計畫編號：**SWCB-111-049**

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

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：111 年 1 月 18 日至 111 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 111 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

表次 III

圖次 V

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 ..... -9

第四節 前期研究成果 1-12

第二章 工作執行方法與結果 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 執行結果 2-17

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 計畫成果及後續建議 4-1

第一節 計畫成果 4-1

第二節 後續建議 4-4

參考文獻 參-1

附錄 A-1

附錄一、服務建議書審查意見暨回覆辦理情形 A-1

附錄二、工作計畫書審查意見暨回覆辦理情形 A-3

附錄三、期中報告書審查意見暨回覆辦理情形 A-7

附錄四、期末報告書審查意見暨回覆辦理情形 A-13

表次

表 2-1 試驗區規格..... 2-3
表 2-2 土壤結構參數..... 2-9
表 2-3 土壤滲透性參數..... 2-9
表 2-3 標準的灑播資材組成(肥料．基材等)表..... 2-20
表 2-4 BSC-1 資材取得及進口檢疫辦理過程..... 2-33
表 2-5 BSC-1 資材取得及進口檢疫辦理過程(續)..... 2-34
表 2-6 土壤流失量監測與分析之預訂進度表..... 2-36
表 2-7 標準沖蝕試驗區之土壤基本性質..... 2-38
表 2-8 肥料及試驗資材之施用比例表..... 2-41
表 2-9 肥料及試驗資材之施用總量表..... 2-42
表 2-10 2022 年 4 月至 10 月之有效雨場劃分 (1)..... 2-45
表 2-11 2022 年 4/至 10/之有效雨場劃分 (2)..... 2-46
表 2-12 2022 年 4/至 10/之有效雨場劃分 (3)..... 2-47
表 2-13 2022 年 4/至 10/之有效雨場劃分 (4)..... 2-48
表 2-14 現地沖蝕試驗累積雨量與土壤流失量統計表..... 2-49
表 2-15 現地沖蝕試驗累積雨量與土壤流失量統計表..... 2-52
表 2-16 試驗第 0 天之 MNDVI 百分比與敷蓋面積統計表..... 2-61
表 2-17 試驗第 13 天之 MNDVI 百分比與敷蓋面積統計表..... 2-61
表 2-18 試驗第 20 天之 MNDVI 百分比與敷蓋面積統計表..... 2-61
表 2-19 試驗第 27 天之 MNDVI 百分比與敷蓋面積統計表..... 2-62
表 2-20 試驗第 41 天之 MNDVI 百分比與敷蓋面積統計表..... 2-62
表 2-21 試驗第 55 天之 MNDVI 百分比與敷蓋面積統計表..... 2-62
表 2-22 試驗第 62 天之 MNDVI 百分比與敷蓋面積統計表..... 2-63
表 2-23 試驗第 69 天之 MNDVI 百分比與敷蓋面積統計表..... 2-63

表 2-24 試驗第 76 天之 MNDVI 百分比與敷蓋面積統計表 2-63
表 2-25 試驗第 90 天之 MNDVI 百分比與敷蓋面積統計表 2-64
表 2-26 試驗第 111 天之 MNDVI 百分比與敷蓋面積統計表 2-64
表 2-27 試驗第 125 天之 MNDVI 百分比與敷蓋面積統計表 2-64
表 2-28 試驗第 132 天之 MNDVI 百分比與敷蓋面積統計表 2-65
表 2-29 試驗第 146 天之 MNDVI 百分比與敷蓋面積統計表 2-65
表 2-30 試驗第 167 天之 MNDVI 百分比與敷蓋面積統計表 2-65
表 2-31 試驗第 181 天之 MNDVI 百分比與敷蓋面積統計表 2-66
表 2-32 不同處理之土壤總體密度於上中下坡之變化表 2-69
表 2-33 不同處理之土壤有機碳於上中下坡之變化表 2-71
表 2-34 不同處理之土壤導水度於試驗初中後期之變化表 2-72
表 2-35 不同處理之導水度於試驗前中後期之變化表 2-73
表 2-36 不同處理之土壤 PH 於試驗初中後期之變化表 2-74
表 2-37 不同處理之團粒穩定度於試驗初中後期之變化表 2-76
表 2-38 不同處理之土壤硬度於試驗初中後期之變化表 2-78
表 2-39 園區周邊統計範圍端點座標 2-81
表 2-40 現地試驗邊坡選定與執行日程概況 2-88
表 2-41 惡地區土壤肥力分析 2-91
表 3-1 計畫進度及執行項目規劃表 3-2
表 3-2 計畫交付項目及執行進度表 3-3

圖次

圖 1-1 生物土壤(BSC)內生物相的組成示意圖 1-1

圖 1-2 BSC 技術方法的施作概念與發展階段 1-2

圖 1-3 生物土壤的主要組成-微藻顯微照片 (日本工營提供)..... 1-4

圖 1-4 BSC 可以在最初期形成先驅植物提供植生基礎 1-4

圖 1-5 沖繩縣 BSC 施作案例地點 (富坂峰人，2019) 1-9

圖 1-6 施作地點後續崩塌效果比較 (富坂峰人，2019)..... 1-9

圖 2-1 屏科大水保系緩坡試驗區 2-3

圖 2-2 屏東科大緩坡試驗區之現地流失量收集裝置 2-4

圖 2-4 計畫執行流程圖 2-16

圖 2-5 BSC 機械灑播施工示意圖 (日健總本社，2020)..... 2-19

圖 2-6 不使用基材的灑播方式案例 (日健總本社，2020)..... 2-22

圖 2-7 坡面綠化及 BSC 工法選擇規劃流程圖 2-23

圖 2-8 以手工撒播作業案例 (日健總本社，2020)..... 2-25

圖 2-9 既有植生綠化工效果的改善跟補修案例 2-26

圖 2-10 BSC 工法與其他工法組合施工的案例..... 2-27

圖 2-11 實驗室以絲狀藍綠菌進行 BSC 的建立圖..... 2-31

圖 2-12 施工後 BSC 的形成狀態 2-32

圖 2-13 試區除草..... 2-39

圖 2-14 上下行耕犁..... 2-39

圖 2-15 篩除表土雜草及礫石 2-39

圖 2-16 整平坡面..... 2-39

圖 2-17 試區翻整後..... 2-39

圖 2-18 鋪設帆布..... 2-39

圖 2-19 清理收集槽..... 2-40

圖 2-20 秤取需要的肥料及試驗資材 2-42
圖 2-21 均勻撒播於試驗地 2-42
圖 2-22 單場降雨之累積降雨量與土壤流失量之關係圖 2-50
圖 2-23 各試驗區於不同試驗期間之高程變化圖(1)..... 2-53
圖 2-24 各試驗區於不同試驗期間之高程變化圖(2)..... 2-54
圖 2-25 各試驗區於不同試驗期間之高程變化圖(3)..... 2-55
圖 2-26 各試驗區於不同試驗期間之高程變化圖(4)..... 2-56
圖 2-27 各試驗區於不同試驗期間之 MNDVI 分析(1) 2-57
圖 2-28 各試驗區於不同試驗期間之 MNDVI 分析(2) 2-58
圖 2-29 各試驗區於不同試驗期間之 MNDVI 分析(3) 2-59
圖 2-30 各試驗區於不同試驗期間之 MNDVI 分析(4) 2-60
圖 2-31 不同種植天數下之土壤含水量與降雨量變化圖 2-67
圖 2-32 不同種植天數下之土壤溫度與降雨量變化圖 2-68
圖 2-33 不同處理之土壤總體密度於試驗初中後期之變化圖 2-69
圖 2-34 不同處理之土壤有機碳於試驗初中後期之變化圖 2-71
圖 2-35 不同處理之土壤導水度於試驗初中後期之變化圖 2-72
圖 2-36 不同處理之土壤 pH 於試驗初中後期之變化圖..... 2-74
圖 2-37 不同處理之團粒穩定度於試驗初中後期之變化圖..... 2-76
圖 2-38 不同處理之土壤硬度於試驗初中後期之變化圖..... 2-77
圖 2-39 現地試驗工區周圍基本資料 2-82
圖 2-40 崎頂雨量站觀測結果 (202201-2022010) 2-84
圖 2-41 崎頂雨量站地理位置 2-85
圖 2-42 崎頂雨量站歷年觀測成果 (1990-2022) 2-85
圖 2-43 崎頂雨量站歷年平均雨量 2-86
圖 2-44 牛埔泥岩水土保持教學園區全景 2-86

圖 2-45 教學園區內主要泥岩裸露區概況..... 2-87
圖 2-46 現地試驗之實驗與對照組分布示意圖..... 2-88
圖 2-47 現地試驗開始坡面初始概況(2021/3/16)..... 2-89
圖 2-48 現地試驗結束坡面沖蝕情形(2022/10/17)..... 2-89
圖 2-49 本年度現地試驗坡面初始概況(2022/2/11)..... 2-89
圖 2-50 本年度現地試驗坡面進行狀況(2022/3/14)..... 2-90
圖 2-51 本年度現地試驗坡面進行狀況(2022/7/11)..... 2-90
圖 2-52 本年度現地試驗坡面進行狀況(2022/8/15)..... 2-90
圖 2-53 本年度現地試驗坡面進行狀況(2022/10/17)..... 2-90
圖 2-54 現地試驗坡面細部特徵(2022/2/11)..... 2-92
圖 2-55 現地試驗坡面細部特徵(2022/3/14)..... 2-92
圖 2-56 現地試驗坡面細部特徵(2022/4/8)..... 2-92
圖 2-57 現地試驗坡面細部特徵(2022/4/8)..... 2-93
圖 2-58 現地試驗坡面藻類發育情形(2022/8/15)..... 2-93
圖 2-59 現地試驗坡面藻類發育情形(2022/9/15)..... 2-93
圖 2-60 現地試驗坡面藻類發育情形(2022/9/15)..... 2-94
圖 2-61 現地試驗坡面植生遷入情形(2022/10/17)..... 2-94
圖 2-62 研究團隊針對龍崎泥岩試驗結果討論會議進行情形..... 2-96
圖 2-63 研究團隊針對龍崎泥岩試驗結果檢討與調整方案..... 2-96

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 Fritsche 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。

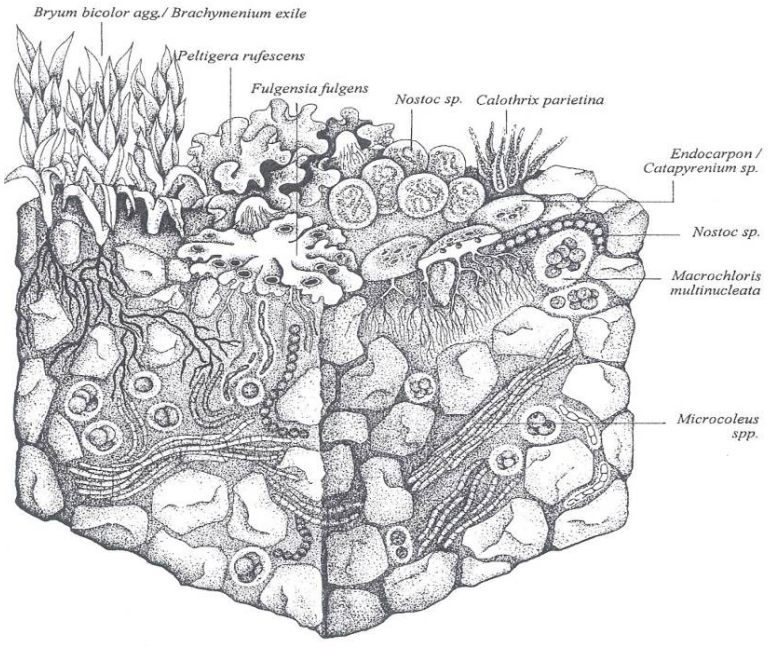


圖 1-1 生物土壤(BSC)內生物相的組成示意圖(Belnap et al., 2001)

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。

透過 BSC 工法的使用，加速表層土壤的安定，做為後續植物生長的基礎。也能作為坡地及林地因為崩塌或長久荒廢導致坡面裸露後，藉由生木土壤的導入，促進周邊植生的復育，逐漸恢復發展成為穩定的山林。或也可以搭配 BSC 技術的導入，針對過去植生綠化成效較差，進行植生修補的替代方法。

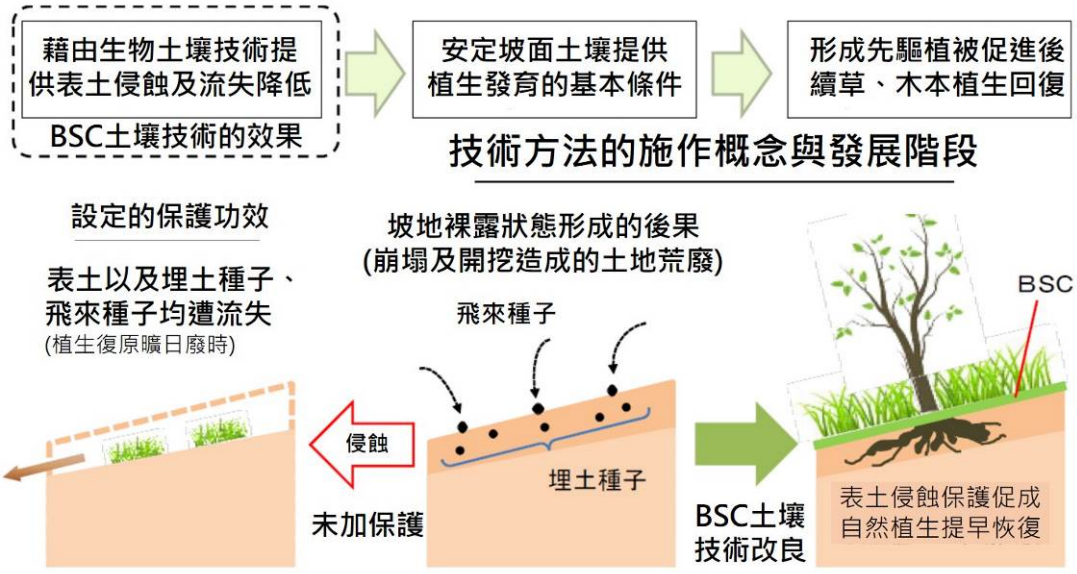


圖 1-2　BSC 技術方法的施作概念與發展階段

(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 主要由系狀菌類、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)

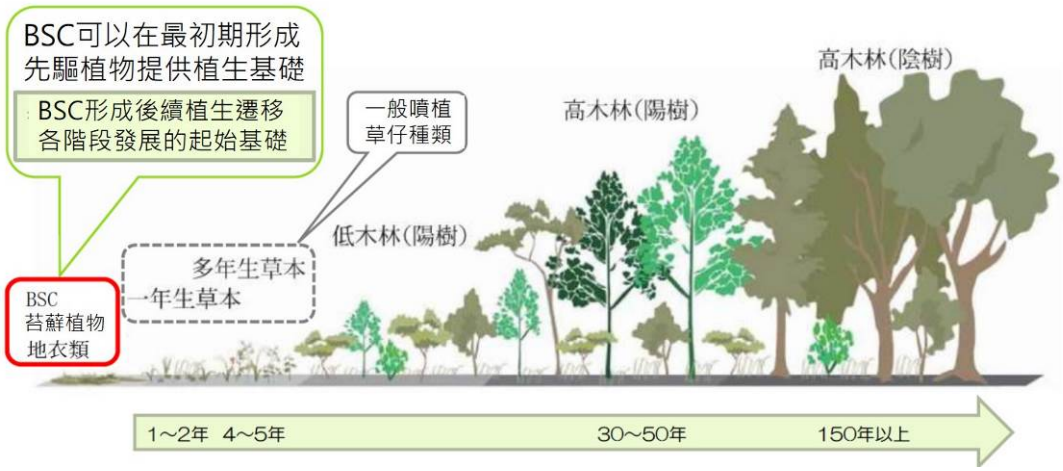


圖 1-4 BSC 可以在最初期形成先驅植物提供植生基礎

(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，其特性為坋砂含量略比粘土多，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頡抗作用，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)。

泥岩為水土保持問題土質之一，台灣西南部泥岩地區一年長達 5～6 個月的旱季，為植物生長之主要逆境。綜合前述多位學者對泥岩地區植生調查及建議，指出優勢植物調查係反映該立地條件下之植群分布，亦是反映植群不同之演替階段或時期，其間包含自然及人為等諸多因子參雜其間，各地所篩選之植物相或型，往往是當地自然或人為干擾下之產物，若用其擔任演替初期之復育植物並不恰當。對於泥岩裸露邊坡之植生復育而言，營造有利於植物自然入侵之環境比人工導入植物來得有效。由於植生演替初期多由草本植物帶頭前進，泥岩地區復育植物之篩選，重點在於耐鹽、耐旱、採種方便，早期能以人工大量處理之草本植物為優先，只要初期將立地條件營造良好，隨著立地環境的改便，不同演替階段之植群即可陸續自然入侵生長，呈安定之植生狀態。本計畫引進日本 BSC 技術，嘗試進行初期培養試驗，評估 BSC 技術應用於植生困難的泥岩區，是否具有後續推廣潛力。

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。

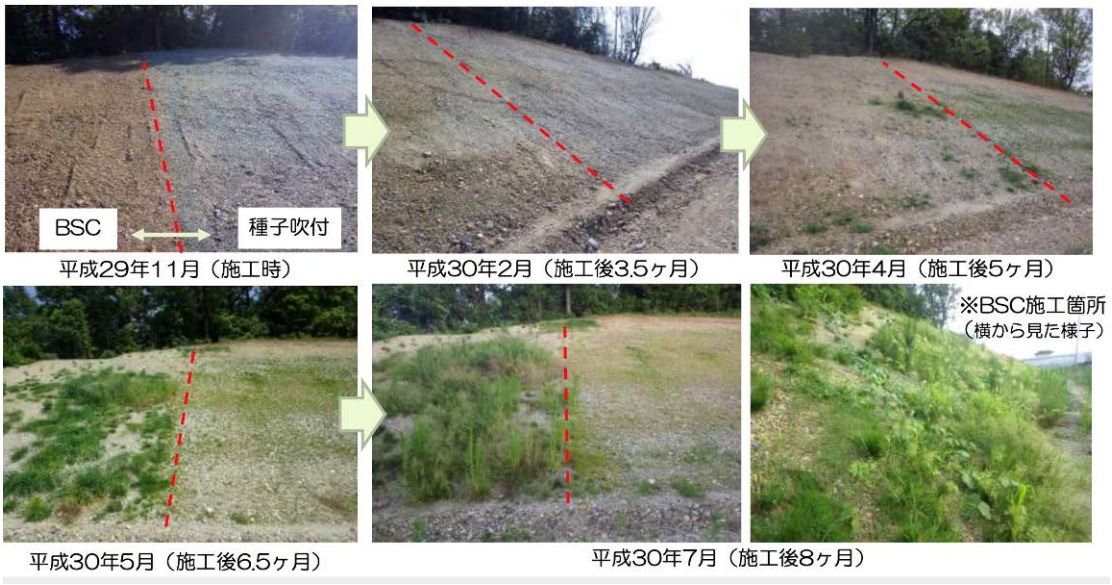


圖 1-5 沖繩縣 BSC 施作案例地點 (富坂峰人，2019)



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）。

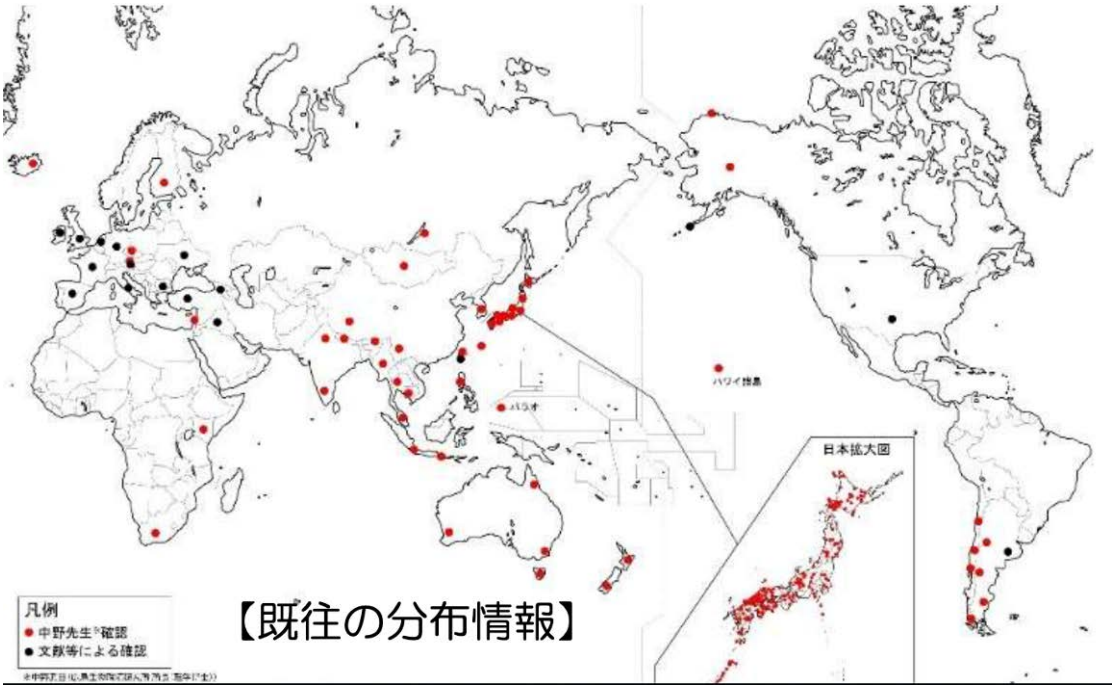


圖 1-7 可資利用的 BSC 土壤藻類全球分布調查初步結果

(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 ㎜(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

第四節 前期研究成果

前期研究成果，包含了跨國技術合作商談、技術資料的引進、BSC的培養及現地實驗等。以下依序說明：

與日本工營洽談 BSC 技術授權並將該技術引進至臺灣 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合作備忘錄項目與細節，並於 2020 年 4 月 8 日加入印尼日惹大學及馬來西亞科技大學，成為跨越日本、臺灣、印尼及馬來西亞等 4 國 5 個代表單位的跨國合作計畫。BSC 技術合作備忘錄於 2020 年 6 月 4 日完成擬訂作業，並已於 2020 年 9 月 20 日完成所有單位的審視及簽署，正式啟動兩年期 (2020/10/1~2022/9/30) 四國五個代表單位的跨國合作計畫。

已取得日本工營提供足量 BSC 工業生產製品，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。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。

針對日方提供的微藻樣品，透過熟悉臺灣土壤微藻類的專家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、供水及舖襯等方式，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。並藉由熟悉臺灣土

壤微藻類的林敬舒博士，協助培養並觀察藻類成長狀態，並透過顯微鏡觀察生物土壤的發展過程，並清楚鑑別出藻種與發展環境及型態。

選擇適當場址進行BSC技術現地試驗2021年已完成屏東科技大學BSC技術現地試驗試區(緩坡試區)，進行現場勘查與配置。現地實驗規劃試驗面積約360平方公尺，依據面積估算約需4公斤的BSC材料及配合施工資材。本試驗於雨季(6~10月)期間進行，試驗前一個月於試區表土進行藻類培養，期間中均覆蓋帆布，避免降雨影響，土壤含水量較穩定(27%%~33%)；第二個月後開始進行沖蝕試驗，結果呈現，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(具有較佳溫度緩衝效果)。本試驗於藻類培養後第27天開始進行沖蝕試驗，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；第41天監測值下，施用BSC及MSC處理土壤沖蝕量較高於對照組CK，推測可能當下該二處理前期土壤含水量顯著高於對照組CK，因而致使施用BSC及MSC之處理土壤流失量提高。

BSC泥岩區培養前驅試驗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，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。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。自2021年3月16日開始執行現地試驗至10月止，試驗區邊坡有顯著的泥岩侵蝕現象，若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。

第二章 工作執行方法與結果

第一節　工作執行方法

本年度計畫已取得日本工營提供足量 BSC 工業生產製品，並已分別於 110 年 3 月建立 BSC 泥岩區培養前驅試驗，已獲得 8 個月的觀測成果；另一方面，於屏科大的緩坡試驗場現地實驗，已完成連續兩年度雨季的現場沖蝕觀測與量測分析，希望能藉由持續觀測獲得豐富資料，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主要由系狀菌類、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，整課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。110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專家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、供水及舖襯等方式，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

本計畫選擇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) 作為後續生物土壤 (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 所示)，沖蝕試驗區及收集槽規格如表 2-1 所示。



圖 2-1 屏科大水保系緩坡試驗區

表 2-1 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



圖 2-2 屏東科大緩坡試驗區之現地流失量收集裝置

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℃，乾濕季明顯屬熱帶氣候。

本試驗目的是為了瞭解施用 BSC 後的土壤在降雨下是否能降低土壤流失，因此當每場有效降雨場結束後需收集泥砂，並移至 105 ℃烘箱中烘乾後秤重，推算每場有效降雨場所產生土壤流失量，並以不同樣區之成果(實施 BSC 與 MSC 技術)與對照組(裸露地)進行比較。

(一) 現地沖蝕試驗項目

本試驗於 3 月時整理試驗區，需先除去試驗樣區表土之雜草後，進行上下行耕犁再整平試驗區坡面，並清理試驗區之收集槽；4 月時開始培養微藻，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，培養微藻的一個月期間需鋪設帆布，且需每週施灑肥料 1 次，並每隔 3~4 天灑水至表層土壤達飽和；而 5 月~10 月進行為期 6 個月的現地沖蝕試驗，且肥料調整為每個月施灑 1 次 (若發生強降雨或颱風，需於事件後適度追肥)，而試驗期間收集及測定以下項目:

- 收集試驗期間 (5/1~10/31)之降雨資料；
- 收集各試區之每場有效降雨場下泥砂量；
- 每週測定試區上、中及下區之土壤含水量及溫度；
- 每半個月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；
- 試驗前、初期、中期及後期 (4/1、5/1、8/1 及 11/1)時於試區上、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、有機質、導水度、質地、pH 及團粒穩定度。

由上述所蒐集之資料以供以下分析使用:

1. 劃分有效雨場

利用屏東科技大學氣象站 (A0R08)收集 1 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：

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

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。

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

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)。

2. 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)。

I. 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)，並置於加熱器上以 70-80 ℃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 ($Na_2S_2O_4$)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，土壤溶液內的坋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、坋粒及黏粒含量，並參考美國農 (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。

II. 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。

III. 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。

1. 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。

2. 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)。

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

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

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

M=坋粒與極細砂 (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。

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

3. 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 ℃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」。

$$C=\frac{ER_{crop}}{ER_{control}} \qquad \textbf{(2-4)}$$

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。

(二) 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半個月操作 DJI 光譜無人機 P4 Multispectral (P4M) (如圖 2-3 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:

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

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

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；

$NDVI_{min}$：該影像所有像元 NDVI 之最小值；

$NDVI_{max}$：該影像所有像元 NDVI 之最大值。



圖 2-3 DJI 光譜無人機 P4 Multispectral

(三) 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 ± 5℃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) 土壤質地 (Soil texture analysis): 吸管法 (Gee and Bauder, 1986)

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

(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作的檢討。

第二節　工作執行步驟

計畫執行流程如圖2-4，依序完成室內研究及室外試驗，

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。

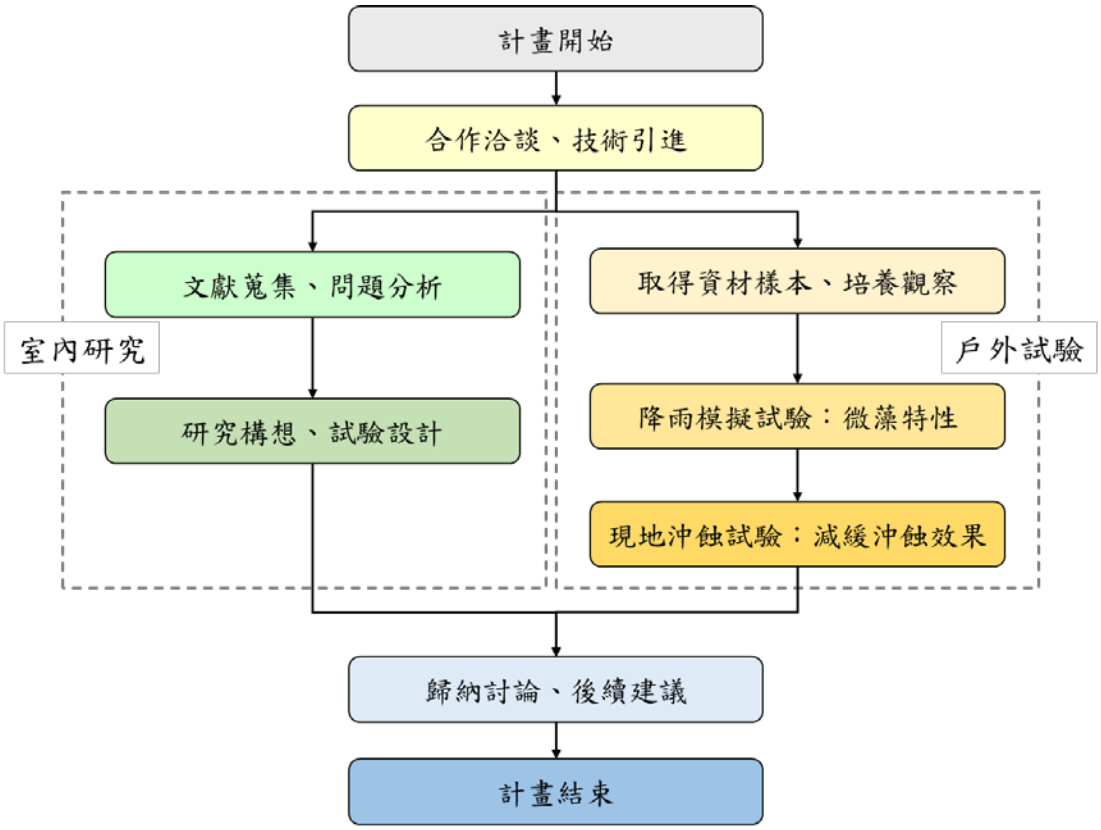

計畫開始
合作洽談、技術引進
室內研究
文獻蒐集、問題分析
研究構想、試驗設計
戶外試驗
取得資材樣本、培養觀察
降雨模擬試驗：微藻特性
現地沖蝕試驗：減緩沖蝕效果
歸納討論、後續建議
計畫結束

