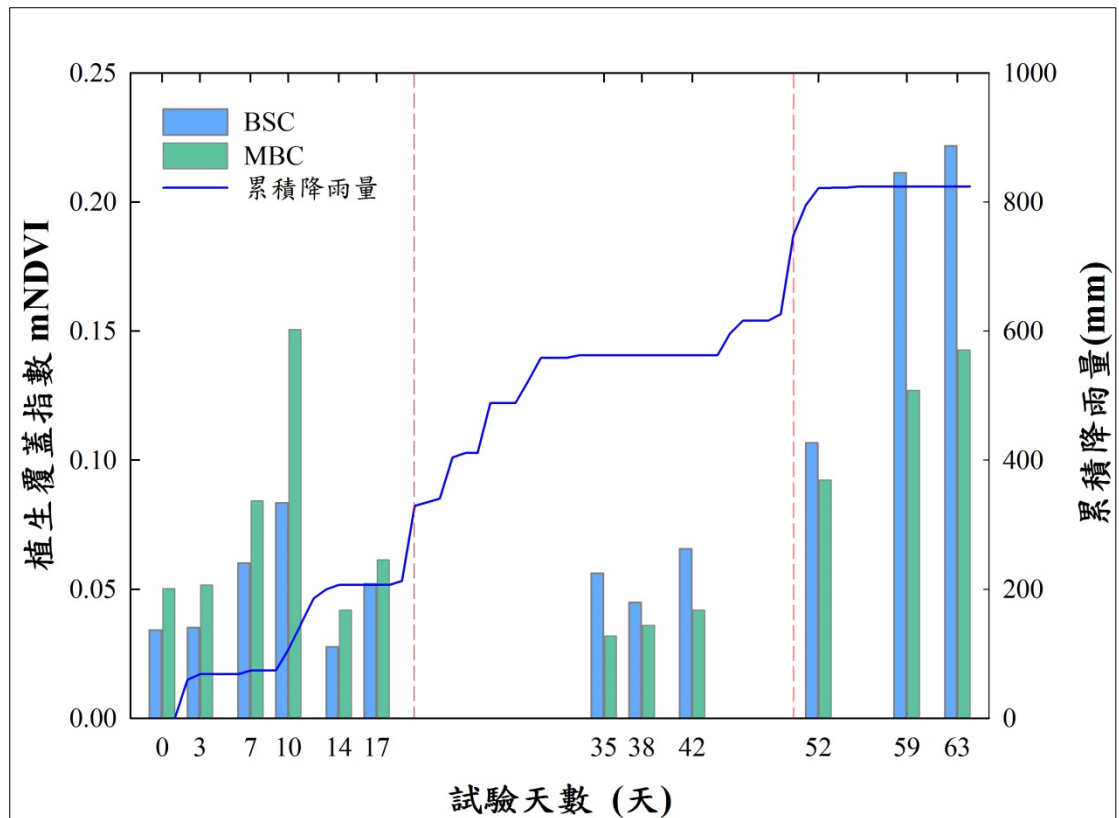


圖 2-35 不同試驗天數下之植生覆蓋指數 mNDVI 與累積雨量圖

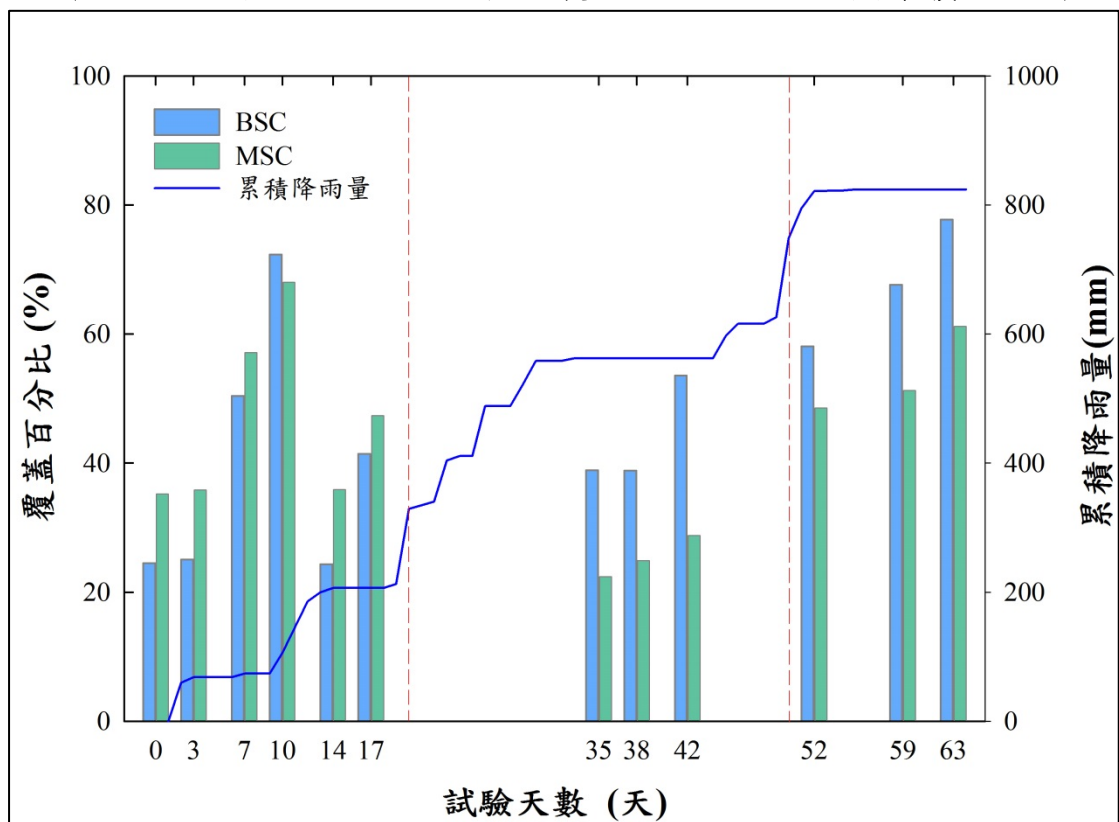


圖 2-36 不同試驗天數下之藻類覆蓋百分比與累積雨量圖

2.以有效降雨場下之土壤流失量推算 BSC 及 MSC 之覆蓋與管理因子(C 值)

本試驗收集試驗期間(7/28~10/26)之 10 min 降雨資料，並依據單場有效降雨事件定義進行劃分有效降雨場，本試驗之有效降雨場劃分結果如表 2-20 所示，試驗期間共有 26 場有效降雨場次，而沖蝕試驗開始(8/24)後，則有 15 場有效降雨場，其中有 4 場累積降雨量未超過 15mm，且未收到土壤流失量，此顯示若單場有效降雨之累積降雨量未能超過 15 mm 時，屏東科技大學之沖蝕試驗區不會產生土壤流失；本試驗期間之第 17 場有效降雨場(試驗第 20 天)及第 25 場有效降雨場(試驗第 50 天)為期間最大累積雨量的兩場，分別為 123 mm 及 202 mm，此兩場雨量造成試區內微藻大量流失，因此本試驗於試驗第 22 天(9/14)及第 53 天(10/15)補肥。本試驗以單場降雨之累積降雨量與土壤流失量進行分析，如圖 2-37 所示，其中不論是對照組或噴灑生物土壤之處理，其判定係數(R^2)皆可達 0.8 以上，顯示單場降雨之累積降雨量與土壤流失量間具有一定的相關性；而 BSC、MSC 及 CK 之線性迴歸關係式分別為 $P = 0.6530 A - 1.3950$ 、 $P = 0.6797 A - 1.7402$ 及 $P = 0.9225 A - 9.6129$ ，由表 3-8 可發現，除了第 15 場有效降雨場外，施灑微藻資材可有效降低 21.7%-38.6%及 7.3%-32.2%的土壤流失量，其中又以 BSC 效果最為顯著。由圖 2-37 可發現，BSC 及 MSC 之土壤含水分別高於 CK 達 17.5%-36.7%及 14.6%-27.5%，顯示微藻資材可有效保持土壤水分。將 BSC 及 MSC 之總沖蝕量與 CK 相比下，可得到覆蓋與管理因子(C 值)分別為 0.81 及 0.84。

表 2-20 現地沖蝕試驗之有效降雨場累積雨量與土壤流失量統計表

有效 雨場次	降雨開始時間	降雨結束時間	降雨時間 (hr)	降雨時間 (min)	單場降雨之累積雨量 (mm)	土壤流失重 (kg)		
						BSC	MSC	CK
1	2021/07/28 22:51:38.5	2021/07/29 09:14:44.5	10.4	623.1	55.5	-	-	-
2	2021/07/29 23:59:07.0	2021/07/30 14:49:50.0	14.8	890.7	59.0	-	-	-
3	2021/07/31 04:57:36.5	2021/08/02 16:35:08.5	59.6	3,578	586	-	-	-
4	2021/08/03 00:33:40.5	2021/08/04 15:50:05.5	39.3	2,356	117	-	-	-
5	2021/08/05 02:32:29.5	2021/08/08 17:34:27.5	87.0	5,222	966	-	-	-
6	2021/08/09 02:44:57.0	2021/08/09 13:38:41.5	10.9	653.7	13.5	-	-	-
7	2021/08/11 15:14:24.5	2021/08/11 18:24:01.5	3.16	189.6	72.0	-	-	-
8	2021/08/12 15:06:47.0	2021/08/12 21:13:02.5	6.10	366.3	25.5	-	-	-
9	2021/08/14 06:38:22.5	2021/08/14 23:43:36.5	17.1	1,025	59.5	-	-	-
10	2021/08/16 12:49:56.5	2021/08/16 19:12:41.5	6.38	382.8	56.0	-	-	-
11	2021/08/21 13:30:53.5	2021/08/21 14:23:33.5	0.88	52.67	40.0	-	-	-
12	2021/08/25 12:57:08.5	2021/08/25 14:23:17.5	1.44	86.15	60.0	47.4	52.4	77.3
13	2021/09/02 14:44:40.0	2021/09/02 16:41:38.0	1.95	117.0	32.0	11.2	14.6	17.0
14	2021/09/03 13:28:06.5	2021/09/03 13:29:26.0	0.02	1.325	1.50	-	-	-
15	2021/09/04 14:19:23.0	2021/09/04 15:57:36.0	1.64	98.22	79.5	94.1	84.8	38.1
16	2021/09/05 18:45:38.0	2021/09/05 21:32:50.0	2.79	167.2	14.5	-	-	-
17	2021/09/11 10:33:13.0	2021/09/12 14:57:30.0	28.4	1,704	123	68.5	70.0	90.9
18	2021/09/15 15:02:49.5	2021/09/15 16:54:04.0	1.85	111.2	64.5	22.6	23.3	29.3
19	2021/09/16 15:04:45.0	2021/09/16 15:19:24.0	0.24	14.65	6.50	-	-	-
20	2021/09/18 13:30:50.0	2021/09/18 15:03:00.0	1.54	92.17	77.0	47.3	49.2	63.5
21	2021/09/21 14:12:03.5	2021/09/21 15:53:02.0	1.68	101.0	34.0	20.9	21.7	28.1
22	2021/09/22 15:59:50.0	2021/09/22 16:43:26.0	0.73	43.60	36.5	10.1	11.9	12.9
23	2021/10/07 15:59:26.0	2021/10/07 16:43:21.5	0.73	43.92	34.5	21.6	23.0	32.4
24	2021/10/08 17:07:02.0	2021/10/08 18:20:07.0	1.22	73.08	19.0	11.9	12.7	17.8
25	2021/10/11 11:14:21.5	2021/10/14 09:42:40.0	70.5	4,228	202	126	135	190
26	2021/10/17 07:23:14.5	2021/10/17 07:23:15.5	0.00	0.017	1.50	-	-	-
總和 (沖蝕試驗)			370.4 (114.7)	22,222.1 (6,882.1)	2,835.0 (785.5)	482	492	597
覆蓋與管理因子(C 值)			-	-	-	0.81	0.84	-