圖 2-4 計畫執行流程圖

第三節　執行結果

因 2020 年度日本 COVID-19 嚴重疫情關係，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，2021~2022 年度計畫已取得日本工營提供足量 BSC 工業生產製品，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

(一) 適用的場所

一般進行坡面的綠化，都要進行坡面的整坡以及衍生的坡面(土岩)挖除及殘土處理等費用(如植生毯...等鋪面工法)。但是 BSC-1 相比之下，施工較為簡單，不需要進行坡面的整坡，或坡面整坡施工困難的地點均適用，只要針對表面進行灑播或噴植即可。對於表層崩塌的舊跡地、過去施作工程後的荒廢地或林地砍罰或作物殘株的地點，或者其他因為侵蝕嚴重導致坡面凹凸不一致的坡面均可適用。

但是 BSC-1 是屬於生物資材，其有適用的環境條件(乾濕度、土壤性質等)，還有其他局部的原因會影響 BSC 的形成狀況與發展速度。例如施工後發生豪雨或積雪-融雪等狀況導致肥料成分流失，就必須適當的追肥。坡面容易乾燥，溼度不容易維持的填土坡面，就必須適當的澆水，維持初期生長所需，施工後初期的

保育作業影響後續植生發展成效甚鉅。

除此之外，BSC-1 噴灑必須能夠與表土有強的結合。假如坡面容易崩塌或土壤容易裂解，BSC-1 的灑播及後續植生的促進，就會遭受很大的困難。

(二) BSC 的施工條件

1.自然條件

- 對於 BSC 附著於土壤不利的地點應該儘量避免或藉由其他輔助措施克服，如噴植或灑播後會造成資材流失的強風、強降雨、降雪等，應該於施工時避免。
- 為了避免土壤藻類增殖受到影響，應該避免在乾旱時施工

2.現場條件

- 作業空間：1 平方公尺(噴植作業操作所需)
- 噴植機材(攪拌機及加壓馬達等操作器具)搬運的車輛(4 噸以上)停車空間：4 公尺×8 公尺。

3. 施工條件

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 ㎜（道路土木工程、災修工程及坡面穩定工程方針）。

4. 效果較好的地點

- 黏性土較多、溫度與濕度較適合與不容易乾燥的坡面
- 因為有生態顧慮，要避免使用外來種造成物種干擾的地點(如國家公園及重要生態保存區)

5. 比較不適用的環境

- 表面容易乾燥不易維持濕度的環境(缺乏基質，例如屬於砂礫質，孔隙多的土壤，過於乾燥導致發育不良的土壤-土壤硬度小於 10 ㎜)
- 土壤容易裂解風化，表土容易崩塌的坡面

(三) 標準的施工工法

此處提供相關的施工案例。提供參考

1. 標準方法(機械灑播)



圖 2-5 BSC 機械灑播施工示意圖 (日健總本社，2020)

BSC 雖然對於坡面侵蝕有其效果，但對於坡面滲水或風化裂解產生剝離及剝落的坡面則相對穩定性有限。針對類似的坡面，與其他綠化植生的工法相同，必須透過其他的工法，解決除了坡面侵蝕以外的坡面安定或穩定工法。另外，膠結度低、土壤硬度小於 10 ㎜、缺乏表土的岩盤表面或是過於乾燥的沙漠化土壤等，要進行植生綠化之前，要再搭配其他的配合工法，才會得到成效。標準的灑播資材構成如下表：

表 2-3 標準的灑播資材組成(肥料．基材等)表 (日健總本社，2020)

項目		單位	數量	備註
①BSC-1 自然侵入促進用生態的侵蝕防止劑		g/ m^2	14	●藻類資材 4g+副資材(藻類生物促進用)10g
②肥料(選用)	普通化肥(10-10-10)	g/ m^2	100	●噴植時落下形成的形成的細粒，可形成緩效性 ●苦土(Mg)混入的肥料(10-10-10-1~5)效果較佳(草地使用) ●N-P-K 配合率不同的肥料，以 N10 g/ m^2 為基準，進行調配與施做
	普通化肥(8-8-8)	g/ m^2	125	
③黏著劑(機器噴植用)		g/ m^2	1	●提高噴植資材的附著力，可採用一般植生噴植用的資材 ●但是若有摻入侵蝕防止劑，會產生固結的效果，反而會對後期藻類發育產生阻礙。
④基材-纖維(機器噴植用)		g/ m^2	60	●約為一般種子噴植一半的量即可，若以手工撒播時，則以容易施工的程度摻入即可。
⑤灑播用水		ℓ/ m^2	參照右欄	●機械噴植：2 ℓ/ m^2(標準) ●手工撒播：0.1~1.0 ℓ/ m^2，依施工條件做調整
⑥其他(配合現地所需選擇)		-	-	●著色劑(色粉)：無環境毒性，不會影響藻類生長 ●追加肥料(Mg 等) ：依據上述使用用的肥料進行追加 ●纖維網等：表土固結力較差或意於剝落時，追加施作穩定生長坡面

①設計時

- 坡面崩塌或土岩體有明顯風化裂解導致崩壞的影響因素，應事先確認。
- 地下水流徑或湧出的地點，必須配合排水工程的施作。
- 噴植機械及材料擺放、作業員作業的空間等，評估噴植作業是否能順利進行。或是否搭配輔助工程(鷹架、安全梯、攔截網等)，確認施作安全。
- 噴植後，鄰近的植物種子是否能飄落及發育。

- 施工後，若會有持續乾旱及氣溫持續超過 30 度的時期或低於氣溫 10 度超過兩個月以上，則應該安排迴避及重新安排施工日期。

②施工時

- 資材的放置與保存,應避免濕度過高或浸水產生腐敗。搬運時，也應避免在高溫 30 度以上或濕度過高的環境擺放過久，導致活性降低。
- 之前作業如果有殘留外來種種子等，應該將機具(混合槽、加壓馬達及水管...等)徹底洗淨，避免混入。
- 現場施工基材，如纖維織布等，如果與土壤相近將導致施工狀況確認困難，建議使用無毒的著色劑進行混染，方便後續施工追蹤。
- 施工中或施工後，應儘量避免過大的雨勢沖刷。如果降雨後遭遇大雨，可能導致肥料流失，則在 2~3 週若藻類沒有明顯增殖時，進行追肥，恢復藻類發育與活性。
- 噴植時，噴植距離及噴植角度及壓力等，應配合坡面狀況進行調整，以獲得較佳噴植及附著效果。
- 地表凹凸起伏，能夠提供飛來種子較佳的附著，對於原地形或整地後若能維持適當起伏，也能維持自然植生恢復較佳的效果。
- 灑播後若氣溫有超過 30 度，坡面乾燥維持超過 5 日以上，應適當灑水以維持藻類發育的適當濕度。

③工程完成的成效檢查

- 工程施作完畢後，應進行植被率的相關調查以外，另應參照種子噴植的項目，補充相關內容。
- 可參考「植生復育促進工法」的成效判定方法進行評估。

④維護管理

- 後續檢查，如果有外來種等不適當的植生發展，應適當的進行拔除與清理。
- 為了促進坡面適宜的植生復育，於坡面上若有不利坡面安定或後續自然植生發展的危木或孤石，建議可以也可進行適當處置。

2. 不使用基材的灑播方式(機械灑播)

參考前項所提標準的灑播方法，再加入基材(紙纖維)及染色劑等混入，進行噴植的方法。但是對於有自然景觀保全顧慮、避免有人為施工痕跡介入、影響既有植被景觀等問題的地點，可能需避免使用基材施作。

遇到有這樣顧慮問題的地點，應避免基材(紙纖維)及染色劑等混入(僅使用黏著劑)。但不使用基材的狀況下，灑播的資材比較容易流失，也比較不容易分散平均的灑播於坡面，對於後續維護管理也會相對較於困難。除此之外，灑播後藻類活性的恢復或者是後續增殖的發展也會較於困難，可於灑播完 3 週~1 個月左右，進行追肥及灑水，補修資材流失影響成效。



圖 2-6 不使用基材的灑播方式案例 (日健總本社，2020)

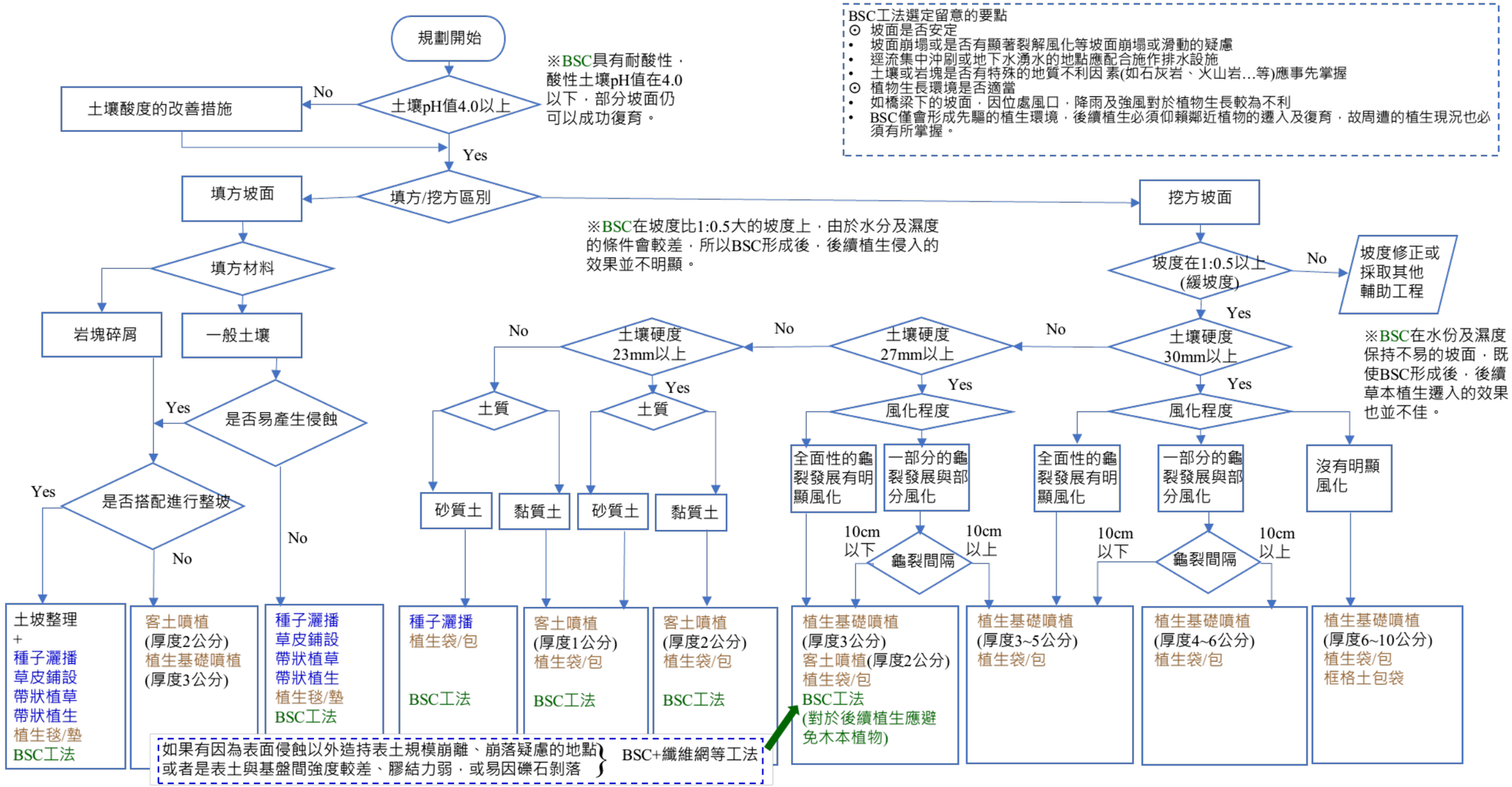


圖 2-7 坡面綠化及 BSC 工法選擇規劃流程圖 (日健總本社，2020)

3. 以手工撒播作業的注意事項

噴植機具不適合作業的地點，可以手工撒播的方式進行。但因為 BSC-1 資材相當輕，以手工撒播時容易飄散或被風吹離。如果方便取水作業，可以每 1 平方公尺 0.05~0.1 公升的水(配合每 1 平方公尺 4g BSC-1 及 10g 副資材)比例，溶入後進行手工潑灑。(如果水源不容易取得的地方，也可以混合少量的水，以糊狀．黏土狀的方式進行施工，可配合施工地點，混合土砂、粒狀化肥料進行)。

如果面積稍大，可以每 1 平方公尺 1 公升的水(配合每 1 平方公尺 4g BSC-1 及 10g 副資材) 比例，溶入後利用小型的抽水馬達及水管進行小型機械的噴灑。

也請比照機械噴灑的方式，平均的小心的進行灑播。除此之外，如果不像機械灑播使用噴植基材(纖維)，怕有 BSC 資材會流失的狀況的話，那比照機械灑播的方式，後續可配合追肥、灑水及培育等後續作業。一般小面積的手工撒播，就類似自然生長形式執行。



圖 2-8 以手工撒播作業案例 (日健總本社，2020)

4. 既有植生綠化工效果的改善跟補修

既有的植生工法(種子的噴植、植生毯、基材噴植及表土利用等)，即使在施工後，也會有部分地點會因為坡面條件的關係，產生局部侵蝕及植生劣化等。為了補強或補修這些地點，可以進行工法的檢討或調整。但是因為前期已經完成施工，要再次施工恐怕會損傷到原本已經完成的部分(之前植生毯的撤除、坡面的修整...等)，而必要資材的搬運以及堆置，都會使得花費及操作的空間受限，而導致追加的後續工程遇到很多困難。

BSC 的工法，主要能針對局部侵蝕及植生劣化提供保護，即使只是形成土壤表層的保護，也會提供後續的自然恢復，所以利用 BSC 這樣簡便的特性，作為澳果不佳地區的局部修補，是有其輕量化的優勢。所以若遭遇有局部植生效果不佳，產生局部侵蝕及植生劣化等時，可藉由 BSC 工法進行局部補修或加強。



圖 2-9 既有植生綠化工效果的改善跟補修案例 (日健總本社，2020)

也可考慮與既有的植生工法採用搭配進行的方式，更能夠針對不同型態坡面產生更好的植生效果。但相關的規劃與工法的組合，還是必須依照現場的需求與施工的工序進行討論與改進。

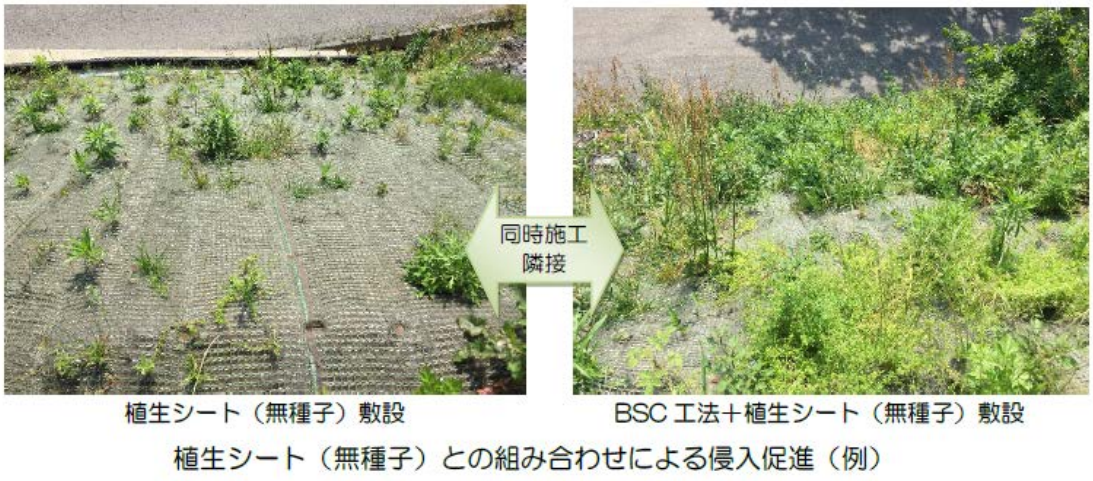


圖 2-10　BSC 工法與其他工法組合施工的案例 (日健總本社，2020)

5. 農地資材效果延長及濁水流出的防止

農地的土壤侵蝕，以及伴隨的濁水污染水源等問題，好發在日本西南側島嶼地區，沖蝕的發生地區透過 BSC 的施作，明顯的可以發揮降低沖蝕等問題已經獲得了實證。除此之外，BSC 提供的效果，還包括了當地農戶耕作時，為了減少人力、增加產量，配合農耕使用除草劑及肥料等，BSC 除了降低土壤的沖蝕與流失外，對於除草劑及肥料也能增加附著，減少因雨水沖失，流進溝渠進而汙染鄰近水源的問題。

但是 BSC 雖然能對耕土表層進行保持，但飛來的雜草種子等，也會伴隨的被保留，引發雜草的問題。這時如果選用合適的除草劑(土壤處理類型)，先培植 BSC 發育成型，之後再使用除草

劑(在 BSC 撒布 3 週~1 個月後)及追肥，則可減少雜草問題，又可讓肥料留存於土壤內為維持較長的時間(延命化)。以上的作法，還是應該諮詢農業經營的單位或專家，適當檢討實際的作法，維持適當的農作方式。

(四) 施工後成效的追蹤

有需要進行施工後的成效檢討與追蹤時,可於月平均氣溫 15 度以上超過 6 個月後進行成效判定與檢討，可以前述「植生復育促進工法」的成效判定方法進行評估。

成效追蹤也是引用植生(綠化)工法成效判定的指標，如植被率(通常是指草本類植物葉部被覆的面積率)，對於一般植物的判定雖然適用，但對於沒有明顯葉部的藻類、地衣及苔癬類而言，就不適用這習慣操作的定義。所以施工後，有關於 BSC 施作的成效好壞，就建議由後續追蹤 BSC 對土壤表面的被覆率來做測定，比較恰當。

但是，BSC 土壤藻類在地表的發育通常都是呈現稀薄的絲狀，在地衣及苔蘚侵入前，雖然目視可以分辨，對於土壤也有明顯保護效果,但是以一般測量機具的量測有其困難性。除此之外，BSC 不像一般植物有孢子或種子可以明顯看到植生的拓展與附著，如果不採微觀的觀察，就不容易看的出來，如果透過一般的施工檢查，往往就會被判定成施工結果不佳。所以對於 BSC 被覆率的判斷,建議由地表面巨觀的表現(①地表是否有明顯侵蝕、②土壤表層跟新鮮土面相比是否有變色等)。

標準的後續追蹤作業,可參考以下所列項目,依照施工目的、施工條件等進行選定及調整。BSC 的被覆率及侵入植生的被覆率，依然可以參考過去綠化工及調查員的現地確認方式，依照 BSC 特性，進行適當的調整(目前藉由攝影機等方式計算 BSC 被覆面積的方法，還在研發中)。

觀察的項目:

1. 施工後的天候狀況(雨量，氣溫等)
2. 地表面的觀察、攝影(BSC 形成狀況、被覆率、基盤狀況(侵蝕、獸害等破損))
3. 植生侵入、生育狀況(植生侵入、生育的狀況、植被率)

施工後成效追蹤的頻度,約為施工後一個月約維持 1 週 1 次的頻度，2 個月後調整成 1 個月 1 次即可，重要降雨及颱風事件後,再追加適度點檢(化成肥料可能有流失的狀態,再適度追肥)。

二、BSC 技術培養紀錄及施作速度

BSC (Biological Soil Crust,生物土壤/殼)),主要是由菌類、藻類、地衣與苔蘚等生物，建結土粒、土塊等，交織成絲狀或冠狀的土壤微生物複合體。BSC 是崩塌或裸露地、剛開墾或翻新農地等，植生恢復初始時期常見的物種。這些地點經過長期的植生恢復觀察，都可發現有 BSC 的形成,暗示其所代表的先驅性與重要性。此處所使用的 BSC-1 構成藻類，是一種廣泛性分布的藻種(cosmopolitan species)，且因為

該藻種主要以無性繁殖進行拓殖，所以進行人為施作工法時，對於原生地的物種較不會有基因汙染或導致突變的風險存在。

本期針對日本 BSC-1 資材使用的藻種進行的培養與觀察如下：

(一) BSC 技術陪養及觀測特徵

1. 分類學的特徵

藻體呈不分枝的圓筒絲狀，細胞寬度約5~10μm。藻體的寬度及長度會隨著環境條件有差異，藻體兩端相似，無頭部及尾部的差異。細胞壁外通常有薄膜狀的分泌基質附著。此藻種的增殖方式，主要是透過細胞分裂進行無性繁殖(asexual reproduction)。少見利用游動孢子(zoospore)、靜孢子(aplanospore)或akinete(厚壁孢子)等方式進行。

2. 生態學的特徵

此類藻種為陸生型藻類(terrestrial algae)，主要生長在土壤表面，亦可能生活在樹皮上、岩石上或於空氣中飄送等，是一種廣泛分佈的藻類(cosmopolitan species)。此藻種於缺水時的耐旱性可長達6個月至1年，可依據藻類存在的環境自行適應與調整。例如，附著在土壤表面的藻類，可以吸附大氣中的濕度作為所需的水分；而生長在土壤中的藻類，則可利用土壤團粒間隙中的水分，作為生長所需。

自然環境中的坡地或林地崩塌處，或者是人為造成的開挖面(道路、建地或整坡等)裸露坡面，此類藻種常是植生最初發展的先驅物種(pioneer plant)。

對比於林敬舒(2014) 實驗室內，以絲狀藍綠菌 L. boryana 進行 BSCs 的建立圖(圖2-11)日方提供的微藻樣本似乎不適合直接撒播於土壤表面，以清水培養的樣本約1~2個月可充分發展，日健總本社的BSC資材應包含肥料及其他加強附著及滋養的材料。



圖 2-11 實驗室以絲狀藍綠菌進行 BSC 的建立圖(林敬舒，2014)

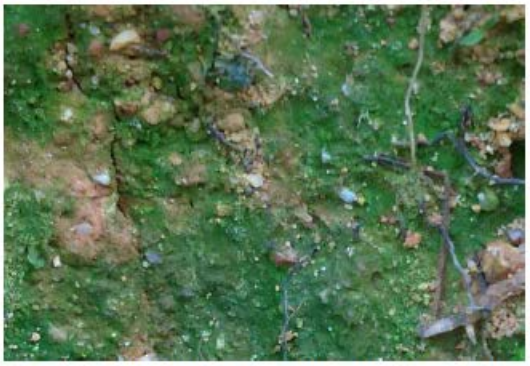
從顯微鏡的觀察結果歸納，日方提供藻團原本就不是無菌狀態，故培養過程也無需保持無菌狀況，因此培養中除了原先最優勢的絲狀綠藻之外，出現其它藻類亦算正常。野外土壤中的主要優勢藻種為綠藻和藍綠菌，即為本次培養出現的兩大類藻群。對生態工法是否成功而言，關鍵不在出現何種藻種，而是出現的該藻種能不能成功於表土成長，進而成功建立BSC，絲狀藻種的成功機率又顯著大於顆粒狀藻種。

實驗結果，未能如預期養出大量的綠藻Klebsormidium，主要原因為未能有適當的培養液或肥料，用以活化這些乾燥細胞。導致這些原本長出的Klebsormidium，僅在約1-2個月之後，就被台灣本地的藍綠菌和綠藻所取代，而這些本土優勢的藻類，在表土成功拓殖成長，因故導致綠藻Klebsormidium無法在表土上建立BSC。

通常藻類成形後，地衣植物及苔蘚等會依序的遷入及發展。苔蘚是 BSC 典型的代表物種之一，但由於苔癬的分佈有地域性，且可能有雌、雄性或雙性等不同類型，所以在 BSC-1 的組對種類中，為避免生態干擾而未納入使用。施工地點除了藻類的發展外，如果苔蘚類也開始發育，代表先驅植被漸趨穩定，也為後續植生條件提供良好的基礎。

BSC-1 的生育期主要在植物好發的春~夏兩季，施工後會因為豪雨或積雪等原因，而導致在 BSC-1 還沒發育完成前養分就流失，所以要適度地進行補充與照顧。

BSC-1 在寒冬或晚秋的低溫期活性與發展力會降低，所以既使施作了，到春季也還沒見明顯的其他植被發展。但如果仔細觀察，會發現坡面沒有明顯侵蝕的痕跡，表面也有一層薄薄的纖維絲狀物，代表 BSC 還是有持續發展。



BSC-1 により形成された BSC が微粒子を付着させている例（施工２週間後）



コケ及び草本の侵入状況例（施工７ヵ月後）



春季に施工した斜面例（施工２ヵ月後）

圖 2-12 施工後 BSC 的形成狀態

(日健總本社，2020)

BSC-1 在土壤表面形成的絲狀纖維發育後，就會使土壤沖蝕降低並提供保護，可再持續觀察後續植生發展。如果在晚秋及冬天的寒冷氣候中施作，隔年春天藻類發展及活化後，後續的植生就可能會有所加速，這時也可配合適當的追肥，加強它的效果。

(二) BSC 資材取得及進口檢疫

本年度取得 BSC-1 資材及進口檢疫，由於辦理項目眾多，茲將辦理情形整理如表 2-5：

表 2-4 BSC-1 資材取得及進口檢疫辦理過程

日期	單位/工作項目	辦理情形
2022/5/11	食品藥物管理署	送件 BSC-1 輸入審查
2022/5/19	食品藥物管理署	補件說明(原料製造資訊)
2022/5/20	食品藥物管理署	補件說明(不含敏感物質證明)
2022/5/23	食品藥物管理署	有條件通過，需現場查驗
2022/6/10	農委會動植物檢疫防疫檢疫局	副知食藥署申請結果，微生物管理補件
2022/6/19	農委會動植物檢疫防疫檢疫局	微生物管理釐清非管制類別，准予輸入
2022/6/19	日本工營	BSC-1 輸入辦理
2022/6/22	日健總本社	安排出貨及輸出檢疫辦理
2022/6/23	日健總本社	BSC-1 輸出稅關辦理及通知台方輸入辦理
2022/6/27	日健總本社	班機安排確認，安排入關辦理手續

表 2-5 BSC-1 資材取得及進口檢疫辦理過程(續)

日期	單位/工作項目	辦理情形
2022/6/30	關務署	入關手續辦理，轉知食藥署配合查驗手續
2022/7/1	關務署	轉知檢疫局配合查驗手續
2022/7/3	農委會動植物檢疫防疫檢疫局	查驗通過
2022/7/3	食品藥物管理署	查驗通過
2022/7/4	關務署	通關辦理完成，辦理物流
2022/7/5	成功大學	送抵台南成大

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

本試驗之各工作項目之預訂進度規劃如表 2-6 所示，於雨季 (5~10 月)期間進行後續生物土壤 BSC 及 MSC 施灑養護及現地沖蝕試驗。本計畫之期末進度已完成「試驗前準備」、「培養微藻」及「沖蝕試驗」，且已於試驗前 (培養微藻前)、試驗初期、試驗中期及試驗後期 (4/1、5/1、8/1 及 11/1)採集各樣區之表土樣本，並已完成試驗前之土壤性質分析及土壤沖蝕性指數推算、現地沖蝕試驗 (試驗前準備、微藻培養及沖蝕試驗)、推算微藻之覆蓋與管理因子 (C 值)、微藻之植生變化 (以無人機拍攝多光譜影像)及微藻改良土壤性質 (試驗初期、中期及後期)。