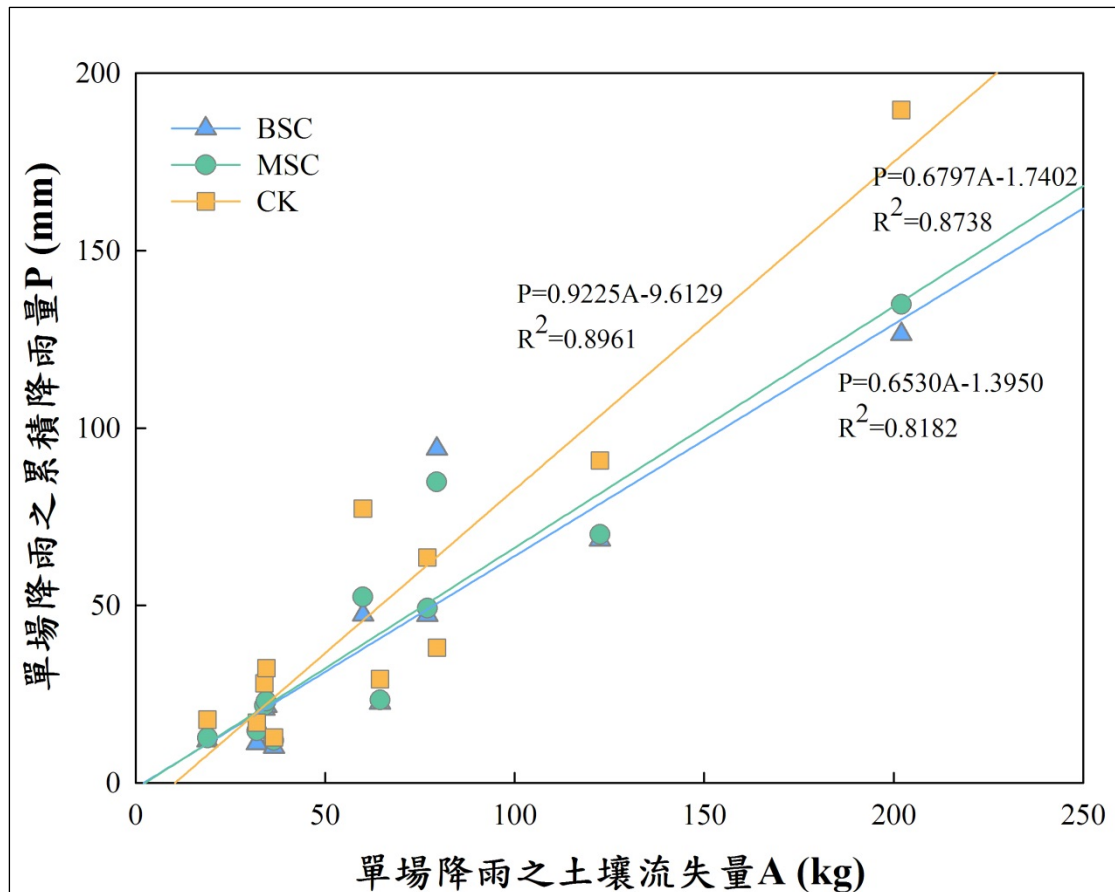


圖 2-37 單場降雨之累積降雨量與土壤流失量之關係圖

3.微藻改良土壤性質

(1) 土壤含水量與土壤溫度變化

於沖蝕試驗前一個月進行藻類培養，期間每隔 3~4 天(以每個禮拜二及禮拜五進行測定)測定試區上、中及下區之土壤含水量及溫度，其成果如圖 2-38 及圖 2-39 所示。微藻培養期間因均鋪設帆布，因此含水量及溫度較為穩定，含水量可維持在 27%~33%，而土壤溫度則可維持在 31°C~37°C；一個月後則進行沖蝕試驗(無鋪設帆布)，可發現施用 BSC 或 MSC 可顯著提高土壤的保水性，其中 BSC 可有效降低 1.1%~6.8% 土壤溫度。

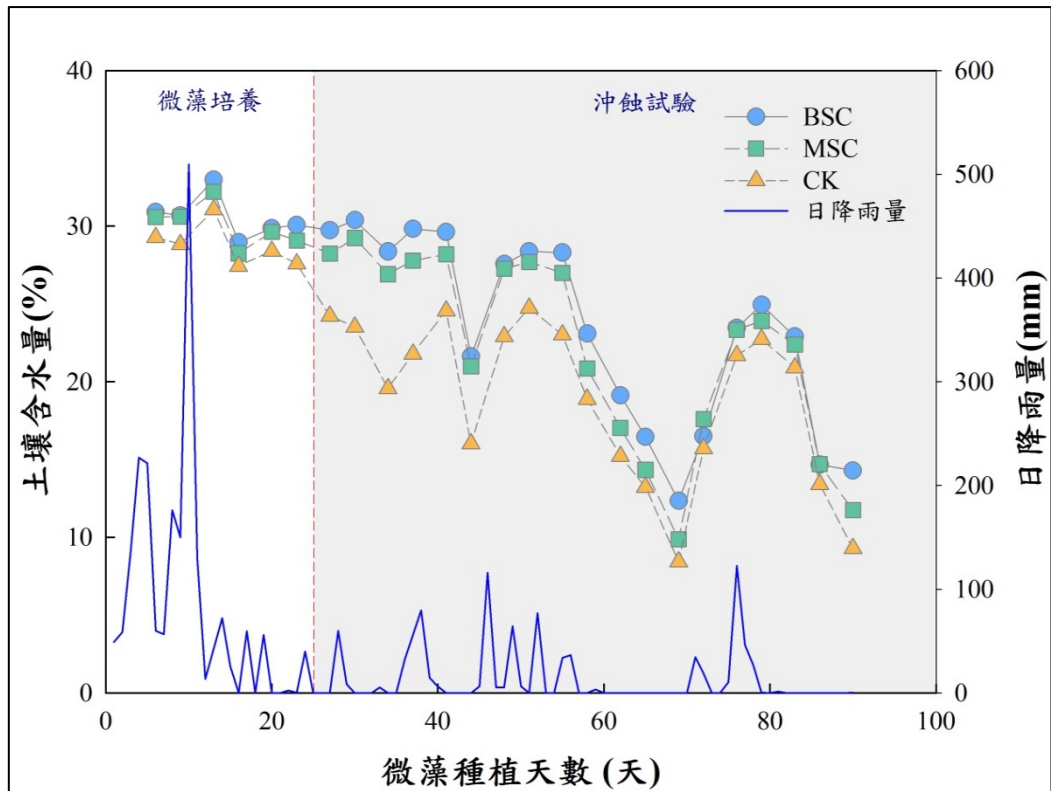


圖 2-38 不同試驗種植天數下之土壤含水量與日降雨量變化圖

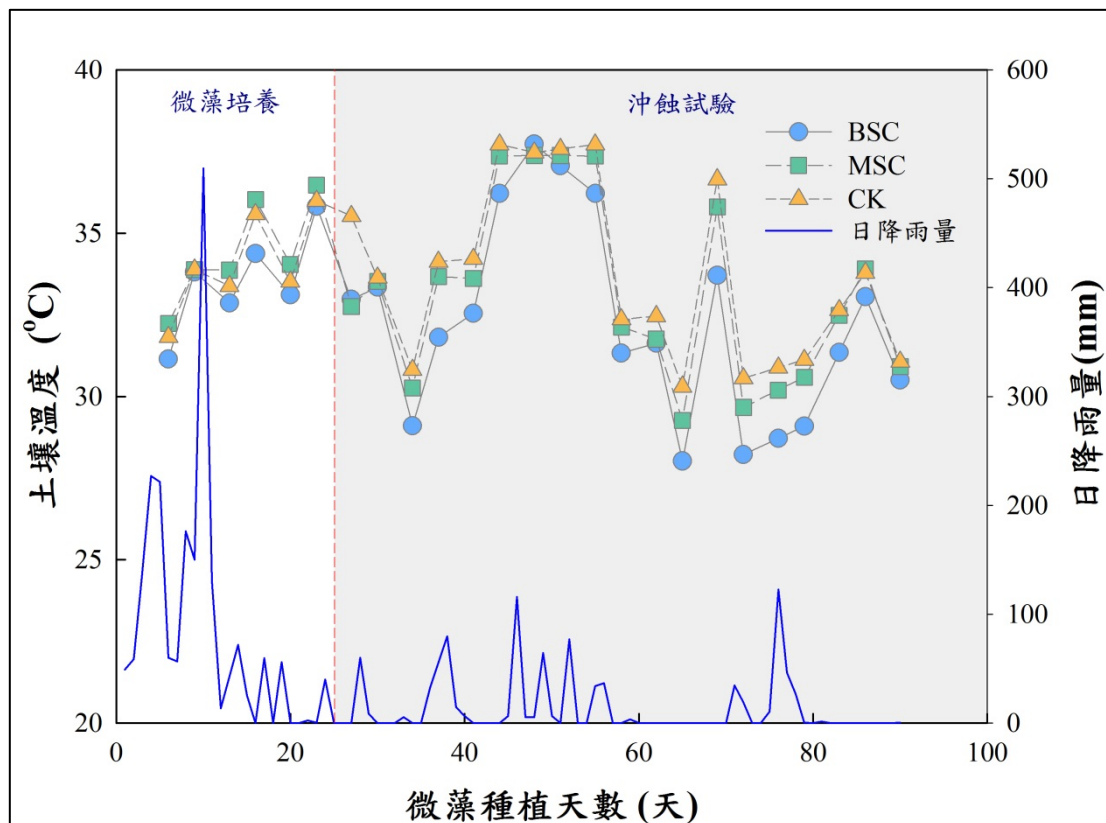


圖 2-39 不同試驗種植天數下之土壤溫度與日降雨量變化圖

本試驗於試驗前、中及後期於各試驗區內採集土樣攜回實驗室內風乾並過篩(#10)，以供以下性質分析：

(2) 土壤反應

本試驗不同處理之土壤 pH 於試驗前中後變化如圖 3-28 所示。由於本試驗在培養微藻過程時定期會添加化肥，因此試驗中期時 BSC 及 MSC 處理之土壤 pH 顯著下降約 11.0%及 11.6%，後期則因受降雨淋洗而有些微上升，而對照組 CK 在試驗期間中未有顯著變化。

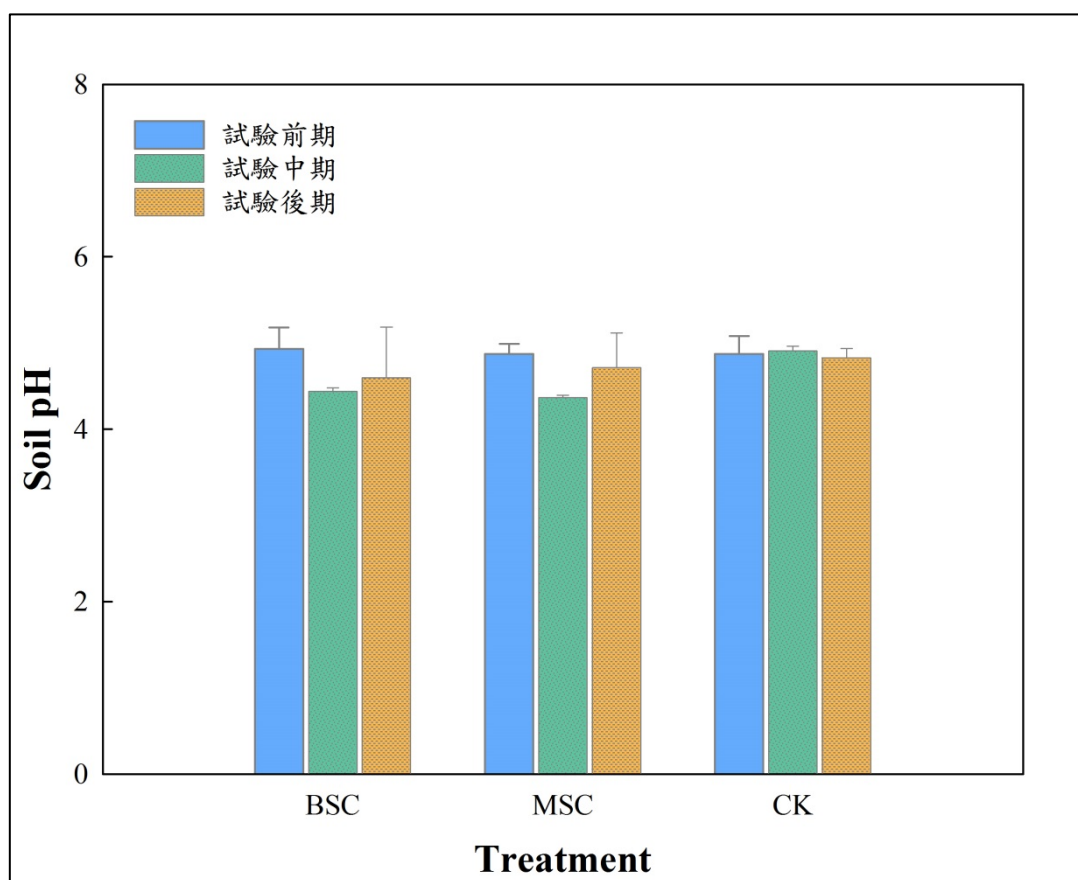


圖 2-40 不同處理之土壤 pH 於試驗前中後期之變化圖

(3) 土壤總體密度

本試驗不同處理之土壤總體密度於試驗前中後變化如圖 3-29 所示。由於試驗開始培養微藻前，已進行過耕犁鬆土作業，因此各處理於試驗開始後皆受到雨滴撞擊或逕流水淋洗等影響，因此總體密度皆於中期時有顯著增加 5.3%-8.1%在，至後期時則無顯著變化；而施用 BSC 及 MSC 則僅有微微增加 0.8%-3.8%。

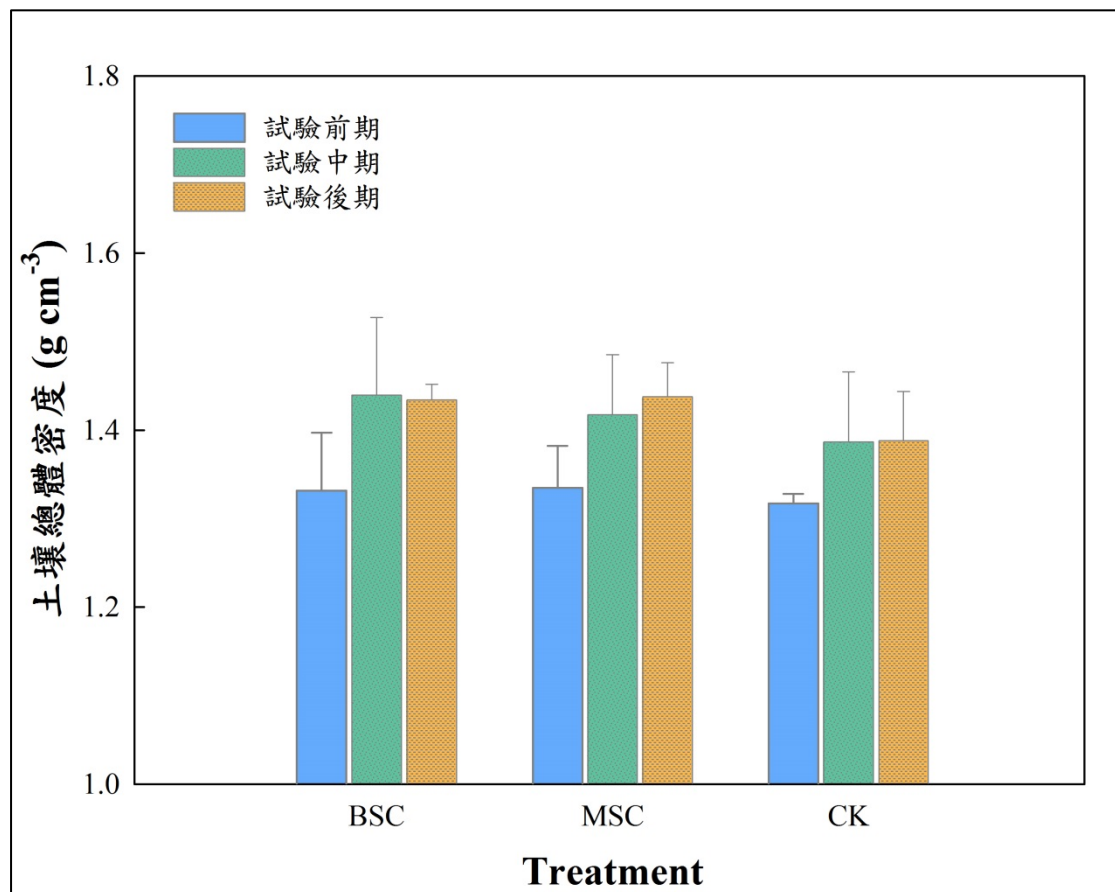


圖 2-41 不同處理之土壤總體密度於試驗前中後期之變化圖

(4) 土壤導水度

本試驗不同處理之土壤導水度於試驗前中後變化如圖 3-30

所示。因試驗前已耕犁鬆土過，各處理皆於試驗開始後隨著密度的增加，導水度亦隨之降低，尤其是有微藻覆蓋處，由圖 3-22 與圖 3-23 可發現，試驗中期微藻主要覆蓋於下坡及中坡，而後期則主要覆蓋於上坡，因此致使 BSC 及 MSC 於中期時，下坡及中坡導水度較上坡慢 42.9%-45.5%及 59.6%及 63.8%；而後期則為上坡慢於下坡及中坡 92.1%-95.6%及 92.5%-93.3%，如表 3-21 所示。

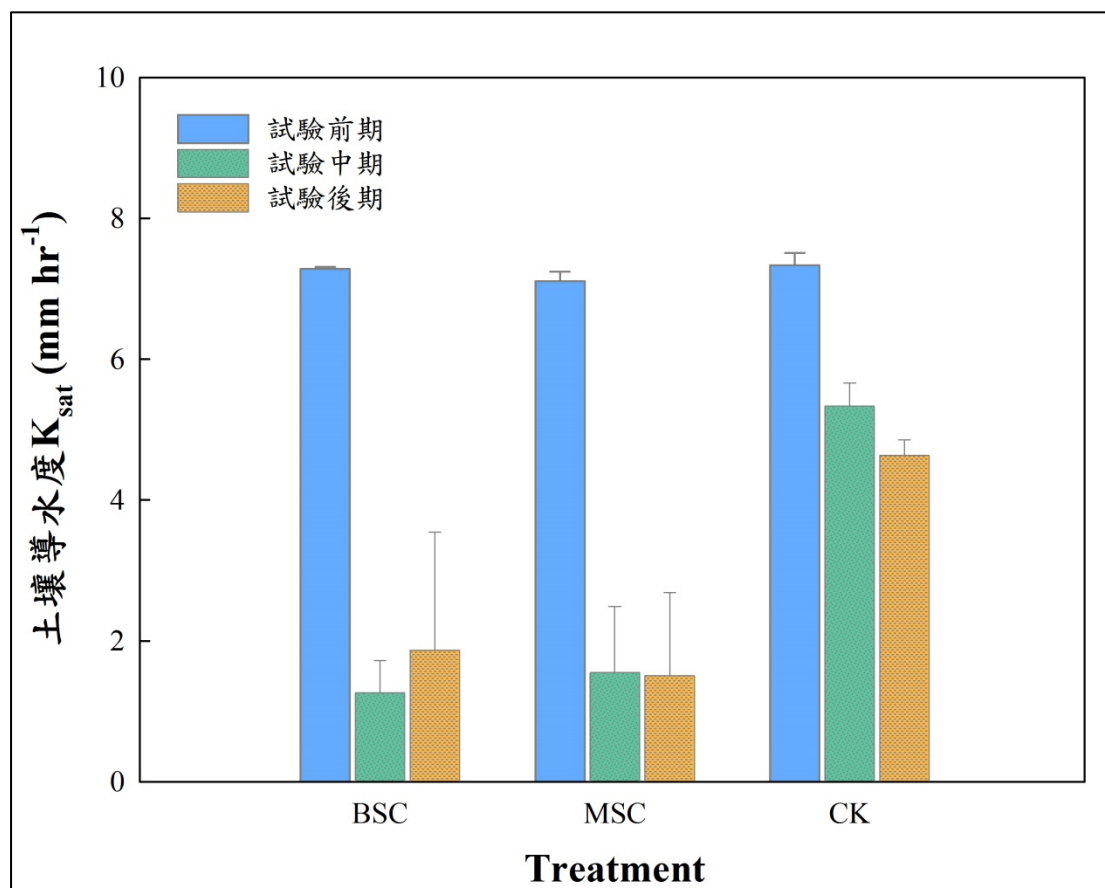


圖 2-42 不同處理之導水度於試驗前中後期之變化圖

表 2-21 不同處理之導水度於試驗前中後期之變化表

處理	試區 位置	K _{sat} (mm/hr)		
		前期	中期	後期

	上坡	7.27		1.79		0.15	
BSC	中坡	7.26	7.28 ± 0.03	1.02	1.26 ± 0.46	1.94	1.87 ± 1.68
	下坡	7.32		0.98		3.51	
	上坡	7.00		2.63		0.15	
MSC	中坡	7.07	7.11 ± 0.13	1.06	1.55 ± 0.94	2.31	1.51 ± 1.18
	下坡	7.26		0.95		2.07	
	上坡	7.42		5.67		4.41	
CK	中坡	7.46	7.34 ± 0.18	5.02	5.33 ± 0.33	4.63	4.63 ± 0.22
	下坡	7.13		5.30		4.86	

(5) 土壤硬度

本試驗不同處理之土壤硬度於試驗前中後變化如圖 3-31 所示。由於試驗前受剛耕犁鬆土的影響，因此試驗前期為土壤硬度此時為最為鬆散(硬度值約為 17-18 mm)，在試驗中期及後期時 BSC 及 MSC 因微藻覆蓋於表土上，使土壤硬度增加 27.9%-87.4%及 31.7-86.6%；而土壤硬度受到 BSC 及 MSC 之微藻影響，中期時下坡及中坡較上坡硬 10.5%-12.1%及 27.3%-29.7%；而後期時時上坡較下坡及中坡硬 11.6%-15.1%及 7.6%-9.9%。

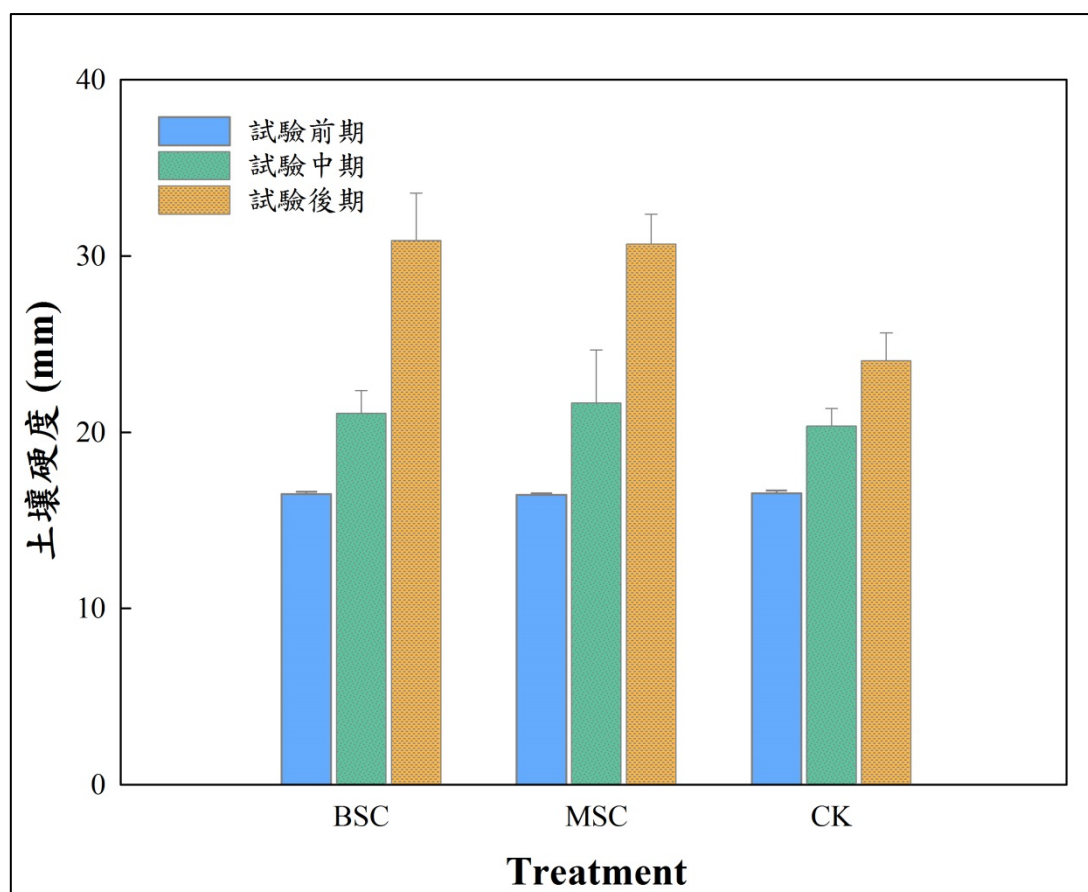


圖 2-43 不同處理之土壤硬度於試驗前中後期之變化圖

表 2-22 不同處理之土壤硬度於試驗前中後期之變化表

處理	試區 位置	土壤硬度 (mm)			
		前期	中期		後期
BSC	上坡	16.5	19.6		33.9
	中坡	16.6	16.5 ± 0.15	$22.0 \quad 21.1 \pm 1.29$	$30.0 \quad 30.9 \pm 2.69$
	下坡	16.3	21.7		28.8
MSC	上坡	16.3	18.2		32.6
	中坡	16.5	16.4 ± 0.10	$23.6 \quad 21.7 \pm 3.00$	$30.1 \quad 30.7 \pm 1.69$
	下坡	16.4	23.2		29.3
CK	上坡	16.6	19.8		23.1
	中坡	16.7	16.5 ± 0.15	$21.5 \quad 20.3 \pm 1.00$	$25.9 \quad 24.1 \pm 1.57$
	下坡	16.4	19.8		23.2