表 2-6 土壤流失量監測與分析之預訂進度表

期程 / 週次 / 工作項目	3月				4月				5月					6月				7月				8月				9月				10月				
	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
試驗前準備					培養微藻				沖蝕試驗																									
沖蝕試驗場址重新翻整																																		
清理收集槽																																		
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、有機質、導水度、質地、pH及團粒穩定度																																		
數據整理																																		
mNDVI及沖蝕與堆積計算																																		
預定進度(%)	6				3				12					13				12				12				20				22				
預定進度累計(%)	6				9				21					34				46				58				78				100				

備註

1. 於4/1開始培養微藻，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，期間需每週施灑肥料1次，並每隔3~4天灑水至表層土壤飽和；第2個月後(5/1)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)；
3. 收集試驗期間(5/1~10/31)之降雨資料；
4. 收集各試區之每場有效降雨場下泥砂量；
5. 土壤含水量及溫度以每隔1週進行測定；
6. 培養微藻前及沖蝕試驗之試驗初期、中期及後期(4/1、5/1、8/1及11/1)時於試區上、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、有機質、導水度、質地、pH及團粒穩定度。

(一) 試驗區之土壤基本性質與土壤沖蝕性指數

本試驗於試驗前 (4/1)時，分別於試區上、中及下坡中隨機位置採集表土 (0~5cm)後攜回實驗室過篩並風乾，並已完成試驗區之土壤性質分析及土壤沖蝕性指數推算，其結果如表 2-7 所示。土壤 pH 為 5.55 ± 0.04，屬於中酸性；土壤總體密度為 1.27 ± 0.03 g cm^{-3};依據美國農部對土粒粒徑分級方式，可得到砂粒、坋粒及黏粒含量分別為 3.21 ± 1.8 %、39.7 ± 2.1 %及 32.1 ± 1.8 %，其土壤質地屬於黏質壤土 (Clay loam)；土壤硬度為 16.4 ± 0.07 mm，依據山寺喜成 (1982)的土壤硬度對植物生育情形分類，可知本樣區若種植植物，其根系伸展屬於良好，且種子發芽及生育為良好；土壤團粒穩定度為 1.19 ± 0.21 mm；土壤導水度為 7.24 ± 0.15 mm hr^{-1}，屬於中等慢；而 K 值之參數，坋粒及極細砂 ×(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 3076、1.40、2 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 0.03105 ton ha hr yr $ha^{-1}MJ^{-1}mm^{-1}$。

表 2-7 標準沖蝕試驗區之土壤基本性質

項目	Soil
pH (1:5)	5.55 ± 0.04
總體密度 (g cm^{-3})	1.27 ± 0.03
砂粒含量 (%)	32.1 ± 1.8
極細砂含量 (%)	5.6 ± 2.3
坋粒含量 (%)	39.7 ± 2.1
黏粒含量 (%)	32.1 ± 1.8
土壤質地	Clay loam
坋粒及極細砂 × (100%-黏粒)M	3076
有機質含量 OM (%)	1.40 ± 0.16
有機質含量 a	1.40
土壤之硬度 (mm)	16.4 ± 0.07
土壤主要構造	角塊狀 (1.0~2.0 mm)
土壤團粒穩定度 (mm)	1.19 ± 0.21
土壤結構參數 b	2
土壤導水度 K_{sat} (mm hr^{-1})	7.24 ± 0.15
土壤滲透性參數 c	4
土壤沖蝕性指數 Km (ton ha hr yr $ha^{-1}MJ^{-1}mm^{-1}$)	0.03105

(二) 現地沖蝕試驗

(一)試驗前準備

本試驗已於 3 月 11 日至 24 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 2-13 所示)；②以中耕機上下行耕犁 (如圖 2-14 所示)；③篩除表土之雜草及礫石 (如圖 2-15 所示)；④整平坡面 (如圖 2-16 所示)，試區翻整後成果如圖 2-17 所示，完成翻整後需鋪設帆布 (如圖 2-18 所示)以防止沖蝕試驗前造成土壤沖蝕；並於 3 月 23 日至 29 日期間清理收集槽 (如圖 2-19 所示)。



圖 2-13 試區除草



圖 2-14 上下行耕犁



圖 2-15 篩除表土雜草及礫石



圖 2-16 整平坡面



圖 2-17 試區翻整後



圖 2-18 鋪設帆布



圖 2-19 清理收集槽

(二)微藻培養

本研究於試驗第一天 (4/1)時，已於標準沖蝕試驗區的第 1 試區及第 2 試區分別施用日本日健總研 BSC 及 MSC 之生物土壤進行微藻培養，於第 1 試區將肥料 (本試驗使用尿素、寶粒磷、氯化鉀及鎂鈣肥)、4 g/m^2 的 BSC 及 10 g/m^2 的副資材溶入 1 L/m^2 的水中，並以手工方式均勻撒播於試驗地 (如圖 2-20 所示)；而第 2 試驗區則將肥料及 10 g/m^2 的 MSC 溶入 1 L/m^2 的水中再撒播，其中肥料及施灑的資材配比及施灑量如表 2-8 及表 2-9 所示；第 3 試區則作為對照組 (裸露地)。培養期間至沖蝕試驗開始前，試區表土皆需鋪設帆布 (如圖 2-21 所示)，以防止微藻生長期間仍未深根即被地表逕流沖走，亦可排除試驗前降雨造成的土壤流失誤差；並每週需施灑肥料 1 次，每隔 3~4 天灑水至表層土壤飽和 (維持土壤田間容水量)，以維持微藻生長最佳生長環境。

表 2-8 肥料及試驗資材之施用比例表

項目	肥料				土壤微細藻類 BSC (日本日健總本社)	副資材 II	MSC
	農友牌尿素 CH_4N_2O	農友牌寶粒磷	農友牌氯化鉀 KCl	農友牌鎂鈣肥			
圖片							
每包重量(kg)	40.0	40.0	40.0	20.0	0.4	1.0	0.5
每包價格(NT)	460	290	470	130	-	-	-
N-P_2O_5-K_2O-MgO (%)	46-0-0-0	5-16-0-0	0-0-60-0	0-0-0-18	-	-	-
N (%)	46	5	0	0	-	-	-
P_2O_5 (%)	0	16	0	0	-	-	-
K_2O (%)	0	0	60	0	-	-	-
MgO (%)	0	0	0	18	-	-	
施用量(g/m^2)	16.6	57.5	15.0	26.7	4	10	10~15
一次追肥量(g)	1491.8	5175.0	1350.0	2400.0	180.0	450.0	450.0~675.0
Cost (NT/m^2)	0.191	0.417	0.176	0.173	-	-	-

表 2-9 肥料及試驗資材之施用總量表

樣區編號	面積 (m^2)	肥料(g)				水 (L)	BSC (g)	副資材 (g)	MSC (g)
		農友牌尿素 CH_4N_2O	農友牌寶粒磷	農友牌氯化鉀 KCl	農友牌鎂鈣肥				
BSC	45.0	8.21	28.46	7.43	13.20	495.0	180.0	450.0	-
MSC	45.0	8.21	28.46	7.43	13.20	495.0	-	-	675.0
CK	45.0	-	-	-	-	495.0	-	-	-
總量	135	16.41	56.93	14.85	26.40	1,485	180.0	450.0	675.0



圖 2-20 秤取需要的肥料及試驗資材



圖 2-21 均勻撒播於試驗地

(三) 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)

本試驗已收集試驗期間 (4/1~10/31)之 1 min 降雨資料，並依據 Wischmeier and Smith (1958)之單場有效降雨事件定義進行劃分有效降雨場，其中單場有效降雨事件定義如下：

1. 單場累積降雨量需超過 12.7 mm，且該場降雨與前場降雨需間隔超過 6 hr 以上；
2. 若單場累積降雨量低於 12.7 mm，但於 15 min 內降下 6.35 mm 以上之雨量，仍具備有沖蝕之潛在能力，則該場降雨應視為單場有效降雨事件。

本試驗之有效降雨場劃分結果如表 2-11 至表 2-14 所示，降雨事件前後大於 6 hr 以上之雨場，在試驗期間共有 79 場，其中有 27 場單場降雨之累積降雨量須超過 12.7 mm，或雨場內有符合 15 min 內降下 6.35 mm 以上之雨量，因此判定具備有沖蝕之潛在能力，該 27 場降雨視為有效降雨事件。而 27 場有效降雨事件中有 10 場累積降雨量未超過 18mm，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 18 mm 時，屏東科技大學之沖蝕試驗區不會產生土壤流失；本試驗期間之降雨類型分為: (1) 5、6 月以梅雨季為主；(2) 7 月至 9 月以對流雨及西南季風(地形雨)為主。本試驗期間之累積雨量超過 50mm 的有效雨場分別為第 1 場、第 4~6 場(連續降雨)、第 13 場、第 18 場及第 27 場，幾乎集中於 5 月及 7 月期間，這些雨場造成試區內微藻大量流失，因此本試驗於 7 月底的連續降雨結束後(8/1)重新施灑微藻及

補肥。本試驗以單場降雨之累積降雨量與土壤流失量進行相關性分析，如圖 2-22 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 0.88 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 = 0.8333A－14.1128、P = 0.8797A－14.86178 及 P = 1.0139A－16.5442，由表 3-11 及圖 3-10 可發現，試驗期間之第 3 場 (試驗第 15 天)、第 4-6 場 (試驗第 22 天-第 27 天)、第 18 場 (試驗第 89 天)之有效降雨場，造成 BSC、MSC 及 CK 之土壤流失量顯著提高 29.4 % - 56.1 %、29.1 % - 60.8 %及 22.4 % - 61.0 %，推測可能是受到連續降雨的影響，導致土壤含水量過高(超過 20%以上)，此情況下容易導致土壤流失量增加，達到 1.2 倍以上。其中第 1 場(試驗第 11 天) 及第 27 場(試驗第 144 天)之有效降雨場因微藻生長較為完整(試驗剛開始)及 8 月初重新補微藻與 9 月初及 10 月初施用化肥等緣故，致使 BSC、MSC 及 CK 之土壤流失量皆顯著降低 23.4% - 26.7%及 24.0%、24.8%及 15.9% - 24.0%。試驗期間施用微藻(生物土壤)可有效降低 13.0 % - 183 %及 6.95 % - 171 %的土壤流失量，其中又以 BSC 效果最為顯著。依據公式 2-3 將 BSC 及 MSC 之總沖蝕量與 CK 相比下，可得到 BSC 及 MSC 之覆蓋與管理因子(C 值)分別為 0.79 及 0.84。

表 2-10 2022 年 4 月至 10 月之有效雨場劃分 (1)

前後間隔 >6 hr 之雨場	降雨開始時間	降雨結束時間	該場降雨延時 (min)	單場降雨之累積雨量 (mm)	累積降雨量超過 12.7 mm	15min 內降雨量超過 6.35mm	有效雨場次
1	04/02 17:18	04/02 17:18	1	0.5			-
2	04/03 02:04	04/03 07:51	3	1.5			-
3	04/08 19:13	04/08 19:14	2	1.0			-
4	04/15 02:11	04/15 02:27	3	1.5			-
5	04/20 16:38	04/20 16:38	1	0.5			-
6	05/02 07:25	05/02 11:33	9	4.5			-
7	05/03 10:05	05/03 10:05	1	0.5			-
8	05/11 07:50	05/11 10:52	90	66.0	✓	✓	1
9	05/12 14:56	05/12 14:56	1	0.5			-
10	05/14 05:40	05/14 14:04	22	15.5	✓	✓	2
11	05/15 00:04	05/15 00:49	5	2.5			-
12	05/15 11:03	05/15 19:24	30	20.5	✓		3
14	05/20 00:29	05/20 05:34	7	3.5			-
15	05/22 15:00	05/22 20:59	92	57.0	✓	✓	4
16	05/23 13:11	05/23 13:36	2	1.0			-
17	05/24 19:07	05/25 17:49	121	81.0	✓	✓	5
18	05/26 07:27	05/27 15:45	101	38.0	✓	✓	6
19	05/31 13:26	05/31 13:26	1	0.5			-
20	06/03 13:04	06/03 13:26	7	3.5			-
21	06/04 07:56	06/04 14:41	25	12.5			-

表 2-11 2022 年 4/至 10/之有效雨場劃分 (2)

前後間隔 >6 hr 之雨場	降雨開始時間	降雨結束時間	該場降雨延時 (min)	單場降雨之累積雨量 (mm)	累積降雨量超過 12.7 mm	15min 內降雨量超過 6.35mm	有效雨場次
22	06/05 23:54	06/05 23:57	2	1.0			-
23	06/07 04:54	06/08 00:18	61	30.0	✓	✓	7
24	06/08 15:09	06/08 21:38	12	7.0			-
25	06/09 04:48	06/09 04:48	1	0.5			-
26	06/18 13:36	06/18 13:36	1	1.0			-
27	06/19 15:47	06/19 16:09	12	17.0	✓	✓	8
28	06/20 12:27	06/20 12:30	4	4.0			-
29	06/21 10:46	06/21 10:46	1	2.0			-
30	06/23 14:27	06/23 15:12	13	14.0	✓	✓	9
31	06/25 16:28	06/25 16:37	6	8.0		✓	10
32	06/27 15:52	06/27 16:39	17	18.0	✓	✓	11
33	06/30 17:44	06/30 17:47	3	2.0			-
34	07/01 00:10	07/01 00:21	2	2.0			-
35	07/01 14:53	07/01 17:22	7	9.0			-
36	07/01 23:40	07/01 23:58	4	13.0	✓		12
37	07/02 20:50	07/02 23:31	43	50.0	✓	✓	13
38	07/03 07:07	07/03 12:11	10	10.0			-
39	07/04 10:06	07/04 20:12	20	22.0	✓	✓	14
40	07/05 16:37	07/05 16:40	2	2.0			-
41	07/15 01:53	07/15 06:35	27	26.0	✓		15

表 2-12 2022 年 4/至 10/之有效雨場劃分 (3)

前後間隔 >6 hr 之雨場	降雨開始時間	降雨結束時間	該場降雨延時 (min)	單場降雨之累積雨量 (mm)	累積降雨量超過 12.7 mm	15min 內降雨量超過 6.35mm	有效雨場次
42	07/17 12:25	07/17 16:09	25	31.0	✓	✓	16
43	07/18 13:49	07/18 13:55	4	4.0			-
44	07/25 17:52	07/25 17:58	4	4.0			-
45	07/26 14:10	07/26 17:01	13	13.0	✓		17
46	07/27 19:39	07/27 20:52	44	59.0	✓	✓	18
47	07/28 16:50	07/28 17:31	19	20.0	✓	✓	19
48	07/29 14:56	07/29 16:13	22	22.0	✓	✓	20
49	07/30 13:21	07/30 17:16	12	12.0			-
50	07/31 07:23	07/31 07:24	2	2.0			-
51	08/02 11:26	08/02 11:26	1	1.0			-
52	08/03 09:13	08/03 09:13	1	1.0			-
53	08/03 18:36	08/03 18:36	1	2.0			-
54	08/07 13:59	08/07 14:38	6	6.0			-
55	08/09 14:39	08/09 14:40	2	2.0			-
56	08/10 15:26	08/10 15:44	6	6.0			-
57	08/11 15:42	08/11 16:18	7	7.0			-
58	08/12 13:43	08/12 18:08	19	18.0	✓		21
59	08/13 14:43	08/13 15:09	11	12.0		✓	22
60	08/15 09:35	08/15 09:48	4	4.0			-
61	08/15 23:35	08/15 23:35	1	5.0			-

表 2-13 2022 年 4/至 10/之有效雨場劃分 (4)

前後間隔 >6 hr 之雨場	降雨開始時間	降雨結束時間	該場降雨延時 (min)	單場降雨之累積雨量 (mm)	累積降雨量超過 12.7 mm	15min 內降雨量超過 6.35mm	有效雨場次
62	08/16 17:36	08/16 17:53	2	2.0			-
63	08/17 13:25	08/17 16:43	24	24.0	✓	✓	23
64	08/18 15:41	08/18 16:40	11	12.0			-
65	08/23 23:08	08/23 23:08	1	1.0			-
66	08/24 07:02	08/24 10:46	3	2.0			-
67	08/27 16:24	08/27 17:16	7	8.0			-
68	08/28 13:24	08/28 15:55	6	6.0			-
69	08/30 13:40	08/30 18:01	8	8.0			-
70	08/31 14:38	08/31 17:38	15	18.0	✓	✓	24
71	09/03 10:48	09/03 15:20	10	10.0			-
72	09/04 03:37	09/04 14:24	6	6.0			-
73	09/05 06:01	09/05 06:12	2	2.0			-
74	09/06 03:17	09/06 03:37	5	4.0			-
75	09/06 18:58	09/06 20:29	4	8.0			-
76	09/07 14:13	09/07 17:06	19	23.0	✓	✓	25
77	09/08 08:53	09/08 08:53	1	1.0			-
78	09/08 16:14	09/08 16:36	16	22.0	✓	✓	26
79	09/20 13:48	09/20 14:07	20	76.0	✓	✓	27

表 2-14 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	降雨延時 (hr)	降雨延時 (min)	單場降雨之累積雨量 (mm)	土壤流失重 (kg)		
						BSC	MSC	CK
1	2022/05/11 07:50:00.0	2022/05/11 10:52:00.0	90.0	1.50	**66.0**	41.7	43.3	51.0
2	2022/05/14 05:40:00.0	2022/05/14 14:04:00.0	22.0	0.37	**15.5**	0.0	0.0	0.0
3	2022/05/15 11:03:00.0	2022/05/15 19:24:00.0	30.0	0.50	20.5	4.5	5.1	5.8
4	2022/05/22 15:00:00.0	2022/05/22 20:59:00.0	92.0	1.53	**57.0**	33.1	35.1	37.4
5	2022/05/24 19:07:00.0	2022/05/25 17:49:00.0	121	2.02	**81.0**	69.1	72.8	80.3
6	2022/05/26 07:27:00.0	2022/05/27 15:45:00.0	101	1.68	38.0	27.4	28.3	35.4
7	2022/06/07 04:54:00.0	2022/06/08 00:18:00.0	61.0	1.02	30.0	10.8	12.1	15.0
8	2022/06/19 15:47:00.0	2022/06/19 16:09:00.0	12.0	0.20	**17.0**	0.0	0.0	0.0
9	2022/06/23 14:27:00.0	2022/06/23 15:12:00.0	13.0	0.22	**14.0**	0.0	0.0	0.0
10	2022/06/25 16:28:00.0	2022/06/25 16:37:00.0	6.00	0.10	**8.00**	0.0	0.0	0.0
11	2022/06/27 15:52:00.0	2022/06/27 16:39:00.0	17.0	0.28	**18.0**	0.0	0.0	0.0
12	2022/07/01 23:40:00.0	2022/07/01 23:58:00.0	4.00	0.07	**13.0**	0.0	0.0	0.0
13	2022/07/02 20:50:00.0	2022/07/02 23:31:00.0	43.0	0.72	**50.0**	22.9	24.5	30.0
14	2022/07/04 10:06:00.0	2022/07/04 20:12:00.0	20.0	0.33	22.0	0.0	0.0	0.0
15	2022/07/15 01:53:00.0	2022/07/15 06:35:00.0	27.0	0.45	26.0	2.4	2.7	6.8
16	2022/07/17 12:25:00.0	2022/07/17 16:09:00.0	25.0	0.42	31.0	3.0	3.2	7.6
17	2022/07/26 14:10:00.0	2022/07/26 17:01:00.0	13.0	0.22	**13.0**	0.0	0.0	0.0
18	2022/07/27 19:39:00.0	2022/07/27 20:52:00.0	44.0	0.73	**59.0**	47.2	48.6	54.8
19	2022/07/28 16:50:00.0	2022/07/28 17:31:00.0	19.0	0.32	20.0	0.0	0.0	0.0
20	2022/07/29 14:56:00.0	2022/07/29 16:13:00.0	22.0	0.37	22.0	2.3	2.9	3.5
21	2022/08/12 13:43:00.0	2022/08/12 18:08:00.0	19.0	0.32	**18.0**	0.0	0.0	0.0
22	2022/08/13 14:43:00.0	2022/08/13 15:09:00.0	11.0	0.18	**12.0**	0.0	0.0	0.0
23	2022/08/17 13:25:00.0	2022/08/17 16:43:00.0	24.0	0.40	24.0	2.3	3.0	6.0
24	2022/08/31 14:38:00.0	2022/08/31 17:38:00.0	15.0	0.25	**18.0**	0.0	0.0	0.0
25	2022/09/07 14:13:00.0	2022/09/07 17:06:00.0	19.0	0.32	23.0	2.6	3.0	3.8
26	2022/09/08 16:14:00.0	2022/09/08 16:36:00.0	16.0	0.27	22.0	0.0	0.0	0.0
27	2022/09/20 13:48:00.0	2022/09/20 14:07:00.0	20.0	0.33	**76.0**	36.1	39.5	50.9
總和			906.0	15.1	814.0	297.3	315.8	378.6
覆蓋與管理因子(C 值)						**0.79**	**0.83**	-

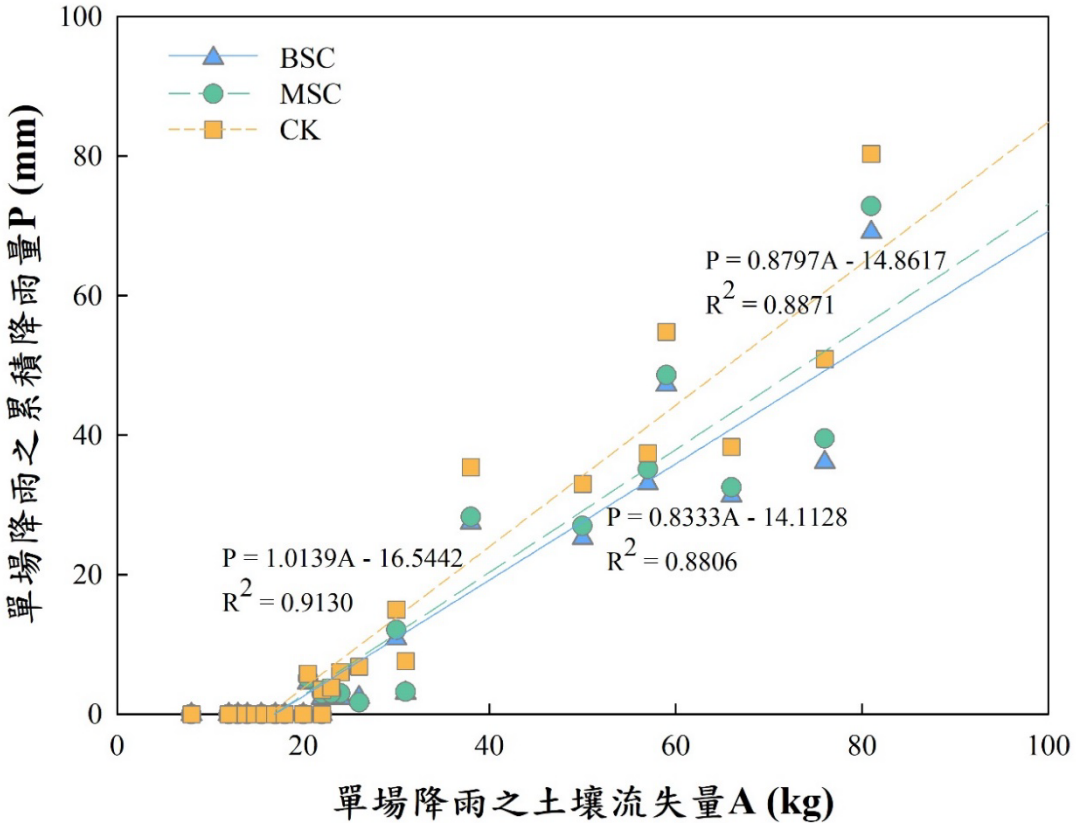


圖 2-22 單場降雨之累積降雨量與土壤流失量之關係圖

(四) 微藻之植生變化

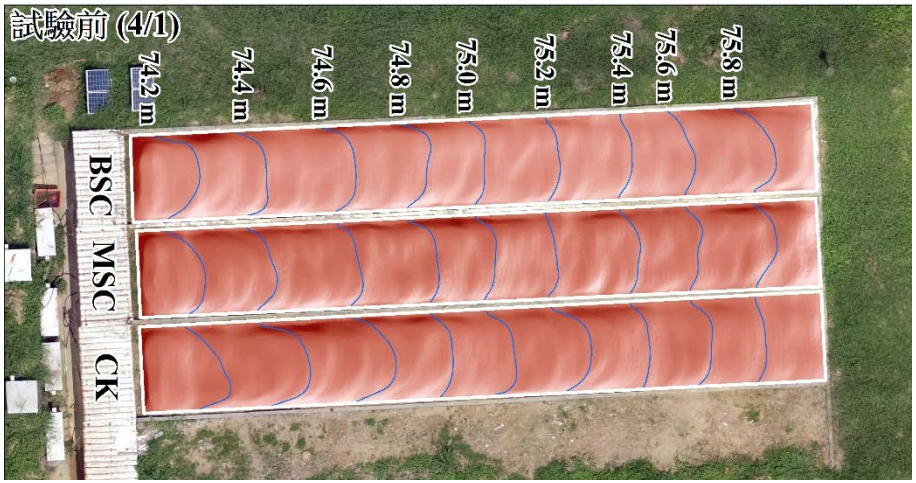
試驗期間每週五操作 DJI 無人機 P4M 於試驗區之空中拍攝正射影像及多光譜影像，若當天下雨或強風等因素使無人機無法執行飛行任務，則當日不執行飛行任務。本試驗將試驗期間所拍攝的正射影像轉換為數值地表模型 (Digital Surface Model, DSM)，以供判視於試驗期間表土受雨水侵蝕後地形變化，但有部分有效雨場之累積雨量過低，無法產生土壤沖蝕，因此地形亦未有變化，因此將其省略，如表 2-15 所示，而地形變化之成果如圖 2-23 至圖 2-26 所示。

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-

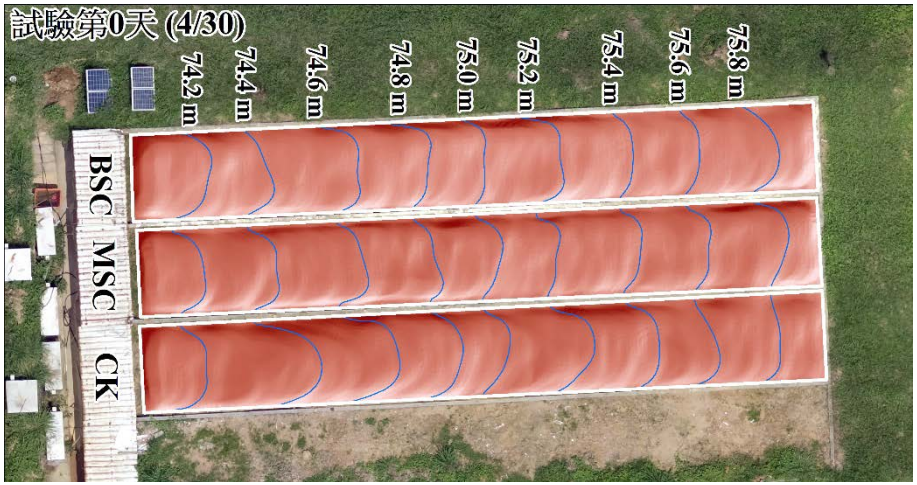
27 至圖 2-30 所示；並以 mNDVI=0 視為裸土，供推算微藻覆蓋百分比，評估試驗期間微藻覆蓋情況。本試驗在進行一個月微藻培養過程中，皆覆蓋帆布以防止雨水侵蝕，在培養結束後，BSC 及 MSC 之平均 mNDVI 值分別為 0.04 及 0.03，而覆蓋百分比則分別可達到 34.4 %及 32.5 % (如表 2-16 所示)；試驗期間最大土壤流失量累積降雨量之單場有效降雨場分別發生於試驗第 13 天、第 22~26 天(連續降雨)、第 69 天、第 90 天及 146 天，其總流失量分別達到 102 kg、419 kg、85.2 kg、151 kg 及 127 kg (如表 2-14 所示)，對照圖 2-23 (c)與(b)可發現，試驗區內之等高線些微往上坡移動，其中以 CK 最為明顯，其下坡海拔 74.2m 的等高線處已形成一清晰之蝕溝，且表 2-17 顯示 BSC 及 MSC 之微藻覆蓋面積分別減少了 9.90 % - 18.8 %及 13.8 % - 25.7 %，表示在第一場有效降雨場 (累積雨量= 66.0 mm)即造成相當嚴重的侵蝕；對照圖 2-24(e)與圖 2-23(c)可發現，CK 試區之中坡及上坡處亦有條微微的蝕溝產生，表 2-19 顯示 BSC 及 MSC 在受到這場連續降雨的侵蝕下，其 mNDVI 僅剩約 0.01，而覆蓋面積則是減少了 8.87 % - 12.4 %及 6.05 % - 7.18%，由圖 2-27(d)與(c)對照後，可明顯看出微藻大部分已流失。由圖 2-30 (n)最後一場有效降雨後之微藻分部圖與圖 2-30 (p)對照後可發現，在 8 月初的重新施灑微藻及化肥、9 月初及 10 月初的追肥下，且經歷 89 天無連續降雨情況下，BSC 及 MSC 之微藻覆蓋面積皆提高了 62.6 % - 65.9 %及 58.4 % - 60.6 %，且 mNDVI 平均值亦達到了 0.10 及 0.07，其中皆以 BSC 提升最為顯著，顯示 BSC 在陽光充足時生長狀態最佳。