(6) 土壤有機質

本試驗不同處理之土壤有機質於試驗前中後變化如圖 3-32 所示。試驗中期時，由於施用 BSC 及 MSC 亦施加化肥的緣故，因此分別提高 5.52%及 10.8%的土壤有機質含量，而未施加肥料補充的對照組 CK 因受到雨水的掏刷作用或雨水入滲的淋洗作用而導致有機質流失，因此下降約 17.6%的有機質含量，而後期相較於中期，各處理之土壤有機質含量並無顯著的變化。

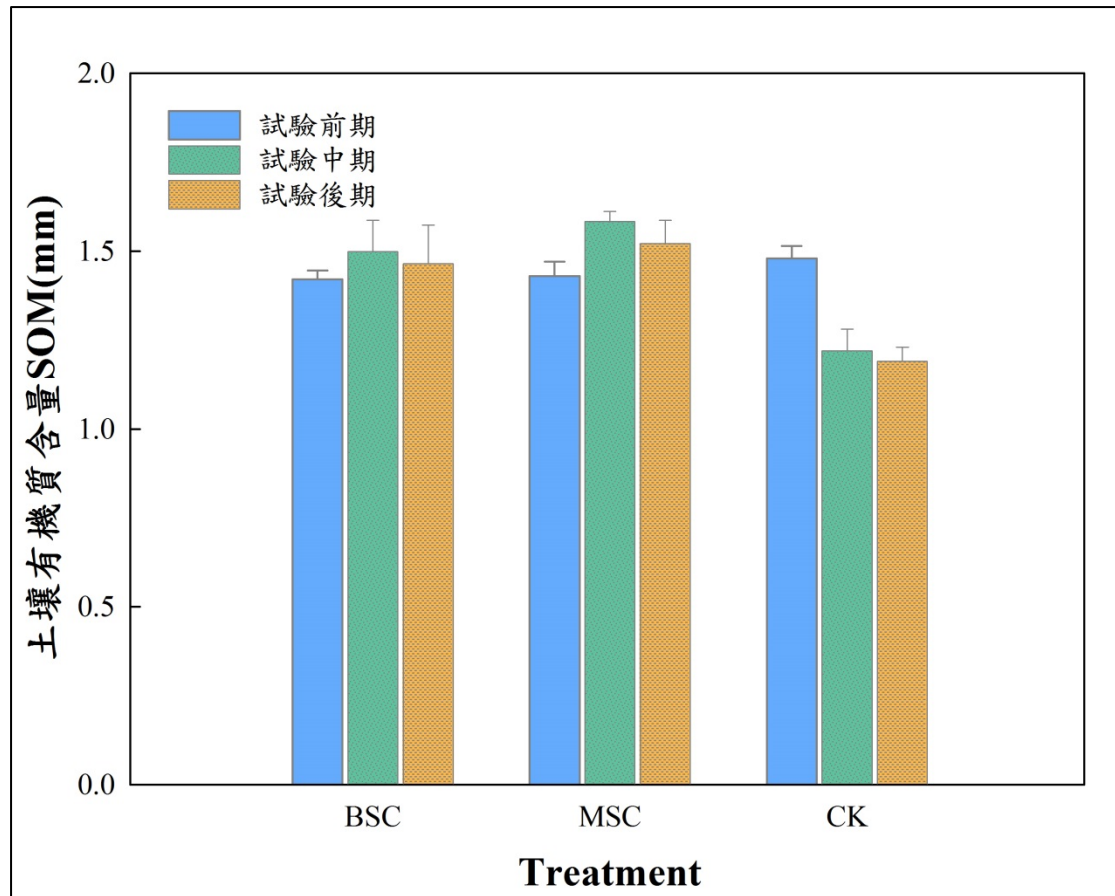


圖 2-44 不同處理之土壤硬度於試驗前中後期之變化圖

(四) BSC運用於泥岩區復育效益與可行性評估

年度BSC技術開始針對現地進行培養試驗，起始目標為南部泥岩裸露區為主要目標，該泥岩區域俗稱為月世界或惡地。第一階段初篩為台南市龍崎區及高雄市燕巢區，隨後考量交通、人為干擾及現地環境適性，最後選定龍崎區「牛埔泥岩水土保持教學園區」作為現地試驗區。

挑選主因為民國87年起水土保持局以生態工法進行土壩及土堤的設置、裸露坡面植生等水土保持工作。後續龍崎區公所配合在集水區內設置步道及涼亭等軟性休閒設施，使得周邊環境逐漸復育且綠意盎然，並獲選為92年度生態工法博覽會之現場觀摩示範區。在區公所與水土保持局的管理與維護下，園區內環境穩定且有湖體維持周邊生態，在開放步道外地區少有人為干擾，實為泥岩裸露區作為BSC復育試驗的良好場地。

1. 現地試驗工區基本資料

「牛埔泥岩水土保持教學園區」位於台南市東南側之龍崎區，近縣道182東側尾端南側(圖2-45_a)，山系屬阿里山山脈南緣丘陵地。根據中央氣象局崎頂測站(C00960)資料進行統計，

2020年之月均溫介於18~28度，年均溫為23.9度。高溫多發生於5-8月，可達39.8度；低溫多介於12-2月，可達7.1度。2020年年雨量為1794毫米，主要降雨亦介於5-8月，最大降雨月份為8月之763毫米。年平均相對適度為80%，最高為8月之

87%，最低為 4 月之 75%。

為求大致瞭解「牛埔泥岩水土保持教學園區」周邊地文特性，將園區周邊以 800 公尺見方區域做相關統計與出圖(圖 2-45)，園區範圍詳見表 2-23，各地文特性相關描述如下。

表 2-23 園區周邊統計範圍端點座標

方位	座標(97TM2)	方位	座標(97TM2)
左上	(188969, 2536936)	右上	(189769, 2536936)
左下	(188969, 2536136)	右下	(189769, 2536136)

(1) 地質(圖 2-45_c)

園區周邊以年代為中新世晚期到更新世之古亭坑層為主，古亭坑層為亞深海至大陸棚環境為主，因此岩性多為泥岩，新鮮裸露以暗灰色為主，其餘因出露地表經風化多為淡黃色或黃褐色。古亭坑層分布廣，自左鎮、龍崎往南至旗山皆有出露，本區以暗灰色塊狀泥岩為主，偶夾薄層砂質泥岩，較特別的是區內具一層十數公尺後之砂泥岩互層。試驗工區周邊則以厚層暗灰色泥岩為主，偶有薄層粉砂岩分布，地表多為塊狀泥岩，因此若邊坡遇事件崩塌裸露，易因泥岩抗地表營力能力低，導致多有高侵蝕現象發生，如強降雨下的地表高沖蝕、坡面容易形成蝕溝造成顯著下切等現象。

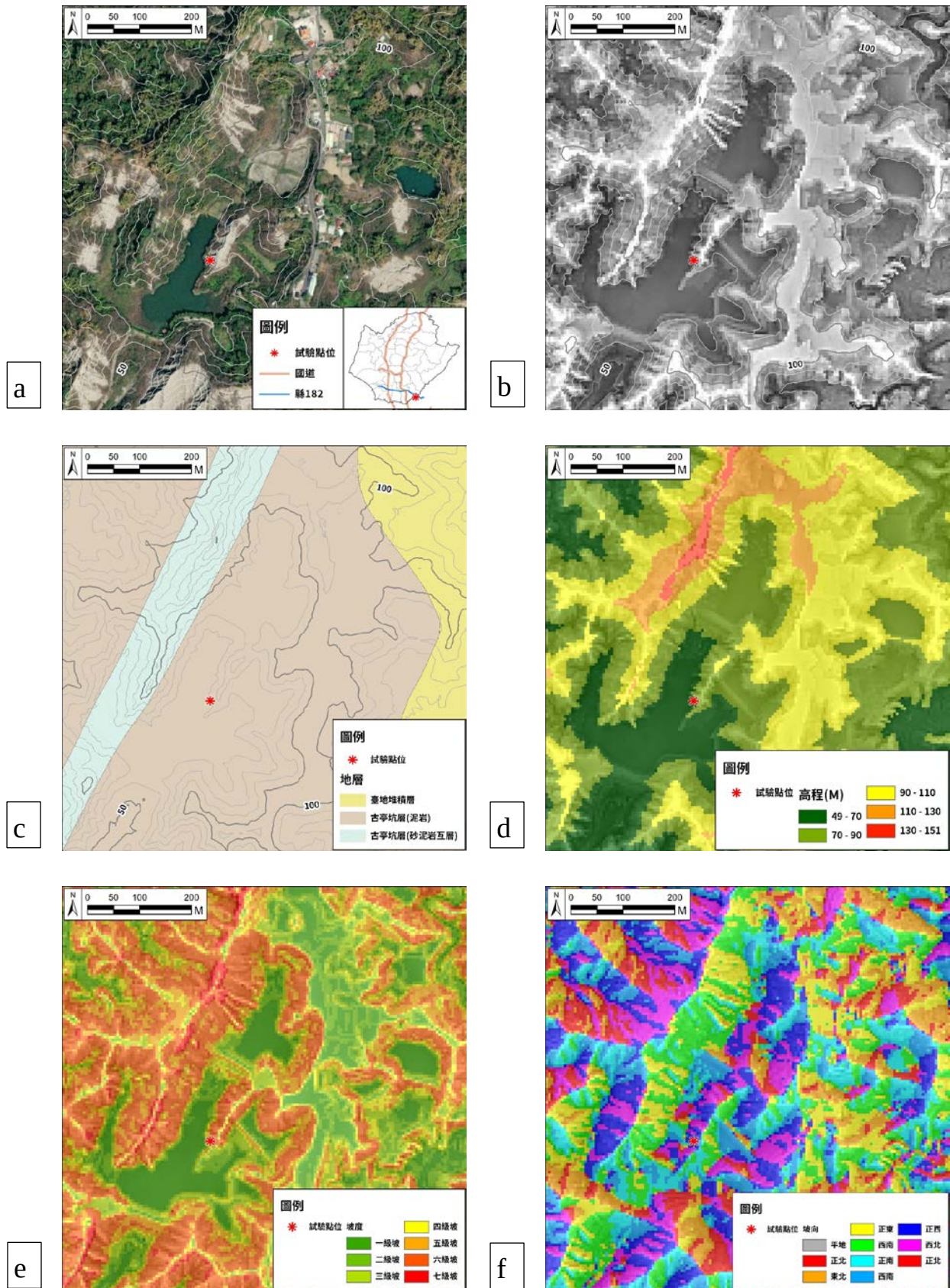


圖 2-45 現地試驗工區周圍基本資料 (a. 衛星影像；b. 開闊度地形；c. 地質圖；d. 高程分布；e. 坡度圖；f. 坡向圖)

(2) 高程(圖 2-45_d)

龍崎區內多為 200 公尺以下之低矮丘陵，少有高聳山丘佇立，另因周圍地層岩性抗侵蝕能力相似，僅少部分為厚層砂岩有較突出之地形，偶見單面山或獨立山脊特徵。

本區內岩性多為塊狀泥岩，因此整體抗侵蝕能力相近，再加上居民多於緩坡處農墾與居住，除大型農塘與溪溝地勢較低外，整體多為平緩邊坡。區內西側之厚層砂岩分布地區地勢較高，此乃差異侵蝕表徵，因厚層砂岩抗侵蝕能力較高，殘存於地表易成高地。