表 2-15 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

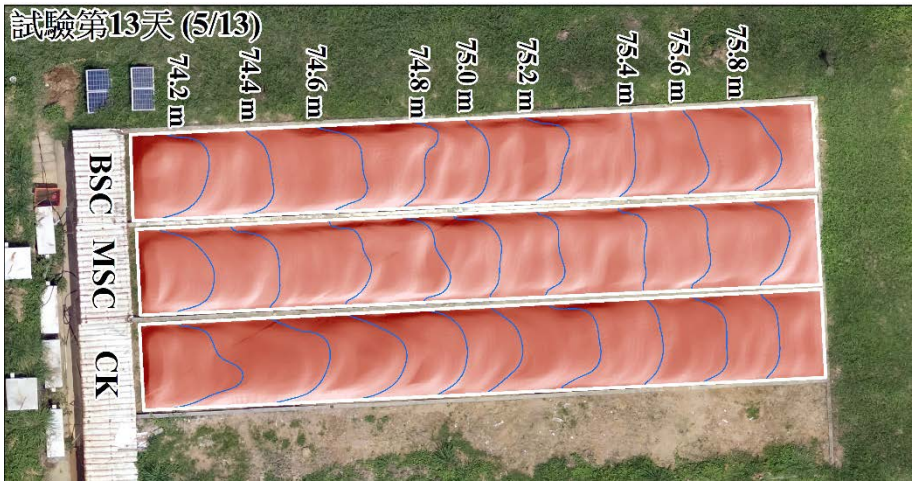
有效雨場次	試驗時間（日）	測定日期	降雨開始時間	降雨結束時間	單場降雨之累積雨量 (mm)	單場有效降雨之總土壤流失量 (kg)	高程變化圖	mNDVI分析
-	試驗前	04/01	-	-	-	-	✓	
-	0	04/31	-	-	-	-	✓	✓
1	13	05/13	05/11 07:50	05/11 10:52	66.0	102.1	✓	✓
2	20	05/20	05/14 05:40	05/14 14:04	15.5	0.0	✓	✓
3			05/15 11:03	05/15 19:24	20.5	15.4		
4	27	05/27	05/22 15:00	05/22 20:59	57.0	105.6	✓	✓
5			05/24 19:07	05/25 17:49	81.0	222.2		
6			05/26 07:27	05/27 15:45	38.0	91.1		
7	41	06/10	06/07 04:54	06/08 00:18	30.0	37.9	✓	✓
8	55	06/24	06/19 15:47	06/19 16:09	17.0	0.0	✓	✓
9			06/23 14:27	06/23 15:12	14.0	0.0		
10	62	07/01	06/25 16:28	06/25 16:37	8.0	0.0	✓	✓
11			06/27 15:52	06/27 16:39	18.0	0.0		
12	69	07/08	07/01 23:40	07/01 23:58	13.0	0.0	✓	✓
13			07/02 20:50	07/02 23:31	50.0	85.2		
14			07/04 10:06	07/04 20:12	22.0	0.0		
15	76	07/15	07/15 01:53	07/15 06:35	26.0	11.9	✓	✓
16	83	07/22	07/17 12:25	07/17 16:09	31.0	13.8	✓	
17	90	07/29	07/26 14:10	07/26 17:01	13.0	0.0	✓	✓
18			07/27 19:39	07/27 20:52	59.0	150.6		
19			07/28 16:50	07/28 17:31	20.0	0.0		
20	97	08/05	07/29 14:56	07/29 16:13	22.0	8.7	✓	
21	111	08/19	08/12 13:43	08/12 18:08	18.0	0.0	✓	✓
22			08/13 14:43	08/13 15:09	12.0	0.0		
23			08/17 13:25	08/17 16:43	24.0	11.3		
24	125	09/02	08/31 14:38	08/31 17:38	18.0	0.0	✓	✓
25	132	09/09	09/07 14:13	09/07 17:06	23.0	9.4	✓	✓
26			09/08 16:14	09/08 16:36	22.0	0.0		
27	146	09/23	09/20 13:48	09/20 14:07	76.0	126.5	✓	✓
-	167	10/14	-	-	-	-		✓
-	181	10/28	-	-	-	-		✓



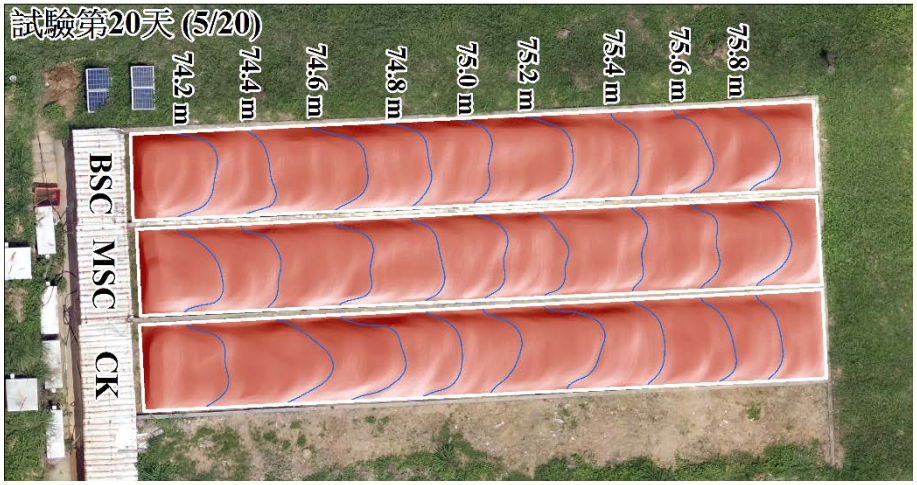
(a) 試驗前



(b) 試驗第 0 天

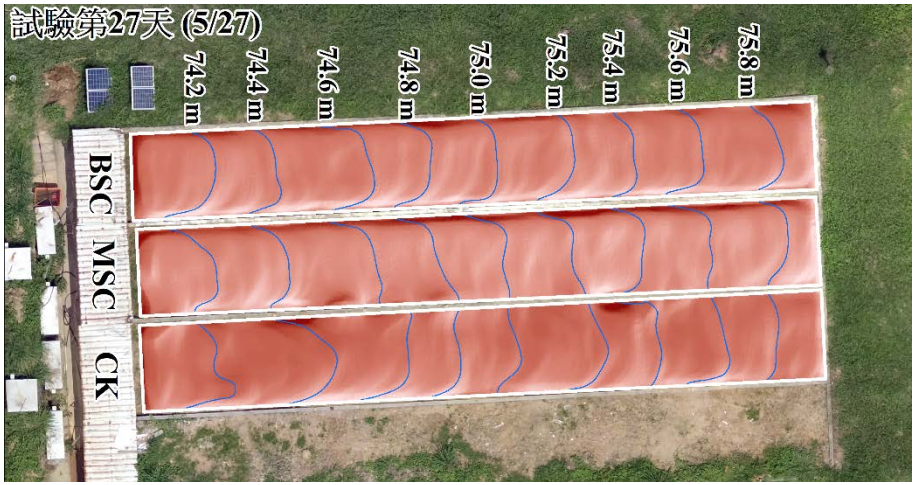


(c) 試驗第 13 天

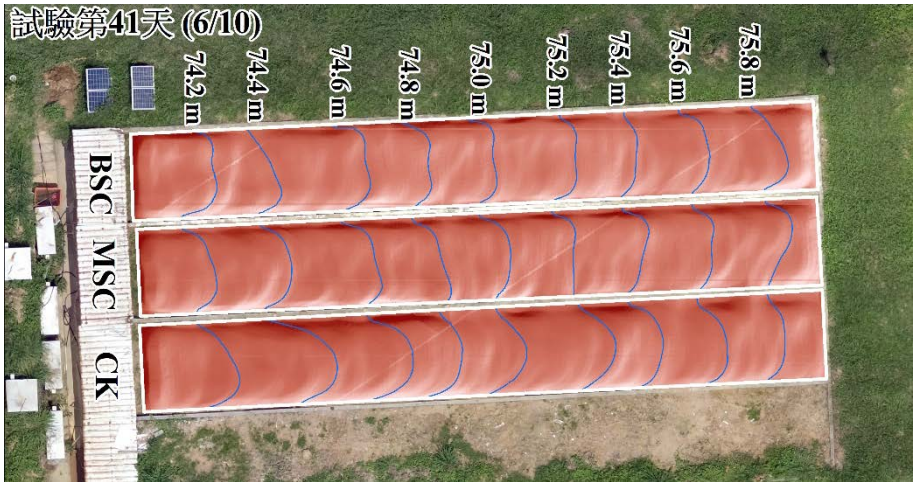


(d) 試驗第 20 天

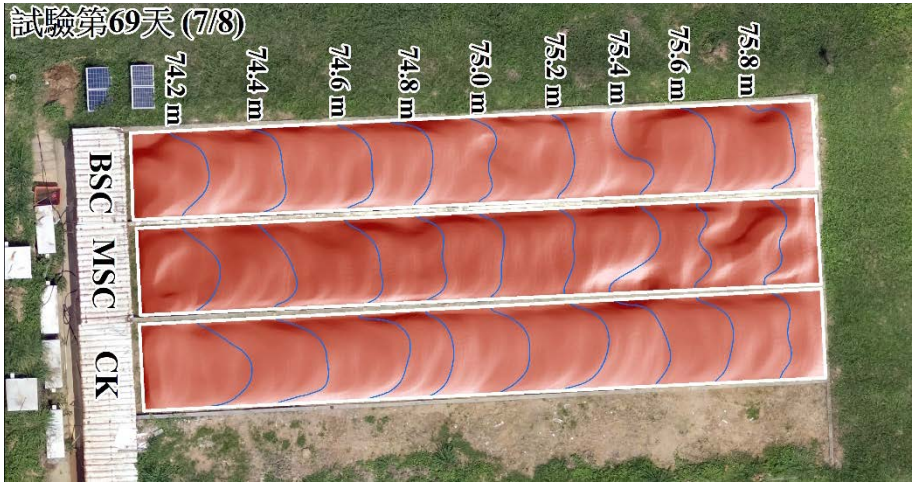
圖 2-23 各試驗區於不同試驗期間之高程變化圖(1)



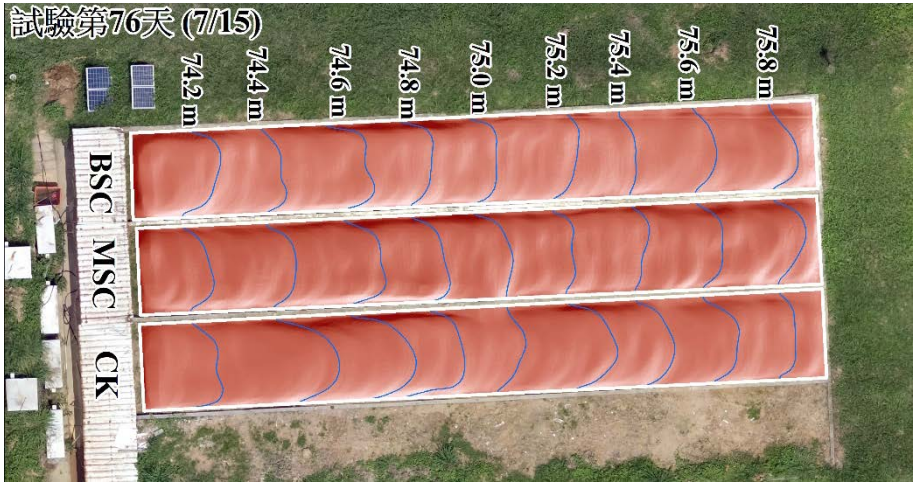
(e) 試驗第 27 天



(f) 試驗第 41 天

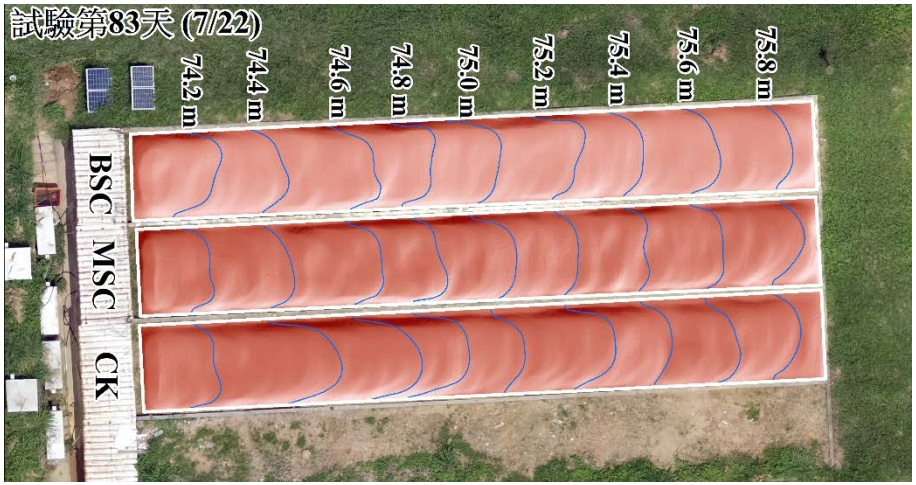


(g) 試驗第 69 天

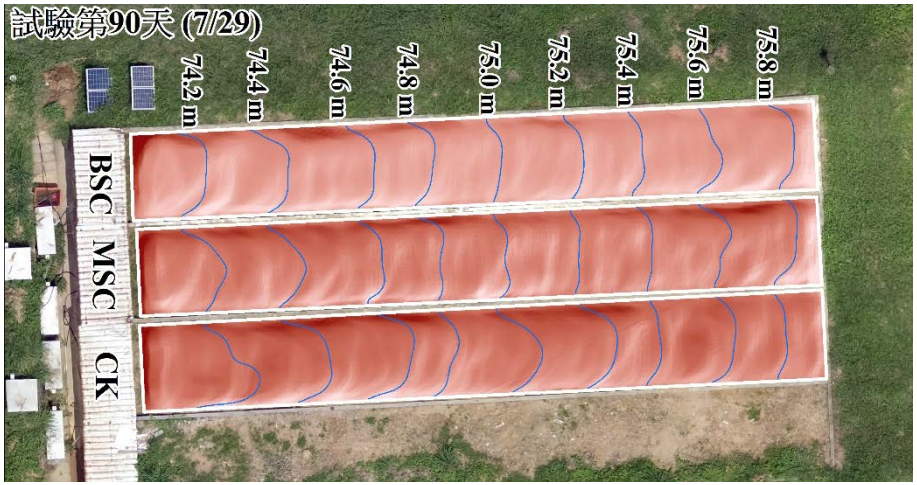


(h) 試驗第 76 天

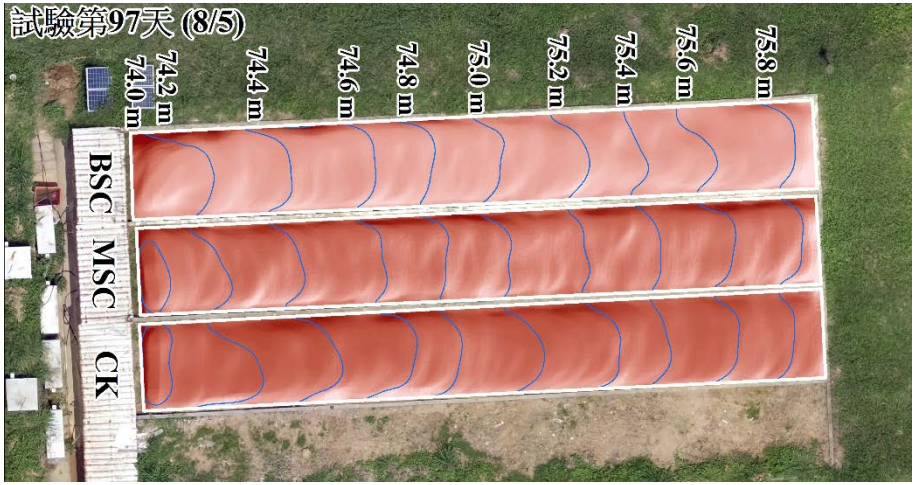
圖 2-24 各試驗區於不同試驗期間之高程變化圖(2)



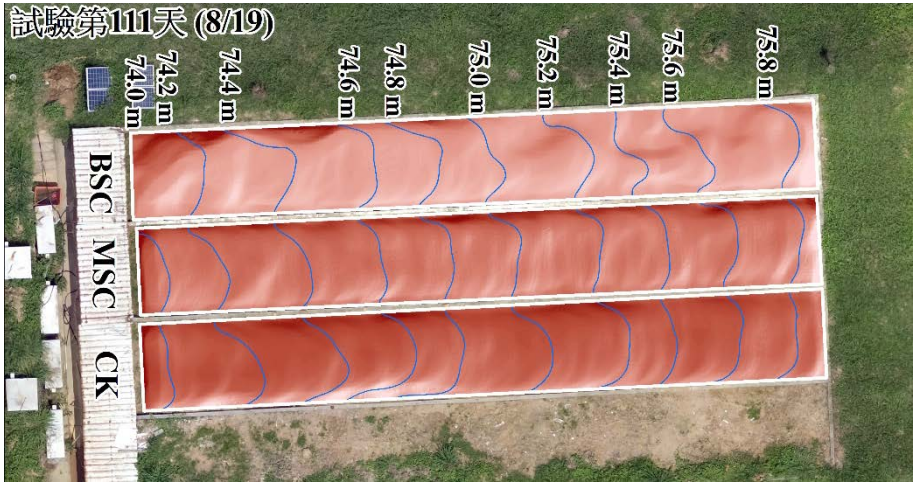
(i) 試驗第 83 天



(j) 試驗第 90 天

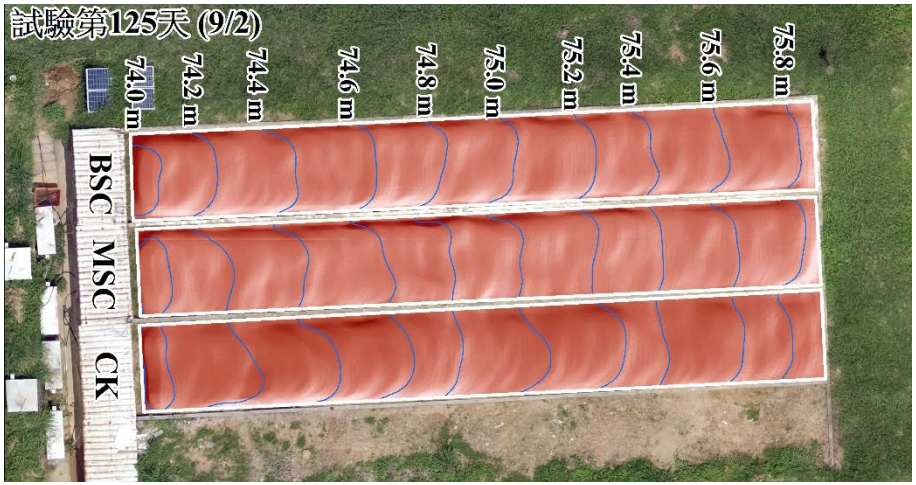


(k) 試驗第 97 天

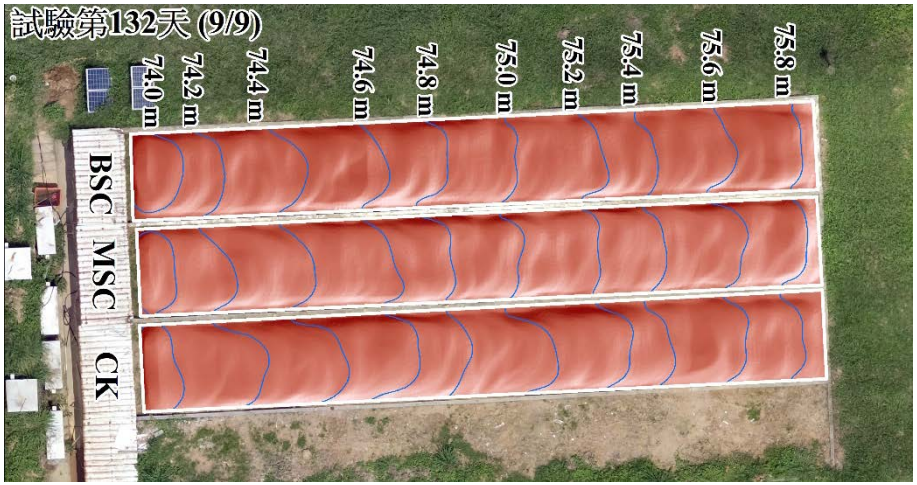


(l) 試驗第 111 天

圖 2-25 各試驗區於不同試驗期間之高程變化圖(3)

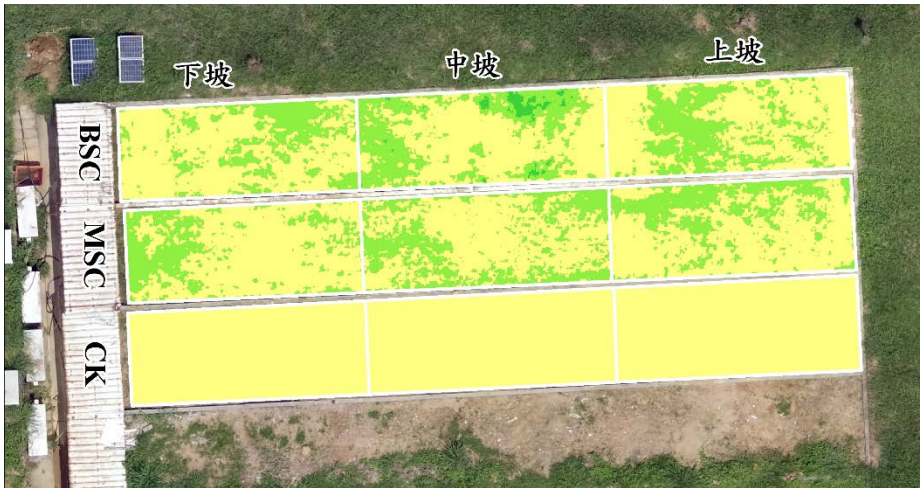


(m)試驗第 125 天

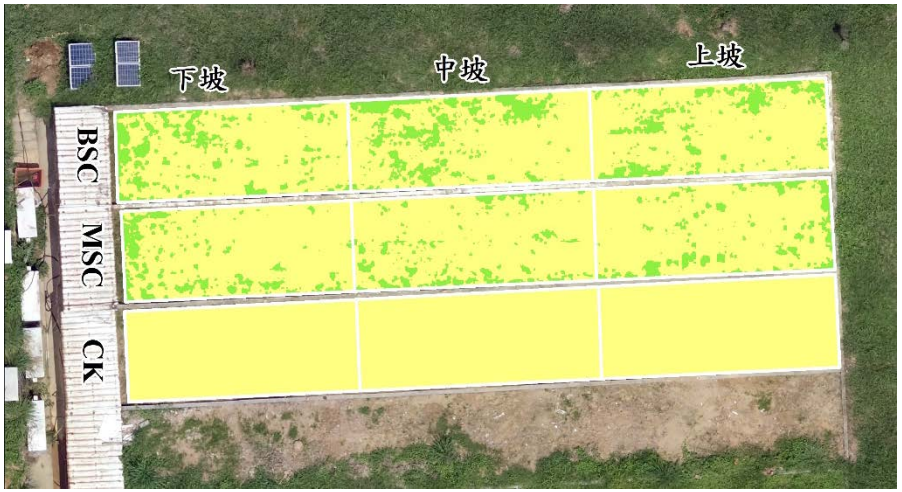


(n) 試驗第 132 天

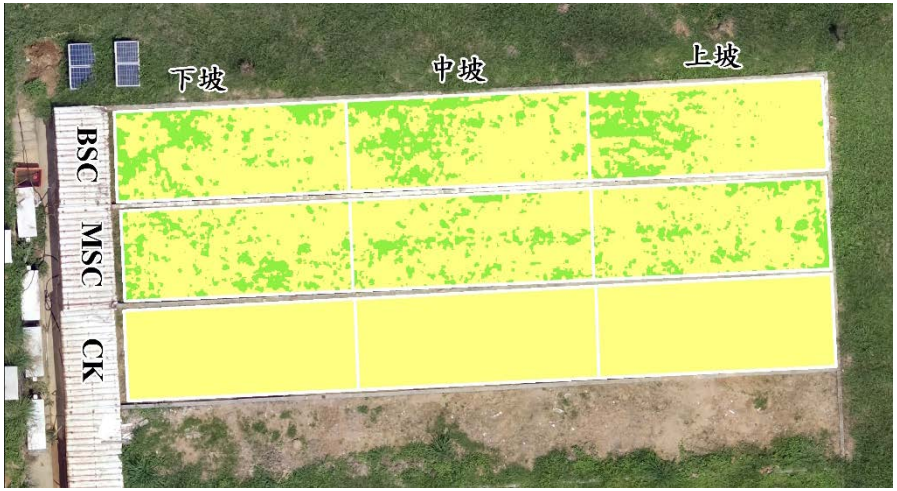
圖 2-26 各試驗區於不同試驗期間之高程變化圖(4)



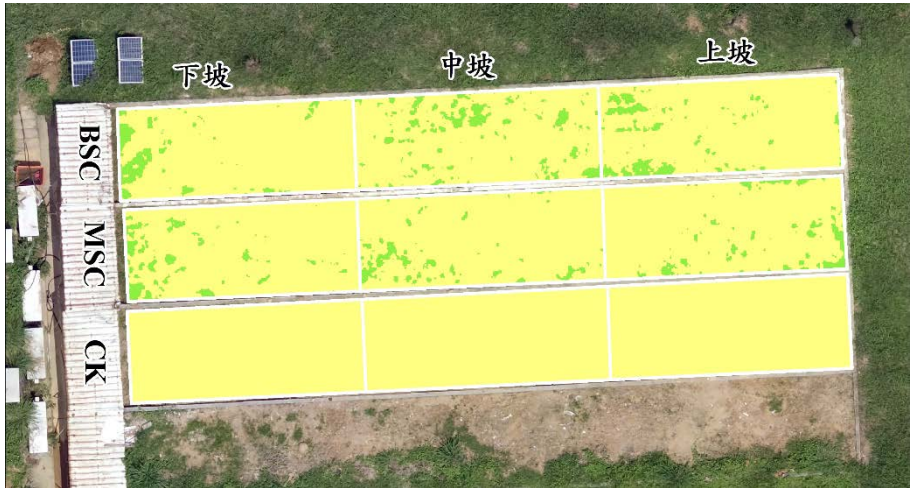
(a)試驗第 0 天



(b)試驗第 13 天



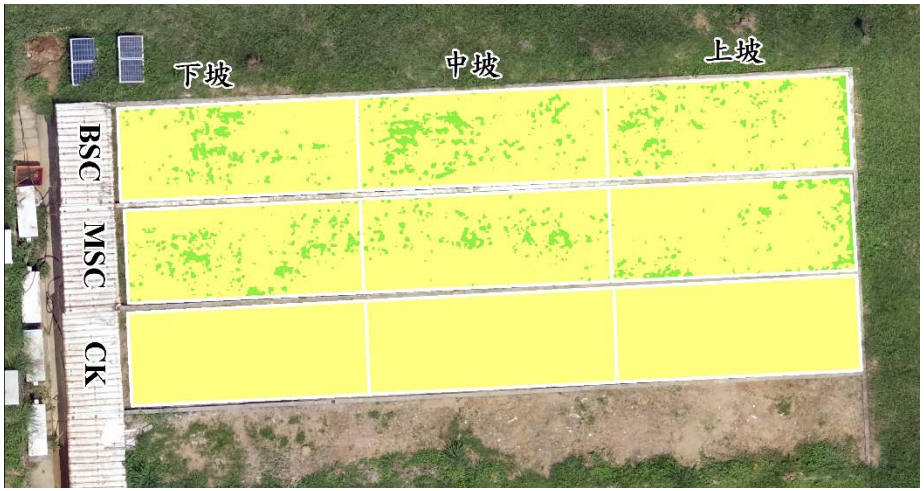
(c)試驗第 20 天



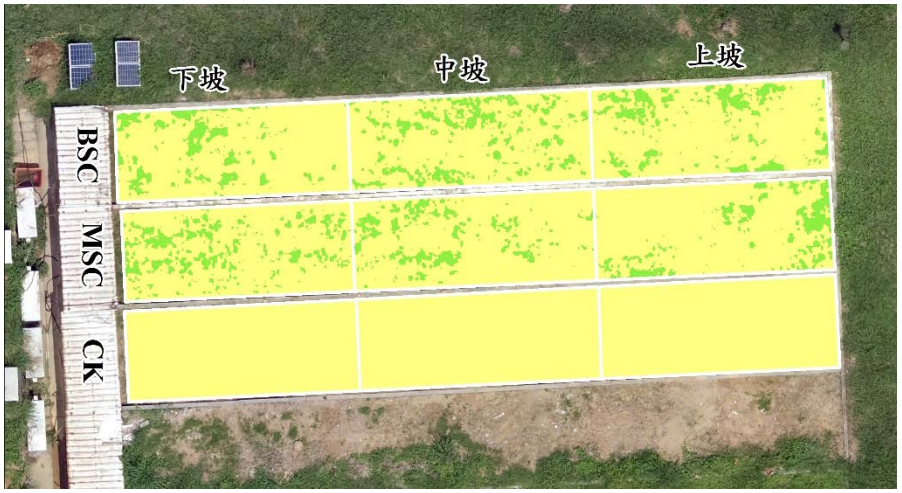
(d)試驗第 27 天

mNDVI=0(裸露地)　0.0 < mNDVI≦0.2　0.2 < mNDVI≦0.4　0.4 < mNDVI≦0.6　0.6 < mNDVI≦0.8　0.8 < mNDVI≦1.0