(3) 坡度(圖 2-45_e)

整體而言，坡度分布區向兩端點，以農塘與農墾地為主之緩坡，與蝕溝及厚層砂岩分布之陡坡，可明顯從坡度的分區觀察到相對應的區域。且以泥岩裸露為主之月世界地形，邊坡多為沖蝕量高之區域，其表層多有蝕溝發育，在坡度上亦多為高陡區域。

(4) 坡向(圖 2-45_f)

受控於區域地質影響，本區西側有一厚層砂岩，其走向為東北-西南向，因此厚層砂岩兩側坡面多朝西北-東南向，此外區域受控塊狀泥岩產狀，則多呈現不規則均勻分布。

(5) 土壤(圖 2-46、圖 2-47)

土壤母質為此區內之砂岩與頁岩風化，呈現初步發育之土壤，因長年裸露與地比高度侵蝕，土壤未具永久性之構造，土色與區域內之泥岩岩性近似，其成分與母質岩性相近，本區以泥岩石質土為主。

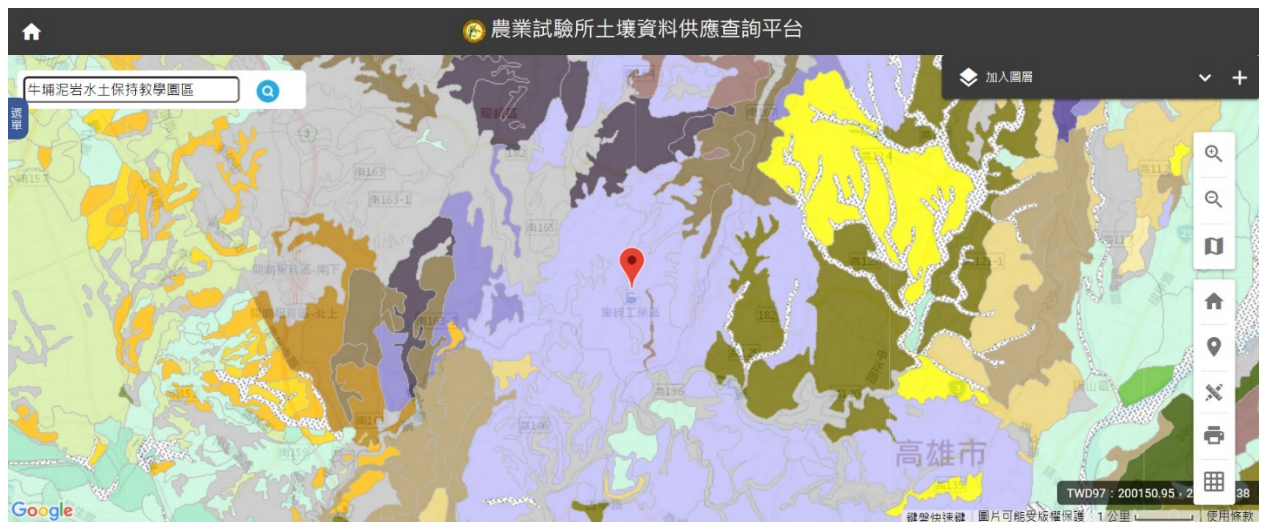


圖 2-46 試驗區周邊土壤特性分布 (引自 農試所土壤資料供應平台)

單元中文
淺水寮坳質壤土
單元英文
Csl4D
地圖單元類
淺水寮坳質壤土Csl4D
土類
泥岩石質土
土系代號
Csl
中文土系名
淺水寮系

圖 2-47 試驗區土壤特性屬性說明

(二) 試驗施作工序

試驗工區位於「牛埔泥岩水土保持教學園區」主要湖區東岸(圖 2-48~圖 2-49)，受惠於農塘儲水影響，湖區周圍水氣充沛且植生茂密。然而實驗區位於坡向面南之泥岩裸露坡面，由於受長年受外營力影響，邊坡表層無顯著植生發育，稍微偏離主要步道，加上近期園區未直接開放，無顯著人為影響因素，為良好的現地試驗場地。唯裸露坡面白天日曬強烈，是為現地嚴苛條件。

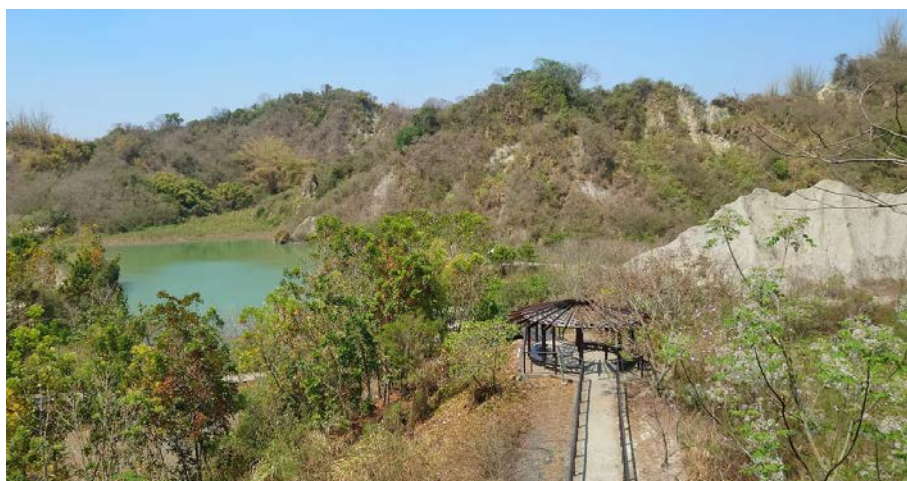


圖 2-48 牛埔泥岩水土保持教學園區全景



圖 2-49 教學園區內主要泥岩裸露區概況

試驗邊坡岩性以塊狀泥岩為主，部分夾有薄層粉砂岩，粉砂岩厚度多介於 1 公分左右，且一旦有蝕溝發育，便開始從蝕溝處明顯有向下侵蝕之現象，因此坡面表層因泥岩之高沖蝕無顯著植生發育。試驗工區選定時程與內容可參考表 2-24，在 2021 年 3 月 16 日開始針對牛埔試驗工區進行相關佈設(圖 2-50)，往後於每月初進行坡面與縮時攝影維護，現地概況如圖 2-51~圖 2-52。

表 2-24 現地試驗邊坡選定與執行日程概況

編號	時間	執行概況
1	2/25	進行現勘，針對龍崎牛埔與燕巢滾水坪現地試驗合宜性評估。
2	3/16	選定牛埔，開始進行打樁圍繩等樣區布設，並噴灑 BSC 及 MSC，與縮時攝影架設。
3	4/7	定期現地維護，補噴灑 BSC 及 MSC，與縮時攝影影片下載。
4	5/4	
5	6/9	
6	7/13	
7	8/3	
8	10/4	
9	11/4	

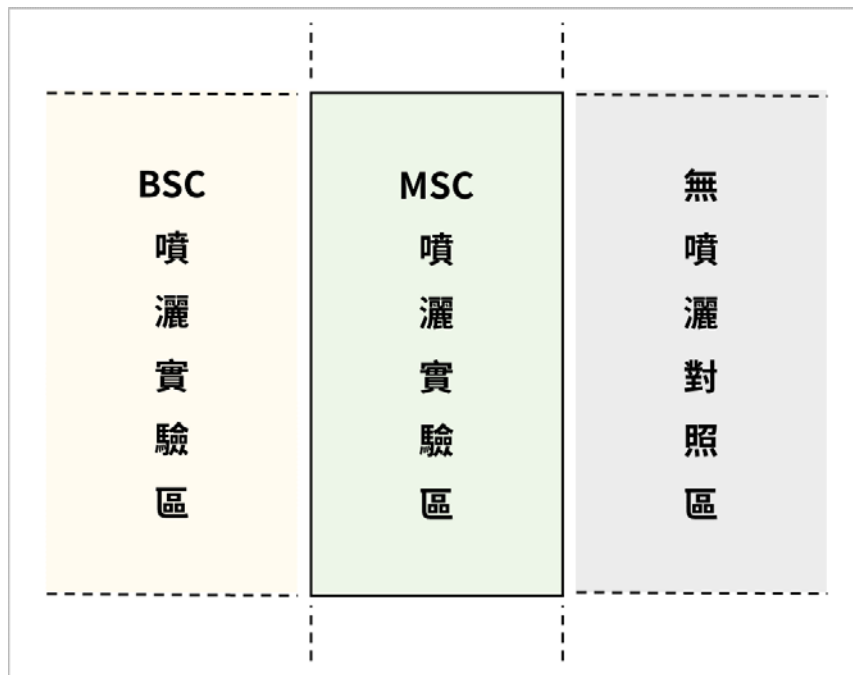


圖 2-50 現地試驗之實驗與對照組分布示意圖



圖 2-51 現地試驗坡面初始概況(2021/3/16)



圖 2-52 現地試驗坡面初始概況(2021/4/7)



圖 2-53 現地試驗坡面初始概況(2021/5/4)



圖 2-54 現地試驗坡面初始概況(2021/6/9)



圖 2-55 現地試驗坡面初始概況(2021/7/13)



圖 2-56 現地試驗坡面初始概況(2021/8/3)

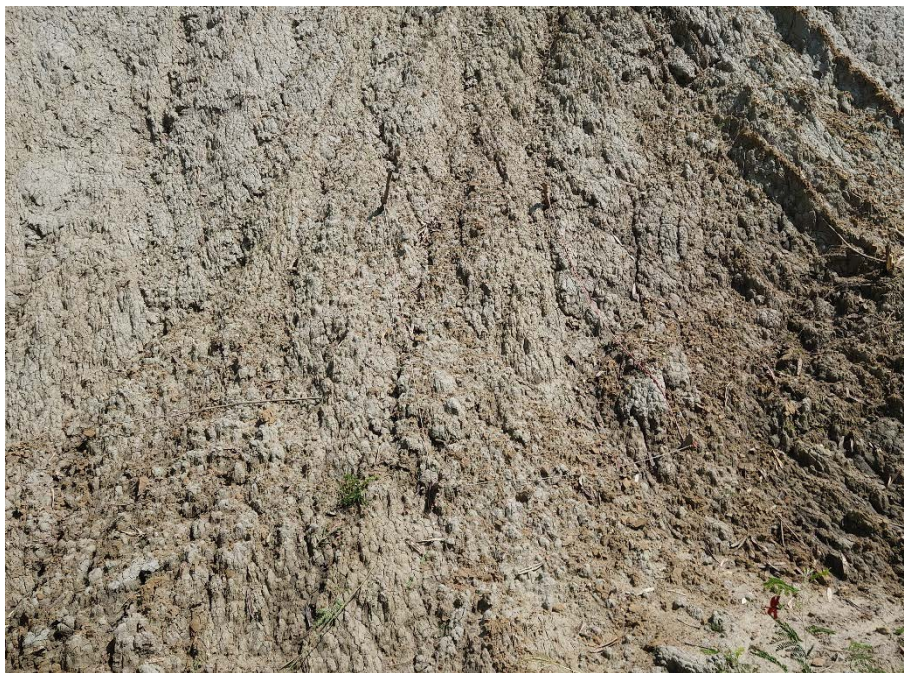


圖 2-57 現地試驗坡面初始概況(2021/10/4)



圖 2-58 現地試驗坡面初始概況(2021/11/4)

現地試驗場自 2021 年 3 月架設至今(11 月)，主要歷經 3 場豪雨事件彩雲颱風(0604)、0621 豪雨事件及盧碧颱風 (0729-0808)，參考鄰近氣象局崎頂雨量站(C00960)(圖 2-59)，雨量組體圖可參考圖 2-60，至 11 月為止累積雨量為 2,438 毫米。可從歷次現地試驗維護照片觀察出，坡面仍明顯維持裸露泥岩狀態，無植生復育現象，局部有坡面沖蝕與蝕溝刷深跡象，就大尺度而言無顯著變化之處。然而，從局部仔細觀察，可發現 BSC 或 MSC 皆於豪雨前後噴撒至坡面有顯著不同(圖 2-61～圖 2-62)，主要差異在噴灑分末後沾附泥岩狀態，應與泥岩含水量高地有直接關聯。