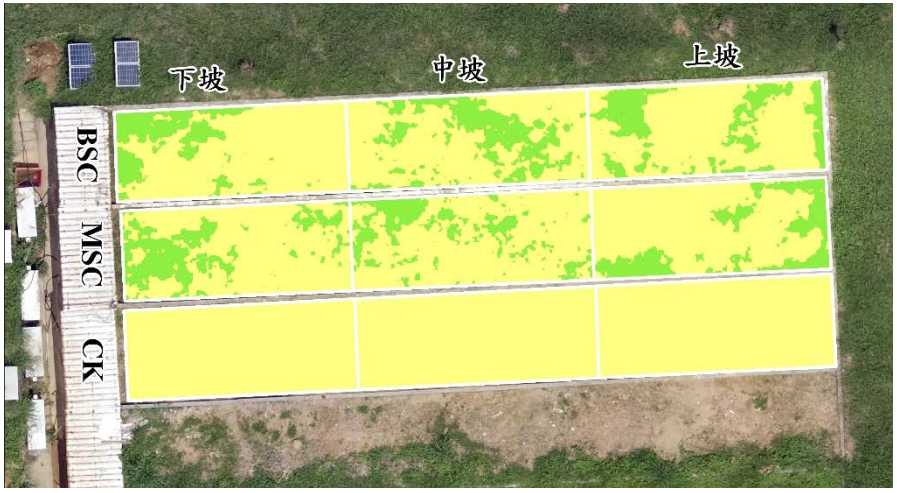
圖 2-27 各試驗區於不同試驗期間之 mNDVI 分析(1)



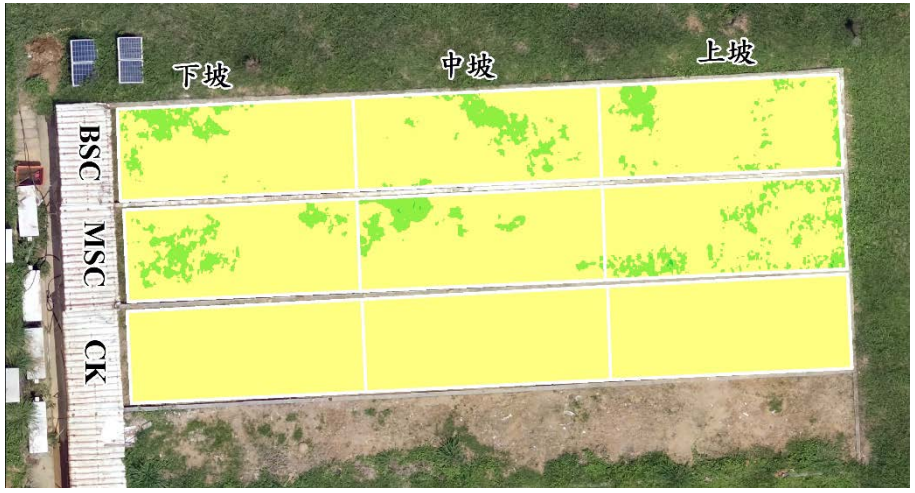
(e)試驗第 41 天



(f)試驗第 55 天



(g)試驗第 62 天



(h)試驗第 69 天

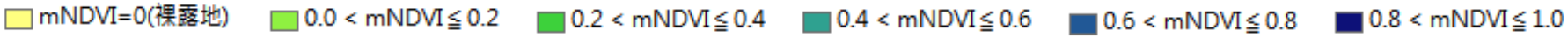
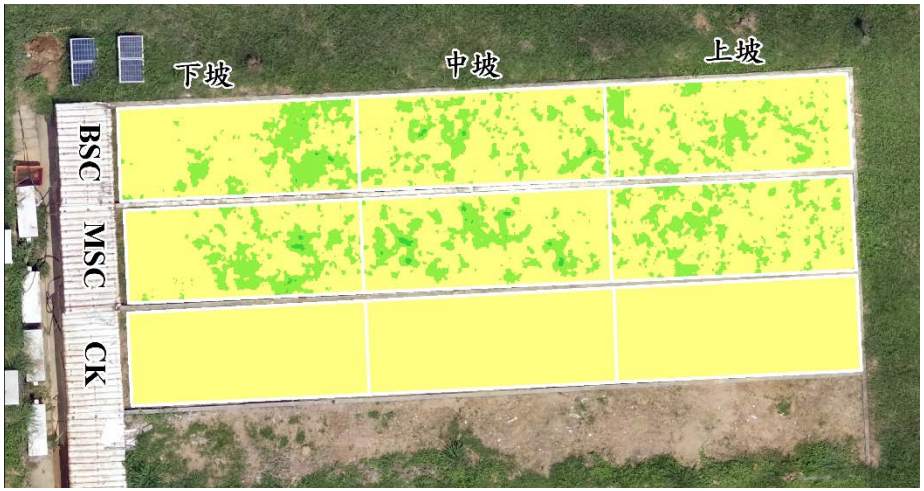
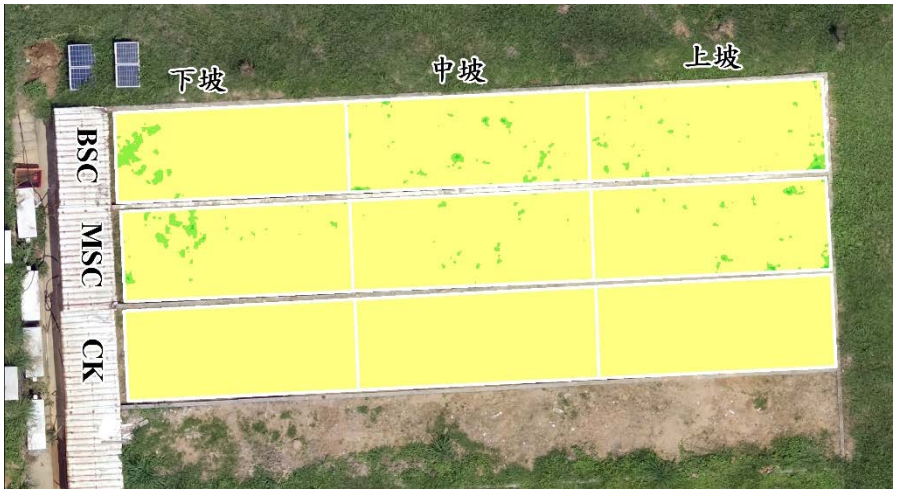


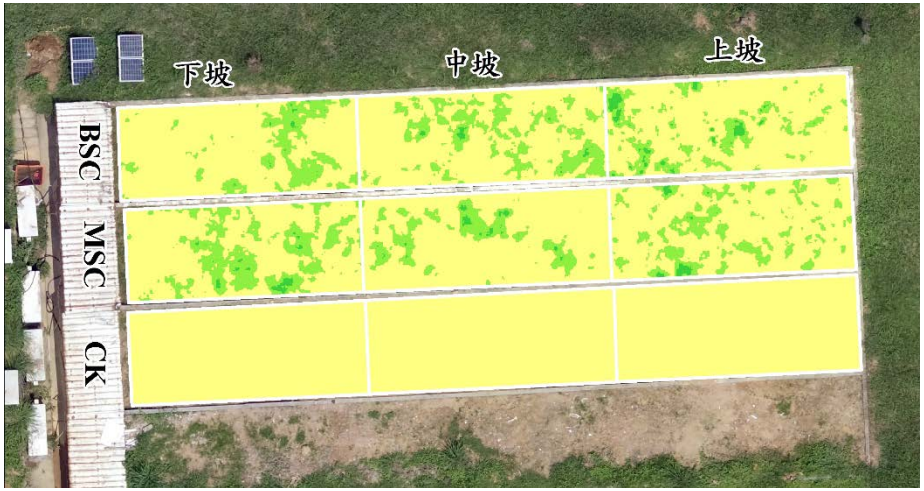
圖 2-28 各試驗區於不同試驗期間之 mNDVI 分析(2)



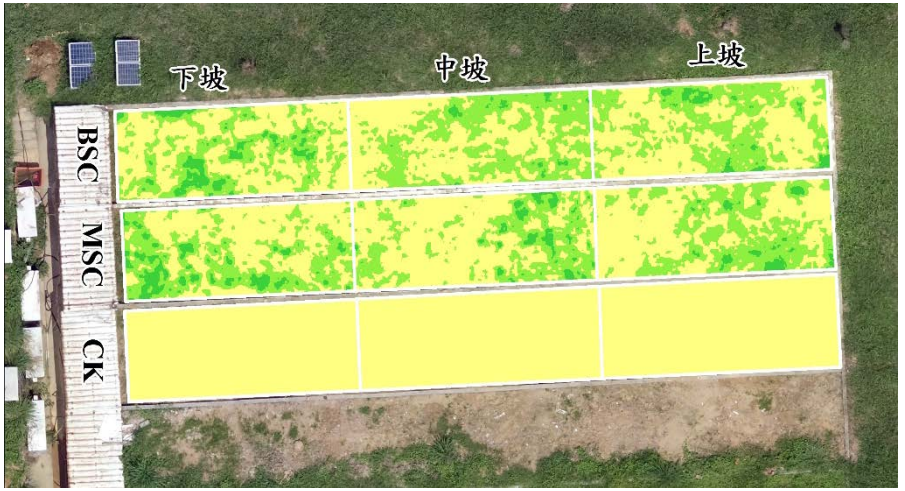
(i)試驗第 76 天



(j)試驗第 90 天



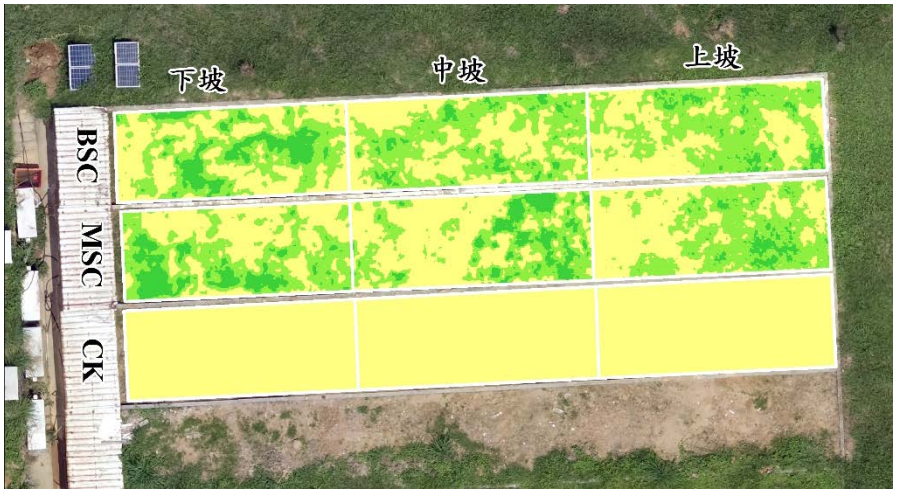
(k)試驗第 111 天



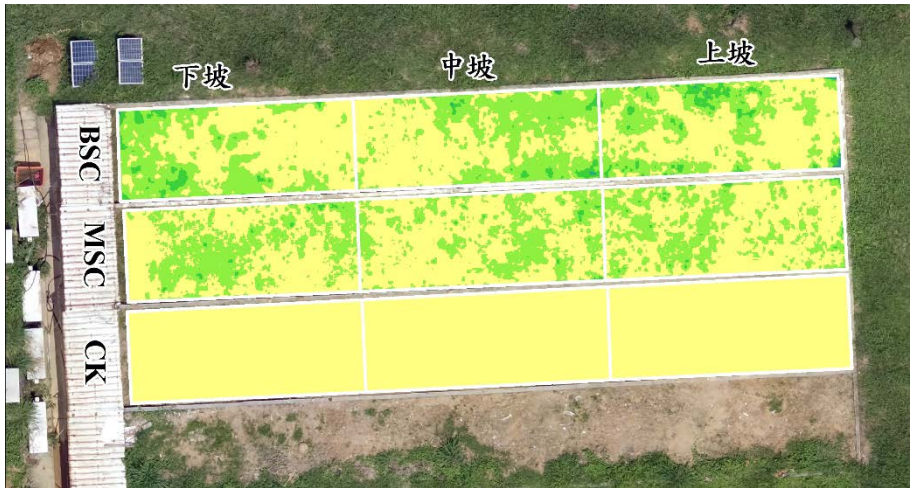
(l)試驗第 125 天

mNDVI=0(裸露地)　0.0 < mNDVI≦0.2　0.2 < mNDVI≦0.4　0.4 < mNDVI≦0.6　0.6 < mNDVI≦0.8　0.8 < mNDVI≦1.0

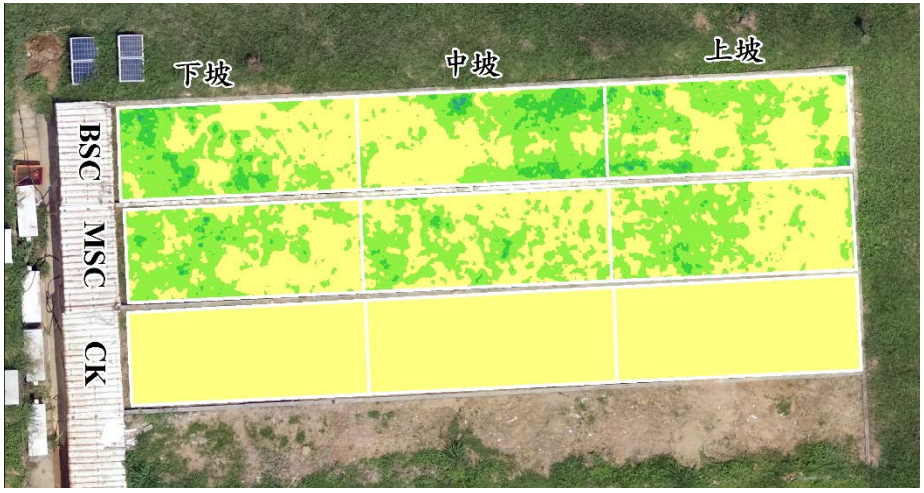
圖 2-29 各試驗區於不同試驗期間之 mNDVI 分析(3)



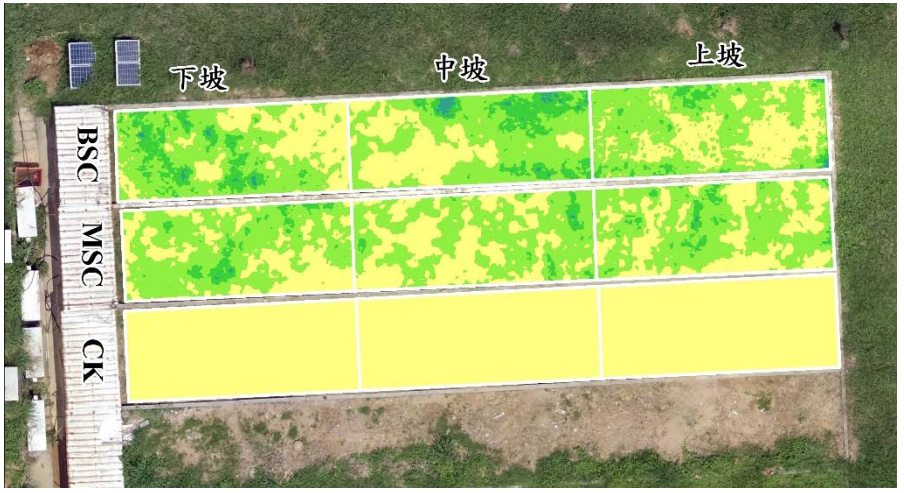
(m)試驗第 132 天



(n)試驗第 146 天



(o)試驗第 167 天



(p)試驗第 181 天

mNDVI=0(裸露地)　0.0 < mNDVI≦0.2　0.2 < mNDVI≦0.4　0.4 < mNDVI≦0.6　0.6 < mNDVI≦0.8　0.8 < mNDVI≦1.0

圖 2-30 各試驗區於不同試驗期間之 mNDVI 分析(4)

表 2-16 試驗第 0 天之 mNDVI 面積等級百分比與敷蓋面積統計表

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)	67.2	59.6	70.1	65.6	67.9	62.6	71.9	67.5
0.0 < mNDVI ≦ 0.2	32.78	36.9	29.9	33.2	32.1	37.4	28.1	32.5
0.2 < mNDVI ≦ 0.4	-	3.51	-	1.17	-	-	-	-
0.4 < mNDVI ≦ 0.6	-	-	-	-	-	-	-	-
0.6 < mNDVI ≦ 0.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0.8 < mNDVI ≦ 1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.03	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03
裸土面積(%)	67.2	59.6	70.1	65.6	67.9	62.6	71.9	67.5
覆蓋百分比(%)	32.8	40.4	29.9	34.4	32.1	37.4	28.1	32.5

表 2-17 試驗第 13 天之 mNDVI 等級百分比與敷蓋面積統計表

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)	83.1	78.4	80.0	80.5	86.4	88.3	85.7	86.8
0.0 < mNDVI ≦ 0.2	16.9	21.6	20.0	19.5	13.6	11.7	14.3	13.2
0.2 < mNDVI ≦ 0.4	-	-	-	-	-	-	-	-
0.4 < mNDVI ≦ 0.6	-	-	-	-	-	-	-	-
0.6 < mNDVI ≦ 0.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0.8 < mNDVI ≦ 1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
裸土面積(%)	83.1	78.4	80.0	80.5	86.4	88.3	85.7	86.8
覆蓋百分比(%)	16.9	21.6	20.0	19.5	13.6	11.7	14.3	13.2

表 2-18 試驗第 20 天之 mNDVI 等級百分比與敷蓋面積統計表

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)	77.7	73.5	75.0	75.4	81.8	83.7	79.4	81.6
0.0 < mNDVI ≦ 0.2	22.3	26.5	25.0	24.6	18.2	16.3	20.6	18.4
0.2 < mNDVI ≦ 0.4	-	-	-	-	-	-	-	-
0.4 < mNDVI ≦ 0.6	-	-	-	-	-	-	-	-
0.6 < mNDVI ≦ 0.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0.8 < mNDVI ≦ 1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
裸土面積(%)	77.7	73.5	75.0	75.4	81.8	83.7	79.4	81.6
覆蓋百分比(%)	22.3	26.5	25.0	24.6	18.2	16.3	20.6	18.4

表 2-19 試驗第 27 天之 mNDVI 面積等級百分比與敷蓋面積統計表

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)	91.9	90.2	92.4	91.5	93.1	94.3	92.9	93.4
0.0 < mNDVI ≦ 0.2	8.05	9.82	7.58	8.49	6.89	5.67	7.13	6.56
0.2 < mNDVI ≦ 0.4	-	-	-	-	-	-	-	-
0.4 < mNDVI ≦ 0.6	-	-	-	-	-	-	-	-
0.6 < mNDVI ≦ 0.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0.8 < mNDVI ≦ 1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
裸土面積(%)	91.9	90.2	92.4	91.5	93.1	94.3	92.9	93.4
覆蓋百分比(%)	8.05	9.82	7.58	8.49	6.89	5.67	7.13	6.56

表 2-20 試驗第 41 天之 mNDVI 等級百分比與敷蓋面積統計表

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)	89.9	88.5	91.3	89.9	91.1	92.8	89.7	91.2
0.0 < mNDVI ≦ 0.2	10.1	11.5	8.74	10.1	8.94	7.21	10.3	8.83
0.2 < mNDVI ≦ 0.4	-	-	-	-	-	-	-	-
0.4 < mNDVI ≦ 0.6	-	-	-	-	-	-	-	-
0.6 < mNDVI ≦ 0.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0.8 < mNDVI ≦ 1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
裸土面積(%)	89.9	88.5	91.3	89.9	91.1	92.8	89.7	91.2
覆蓋百分比(%)	10.1	11.5	8.74	10.1	8.94	7.21	10.3	8.83

表 2-21 試驗第 55 天之 mNDVI 等級百分比與敷蓋面積統計表

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)	84.8	83.3	87.1	85.1	87.3	88.5	84.4	86.7
0.0 < mNDVI ≦ 0.2	15.2	16.7	12.9	14.9	12.7	11.5	15.6	13.3
0.2 < mNDVI ≦ 0.4	-	-	-	-	-	-	-	-
0.4 < mNDVI ≦ 0.6	-	-	-	-	-	-	-	-
0.6 < mNDVI ≦ 0.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0.8 < mNDVI ≦ 1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
裸土面積(%)	84.8	83.3	87.1	85.1	87.3	88.5	84.4	86.7
覆蓋百分比(%)	15.2	16.7	12.9	14.9	12.7	11.5	15.6	13.3

表 2-22 試驗第 62 天之 mNDVI 面積等級百分比與敷蓋面積統計表

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)	75.3	72.7	78.3	75.4	76.5	79.3	74.2	76.6
0.0 < mNDVI ≦ 0.2	24.6	27.3	21.7	24.6	23.5	20.7	25.8	23.4
0.2 < mNDVI ≦ 0.4	0.02	-	-	0.01	-	-	-	-
0.4 < mNDVI ≦ 0.6	-	-	-	-	-	-	-	-
0.6 < mNDVI ≦ 0.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0.8 < mNDVI ≦ 1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02
裸土面積(%)	75.3	72.7	78.3	75.4	76.5	79.3	74.2	76.6
覆蓋百分比(%)	24.7	27.3	21.7	24.6	23.5	20.7	25.8	23.4

表 2-23 試驗第 69 天之 mNDVI 等級百分比與敷蓋面積統計表

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)	90.6	89.1	89.9	89.9	84.5	89.2	87.5	87.1
0.0 < mNDVI ≦ 0.2	9.35	10.9	10.1	10.1	15.3	10.7	12.5	12.8
0.2 < mNDVI ≦ 0.4	-	-	-	-	0.15	0.07	-	0.07
0.4 < mNDVI ≦ 0.6	-	-	-	-	-	-	-	-
0.6 < mNDVI ≦ 0.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0.8 < mNDVI ≦ 1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
裸土面積(%)	90.6	89.1	89.9	89.9	84.5	89.2	87.5	87.1
覆蓋百分比(%)	9.35	10.9	10.1	10.1	15.5	10.8	12.5	12.9

表 2-24 試驗第 76 天之 mNDVI 等級百分比與敷蓋面積統計表

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)	79.1	78.9	75.9	77.9	77.1	76.5	78.5	77.3
0.0 < mNDVI ≦ 0.2	21.0	20.8	23.9	21.9	22.9	22.6	21.1	22.2
0.2 < mNDVI ≦ 0.4	-	0.31	0.23	0.18	0.01	0.95	0.46	0.47
0.4 < mNDVI ≦ 0.6	-	-	-	-	-	-	-	-
0.6 < mNDVI ≦ 0.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0.8 < mNDVI ≦ 1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02
裸土面積(%)	79.1	78.9	75.9	77.9	77.1	76.5	78.5	77.3
覆蓋百分比(%)	21.0	21.1	24.1	22.1	22.9	23.5	21.5	22.7

表 2-25 試驗第 90 天之 mNDVI 等級百分比與敷蓋面積統計表

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)	96.2	95.6	94.8	95.5	96.4	98.0	94.8	96.4
0.0 < mNDVI ≦ 0.2	2.55	3.02	4.11	3.23	2.32	0.95	3.99	2.42
0.2 < mNDVI ≦ 0.4	0.18	0.35	-	0.18	0.21	-	0.11	0.10
0.4 < mNDVI ≦ 0.6	-	-	-	-	-	-	-	-
0.6 < mNDVI ≦ 0.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0.8 < mNDVI ≦ 1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
裸土面積(%)	97.2	96.6	95.8	96.6	97.4	99.0	95.9	97.4
覆蓋百分比(%)	2.76	3.41	4.15	3.44	2.56	0.96	4.14	2.55

表 2-26 試驗第 111 天之 mNDVI 面積等級百分比與敷蓋面積統計表

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)	81.6	77.8	82.7	80.7	79.9	85.0	72.7	79.2
0.0 < mNDVI ≦ 0.2	15.86	21.6	17.0	18.1	19.0	14.0	26.0	19.7
0.2 < mNDVI ≦ 0.4	2.52	0.58	0.32	1.14	1.06	0.97	1.22	1.08
0.4 < mNDVI ≦ 0.6	-	-	-	-	-	-	-	-
0.6 < mNDVI ≦ 0.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0.8 < mNDVI ≦ 1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02
裸土面積(%)	81.6	77.8	82.7	80.7	79.9	85.0	72.7	79.2
覆蓋百分比(%)	18.38	22.2	17.3	19.3	20.1	15.0	27.3	20.8

表 2-27 試驗第 125 天之 mNDVI 等級百分比與敷蓋面積統計表

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)	56.6	54.4	57.0	56.0	58.2	63.5	53.5	58.4
0.0 < mNDVI ≦ 0.2	40.7	45.0	35.6	40.4	39.3	32.5	38.0	36.6
0.2 < mNDVI ≦ 0.4	4.02	1.92	8.75	4.90	3.88	5.37	9.85	6.37
0.4 < mNDVI ≦ 0.6	-	-	-	-	-	-	-	-
0.6 < mNDVI ≦ 0.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0.8 < mNDVI ≦ 1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.07	0.06
裸土面積(%)	55.9	53.7	56.2	55.3	57.4	62.6	52.8	57.6
覆蓋百分比(%)	44.1	46.3	43.8	44.7	42.6	37.4	47.2	42.4

表 2-28 試驗第 132 天之 mNDVI 等級百分比與敷蓋面積統計表

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)	45.7	45.3	46.6	45.9	49.6	55.4	44.3	49.8
0.0 < mNDVI ≦ 0.2	47.9	48.2	37.2	44.4	43.9	30.8	39.81	38.2
0.2 < mNDVI ≦ 0.4	5.37	5.51	15.15	8.68	5.62	12.75	14.8	11.07
0.4 < mNDVI ≦ 0.6	-	-	-	-	-	-	-	-
0.6 < mNDVI ≦ 0.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0.8 < mNDVI ≦ 1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.06	0.06	0.08	0.07	0.06	0.07	0.08	0.07
裸土面積(%)	46.2	45.8	47.1	46.3	50.0	56.0	44.8	50.3
覆蓋百分比(%)	53.8	54.2	52.9	53.7	50.0	44.0	55.2	49.7

表 2-29 試驗第 146 天之 mNDVI 面積等級百分比與敷蓋面積統計表

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)	57.8	54.6	57.0	56.5	64.6	66.1	59.4	63.4
0.0 < mNDVI ≦ 0.2	35.6	42.5	37.7	38.6	34.2	33.0	39.54	35.6
0.2 < mNDVI ≦ 0.4	5.95	2.71	4.97	4.54	1.15	0.72	0.74	0.87
0.4 < mNDVI ≦ 0.6	0.54	0.13	0.12	0.26	-	-	-	-
0.6 < mNDVI ≦ 0.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0.8 < mNDVI ≦ 1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
裸土面積(%)	57.8	54.6	57.1	56.5	64.6	66.2	59.6	63.5
覆蓋百分比(%)	42.2	45.4	42.9	43.5	35.4	33.8	40.4	36.5

表 2-30 試驗第 167 天之 mNDVI 等級百分比與敷蓋面積統計表

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)	49.4	46.7	48.6	48.2	56.5	58.7	51.1	55.4
0.0 < mNDVI ≦ 0.2	45.1	41.1	41.7	42.6	43.2	40.7	47.73	43.9
0.2 < mNDVI ≦ 0.4	5.59	13.4	10.0	9.65	1.39	1.69	2.08	1.72
0.4 < mNDVI ≦ 0.6	0.42	0.44	0.15	0.34	0.01	0.02	0.13	0.05
0.6 < mNDVI ≦ 0.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0.8 < mNDVI ≦ 1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.06	0.08	0.07	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05
裸土面積(%)	49.2	45.9	48.4	47.8	55.9	58.1	50.6	54.9
覆蓋百分比(%)	50.8	54.1	51.6	52.2	44.1	41.9	49.4	45.1

表 2-31 試驗第 181 天之 mNDVI 等級百分比與敷蓋面積統計表

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)	35.0	30.7	33.2	32.9	39.1	43.4	35.3	39.2
0.0 < mNDVI ≦ 0.2	59.2	51.5	50.5	53.7	55.7	53.3	58.4	55.8
0.2 < mNDVI ≦ 0.4	6.39	15.8	15.6	12.6	5.07	3.15	6.20	4.81
0.4 < mNDVI ≦ 0.6	0.52	1.89	0.67	1.03	0.09	0.08	0.13	0.10
0.6 < mNDVI ≦ 0.8	-	-	-	-	-	-	-	-
0.8 < mNDVI ≦ 1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
mNDVI 平均	0.08	0.11	0.10	0.10	0.07	0.06	0.08	0.07
裸土面積(%)	34.6	30.7	33.2	32.8	39.1	43.4	35.3	39.3
覆蓋百分比(%)	65.4	69.3	66.8	67.2	60.9	56.6	64.7	60.7

(五) 微藻改良土壤性質

(一)土壤含水量與土壤溫度

沖蝕試驗前一個月進行藻類培養，而試驗期間 (5/1 - 10/31) 每隔一週 (每週五)以 TDR 測定各試驗區之土壤含水量及土壤溫度 (每次需隨機選取三處以上測定)，並收集微藻培養及沖蝕試驗期間 (4/1~10/31)之降雨資料，其成果如圖 2-31 及圖 2-32 所示。結果顯示，在乾燥無雨的天氣且未有額外水源補充的情況下，空白對照組 CK 之土壤含水量損失相對快速，若種植微藻則可顯著保持土壤的含水量，其中 BSC 及 MSC 分別可保持約 19.2 % - 43.9 %及14.5 % - 39.2 %的含水量，且在環境呈現高溫的情況下，BSC 及 MSC 亦可分別有效降低 0.6 ℃ - 2.8 ℃及 0.5 ℃ - 2.4 ℃之土壤溫度。

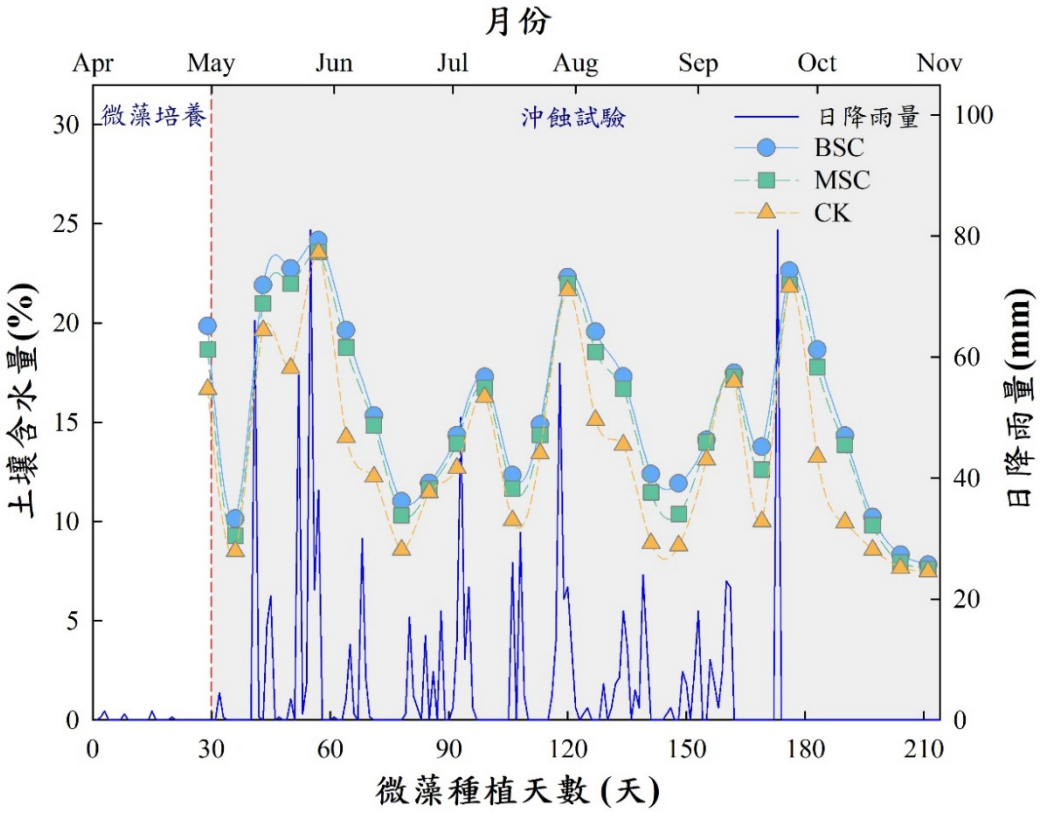


圖 2-31 不同種植天數下之土壤含水量與降雨量變化圖

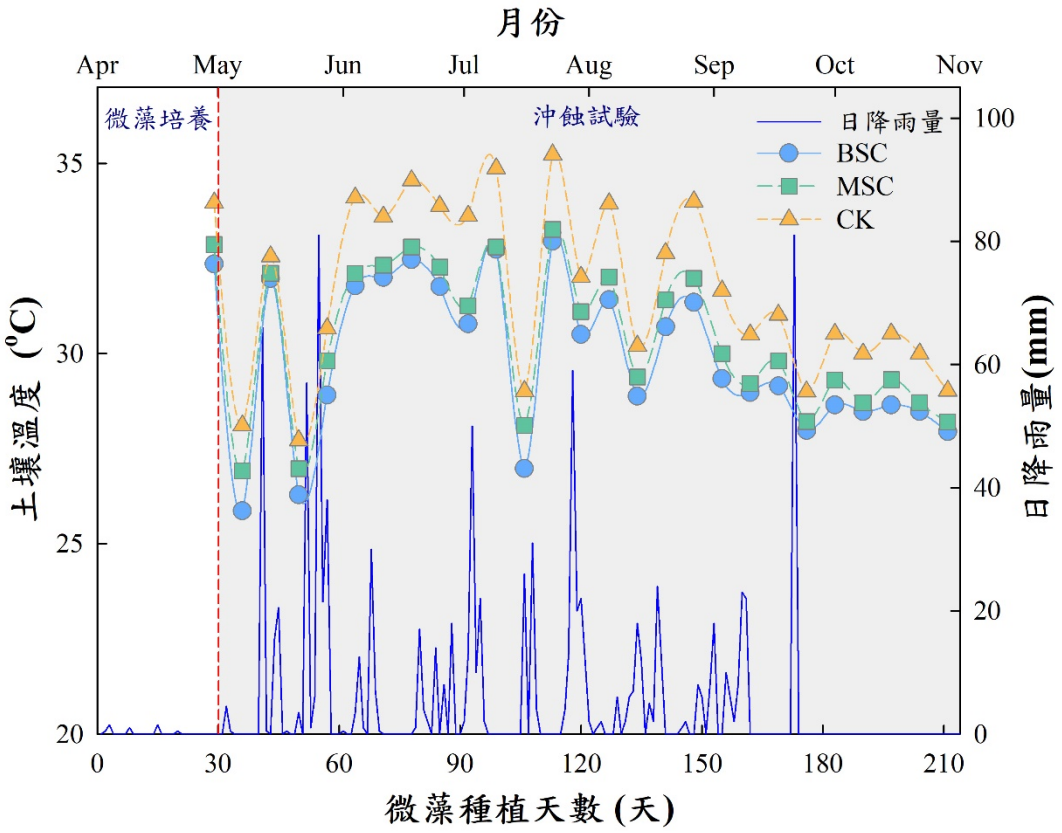


圖 2-32 不同種植天數下之土壤溫度與降雨量變化圖

(二)土壤總體密度

本試驗不同處理之土壤總體密度於試驗初中後期變化如圖 2-33 所示。由於在試驗開始前，試驗區已進行過耕犁鬆土作業，因此試驗前 (4/1)之土壤總體密度較低，僅有 1.27 ± 0.03 g/cm^3 (如表 2-7 所示)，而各處理於試驗初期之總體密度皆有提升，推測可能因培養微藻期間，每週皆會施肥 (各試區皆施灑相同的水量)，在受到施灑的水滴撞擊下，總體密度有所增加；各處理之表土於試驗開始後受到雨滴撞擊或逕流水淋洗等形成自然夯實，因此總體密度皆於中期時有顯著增加 4.4 %-6.8 %，至後期時則無顯著變化，其中施用 BSC 及 MSC 則僅增加 1.6 %-2.2 %。由表 2-32 可發現，試驗中期及後期時各處理之下坡相較中坡及上坡低 2.10 % - 4.20 %，且以圖 2-25(k)試驗第 97 天與圖 2-23(b)

試驗第 0 天之地形變化，推測可能是因下坡表土被掏刷後，下方土壤密度較低的關係。

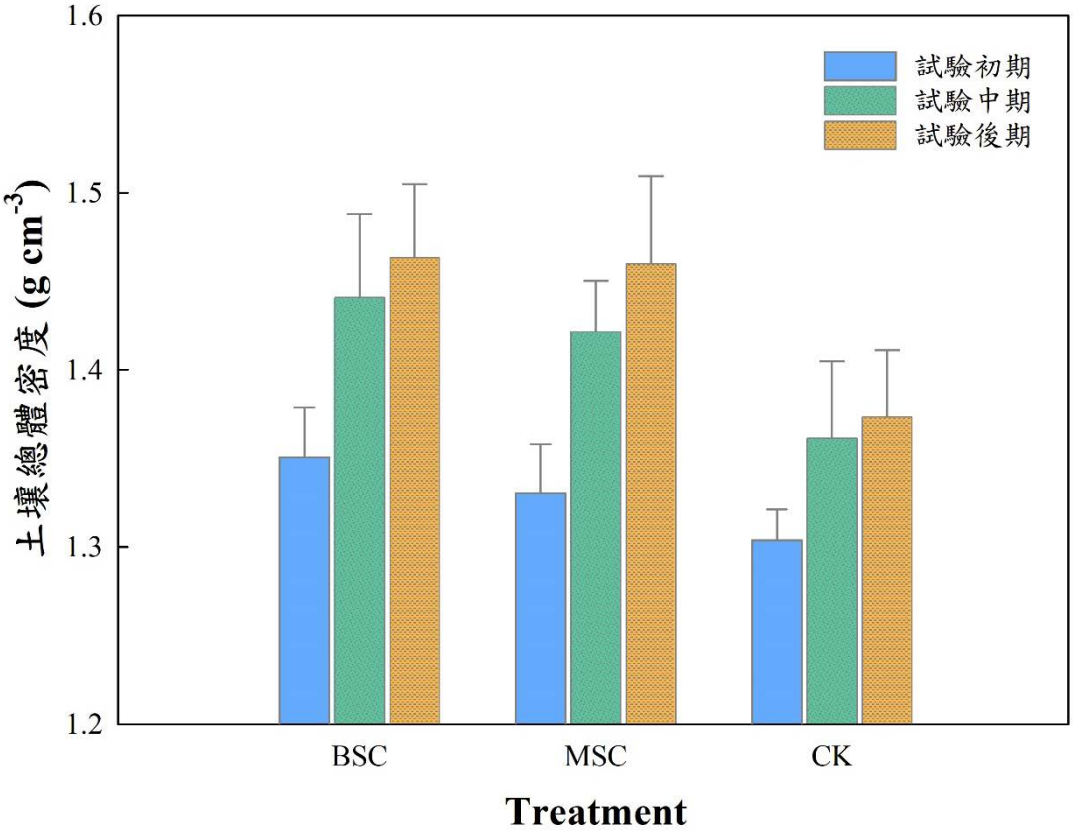


圖 2-33 不同處理之土壤總體密度於試驗初中後期之變化圖

表 2-32 不同處理之土壤總體密度於上中下坡之變化表

處理	試區位置	總體密度 BD (g/cm^3)					
		初期		中期		後期	
BSC	上坡	1.33 ± 0.02		1.45 ± 0.05		1.49 ± 0.04	
	中坡	1.34 ± 0.02	1.35 ± 0.03	1.46 ± 0.04	1.44 ± 0.05	1.47 ± 0.05	1.46 ± 0.04
	下坡	1.38 ± 0.02		1.40 ± 0.04		1.43 ± 0.03	
MSC	上坡	1.32 ± 0.02		1.44 ± 0.03		1.46 ± 0.04	
	中坡	1.33 ± 0.02	1.33 ± 0.03	1.44 ± 0.00	1.42 ± 0.03	1.47 ± 0.03	1.45 ± 0.05
	下坡	1.34 ± 0.05		1.39 ± 0.03		1.43 ± 0.05	
CK	上坡	1.31 ± 0.01		1.37 ± 0.05		1.38 ± 0.05	
	中坡	1.30 ± 0.03	1.30 ± 0.02	1.37 ± 0.05	1.36 ± 0.04	1.39 ± 0.03	1.37 ± 0.04
	下坡	1.30 ± 0.02		1.34 ± 0.04		1.35 ± 0.05	

(三)土壤有機碳

本試驗不同處理之土壤有機碳於試驗初中後期變化如圖 2-34 所示。在培養微藻期間，因施加化肥的緣故，試驗初期之 BSC 及 MSC 土壤有機碳顯著提高了約 40 %；試驗中期時，隨 6 月初、7 月初時有追肥，但在受到 5 月的梅雨季及 7 月的午後對流雨的影響下，試區受到雨水的掏刷作用或雨水入滲的淋洗作用，導致 BSC、MSC 及 CK 仍損失了 8.46 %、15.0% 及 8.37 % 之土壤有機碳；而試驗後期時，8 月初重新補微藻及施灑化肥，9 月初及 10 月初則有追肥，在降雨較不集中的情況下，BSC 及 MSC 的土壤有機碳顯著增加了 18.2 %及 23.9 %。而試驗中期及後期時，BSC 及 MSC 下坡與總體密度情況相同，土壤有機碳皆因土壤沖蝕而減少。

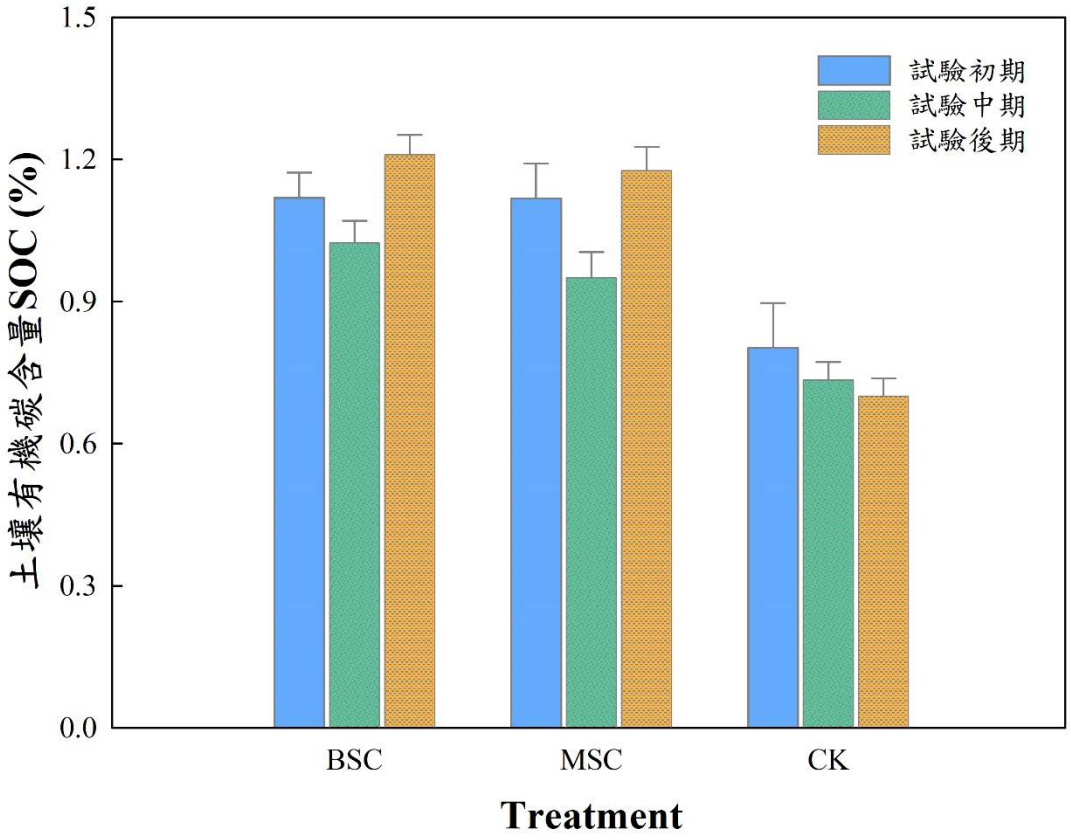


圖 2-34 不同處理之土壤有機碳於試驗初中後期之變化圖

表 2-33 不同處理之土壤有機碳於上中下坡之變化表

處理	試區位置	有機碳 OC (%)					
		初期		中期		後期	
BSC	上坡	1.11 ± 0.09		1.07 ± 0.03		1.24 ± 0.03	
	中坡	1.14 ± 0.02	1.12 ± 0.05	1.01 ± 0.04	1.02 ± 0.05	1.21 ± 0.05	1.21 ± 0.04
	下坡	1.11 ± 0.03		0.99 ± 0.03		1.18 ± 0.03	
MSC	上坡	1.12 ± 0.03		0.98 ± 0.04		1.20 ± 0.04	
	中坡	1.12 ± 0.10	1.12 ± 0.07	0.94 ± 0.04	0.95 ± 0.05	1.18 ± 0.03	1.18 ± 0.05
	下坡	1.12 ± 0.11		0.93 ± 0.09		1.15 ± 0.05	
CK	上坡	0.79 ± 0.15		0.75 ± 0.05		0.76 ± 0.03	
	中坡	0.80 ± 0.03	0.80 ± 0.10	0.73 ± 0.01	0.73 ± 0.04	0.74 ± 0.05	0.76 ± 0.04
	下坡	0.82 ± 0.11		0.72 ± 0.05		0.78 ± 0.04	

(四)土壤導水度

本試驗不同處理之土壤導水度於試驗初中後期變化如圖 2-35 所示。由於培養微藻前表土已耕犁鬆土過，因此試驗前之土

壤導水度可達到 7.24 ± 0.15 mm/hr (如表 2-7 所示)；試驗前施加化肥造成總體密度提高，進而使 BSC、MSC 及 CK 之導水度顯著降低 69.1 %、59.7 %及 27.8 %；隨著沖蝕試驗開始後，土壤總體密度的增加，進而導致導水度亦隨之降低，尤其是有微藻覆蓋處。

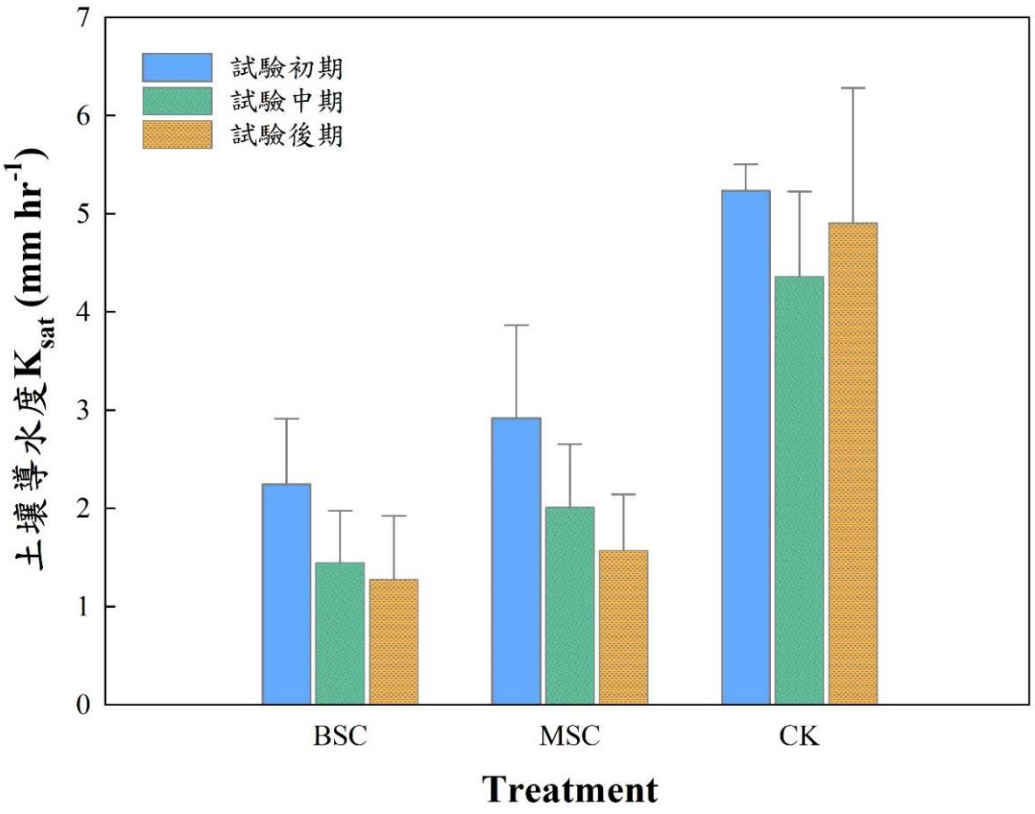


圖 2-35 不同處理之土壤導水度於試驗初中後期之變化圖

表 2-34 不同處理之土壤導水度於試驗初中後期之變化表

處理	試區位置	K_{sat} (mm/hr) 初期		中期		後期	
BSC	上坡	3.01 ± 0.45		1.93 ± 0.43		1.54 ± 0.35	
	中坡	1.94 ± 0.56	2.24 ± 0.67	1.53 ± 0.57	1.45 ± 0.53	1.75 ± 0.25	1.28 ± 0.65
	下坡	1.78 ± 0.38		0.88 ± 0.63		0.54 ± 0.54	
MSC	上坡	3.37 ± 0.33		2.02 ± 0.35		1.74 ± 0.65	
	中坡	2.65 ± 0.42	2.92 ± 0.95	1.88 ± 0.23	2.01 ± 0.64	1.43 ± 0.61	1.57 ± 0.57
	下坡	2.73 ± 0.41		2.14 ± 0.15		1.54 ± 0.39	
CK	上坡	5.47 ± 0.59		5.32 ± 0.45		6.43 ± 0.29	
	中坡	4.94 ± 0.34	5.23 ± 0.27	4.12 ± 0.61	4.36 ± 0.87	4.53 ± 0.53	4.91 ± 1.37
	下坡	5.29 ± 0.31		3.64 ± 0.49		3.76 ± 0.52	

(五)質地

試驗初期、中期及後期時，不同處理於上、中及下坡之土壤質地變化如表 2-35 所示。試驗結果顯示，在試驗期間，添加微藻後不會改變土壤的質地，且降雨後所造成的地表掏刷作用亦不會改變土壤質地。

表 2-35 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	土壤質地		
		初期	中期	後期
BSC	上坡	Clay Loam	Clay Loam	Clay Loam
	中坡	Clay Loam	Clay Loam	Clay Loam
	下坡	Clay Loam	Clay Loam	Clay Loam
MSC	上坡	Clay Loam	Clay Loam	Clay Loam
	中坡	Clay Loam	Clay Loam	Clay Loam
	下坡	Clay Loam	Clay Loam	Clay Loam
CK	上坡	Clay Loam	Clay Loam	Clay Loam
	中坡	Clay Loam	Clay Loam	Clay Loam
	下坡	Clay Loam	Clay Loam	Clay Loam

(六)土壤反應

本試驗不同處理之土壤 pH 於試驗初中後期變化如圖 2-36 所示。本試驗之試區土壤 pH 為 5.55 ± 0.04 (如表 2-7 所示)，屬於中酸性土壤，但因在培養微藻過程時定期會添加化肥，因此試驗初期時 BSC 及 MSC 處理之土壤 pH 下降約 7.55 %及 8.33 %；試驗中期時，因 6 月初、7 月初時則再進行追肥，導致 BSC 及 MSC 之土壤 pH 顯著下降約 14.1 %及 14.7 %，土壤呈極強酸性；而試驗後期，於 8 月初時重新補灑微藻及化肥，9 月初及 10 月初時則亦有追肥,BSC 及 MSC 之土壤 pH 顯著下降約 24.6 %及 25.1 %，土壤已呈極酸性，此現象顯示，若僅施用微藻保

護裸露地且為長期使用，最終可能會導致土壤酸化，且不利於不耐酸植物生長。由於添加化肥的緣故，在發生強降雨事件時，上坡和中坡之化肥可會隨逕流帶至下坡，因此下坡之土壤 pH 相對較低。

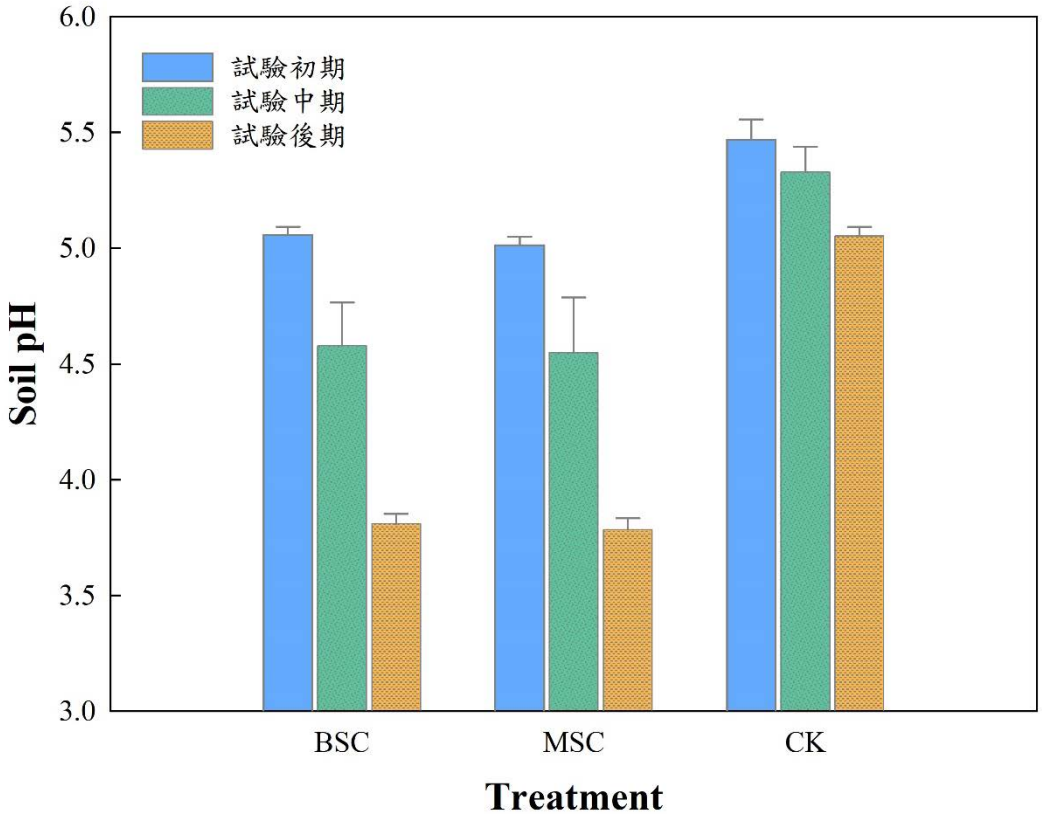


圖 2-36 不同處理之土壤 pH 於試驗初中後期之變化圖

表 2-36 不同處理之土壤 pH 於試驗初中後期之變化表

處理	試區位置	pH					
		初期		中期		後期	
BSC	上坡	5.10 ± 0.02		4.79 ± 0.03		3.92 ± 0.04	
	中坡	5.05 ± 0.02	5.06 ± 0.04	4.56 ± 0.12	4.58 ± 0.19	3.82 ± 0.05	3.81 ± 0.04
	下坡	5.02 ± 0.01		4.39 ± 0.06		3.69 ± 0.03	
MSC	上坡	5.01 ± 0.03		4.75 ± 0.01		3.85 ± 0.04	
	中坡	5.03 ± 0.06	5.01 ± 0.04	4.66 ± 0.02	4.55 ± 0.24	3.86 ± 0.03	3.78 ± 0.05
	下坡	5.00 ± 0.02		4.23 ± 0.01		3.64 ± 0.05	
CK	上坡	5.41 ± 0.06		5.39 ± 0.01		5.06 ± 0.05	
	中坡	5.47 ± 0.07	5.47 ± 0.09	5.41 ± 0.03	5.33 ± 0.11	5.11 ± 0.03	5.05 ± 0.04
	下坡	5.53 ± 0.11		5.19 ± 0.02		4.99 ± 0.05	