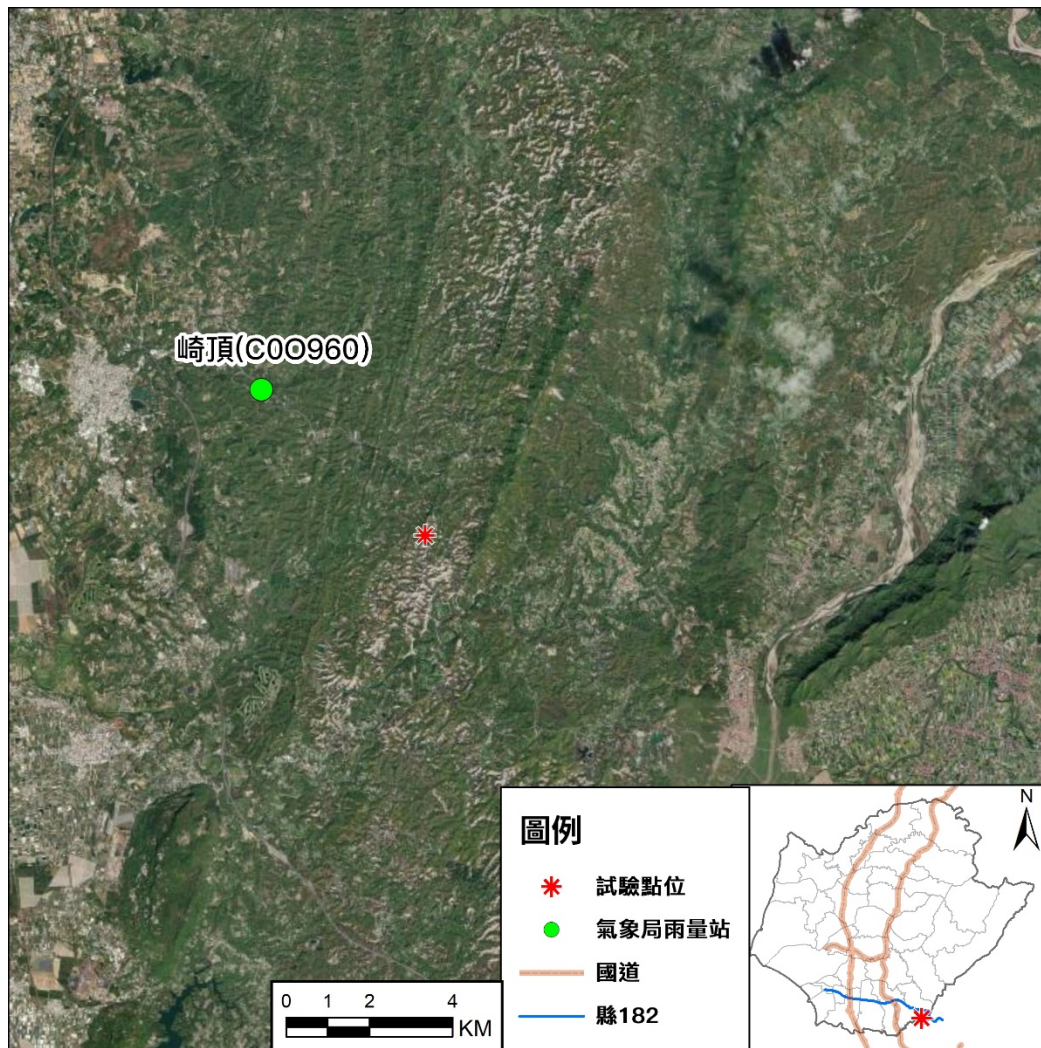


圖 2-59 試驗區與氣象站分布相關位置分布

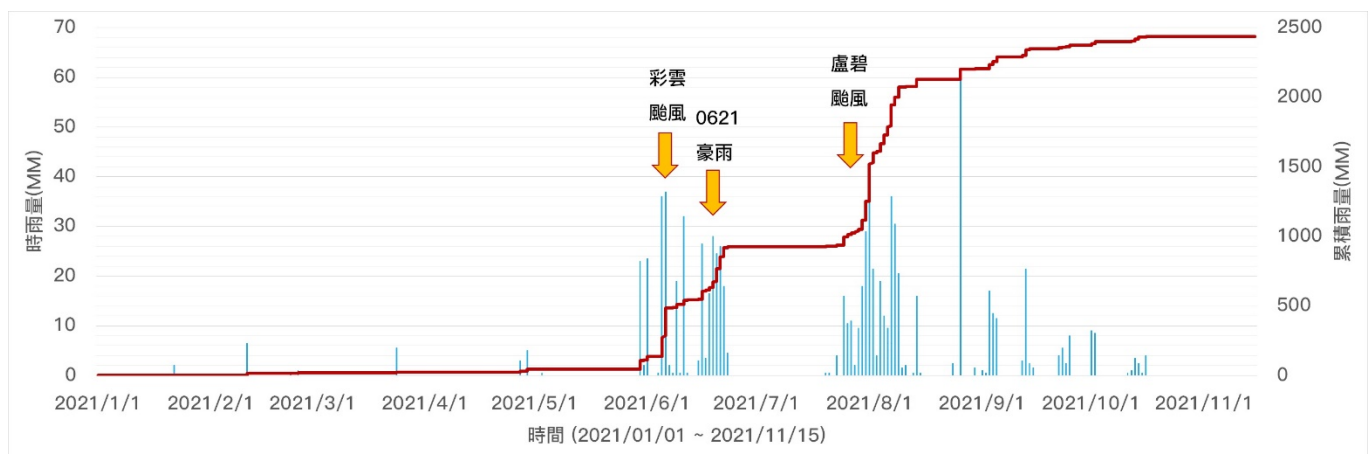


圖 2-60 崎頂雨量站 2021/01/01 ~ 2021/11/15 雨量組體圖



圖 2-61 現地試驗坡面細部特徵(2021/3/16)



圖 2-62 現地試驗坡面細部特徵(2021/4/7)



圖 2-63 現地試驗坡面細部特徵(2021/5/7)



圖 2-64 現地試驗坡面細部特徵(2021/6/9)



圖 2-65 現地試驗坡面細部特徵(2021/7/13)



圖 2-66 現地試驗坡面細部特徵(2021/8/3)



圖 2-67 地試驗坡面細部特徵(2021/10/4)



圖 2-68 現地試驗坡面細部特徵(2021/11/4)

第三章 工作進度與交付項目

第一節 計畫甘特圖

本計畫執行依水土保持局創研計畫相關規定辦理，已於 2021 年 4 月 11 日繳交期初工作執行計畫書，7 月 18 日繳交期中報告書，並 11 月 14 日繳交期末報告書，12 月 25 日繳交成果報告書，執行規劃如下表。

表 3-1 計畫進度及執行項目規劃表

重要工作項目	工作比重 %	預定進度	2021				備註
			1-3月	4-6月	7-9月	10-12月	
BSC技術現地尺度施作工序及配合施工條件	20	工作量或內容	於試區進行基礎施工與設置	維運與管理	維運與管理	維運與管理	
		累計百分比	35	60	80	100	
BSC技術培養紀錄及施作速度	20	工作量或內容	於試區進行基礎施工與設置	試區紀錄與量測	試區紀錄與量測	試區紀錄與量測	
		累計百分比	15	50	75	100	
BSC試驗場址長期於自然降雨條件與對照組沖蝕量-逕流量監測與分析	35	工作量或內容	規劃評估	於試區進行基礎施工與設置	量測與維護	彙整分析與歸納整理	
		累計百分比	10	40	75	100	
BSC運用於泥岩區復育效益與可行性評估	15	工作量或內容	既有研究資料蒐集	資料整理與監測資料比對	資料整理與監測資料比對	研究成果整理與討論	
		累計百分比	25	40	60	100	
技術報告	10	工作量或內容	資料整理	期中成果撰寫	資料整理	期末報告撰寫	
		累計百分比	20	50	70	100	
累計總進度	百分比		19	47	73	100	

第二節 計畫交付項目

本計畫之執行，預定產出成果包含

1. 研發基礎資料蒐集：預定 1 項，蒐集生物土壤技術相關資料，進行文獻蒐集整理，並預計收集並分析 10 場降雨之土壤沖蝕量。
2. 引進技術及水土保持管理創新作為：預定引進生物土壤 (BSC) 技術 1 項及建立建立示範區 1 處。
3. 技術報告撰述：預定 1 篇。

表 3-2 計畫交付項目及執行進度表

重要工作項目	工作數量				預算金額(千元)		實施地點	備註
	單位	全程計畫目標 110 年 01 月至 110 年 12 月	至 109 年度止累計	本年度預定目標	水利局經費	其他配合經費		
BSC 技術現地尺度施作工序及配合施工條件	項	1	0	1	160	0		
BSC 技術培養紀錄及施作速度	項	1	0	1	150	0		

BSC 試驗場址全年期於自然降雨條件與對照組沖蝕量逕流量監測與分析	施作紀錄及調查分析之資料筆數	10	0	20	240	0	屏科大試驗場	
BSC 運用於泥岩區復育效益與可行性評估	項	1	0	1	150	0	龍崎水保教室	
技術報告	篇	1	0	1	47	0		

第四章 執行成果及後續建議

第一節 執行成果

本年度計畫，主要完成 (一) BSC 技術現地尺度施作工序及配合施工條件； (二) BSC 技術培養紀錄及施作速度； (三) BSC 試驗場址長期於自然降雨條件與對照組沖蝕量-逕流量監測與分析及(四) BSC 運用於泥岩區復育效益與可行性評估。以下針對本年期計畫完成之主要工作項目進行說明：

(一) BSC 技術現地尺度施作工序及配合施工條件

自計畫啟動後，持續與日本工營株式會社與日健總本社討論與修正相關技術手冊項目與細節，依據日本國內、外相關施工案例探討施作工序及配合施工條件。完成提供臺灣 BSC 作業的技術手冊，內容包括：(1)適用的場所、(2) BSC 的施工條件、(3)標準的施工工法、(4)施工後成效的追蹤等相關內容，其中施作的順續及配合施工的材料種類及比例等，可提供後續示範案例及實驗作業參考，其相關結果如第三節(一) BSC 技術現地尺度施作工序及配合施工條件。

(二) BSC 技術培養紀錄及施作速度

藻類發展及穩定是 BSC 技術施作的關鍵，但因微生物種類複雜，常有多樣的共生、寄生等關係和特殊的生存條件，且目前

對於絕大部分微生物的生理需求與環境的交互作用瞭解相當有限，而微生物培養技術顯然具有嚴重的偏好性問題，本次取得 BSC 工業生產製品，得以實施現地場址培養及歷程紀錄，並透過調整基地條件、輔助營養料、供水及鋪襯等方式，紀錄(1) 微藻培養狀況、(2) 微藻成長速度及(3) 在表土上拓殖速度等三種特性，配合試驗場址氣候條件的完整紀錄，清楚鑑別出 BSC 工法植生發展環境及型態變化。

(三) BSC 試驗場址長期於自然降雨條件與對照組沖蝕量-逕流量

監測與分析

為了瞭解土壤施用 BSC 後，微藻覆蓋於表土上是否能於降雨事件內減緩雨滴及飛濺對地表土壤的衝擊，提供地表保護作用；同時亦可評估微藻覆蓋是否可有效減緩地表逕流掏刷，以降低地表的土壤流失量。已完成屏東科技大學 BSC 技術現地試驗試區(緩坡試區)，8 月~10 月開始進行為期 3 個月的現地沖蝕試驗，並收集及測定：(1)降雨資料、(2)沖蝕泥砂量、(3) 土壤含水量及溫度、(4)正攝影像及多光譜影像及(5)定期採集表土進行室內實驗分析。並藉由以上資料，推估土壤沖蝕指數、覆蓋與管理因子與植生變化的相對關係，結果顯示，施用 BSC 及 MSC 之處理除了第 41 天外，其餘有效降雨事件下，皆可有效降低 14.3%-38.6%

之土壤流失量。施用 BSC 或 MSC 可顯著提高土壤的保水性，其中 BSC 可有效降低 1.1%~6.8% 土壤溫度(具有較佳溫度緩衝效果)。

(四) BSC 運用於泥岩區復育效益與可行性評估

於牛埔水土保持岩區進行的泥岩 BSC 培養先驅實驗，現地試驗場自 2021 年 3 月架設至 11 月，主要歷經 3 場豪雨事件彩雲颱風、0621 豪雨事件及盧碧颱風，至 11 月為止累積雨量為 2,438 毫米。從歷次現地試驗比較，坡面仍明顯維持裸露泥岩狀態，就大尺度而言無顯著變化之處。然而，從局部仔細觀察，可發現 BSC 或 MSC 皆於豪雨前後噴撒至坡面有顯著不同，主要差異在噴灑分末後沾附泥岩狀態，應與泥岩含水量高地有直接關聯，參考定位樁的插入深度，約莫有 8-10 公分的沖蝕量，再次驗證泥岩裸露地的高沖蝕特性。因此在這表層土壤難以發育的高沖蝕環境，要讓藻類作為先驅植物進駐穩定坡面，勢必要先克服此惡劣的外營力沖蝕特性。

第二節 後續建議

本計畫克服 COVID-19 疫情關係，取得生物土壤(BSC)試驗資材的進口，現地的培養及實驗，更能掌握後續工業化生產生物土壤(BSC)的運用特性，以下針對本年度計畫執行的經驗提出歸納建議，提供後續相關研究者參考。

(一) BSC 跨國技術合作計畫

BSC 工法以土壤藻類為主要資材，一方面能適用於各式各樣的地區生態系，二方面有容易施工且價格低廉的通用性，獲得現場施作單位的高評價，亦被國土交通省的新技術活用系統(NETIS) 登錄為次世代的整治發展技術。BSC 技術在不同的氣候與施工條件時，仍有其施作工序及配合施工條件的調整，針對台灣示範場址亞熱帶-熱帶氣候與施工條件的考慮，是相關技術再推廣至東南亞、南亞或其他亞熱帶-熱帶氣候地區的重要參考依據，日本工營中央研究所也將全力支援針對實驗狀況，進行施作工序及配合施工條件調整與檢討的實施。

(二) BSC 技術培養紀錄及施作速度

利用生物土壤(BSC)樣品的前期研究經驗，針對日方提供的微藻樣本似乎不適合直接撒播於土壤表面，雖然以清水培養的樣本約 1~2 個月可充分發展，但真實應用於坡面工法的 BSC 資材

包含肥料及其他加強附著及滋養的材料。對生物土壤(BSC)是否成功而言，從本年期的培養及觀察經驗，關鍵不在出現何種藻種，而是出現的該藻種能不能成功於表土成長，進而成功建立 BSC，絲狀藻種的成功機率又顯著大於顆粒狀藻種。

(三) BSC 運用於泥岩區復育效益與可行性評估

針對泥岩先驅培養實驗成效不佳，主要可針對坡面掛網並填充現地的腐植土或落葉作為抗沖蝕、保濕與高日曬的防護層。另外，可針對坡面藻類噴植方式進行改良，除了原本的藻類與副資材外，可再混入相關養分、固著劑與保濕劑，一方面增加試驗場域邊坡抗蝕能力，另一方面改善現地復育環境，用以增加於泥岩裸露區域的初階復育與穩定邊坡之可能性。

參考文獻

1. Alexander, R. W. and A. Calvo, 1990. The influence of lichens on slope processes in some Spanish badlands. In: J. B. Thornes (eds.). Vegetation and Erosion. John Wiley and Sons, Ltd. Chichester, England. pp. 385-398.
2. Anthony, O. and G. Heike. 1999. 16S rDNA methods in soil microbiology. Curr. Opin. Biotech. 10: 225-229.
3. 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.
4. Belnap, J. 2001. Factors influencing nitrogen fixation and nitrogen release in biological crusts. In: J. Belnap and O. L. Lange (eds.). Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. Springer, Berlin Heidelberg, Germany. pp. 241-261.
5. Belnap, J. and D. A. Gillette. 1997. Disturbance of biological soil crusts: impacts on potential wind erodibility of sandy desert soils in southeastern Utah. Land Degrad. Develop. 8: 355-362.
6. Belnap, J. and D. A. Gillette. 1998. Vulnerability of desert biological soil crusts to wind erosion: the influences of crust development, soil texture, and disturbance. J. Arid Environ. 39: 133-142.
7. Calvo-Cases, A., A. M. Harvey, J. Paya-Serrano and R. W. Alexander. 1991. Response of badlands surfaces in South East Spain to simulated rainfall. Cuater. Geomorphol. 5:3-14.
8. Cantón, Y., F. Domingo, A. Solé-Benet and J. Puigdefábregas. 2001. Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. J. Hydrol. 252: 65-84.
9. Cowan, D. A. 2000. Microbial genomes - the untapped resource. Trends Biotechnol. 18:14-16.
10. Eldridge, D. J., E. Zaady and M. Shachak. 2000. Infiltration through

- three contrasting biological soil crusts in patterned landscape in the Negev, Israel. *Catena* 40: 323-336.
11. Evans, R. D. and J. R. Johansen. 1999. Microbiotic crusts and ecosystem processes. *Cr. Rev. Plant Sci.* 18: 183-225.
 12. Garcia-Pichel, F., S. L. Johnson, D. Youngkin and J. Belnap. 2003. Small-scale vertical distribution of bacterial biomass and diversity in biological soil crusts from arid lands in the Colorado Plateau. *Microbiol. Ecol.* 46: 312-321.
 13. Gee, G. W., J. W. Bauder., 1986, Particle-size analysis. In A. Klute (ed.) "Methods of soil analysis," Part 1. Physical and Mineralogical methods-Agronomy monograph No. 9. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA., 383-411.
 14. Hu, C. X., Y. D. Liu, D. L. Zhang, Z. B. Huang and B. S. Paulsen. 2002b. Cementing mechanism of algal crusts from desert area. *Chin. Sci. Bull.* 47: 1361-1368.
 15. Hu, C., Y. Liu, L. Song and D. Zhang. 2002a. Effect of desert soil algae on the stabilization of fine sands. *J. Appl. Phycol.* 14: 281-292.
 16. Klute, A., and Dirksen, C., 1986. Particle-size analysis. In Klute, A., Campbell, G. S., Jackson, R. D., Mortland, M. M., and Nielsen, D. R. (ed.) "Methods of soil analysis," Part 1. Physical and Mineralogical methods-Agronomy monograph No. 9. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA., pp. 687-733.
 17. Ladyman, J. A. R. and E. Muldavin. 1996. Terrestrial cryptogams of pinyon-juniper woodlands in the southwestern United States: A review. USDAFS General. Technical. Report RM-GTR-280, Fort Collins.
 18. Lan, S., L. Wu, D. Zhang and C. Hu. 2012b. Successional stages of biological soil crusts and their microstructure variability in Shapotou region (China). *Environ. Earth. Sci.* 65: 77-88.
 19. Laws, J. O., and Parsons, D. A., The relation of rain drop size to intensity, American Geophysical, Union Transactions, Vol. 24, pp. 452-460, 1943.

20. Levy, G. J., J. Levin and I. Shainberg. 1997. Prewetting rate and aging effect on seal formation and interrill soil erosion. *Soil Sci.* 162: 131-139.
21. Liu, Y. D. and S. H. Ley. 1989. Species composition and vertical distribution of blue-green algae in ricefield soil, Hubei, China. *Nova Hedwigia* 48: 55-67.
22. Lukešová, A. 1993. Soil algae in four secondary successional stages on abandoned fields. *Algol. Stud.* 71: 81-102.
23. Maestre, F. T., M. A. Bowker, Y. Cantón, A. P. Castillo-Monroy, J. Cortina, C. Escolar, A. Escudero, R. Lázaro and I. Martínez. 2011. Ecology and functional roles of biological soil crusts in semi-arid ecosystems of Spain. *J. Arid Environ.* 75: 1282-1291.
24. Mager, D. M. and A. D. Thomas. 2011. Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: a review of their role in dryland soil processes. *J. Arid Environ.* 75: 91-97.
25. Mamedov, A. I., G. J. Levy, I. Shainberg and J. Letey. 2001. Wetting rate and soil texture effect on infiltration rate and runoff. *Aus. J. Soil Res.* 36: 1293-1305.
26. Mazor, G., G. J. Kidron, A. Vonshak and A. Abeliovich. 1996. The role of cyanobacterial exopolysaccharides in structuring desert microbial crusts. *FEMS Microbiol. Ecol.* 21: 121-130.
27. McKenna-Neuman, C., C. Maxwell and J. W. Boulton. 1996. Wind transport of sand surfaces crusted with photoautotrophic microorganisms. *Catena* 27: 229-247.
28. McLean, E. O., 1982. Soil pH and lime requirement,” In A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney (eds.) “Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties,” Agronomy monograph No. 9. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA., pp.199-244.
29. Metting, B. 1981. The systematic and ecology of soil algae. *Bot. Rev.* 47: 195-312.
30. Nelson, D. W., and Sommers., L. E., 1996, Total carbon, organic

- carbon, and organic matter. In D. L. Sparks et al. (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods.*, SSSA Book Series No. 5, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, USA.
31. Pointing, S. B. and J. Belnap. 2012. Microbial colonization and controls in dryland systems. *Nat. Rev.* 10: 551-562.
 32. Schoeneberger P.J., Wysocki D.A., Benham E.C. and Broderick W.D. 2012. *Field Book for Describing and Sampling Soils.* Natural Resources Conservation Service: Version 3, USDA, National Soil Survey Center, Lincoln.
 33. Schulten, J. A. 1985. Soil aggregation by cryptogams of a sand prairie. *Am. J. Bot.* 72:1657-1661.
 34. Solé-Benet, A., A. Calvo, A. Cerdà, R. Lázaro, R. Pini and J. Barbero. 1997. Influences of micro-relief patterns and plant cover on runoff related processes in badlands from Tabernas (SE Spain). *Catena* 31: 23-38.
 35. Stal, L. J. 2000. Cyanobacterial mat and stromatolites. In: B. A. Whitton and M. Potts (eds.). *The Ecology of cyanobacteria: their diversity in time and space.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. pp. 88-90.
 36. Tchan, Y. T. and J. N. A. Whitehouse. 1953. Study of soil algae II. The variation of the soil algal population in sandy soils. *Pro. Linn. Soc. New. South Wales* 78: 160-170.
 37. Thomas, A. D. and A. J. Dougill. 2007. Spatial and temporal distribution of cyanobacterial soil crusts in the Kalahari: implications for soil surface properties. *Geomorphology* 85: 17-29.
 38. U.S.D.I. Bureau of Land Management (2001): *BIOLOGICAL SOIL CRUST: ECOLOGY AND MANAGEMENT*, Technical Reference 1730-2
 39. Xie, Z., Y. Liu, C. Hu, L. Chen and D. Li. 2007. Relationships between the biomass of algal crusts in fields and their compressive strength. *Soil Biol. Biochem.* 39:567-572.

40. 小山内信智、田中秀基、桜井亘、下村幸男（2004）：菌類等を利用した侵食対策手法に関する研究、平成 16 年度砂防学会研究発表会、P067、pp.376-377
41. 小島壘・大澤和敏・藤澤久子・富坂峰人・松井宏之：藻菌類の土壤被覆による土壤侵食抑制対策の評価、平成 29 年度農業農村工学会大会講演会要旨集、pp.688~689、2017
42. 日本工営株式会社，侵食防止及び植生の自然侵入促進をはかる土壤藻類資材，国土交通省新技術情報提供システム，OK - 170002 ， 2018.
43. 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。
44. (社)日本道路協会:道路土工 切土工・斜面安定工指針(平成 21 年度版)、平成 21 年 6 月
45. 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。
46. 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。
47. 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。
48. 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。
49. 林敬舒，2014，臺灣中部高侵蝕惡地生物土殼的藻類歧異度與水份逆境之生理效應，臺灣大學生態學與演化生物學研究所學位論文，共 283 頁。
50. 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。
51. 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。
52. 胡春香、劉永定、宋立榮。1999。寧夏沙坡頭地區的旅類植物及其分佈。水生生物學報 23：443-448。

53. 胡春香、劉永定。2003。土壤藻生物量及其在荒漠結皮的影響因子。生態學報 23：284-291。
54. 栗原淳一，田方 智，寺田秀樹，下村幸男，富坂峰人，小林 豊：菌類等による土壤侵食抑制効果，平成 18 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.444～445（2006）
55. 富坂峰人：バイオロジカル・ソイル・クラストを用いた侵食防止対策，農業農村工学会誌 79（1），p.36-37，2011
56. 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。
57. 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。
58. 陳盟文，2006，土胎植生工法於泥岩護坡成效之研究，成功大學土木工程學系學位論文 pp. 1-124。
59. 黃國楨、王韻皓、焦國模(1996)，「植生指標於 SPOT 衛星影像之研究」，台灣林業，22(1)：45-52。
60. 溝渕綾、中野武登、下村幸男、富坂峰人、長谷川啓介（2004）：ラン藻を利用した土壤微粒子流出防止に関する研究：土木学会第 59 回年次学術講演会、7-157、pp.313-314
61. 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。
62. 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。
63. 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。