(七)團粒穩定度

本試驗不同處理之土壤團粒穩定度於試驗初中後期變化如圖 2-37 所示。Trakooyingcharoen et al. (2012) 指出土壤團粒穩定度與團粒粒徑主要取決於土壤有機碳含量；若土壤有機質分解快速或流失，不利於土壤團粒化之形成 (Neris et al., 2012；郭，2004)，而相反則，有機質高的土壤顆粒間的吸引力較高，形成的土壤構造不易被破壞。試驗初期時，受到 BSC 及 MSC 施用化肥的緣故，使土壤有機質提高進而促使團粒化的形成，使土壤團粒穩定度顯著提高 12.7％- 15.9％；但在試驗中期時，試區受到雨水與逕流的侵蝕下，導致之土壤有機質流失，不利於土壤團粒化，導致 BSC、MSC 及 CK 之土壤團粒度皆顯著下降 4.9％、6.8％及 3.5％；而試驗後期時，因 8 月初重新補微藻及施灑化肥，9 月初及 10 月初有追肥，且在降雨較不連續的情況下，BSC 及 MSC 的土壤有機質有所增加，指使土壤團粒度提高 8.8％及 11.3％。而試驗中期及後期時，BSC 及 MSC 下坡受到土壤沖蝕的影響相較為嚴重，在有機質流失較多的情況下，土壤團粒穩定度相較亦較低。

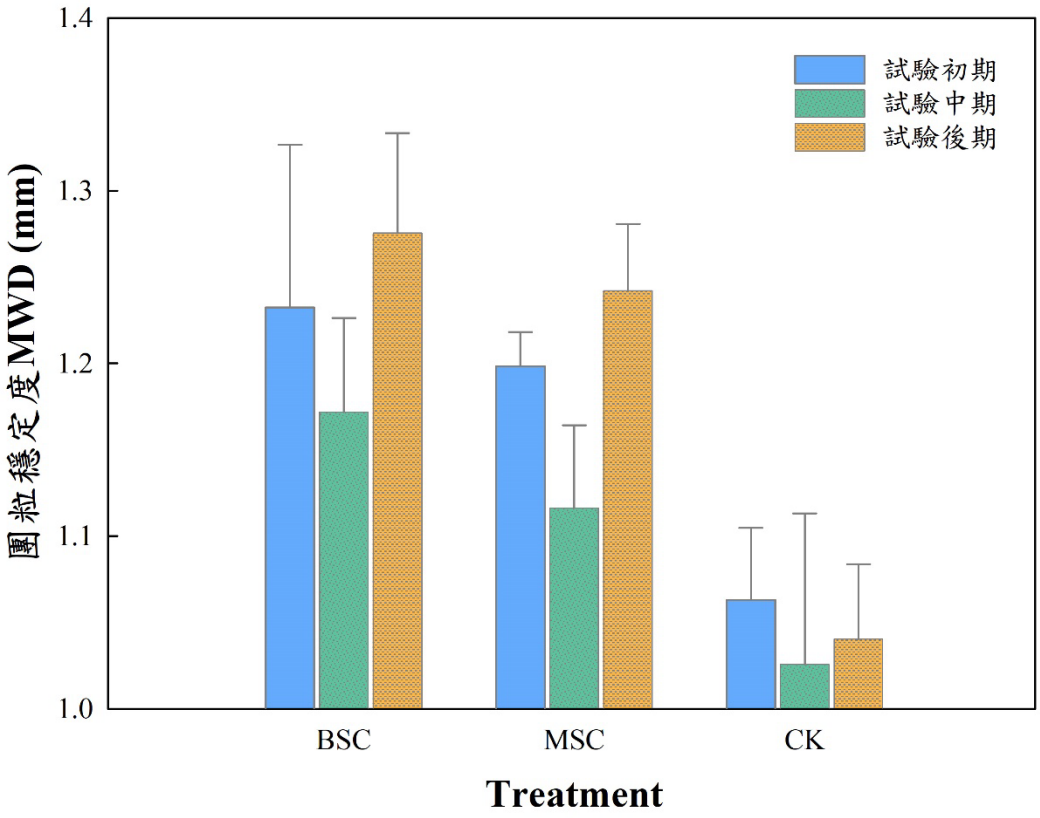


圖 2-37 不同處理之團粒穩定度於試驗初中後期之變化圖

表 2-37 不同處理之團粒穩定度於試驗初中後期之變化表

處理	試區位置	團粒穩定度 MWD (mm)					
		初期		中期		後期	
BSC	上坡	1.33 ± 0.04		1.23 ± 0.04		1.34 ± 0.04	
	中坡	1.23 ± 0.01	1.23 ± 0.09	1.14 ± 0.12	1.17 ± 0.07	1.25 ± 0.04	1.28 ± 0.06
	下坡	1.14 ± 0.12		1.14 ± 0.07		1.24 ± 0.04	
MSC	上坡	1.22 ± 0.04		1.16 ± 0.07		1.29 ± 0.06	
	中坡	1.20 ± 0.11	1.20 ± 0.07	1.13 ± 0.15	1.12 ± 0.06	1.22 ± 0.06	1.24 ± 0.08
	下坡	1.18 ± 0.04		1.06 ± 0.04		1.22 ± 0.04	
CK	上坡	1.02 ± 0.15		1.08 ± 0.11		1.03 ± 0.04	
	中坡	1.10 ± 0.13	1.06 ± 0.09	1.07 ± 0.04	1.03 ± 0.11	1.00 ± 0.13	1.04 ± 0.06
	下坡	1.08 ± 0.04		0.93 ± 0.14		1.09 ± 0.04	

(八)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 2-38 所示。由於培養微藻前須耕犁鬆土，因此試驗前為土壤最鬆散的時候，其土壤硬度僅有 16.4 ± 0.07 mm (如表 2-7 所示)。試驗初期時，BSC 及 MSC 之微藻覆蓋於表土上，形成結皮，致使土壤硬度增加約 46.1 %及 27.1 %；而試驗中期時，因受到連續強降雨的影響，致使覆蓋土壤表層的微藻受到雨水及逕流的掏刷，BSC 及 MSC 之土壤硬度下降約 15.7 %及 9.30 %；而試驗後期，再重新補微藻及追肥下，使土壤硬度又顯著提高 15.4 %及 15.6 %。

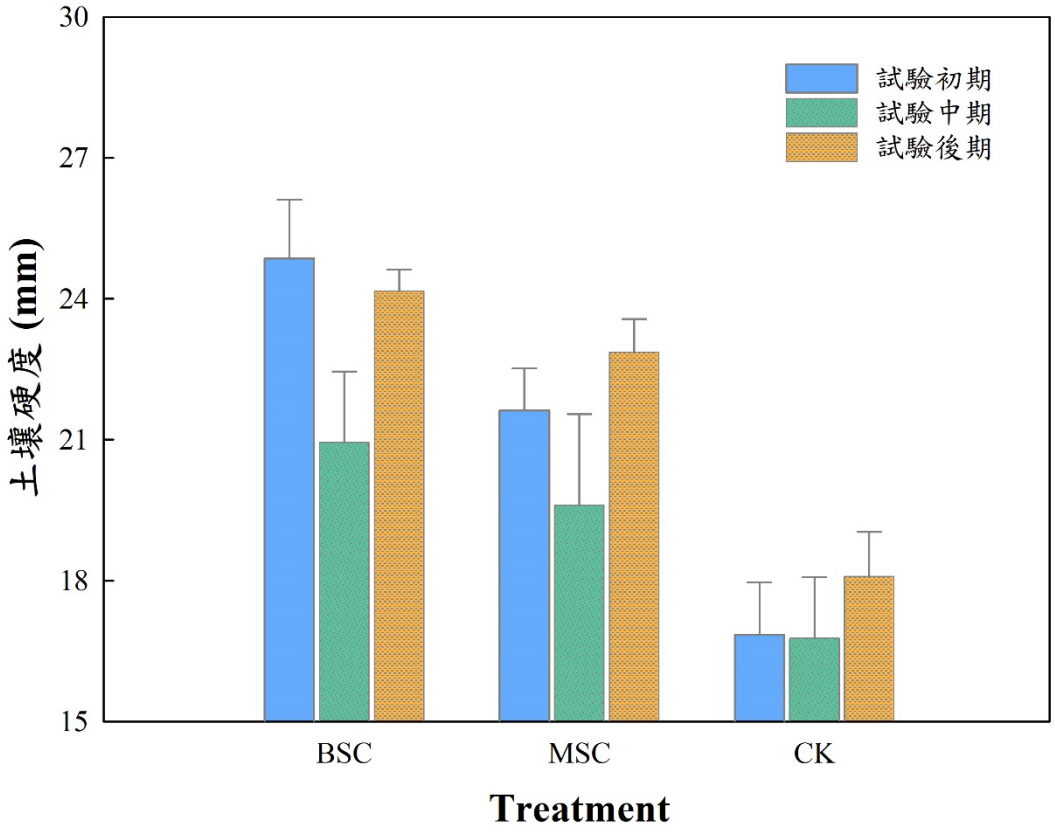


圖 2-38 不同處理之土壤硬度於試驗初中後期之變化圖

表 2-38 不同處理之土壤硬度於試驗初中後期之變化表

處理	試區位置	土壤硬度 (mm)					
		初期		中期		後期	
BSC	上坡	24.3 ± 1.53	24.9 ± 1.25	22.0 ± 1.00	20.9 ± 1.51	24.3 ± 0.23	24.2 ± 0.46
	中坡	24.9 ± 0.92		21.5 ± 1.32		24.5 ± 0.14	
	下坡	25.3 ± 1.53		19.3 ± 0.58		23.7 ± 0.42	
MSC	上坡	21.7 ± 1.53	21.6 ± 0.90	20.2 ± 1.26	19.6 ± 1.93	23.1 ± 0.32	22.9 ± 0.70
	中坡	21.9 ± 0.59		20.0 ± 2.65		22.1 ± 0.42	
	下坡	21.3 ± 0.58		18.7 ± 2.08		23.5 ± 0.21	
CK	上坡	17.3 ± 1.26	17.0 ± 0.93	17.2 ± 0.76	16.8 ± 1.06	18.9 ± 0.39	18.1 ± 0.95
	中坡	16.9 ± 1.16		17.2 ± 1.26		17.1 ± 0.36	
	下坡	16.8 ± 0.58		16.0 ± 1.00		18.3 ± 0.25	

(六) 沖蝕試驗小結

1. 沖蝕試驗期間(5/1-10/31)共有 27 場降雨判定具備有沖蝕之潛在能力，視為有效降雨事件，其中 5 月及 6 月以梅雨季為主，而 7 月至 9 月以對流雨及西南季風(地形雨)為主，10 月則無降雨紀錄。試驗期間之累積雨量超過 50 mm 之有效降雨場幾乎集中於 5 月及 7 月期間。
2. 以單場降雨之累積降雨量及土壤流失量進行相關性分析，其判定係數(R^2)皆可達 0.88 以上，顯示單場降雨之累積降雨量(P)與土壤流失量(A)間具顯著相關性； BSC、MSC 及 CK(無施用)各處理之線性迴歸關係式分別為：A=1.2 P+14.1128；A=1.1367 P+14.8618 及 A=0.9862 P+16.5442；以 BSC 及 MSC 之總沖蝕量與 CK 相比下，可得到 BSC 及 MSC 之覆蓋與管理因子(C 值)分別為 0.79 及 0.84。
3. 本研究結果顯示，當雨場過於集中(連續降雨)且土壤含水量達到 20%以上的情況時，相較於對照組，可能會導致土壤流失量增加達到 1.2 倍以上。

4. 沖蝕試驗在 8 月初重新施灑微藻及化肥、9 月初及 10 月初進行追肥後，且經歷 89 天無連續降雨情況下，BSC 及 MSC 之微藻覆蓋面積皆提高近 6 成，且 mNDVI 平均值亦達到了 0.10 及 0.07，其中皆以 BSC 提升最為顯著，顯示 BSC 在陽光充足時生長狀態最佳。
5. 在乾燥無雨的天氣下，CK 之土壤含水量損失相對快速，若種植 BSC 及 MSC 則可顯著保持土壤近約 20 %及 15 %的含水量，且在環境呈現高溫的情況下亦可分別有效降低 0.6℃ ~2.8℃及 0.5℃ ~ 2.4℃之土壤溫度。
6. 施用 BSC 及 MSC 在培養微藻期間每週施灑化肥下，可提高土壤總體密度、有機碳含量、團粒穩定度、硬度，但土壤導水度及 pH 則是呈現下降；在受到連續降雨的自然夯實及侵蝕下，雖可提高總體密度，但亦會造成土壤有機碳含量、導水度、pH、團粒穩定度及硬度降低；但若降雨不集中且固定追肥下，可提高土壤總體密度、有機碳含量、團粒穩定度及硬度，仍會造成導水度及 pH 下降；若僅施用微藻保護裸露地且為長期使用，最終可能會導致土壤酸化，且不利於不耐酸植物生長。

四、 BSC運用於泥岩區復育效益與可行性評估

本年度BSC技術繼續針對現地進行培養試驗，目標為南部泥岩裸露區，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。

(一) 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2-39_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(C0O960)資料進行統計，

該區之月均溫介於 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。該區年雨量約為 1800 毫米，主要降雨亦介於 5-8 月，最大降雨月份為 8 月。年平均相對溼度為 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 2-39)，園區範圍詳見表 2-39，各地文特性相關描述如下。

表 2-39 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 2-35_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。

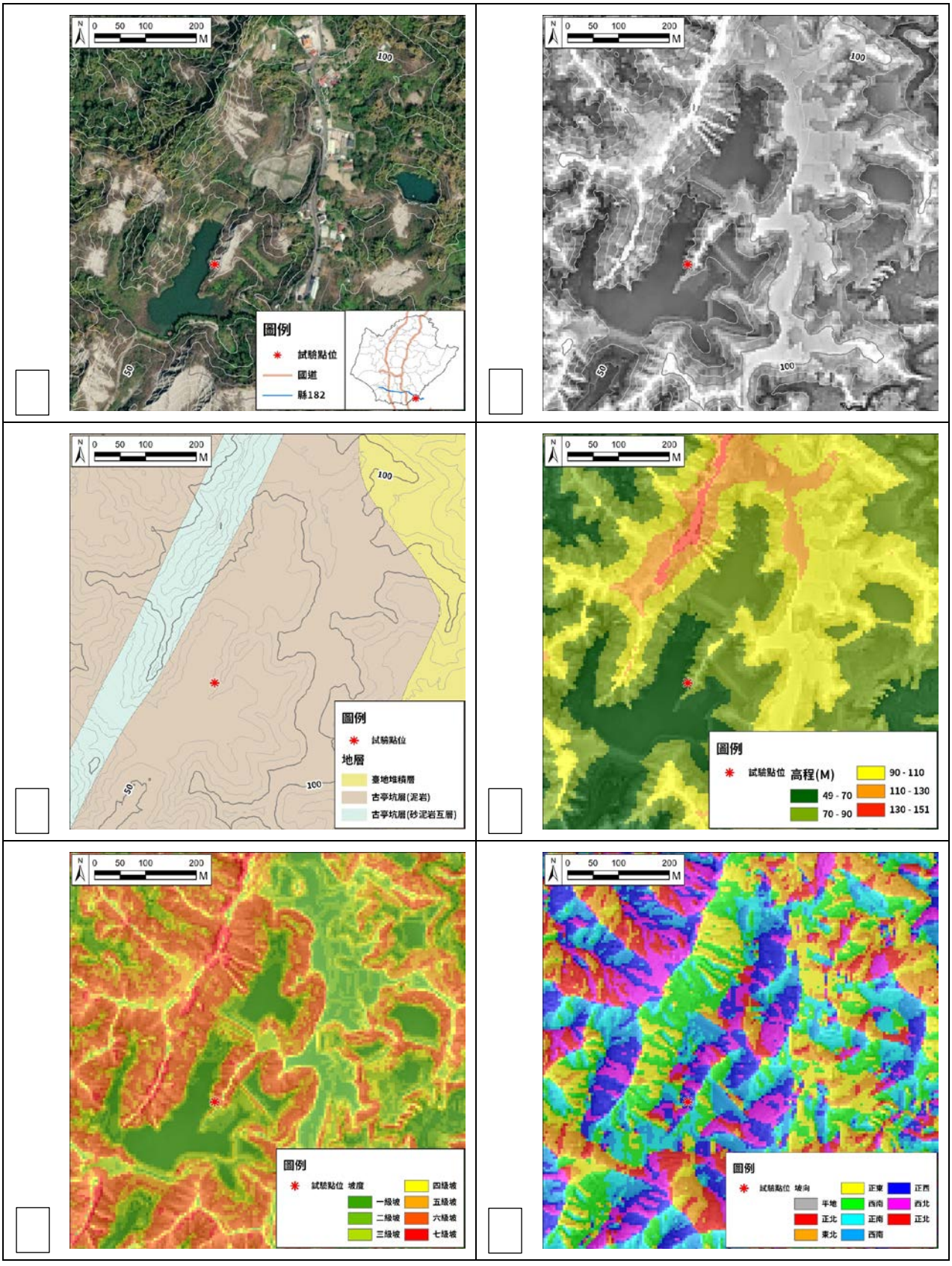


圖 2-39 現地試驗工區周圍基本資料 (a. 衛星影像；b. 開闊度地形；c. 地質圖；d. 高程分布；e. 坡度圖；f. 坡向圖)

泥岩由於組成的黏土礦物在急速狀態下堆積，片理分佈凌亂，影響內部凝聚力。所以在岩石物理性質上，其強度較為疏鬆，缺乏明顯膠結，加上黏土礦物遇水則吸水造成體積膨脹數倍至數十倍，且表層產生薄膜而變軟滑，因此山脊、山坡的表層立即被雨滴打散、濺起，並且向下移動，順坡下流的雨水，並能溶解一些泥土，帶往下坡。在岩石化學性質上，鹽分重，ph 值高達 8.0～9.2(王明果與謝兆申，1991)，妨礙了作物正常的新陳代謝，草木難以存活。又土壤中納離子的含量高，影響土粒分散不易形成良好的環狀結構，致土質脆弱，滲透率低，一旦因為泥岩自重及水力推移，造成邊坡失穩進而加劇侵蝕及沖刷作用的進行。

2. 高程(圖 2-39_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 2-39_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 2-35_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. 雨量

本區 2022 年度 1 月至 10 月止，累積降雨約 888 mm(圖 2-40)，自 5 月起方有顯著降雨，降雨集中在 5 月、6 月的梅雨鋒面，及 8 月、9 月的颱風外圍環流，在梅雨鋒面及颱風外圍環流侵台及其挾帶之西南氣流影響，本年度第一波降雨自 5 月 10 日~6 月 10 日期間於降下約 216 mm 雨量，最大時雨量發生於 5 月 14 日下午 2 時，時雨量約 28 mm，7 月多為短暫零星降雨事件，8 月 2 日~8 月 15 日為主要第二波事件降雨，期間於降下約 185 mm 雨量，最大時雨量發生於 8 月 2 日上午 11 時，時雨量約 63 mm。以水利署歷年觀測成果(圖 2-42 及圖 2-43)顯示，每年雨量集中在 5-9 月，崎頂雨量站年雨量多介於 1,138～3,317 mm 之間。

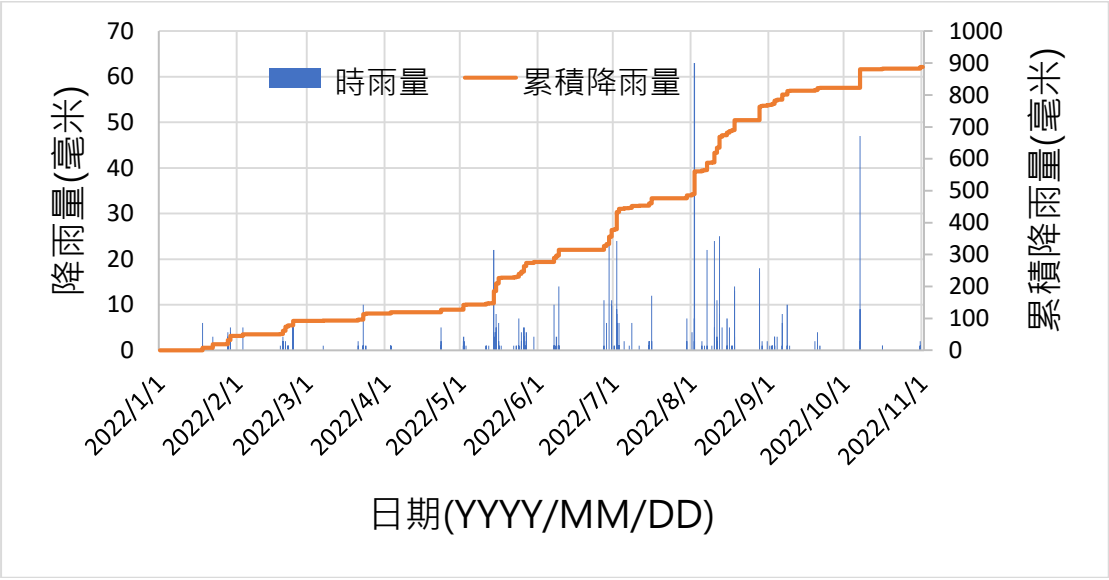
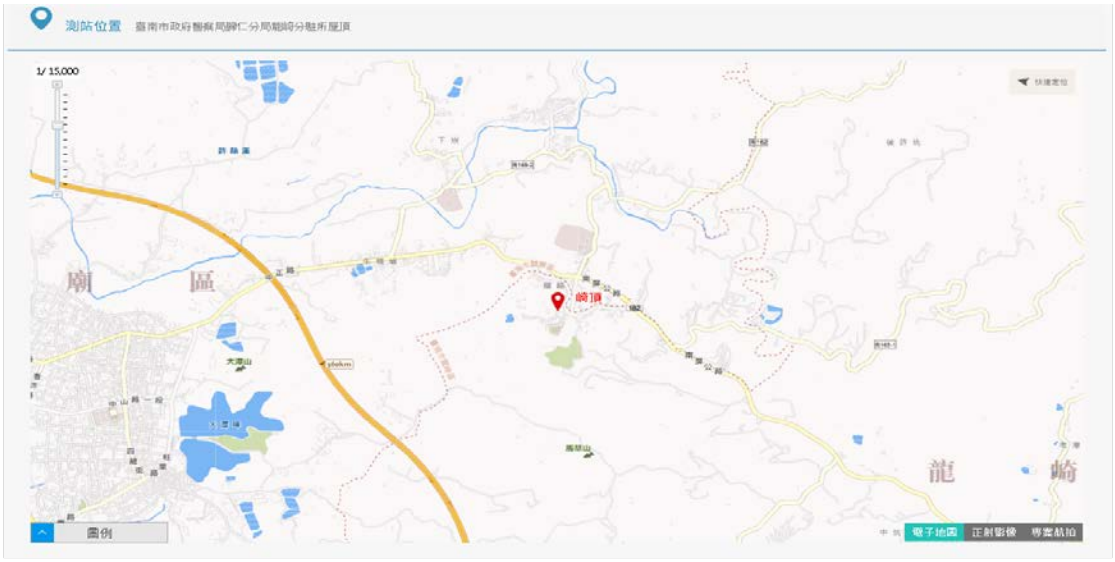
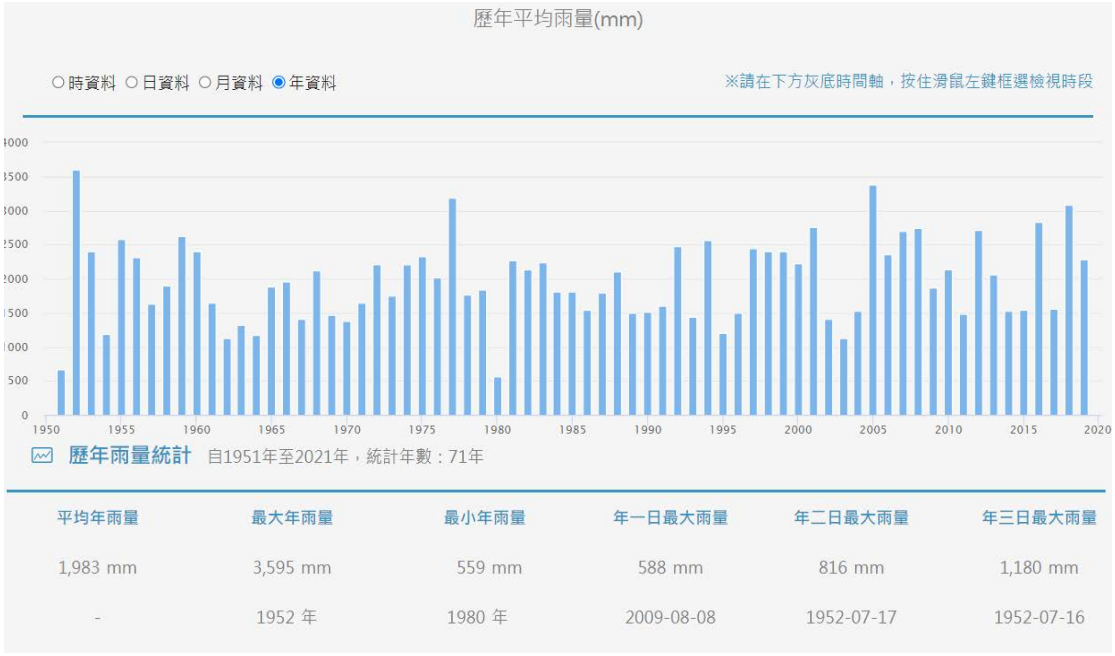


圖 2-40 崎頂雨量站觀測結果 (202201-2022010)



資料來源:經濟部水利署水文資訊網

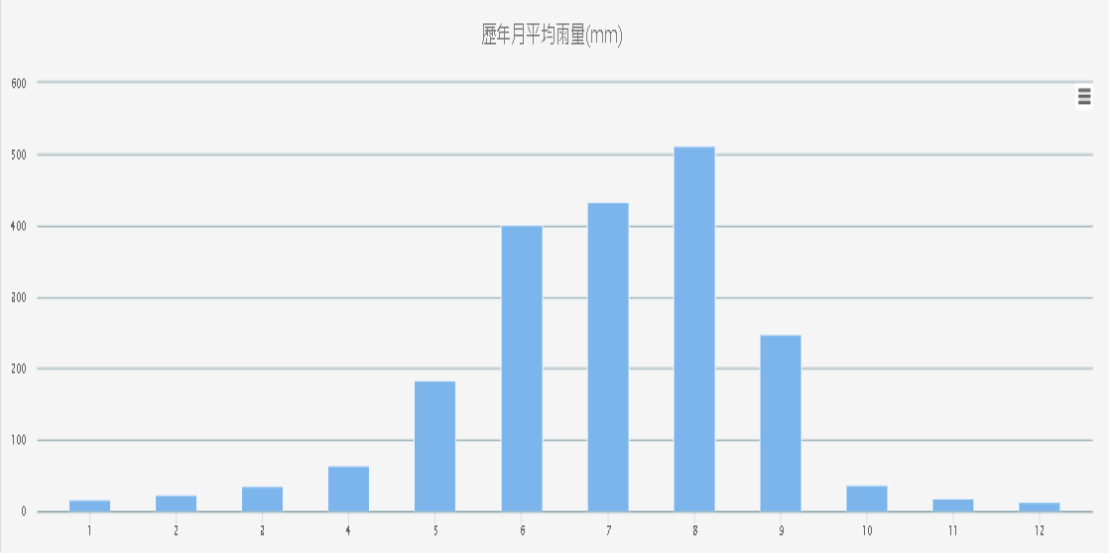
圖 2-41 崎頂雨量站地理位置



平均年雨量	最大年雨量	最小年雨量	年一日最大雨量	年二日最大雨量	年三日最大雨量
1,983 mm	3,595 mm	559 mm	588 mm	816 mm	1,180 mm
-	1952 年	1980 年	2009-08-08	1952-07-17	1952-07-16

資料來源:經濟部水利署水文資訊網

圖 2-42 崎頂雨量站歷年觀測成果 (1990-2022)



資料來源:經濟部水利署水文資訊網

圖 2-43 崎頂雨量站歷年平均雨量

(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 2-44~圖 2-45)，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 2-44 牛埔泥岩水土保持教學園區全景



圖 2-45 教學園區內主要泥岩裸露區概況

由於泥岩裸露邊坡復育植物之篩選條件為耐鹽、耐旱、採種或繁殖方便之草/藻種。耐鹽、耐旱方能生存於泥岩邊坡；匍匐性才能網結表土 ，減低土壤流失，亦不會防礙木本植物入侵生長；採種或繁殖方便才能大量使用，故選擇 BSC 的藻種進行試驗。

本次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 2-40，在 2022 年 2 月 11 日開始針對牛埔試驗工區進行相關佈設(圖 2-46)，往後於每月初進行坡面與縮時攝影維護，現地概況如圖 2-47~圖 2-53。

表 2-40 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	3/14	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	4/11	定期現地維護，補噴灑 BSC 及 MSC，與縮時攝影影片下載。
4	5/16	
5	6/13	
6	7/11	
7	8/15	
8	9/15	
9	10/17	

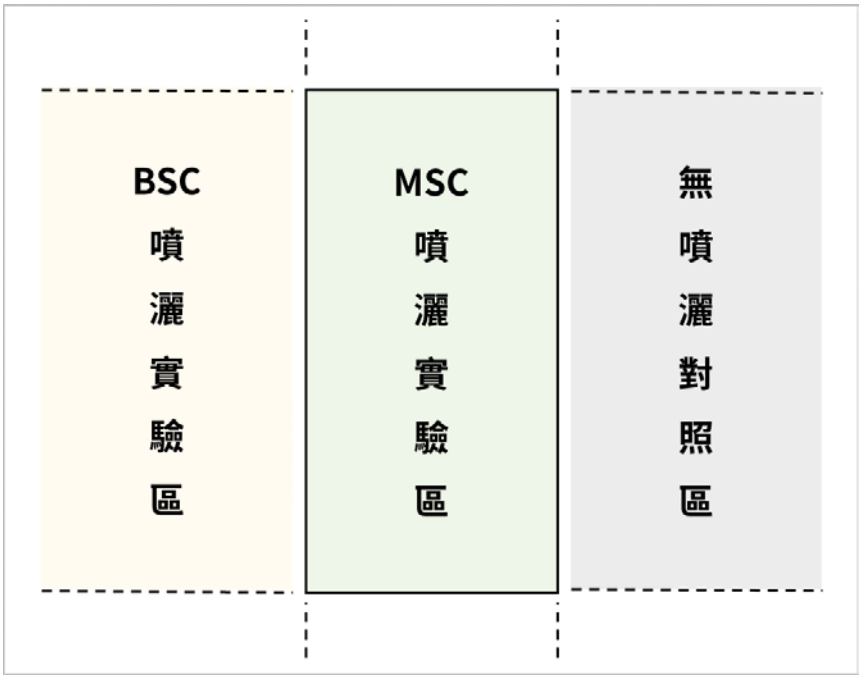


圖 2-46 現地試驗之實驗與對照組分布示意圖



圖 2-47 現地試驗開始坡面初始概況(2021/3/16)



圖 2-48 現地試驗結束坡面沖蝕情形(2022/10/17)

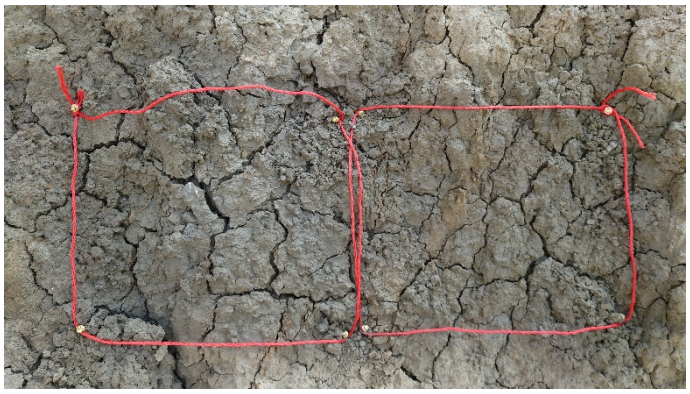


圖 2-49 本年度現地試驗坡面初始概況(2022/2/11)



圖 2-50 本年度現地試驗坡面進行狀況(2022/3/14)

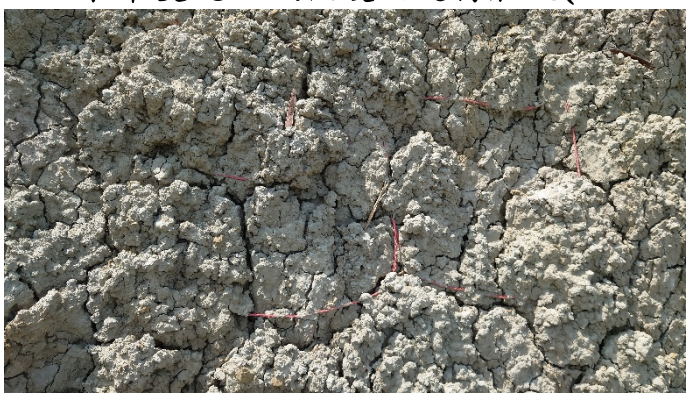


圖 2-51 本年度現地試驗坡面進行狀況(2022/7/11)



圖 2-52 本年度現地試驗坡面進行狀況(2022/8/15)



圖 2-53 本年度現地試驗坡面進行狀況(2022/10/17)

在非雨季的旱季裡，泥岩變得十分堅硬，乾燥的表面有霜白色的薄薄覆蓋層，主要成分是氧化鎂和一些硫酸鹽，因為毛細管作用，帶到土層表面而成。這些鹽類、極軟滑的泥岩本質，加上旱季缺水的原因，使得植物難以生長，因此除了少數植物之外，旱季裡仍然是一片荒涼的景色。從植物生長較為相關的土壤肥力測定(表 2-41)，從主要成分分析中可得知，本區土壤屬分類中的坋質壤土和坋土，乾燥時成大小不等的硬土塊，濕時黏性很大，滲透欠佳，每遇暴雨地表多逕流，侵蝕更為加劇。

表 2-41 惡地區土壤肥力分析

採 樣 點	樣本性質	酸鹼值 (ph)	可溶性鹽分 (mmhos/cm)	有機質 (%)	全氮量 (%)	有效性磷 (p.p.m)	交換性鉀 (p.p.m)	土壤類別
古 亭 坑	惡地蔗田土	8.10	5.50	1.15	0.10	2.80	103.80	坋壤
月 世 界	惡 地 土	8.45	28.00	0.31	0.05	9.00	218.00	坋壤
月 世 界	惡地蔗田土	8.30	1.00	0.87	0.05	0	75.30	坋壤
崇 德	惡地噴泥土	8.90	85.90	0.52	0.07	22.0	250.00	坋
小 滾 水	惡 地 土	8.50	10.20	0.52	0.06	3.80	155.00	坋壤
小 滾 水	惡地風化土	8.40	5.00	0.19	0.04	5.50	46.00	坋壤
崇 德	惡地牧草田土	8.00	1.65	0.81	0.03	0	45.90	坋

資料來源：李美枝(1972)，臺灣西南部典型惡地的地形學研究，師範大學地理研究所

本試區長期受到風與水的高度侵蝕，不僅土質偏鹼、保水能力差、營養源含量也不足，為土壤微生物的逆境生態、初級演替和族群波動研究的良好研究樣區。現地試驗場自 2021 年 3 月架設至 2022 年 10 月，主要歷經多場豪雨事件，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 2-54~ 圖 2-57)，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。經過近一年半的實驗，雖然局部藻類仍有存活及發育(圖 2-58~圖 2-61)。



圖 2-54 現地試驗坡面細部特徵(2022/2/11)



圖 2-55 現地試驗坡面細部特徵(2022/3/14)



圖 2-56 現地試驗坡面細部特徵(2022/4/8)



圖 2-57 現地試驗坡面細部特徵(2022/4/8)



圖 2-58 現地試驗坡面藻類發育情形(2022/8/15)



圖 2-59 現地試驗坡面藻類發育情形(2022/9/15)



圖 2-60 現地試驗坡面藻類發育情形(2022/9/15)



圖 2-61 現地試驗坡面植生遷入情形(2022/10/17)

(三) 泥岩坡面試驗小結

自 2021 年 3 月 16 日開始執行現地試驗至 2022 年 10 月 17 日維護止，試驗區邊坡有顯著的泥岩侵蝕現象，若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。

泥岩區土質物性及化性特殊，土質膠結不良，且具有 PH 值高、坋粒含量多、鹽分含量高之特性。泥岩乾時堅硬如石，表面呈魚鱗龜裂；濕時表層軟化呈泥漿狀態。在乾濕交替變化以及雨水沖蝕下，加速了泥岩裂縫產生以及雨水入滲侵蝕的速率，並使泥岩表面產生指狀得紋溝，進而逐漸加深加大成為蝕溝。在本年度定期與日本工營的視訊會議中提到相關建議，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。



圖 2-62 研究團隊針對龍崎泥岩試驗結果討論會議進行情形

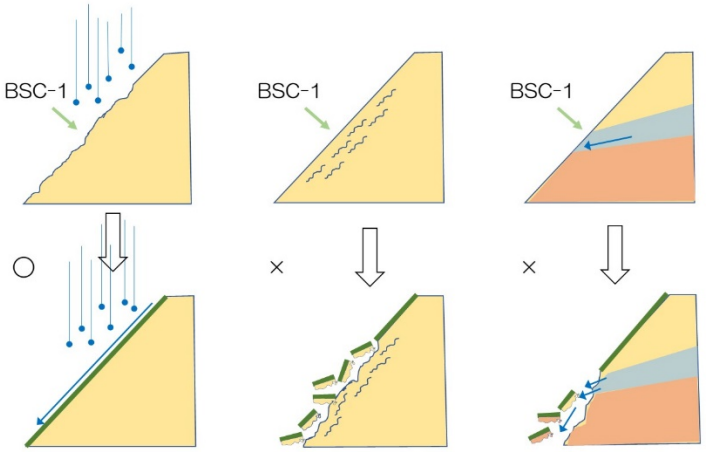


圖 2-63 研究團隊針對龍崎泥岩試驗結果檢討與調整方案

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，於 2022 年 3 月 11 日繳交期初工作執行計畫書，7 月 15 日繳交期中報告書，11 月 15 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 111年01月至111年12	至 110 年度止累計	本年度預定目標	水保局經費	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	150	0		
BSC技術培養紀錄及施作速度	項	1	0	1	150	0	屏科大試驗場	
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	20	0	20	200	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	200	0	龍崎水保教室	

技術報告	篇	1	0	1	64	0		

第四章 計畫成果及後續建議

第一節 計畫成果

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、供水及舖襯等方式，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)， 3 月~10 月開始進行為期 8 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，以 BSC 及 MSC 之總沖蝕量與 CK 相比下，可得到 BSC 及 MSC 之覆蓋與管理因子(C 值)分別為 0.79 及 0.84。BSC 及 MSC 可顯著保持土壤近約 20 %及 15 %的含水量，且在環境呈現高溫的情況下亦可分別有效降低 0.6 ℃~2.8℃及 0.5℃ ~2.4℃之土壤溫度。

(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 2022 年 10 月。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

施用 BSC 及 MSC 在培養微藻期間每週施灑化肥下，可提高土壤總體密度、有機碳含量、團粒穩定度、硬度，但土壤導水度及 pH 則是呈現下降；在受到連續降雨的自然夯實及侵蝕下，雖可提高總體密度，但亦會造成土壤有機碳含量、導水度、pH、團粒穩定度及硬度降低。

但若降雨不集中且固定追肥下，可提高土壤總體密度、有機碳含量、團粒穩定度及硬度，仍會造成導水度及 pH 下降；若僅施用微藻保護裸露地且為長期使用，最終可能會導致土壤酸化，且不利於不耐酸植物生長。

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 andbioavailability of thermally altered Pinusresinosa(Red pine)wood. Organic Geochemistry 33, pp. 1093–1109. doi: 10.1016/S0146-6380(02)00062-1.
4. Belnap, J. 2001. Factors in fluencing 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. Geomorfol. 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. Mirmbiotic 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. Klut (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., Campell, 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 intensiNtp, 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 m 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 Broderson 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 stromotolites. In: B. A. Whitton and M. Potts (eds.). The Ecology of cyanobacteria: their diveristy 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. Trakooyingcharoen, P., R. J. Gilkes, and K. Sangkhasila. 2012. Effects of land use on some physical, chemical, and mineralogical characteristics of Thai Oxisols. Scienceasia 38: 82-89.
39. U.S.D.I. Bureau of Land Management (2001):BIOLOGICAL SOIL CRUST:ECOLOGY AND MANAGEMENT, Technical Reference 1730-2

40. 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.
41. 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
42. 小島塁・大澤和敏・藤澤久子・冨坂峰人・松井宏之：藻菌類の土壌被覆による土壌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
43. 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壌藻類資材，国土交通省新技術情報提供システム， OK －170002 ， 2018.
44. 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。
45. (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
46. 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。
47. 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。
48. 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。
49. 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。
50. 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。
51. 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。
52. 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。
53. 郭鴻裕、劉滄棪、朱戡良、江志峰，2004，花蓮地區問題土壤之肥培管理，花蓮區農業改良場專刊，23：41-63
54. 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。
55. 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。
56. 栗原淳一，田方 智，寺田秀樹，下村幸男，冨坂峰人，小林 豊：菌類等による土壌侵食抑制効果，平成 18 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.444～445（2006）
57. 冨坂峰人：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
58. 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。
59. 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。
60. 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。
61. 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。
62. 溝渕綾、中野武登、下村幸男、冨坂峰人、長谷川啓介（2004）：ラン藻を利用した土壌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
63. 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。
64. 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。
65. 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	前於屏科大試驗場之抗沖蝕效果與日本工營於沖繩之試驗結果有相當差距，是否該菌種不適於臺灣？	兩試驗設置及試驗環境不盡相同，雖然細部無法相比但自然環境差異性確實存在。本年度加強說明及比較差異性，及建議改良做法。
二	前期所得結果BSC與MSC效果差不多，是否本期朝向MSC(本土)為主？	MSC屬於本土材料，取得較容易也較無外來種等生態顧慮，可加重對MSC的討論與試驗觀察。
三	建議增加對土壤之環境影響評估。	BSC技術對於增加植生速度，增加固碳及增匯及對土壤環境影響將一併列入討論。
四	建議在本研究中使用施密特錘或小型的Vane Shear Test的儀器，量測使用BSC前後的差異。如此在學術和實務上說服性更高。	針對土壤硬度及含水率等討論，一併納入實驗觀測項目，提供BSC前後對土壤性質的差異說明。

項次	審查意見	回覆辦理情形
五	BSC對於不同之土壤和草種(或植生)，可能其配比會有所不同，建議研究中加以考量。	本期持續針對BSC或MSC培養後，中、長期的植生發展持續作觀察，提供後續草種及其他植生的發展情形說明。

附錄二、工作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
游繁結委員		
一	依所說明之BSC 技術僅於土壤表面披覆一層菌、藻、苔蘚等植物，其與原土壤之間是否可緊密膠結，宜有說明。	BSC藻類確實僅著土壤表面，其與原土壤之間間的構造說明補充於圖1.1。
二	BSC 覆蓋表土之厚度或量體為多少？宜有說明。	為說明BSC覆蓋情形，補充於P2-47微藻之植生變化。藉由NDVI值計算植生面積，藉以估算藻類量體。
三	BSC 技術用於USLE 推估土壤流失量係在變更原地面之K 值或C 值或P 值？如何定位之？	確實BSC對於土壤抗沖蝕力的改變，會綜合影響於K 值或C 值或P 值，後續參考委員意見，僅討論沖蝕量降低效果。
四	前期執行成果如何？	前期執行成果，改撰寫至第一章緒論中，專節說明相關執行成果。
吳嘉俊委員		
一	建議今年加強分析BSC 所涉及的工序、經濟效益之評估，並強化該技術的優缺點之論述。	參考委員意見，加強蒐集BSC與傳統植生工法之差異性與優缺點之論述。

項次	審查意見	回覆辦理情形
二	泥岩現地試驗(P.2-4)宜於現場設置雨量筒，而不是採用屏科大的降雨資料。	為泥岩現地試驗說明錯誤，該地有水利署崎頂雨量站，已配合修正雨量資料如圖2-36。
三	是否有必要如期初報告P.2-6推算K 值、P.2-9 推算C 值，請再評估。	確實BSC對於土壤抗沖蝕力的改變，會綜合影響於K 值或C 值或P 值，後續參考委員意見，僅討論沖蝕量降低效果。
陳振宇委員		
一	BSC 或MSC 有無可能應用於揚塵之抑制？	由於BSC或MSC適用條件，與河口或海濱揚塵逸發生場所可能較不適合，且經濟效益不大。
周祖明委員		
一	BSC 施工方法於2009 年取得專利，要引進臺灣，有無專利問題(材料和施工方式等)。	日本BSC-1由於已商品化，屬於註冊專利，使用該商品確需授權。但若採用其他微藻類應用的植生工法，則非專利限制範圍。

項次	審查意見	回覆辦理情形
二	除了1：0.5 以下的斜坡及土壤硬度小於30mm 外，BSC施工法還有甚麼限制？	BSC工法的適用條件，可參考圖2-7坡面綠化及BSC工法選擇規劃流程圖，有較詳盡的說明。
三	如何灑播，與傳統噴植工法有何不同？	BSC的灑播方法，包含機械灑播及人工灑播。主要的差別，在於藻類本身也是黏著劑及肥料，且可採現地藻類施作，較無外來種疑慮。
四	是否可取代(或部分取代)黏著劑？	BSC與草仔等植生灑播，確實主要的差別，在於藻類本身也是黏著劑及肥料，可減少其他外界物質的使用。
五	是否容易施工和價格低廉，請詳細說明。	BSC施工材料及養護價格與傳統施工於國土交通省新技術登載內容中經濟性減少8%，後續補充說明。
六	施工機具有無特定形式？藻類加入之技術性如何(溫度、濕度或其他)。	BSC施工機具與其他植生噴植機具相同，但注意事項不同，補充說明於(一) BSC技術現地尺度施作工序及配合施工條件。

項次	審查意見	回覆辦理情形
七	實驗內容有無採傳統噴值工法的對照組？	本次實驗因為仍屬基礎實驗，再緩坡的沖蝕坡道設置BSC、MSC及裸露土坡作為比較。
技研小組(高百毅)		
一	本計畫為第3 期研究，建議補充前期研究成果摘要，並說明本年度計畫與前期之主要差異。	前期執行成果，改撰寫至1.4節前期研究成果中，專節說明相關執行成果。
二	建議計畫建立本土BSC 或MSC 相關施作指引及經費分析，供後續參考。	參考委員意見，參考相關技術文件，蒐集及彙整於P2-9(一)BSC技術現地尺度施作工序及配合施工條件。

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
吳嘉俊委員		
一	期中報告的內容需要再修正，品質應再提升，例如：第二章「工作執行方法與步驟」，但頁首為「工作執行方法與初步結果」。	確為製作頁首時繕打錯誤，謝謝委員指正，已修正為正確章節名稱。
二	第二章第三節為初步結果，但卻放了BSC 技術現地尺度施作工序及配合施工條件，其內容多源自於日健總本社，無法得知該技術於國內的應用可行性。	該節內容為依照前次會議審查意見建議增加作業內容，為避免誤解，另增加BSC施作工序及配合條件一節，避免與本土試驗作業混淆。
三	BSC技術培養紀錄及施作速度的內容來自於林敬舒(2014)的實驗，而本計畫的執行成果卻未見。既然林敬舒(2014)已發現BSC 不如預期，為何仍繼續使用日本的BSC？	BSC技術培養紀錄及施作速度主要為第二年度(2021)計畫成果，本期撰寫時相關圖表未重複納入，造成誤解。林敬舒(2014)是研究本土藻種，該藻種與日本BSC藻種及製程不同，故進行比較與可行性評估。
四	P2-37 第三行出現表3-2，但表3-2 並未見到執行進度。	為圖表編排錯誤，已重新修正，並補上相關圖表。

項次	審查意見	回覆辦理情形
五	表2-11 僅列出2022 年4 月至5 月的有效降雨劃分，但卻未見到有效降雨雨場的地表逕流量與土壤流失量數據。	期中報告因為實驗場量測數據整理作業拖延，未及附上對應的土壤流失量數據，以補足相關數據資料供參考。
六	圖2-27 及圖2-28 分別為9/10及9/15 的正射影像，而圖中的對照組(CK)並未呈現完全裸露狀態，如何做BSC及MSC的比較？	覆蓋與管理因子(C)為種植微藻的試區所產生的土壤流失量與裸露地產生的流失量之比，因此，需固定時間除草，當日考量到風速較大，因此先拍攝正射影像，但之後風速不易飛行，因此未拍攝多光譜影像，之後已移除試區內雜草(除微藻外)。
七	表2-15 及表2-16 的BSC 處理，為何裸土面積及覆蓋面積僅4 天的差距，卻出現裸土面積激增的現象。同時，表2-21，無論是BSC 或MSC 處理，裸土面積為何與覆蓋的百分比相等。	表2-15及表2-16 BSC及MSC裸土面積激增，與期間的降雨事件有關。表2-21裸土面積為何與覆蓋的百分比相等，確實是表格製作錯誤，已重新修正。
八	圖2-45 至圖2-47，無法分辨何者為BSC、何者為MSC 處理，亦無法得知照片是否來自相同的拍攝位，P2-69 最後一行的翻譯有何佐證？請補充。	圖2-45至圖2-47，為方便分辨何者為BSC、何者為MSC，另於照片中增加標示。P2-69 最後一行的說名來自試驗人員的推測，已修正說明，避免誤

項次	審查意見	回覆辦理情形
		導。
周祖明委員		
一	前期委員意見請加註回應於報告書何處。	謝謝委員指正,期初及期中由於內容及圖表都有調整跟更新,修正事項較難標註。期末報告,已增加註明修正依據。
二	P1-1 圖1-1 建議英文翻譯成中文。	該圖因為為引用至他人著作,國內未見適切翻譯,相關學名等專有名詞尚無頒佈辭典可以依據,建議暫保留原圖。
三	BSC 施工方法於2009 年取得專利,要引進台灣,因有註冊專利問題,若仍須使用其流程及價格如何,又除建議其他藻類非專利限制外,是否還有其他可建議事項。	本次實驗,確實是想依本土的環境現況及施工條件,評估該工法之成效與適用條件。 依委員建議,整理與彙整BSC關工法與建議,提供其他考慮相關工法引進之參考。
四	P1-2 第1 段有說明BSC 技術具減緩土壤沖蝕的成效,可否在以後之章節介紹此成效的詳細說明,又第2 段第3 行應為〝物〞。	BSC 技術具減緩土壤沖蝕的成效之依據為日本場址的相關試驗結果,本計畫另針對本土場址另行評估。第2段第3行確為繕打錯誤,已修正。

項次	審查意見	回覆辦理情形
五	P1-8第1章第2節土壤沖蝕減緩，建議加入結語，P1-14亦同。	謝謝委員建議,確應補充相關結語如P1-8及P1-14。
六	P1-11BSC之藻類本身為黏著劑，為何還要加黏著劑。	藻類加強土壤固結及膠結的能力，必須等待其培養發育。在此之前,噴植時仍需加入保濕及黏著於坡面的加工材料。
七	P2-10 BSC比較不適用的環境,像泥岩即是，為何仍要採用其可行性評估,有無特殊的想法。	為了評估該工法於本土使用的限制與極限,故選擇較易培養的紅土台地及較難培養的泥岩地區分別測試其成效,了解其應用的限制。
陳振宇委員		
一	P2-26，BSC-1資材於2022/7/5方送抵成大。P2-27 所規劃之期程則為4月開始培養微藻，時程上為何差異甚大？且原訂5-10月進行6個月的現地沖蝕試驗，如何達成？	P2-26表2-5紀錄第二批(本年度計畫)取得的BSC產品。P2-27規劃之相關試驗,以用第一批(去年度)剩餘樣品開始進行,後續再使用本批產品進行補充與其他試驗。

項次	審查意見	回覆辦理情形
二	P2-40，第1、2 試區作為對照組的BSC 及MSC用量為何不同？其用量評估之依據為何？請補充。	BSC與MSC為不同產品(藻種與配方)，相關比例均依技術手冊及研究人員建議，相關說明補充於說明內容。
三	P2-48 圖2-27 及圖2-28 拍攝日期明顯有誤，請確認。	P2-48圖2-27及圖2-28，為自前一年度開始執行的現場沖蝕試驗紀錄，本年度試驗紀錄已追加於期末報告成果。
四	請補充說明UAV 拍攝之航高、拍攝之影像解析度及DSM 解析度？	已補充說明UAV拍攝之航高、拍攝之影像解析度及DSM解析度。
五	P2-69，稱BSC 及MSC 皆於豪雨前後噴灑至坡面有顯著不同(圖2-48~圖2-53)，惟P2-70 圖2-48~圖2-51 似無法佐証此說法？且圖2-52 非牛埔試驗場，圖2-53 亦無關聯？	P2-70 圖2-48~圖2-51微觀的細部特徵中，可見如黴菌斑紋的藻類發育。但於泥岩中的發育僅為點狀發育，不如於紅土表面的面狀發育(圖2-52)。圖2-53為台日團隊線上會議討論的紀錄，以為工作佐證。

項次	審查意見	回覆辦理情形
六	以牛埔為例，如仿P2-71 之建議針對坡面作掛網及填充腐植土，現有之植生方式似乎即可，那使用MSC 及BSC 之意義何在？	於牛埔泥岩區的實驗，BSC或MSC的播撒及後續培育，成效並不佳，故無明顯優勢；日方有提議其他附屬工法，但遠超過現行工法的經濟效益，故本工法無法適用於泥岩區。
技研小組(高百毅)		
一	P2-9,2-10，出現的”BSC-1”與”BSC”有什麼不同，為何使用不同名稱。	P2-9，P2-10頁中說明”BSC-1”屬日本工營與日健總研合作生產的資材產品名稱。BSC則是泛指各種生物土壤的技術。
二	P2-20 文中指出BSC 施工後(稀薄絲狀)成效不容易明顯看出植生拓展與附著，而屏科大試驗區以多光譜無人機拍攝，是否可以有效觀察BSC覆蓋情況，其拍攝到是藻類還是草類？宜再確認。	P2-20文中指出BSC施工後(稀薄絲狀)為微觀組織，若是當培養成片狀或其他藻類、先驅植物附著，則與裸露土壤會有明顯的差異。屏科大試驗區於攝影前需移除了微藻外之草類，再以多光譜無人機拍攝。
三	P2-48，圖2-27 及圖2-28 中對照組正射影像似有植生，為何圖2-33 對照組之mNDVI 仍為露裸地？	試區需固定時間除草，由於當日考量到風速較大，因此先拍攝正射影像，但之後風速不易飛行，因此未拍攝多光譜影像，之後已移除試區內雜草(除微藻外)。

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	因日本人建議需要在泥岩添加資材輔助植生,那日方在自己的案子中是否有加入植生資材？	經確認日方於施工困難區(火山區、海岸段丘及砂岸地區...等)會配合框架及格網等施工，一般區域則不需配合其他資材施工。
二	植生部分有提及不錯效果，但簡報似乎沒呈現相關數值呈現。	現場試驗部分的結果，與對照組相比抗沖蝕室有效果，不過對後續引進後期植生及泥岩區的應用效果並不好，結果如P2-43~2-50。
三	實驗中水的流速是如何測定？是否有考慮降雨的因素在沖蝕實驗？	室內降雨實驗有控制降雨速度，室外實驗則以雨場切割方式簡化影響因子。
四	水質部分的成果似在簡報沒看到？	水質是說明水庫邊坡的沖蝕，影響蓄水泥砂濃度。現場實驗泥砂濃度的量取與計算如P2-52。
五	文獻回顧的部分有提及會降低吸水能力,請問是否會因此影響植生吸水效果？	現場實驗歸納長期使用微藻也會造成土壤硬化及酸化，長期使用下會不利不耐酸植物生長及導水度。

項次	審查意見	回覆辦理情形
六	本案結果為初步成果？請確認。應用性宜再加強陳述。	相關章節標題未更新，已修正微執行結果及計畫成果。應用性增加沖蝕實驗及泥岩培育實驗小結，如P2-78及P2-95。
七	可以發展為新工法嘗試操作。	臺灣溫熱潮濕的氣候，大部分的裸露土坡微藻的前驅期短，迅速就會由草生植物發育及覆蓋。相關工法，可適用於植生困難地區(如水庫蓄水區邊坡...等)。
八	為引進藻類的困難，可以培育本國的藻進行試驗研究。	本計畫亦有採用本土藻種進行試驗及對照比較，在各項表現上結果相近。惟相較於一般植生工法，在經濟及效率上還待商品量產化後，市場是否有競爭性。
九	藻類抗沖蝕效果及其應用時機與條件建議以明確數據述明。	由於仍屬先驅性研究，藻類抗沖蝕效果藉由兩年期的現場實驗，並以影像及地形變動追蹤植生與沖蝕量，成果如P2-50至P2-95。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十	計畫報告為期末階段,文中仍有許多"預計"等不確定性文字，工作應都已完成，請修正。	該等文字確屬不妥，以統一修正，”預計”進度等文字修正為”預訂”進度，完成之進度已修正文字。
十一	在期中審查審查意見回覆,有關吳委員之審查意見第二點,團隊回覆增加”作業指引”一節,惟於報告內未見相關內容。	該回覆文字混淆造成誤解,該段內容增補於P2-17~P2-29”一、BSC施作工序及配合條件”，已修正回覆文字，避免誤解。
十二	期末報告與期中報告內容似差異不太,報告內容建議請再補充加強。	期末報告更新本年度7~11月沖蝕實驗成果(P2-43~P2-79)及泥岩培育觀察(P2-84~P2-94),修正P2-17~P2-29”一、BSC施作工序及配合條件”。