附錄

附錄一、服務建議書審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	本案為引進新技術工法，建議需要更深入的背景研究，包含：日本的微藻與台灣微藻種類是否相同，減少土壤沖蝕的效力與微藻在各式環境下存活時間(濕度差異大環境)等等。	已增加工項一生物土壤技術應用於減緩土壤沖蝕發展現況蒐集與彙整，針對背景資料進行蒐集分析
二	於現地進行之試驗，應有具體的試驗處理與重複，宜說明試驗設計方法，以利後續之分析、探討。	現地實驗之具體設計，將於後續報告中具體說明，以利後續分析
三	除針對P值評估外，是否K值也有相關，建議進行探討。	工項4增加與P值以外其它影響沖蝕因子(如K值)進行比較

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	BSC技術授權是否有時效性？可否利用此一技術，進行台灣微藻應用於沖蝕防治技術？	BSC技術授權之期限，將於雙方合作協定簽署中註明，本年度引進評估成效後，後續可將台灣微藻納入後續試驗可行性

附錄二、工作執行計畫書審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	BSC發育與水份含量之關連性甚高，試驗時需請探求資材之最佳含水量。	BSC培育施工的水份比例與用水量，補充說明於2.3節(一) BSC技術現地尺度施作工序及配合施工條件內容。
二	藻類進口檢疫內容、方式、通關方式，需予詳細說明。	相關檢疫內容及進口辦理方式補充說明於2.3節(二) BSC技術培養紀錄及施作速度內容。
三	BSC與土壤團粒化之差異，請說明。	BSC與土壤團粒化差異說明，增加補充於第一章緒論內文。
四	土壤藻類如何篩選，有無形成有毒藻類菌類之良好棲地？其與植生種類之共生，有無限制條件？又，藻類之生長條件如何？宜釐清。	土壤藻類主要選擇絲狀藻類(綠藻或藍綠藻)，由於採無性生殖較無突變及衍生為有毒藻菌之疑慮。相關生長環境及限制條件，補充說明於2.3節(一) BSC技術現地尺度施作工序及配合施工條件內容。

項次	審查意見	回覆辦理情形
五	試驗設計之內容宜詳加說明。	試驗設計補充說明如2.3節(三)試驗場址監測與分析相關內容。
六	BSC客土與原地面之附著能力如何？(以crusts之硬殼土壤不易與底土膠結)	BSC一般發育於土壤表面，採噴植時可摻入基材(一般為紙類纖維)沿原坡面灑播，較少採客土工法。
七	原料來源之基本資料應收集完整，以免衍生後遺症。另，該產品是否需經檢疫，亦應釐清。	BSC資材之使用與後續處理，以及檢疫內容及進口方式補充說明於2.3節(二) BSC技術培養紀錄及施作速度內容。
八	BSC工法有可能用於防風定砂，抑止揚塵。	BSC工法在於發展先驅植生，對於促進植生有所助益。但其生長環境，對於高滲透及長期乾燥的沙地有所限制，可列入後期實驗參考。
九	BSC施作之程序、工項、經費評估，請補充。	相關工法及經費比較補列於2.3節(一) BSC技術現地尺度施作工序及配合施工條件內容。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十	實驗與對照組是否增加一般常用的植生方式，比較復原速度及抗蝕能力等。	由於較無類似以BSC施作的工法，目前採臺灣藻類、日本藻類及無施作三組進行比較，後續可考慮移往其他工法比較。
十一	BSC工法，除噴植施工外，可否用UAV灑播或噴植？是否有案例。	由於BSC資材組成相對簡單，雖然日本無採用UAV噴植的方式，後期實驗將討論此工法的可行性。
十二	新BSC工法？目前試驗區均為臺灣南部，成功率多少？	BSC確實為近20年由日本本土研究所發展出來之新工法，目前案例以日本較多，本土案例目前先於台南及屏東兩地研究試驗，先整理日本相關成功率資料，提供參考。

附錄三、期中報告書審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	P.1-10，第6行，文謂在裸露表土進行BSC實驗，有造成土壤流失加劇之情形，是否BSC之效不佳?(有語病)	該文句撰述確實有語病，原意為”增加了土壤沖蝕防護的成效”，已修正用詞為減少了土壤流失的速率與量體。
二	內文重複敘述之文章不少，宜精簡，儘量避免重複敘述。	前言、前期研究成果及本年度BSC現地施工及配合條件中引用的技術文件，確有充富敘述部分，已重新檢視，避免過多重複敘述。
三	P.2-2，倒數第6行，”透過熟悉台灣土壤微藻類專家協助培養”，宜說明何(科學論文均屬公開，若有秘密協商，或不可公開技術，亦示明何人?)	該文為前期工作計畫書內容，用字確屬不適，已修改為林敬舒博士。
四	P.2-8何以土壤硬度大於30mm不適合BSC之施設?	該規範，引用至BSC工法登載於國土交通省的新技術活用系統 (NETIS)內容，已註明參考依據。
五	p.2-7~P.2-18，此部分內容是否屬本計畫執行之初步結果?其內容似為日本之報告摘錄?(P.2-19~P.2-36亦是)	BSC技術現地工序及施工條件，主要依據日方提供多年的實際施工技術要領閱讀及翻譯所得。並由本地實驗進行印證與檢討，引用文獻來源再清楚標示於文前。

項次	審查意見	回覆辦理情形
六	p.2-19 文內敘及火炎山各樣區，其分佈何在?宜敘明。大肚山、大坑等亦是。	該等討論臺灣藻類的樣區係引用自林敬舒(2014)研究論文。
七	於屏科大試驗區之試驗設計如何?宜說明，以利瞭解試驗方法之合理性與客觀性。(本試驗3個試區如何選定? BSC、MSC 之劑量如何?)	屏科大試驗區之試驗設計已增加補充說明如(三) BSC試驗場址長期於自然降雨條件與對照組沖蝕量-逕流量監測與分析。
八	原謂在屏科大試驗地進行，何以又在台南牛埔水土保教學園區進行試驗?該試驗地之試驗方法亦應詳加說明。	屏科大試驗場進行的是驗證BSC沖蝕效果的計量實驗，牛埔泥岩區進行的是泥岩區的BSC培養先驅試驗，已補充相關說明。
九	仍請注意試區試驗之方法與步驟，並掌握觀測數據之正確性，以利進行後續之分析。	期末階段藉由NDVI及沖蝕量觀測等定量觀測與分析，增加量化關係的討論。
十	p2-53 提及牛埔現地實驗場於2021/3 至 2021/7 主要歷經二場豪雨事件，建議補上其累積雨量及時雨量之組體圖。	依據建議補繪觀測期間的雨量分布圖，以及主要降雨雨場資訊。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十一	承上，牛埔現地實驗場至 7 月中之狀況，其復育成果似不明顯，後續規劃之改善方式為何？	泥岩地區的反覆雨潤及乾燥，導致層狀剝落及層狀的沖蝕。後續擬增加培養期的覆蓋，以及網狀支撐再評估其效果。
十二	依圖 2-5 之說明，坡度於 1:0.5 以上不適合施作 BSC，牛埔現地實驗場之坡度為何？圖 2-26~2-35 均為局部區照片，請補附該實驗之全景照、沖蝕針設置位置及實驗區及對照區等的實際面積坡度等資料。	牛埔地區坡度隨著不同區位，各有不同，目前設置的區位接近 1:0.4，由於微藻生長均為細部變化，整個實驗區的外觀有縮蝕攝影機進行連續記錄，相關設置位置等如圖 2-26~2-30。
十三	坡度對生物土壤(Biological soil crusts, BSC)工法是否有影響？屏科大試驗區坡度為何？設為 9%，是否有不同坡度之比較？	坡度對 BSC 的發育環境及承受的重力與沖蝕力都有明顯影響，屏科大之培育為初期沖蝕成效驗證實驗，後續可針對中坡、陡坡進行不同試驗。
十四	撒播使用染色劑之用意為何？	部分施作案例，加入染色劑是為了驗證與追蹤植生的培養及發育情形，多為示範性的施作案例。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十五	BSC 資材從申請核准輸入要 3.5 個月，輸入辦理至送抵訂購單位要 2.5 個月，合計 6 個月，未來是否每次申購均需 6 個月時程？或未來申購可縮短時程？	第一次BSC的資材輸入後，由於有前例可循，可縮短檢疫及輸入的作業；此外，國內也有相關資材的生產，後續也有採用國內生產資材的可能。
十六	報告書封面的計畫編號請修正為SWCB-110-032	確實為前期報告編號未修正，已依正式編號修正封面。
十七	p.2-8，是否有量化的適生長之溫度及濕度範圍數據；在 P.1-11，第四點所指可以施作於氣候嚴酷的條件是什麼？嚴酷氣候是否影響生長。	在技術手冊及相關案例中僅有明確載明不適合施作的環境條件。P1-11指的是北海道酷寒及沙漠地區酷熱的案例。主要的影響是在藻群能否成功培養及發展。
十八	p.2-37，以 USLE 公式之 C 值評估 BSC 對於土壤沖蝕之抑制效果，另於 P.2-5 工作執行步驟中以 P 值進行評估，BSC 在 USLE 公式中是以哪個因子 (C、P) 進行評估？	BSC於降雨實驗及現地沖蝕抑制驗證效果，討論的因子所不同，前期是以降雨的型態探討沖蝕變化；本期是討論與對照組C值得的改變，已補充說明，避免混淆。
十九	建議補充牛埔泥岩園區實驗區之基本資料，以供施工參考，如坡度、土壤硬度。	已蒐集牛埔泥岩園區，以及鄰近古亭坑泥岩相關土壤特性，以及地形特性等資料，提供參考。

項次	審查意見	回覆辦理情形
二十	p.1-11，參考文獻未見”道路土木工程、災修工程及坡面穩定工程方針”。	”道路土木工程、災修工程及坡面穩定工程方針”參考文獻缺漏，已補充。
二十一	文字錯誤，請重新檢視修正。 (1)P.1-1，第4行，植被應為植被，請修正。 (2)p.1-7，第二段第6行，“將之添加至土以上”，文意不明。 (3)P.2-1，倒數第9行，整”課”被破壞的植被環境，文字有誤。 (4)p.2-4，2-2之圖名有誤。 (5)p.2-15，第二段第3行，作為”澳果”不佳地區，文字有誤。 (6)P.2-42，圖2-19之圖名錯字，判”視”。 (7)P.2-46，年平均相對”適”度。	確為報告擅打的疏漏，已及錯誤，已依意見修正，謝謝指正。

附錄四、期末報告書審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	引用日本技術若能成功，期待未來能有效的實務應用之。	謝謝指導，持續與跨國合作團隊檢討與精進，尋求更好之適用性，與解決在地的需求問題。
二	建議未來可利用BSC搭配草種噴種，以瞭解其對草種之影響及抗沖蝕之成效。	謝謝委員建議，本次引進BSC技術確實希望改良與調整為本土產品(避免外來種問題)，本年度的基礎實驗提供了相當多所需知識，後續列入對照組進行試驗。
三	日本藻類運用於國內成效不佳，其原因係品種或氣候？	主要原因在於泥岩的生化環境較為極端，日方過去也較未考慮相似環境。品種部份亦列入國內品種進行測試，後續針對瓶頸點作克服。
四	BSC初期有用帆布覆蓋以利生長，如何應用於人工無法抵達之裸露邊坡？	由於樣品有現，且培育期間可能遭逢颱風豪雨事件，故第一次培育的前3週先以帆布覆蓋增加培植成功率。後續會改良及以實際工序，再實際觀察追蹤成效變化，進行建議做法。

項次	審查意見	回覆辦理情形
五	建議計畫後續將BSC做不同土壤區域之現地實驗。	本年度先以設施完善及養護方便的屏科大進行測試，後續將在選擇其他樣區進行更多元的條件測試。
六	建議計畫後續分析適用台灣之藻類以利後續與MSC做推廣，以合適臺灣本土的藻類取代之。	本年度已尋求國內業者合作，提供本土藻類及資材同步進行測試，結果顯示成效並不差。但實際施作及養護，還有賴日方開發研究者的共同討論及推廣試用性，以符合更廣大的市場需求。