計畫編號：ARDSWC -113-058
113 保發-5.1-保-01-06-001(7)

無人機邊坡噴植技術 (II) 應用與重點推廣

Side Slope Spray Planting using Unmanned Aircraft System – Application and Enforcement

執 行 單 位：財團法人成大研究發展基金會
執 行 期 間：113 年 02 月 08 日至 113 年 12 月 31 日
計畫主持人 ：林清一 專案研究員
共同主持人 ：邵珮琪 副教授、裴輝進 博士

行政院農業部農村發展及水土保持署

中華民國 113 年 11 月

（本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考）


農業部農村發展及水土保持署
Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

無人機邊坡噴植技術 (II) 應用與重點推廣

Side Slope Spray Planting using Unmanned Aircraft System – Application and Enforcement

摘要

利用多旋翼無人機建立的種籽子彈噴植技術，於 112 年執行先期研究計畫開發及驗證可用的無人機噴植技術與工法，完成多個場域進行測試，達成預期的發芽效果。經諮商專家意見，邊坡噴植草本植物較大覆蓋面積約為每平方公尺 20 顆種籽子彈；若改為木本植物，則可以縮小噴植密度，約為每平方公尺 1~2 顆種籽子彈，較容易掌握噴植成果。本年度計畫(1)增加 PAV 材質及紙吸管製作種籽子彈，以利分解；(2)以木本植物混合草本植物，製作種籽子彈來噴植； (3)選定特定區域坡度 60%以上，來義崩塌邊坡進行重點噴植。延續計畫另將改進噴植機構與動力，以提升噴效益，改用較大型無人機以做視距外之飛行噴植，擴大噴植範圍至人機不可及的遠端。噴植效益評估將每一崩塌區將以一塊 1.6 公頃(80m x 200 m)為範圍，進行混合種籽子彈之噴植。觀測之發芽率與覆蓋率將作為本無人機噴植技術之整體效益評估。本年度持續前一年度之噴植成果觀測。

關鍵詞：無人機噴植技術、無人機應用、噴植機構、木本與草本植物

無人機邊坡噴植技術(II) 應用與重點推廣

Side Slope Spray Planting using Unmanned Aircraft System – Application and Enforcement

Abstract

A spray planting technology using unmanned aerial vehicle (UAV) has been established and verified a new working method using seed bullets in the preliminary "112 Fiscal Project". It has demonstrated in several sites to accomplish expected sprouting result. By consulting with experts, the steep side slope planting by grass seed requires larger coverage density of 20 bullets/m^2; while it is planting by tree or bush seed may reduce coverage down to 1~2 bullets/m^2 to easily control the spray planting. This year project has: (1) changed PVA plus paper straw as bullet material to speed dissolving; (2) changed to mix woody plant with grass in a seed bullet to reduced spray planting density; (3) chosen specific area with 60% slope or higher for spray planting. This project improves the spray mechanism and larger UAVs for higher efficiency and operation range. In the spray effect evaluation, 1.6 hectare (80 m x 200 m) in each site is planned for spray planting using mixed seed bullets. The observed seed germination rate and coverage will be assessed for an overall effect of the proposed UAV spray planting technology. This year's work continues the observation on the previous project of spray planting.

Keywords: UAV spray planting, UAV application, spray mechanism, woody and grass seeds.

目錄

摘要 i

Abstract ii

一、計畫背景 1

二、準備工作 3

三、計畫執行 11

四、噴植實施與成果檢視 22

五、噴植成果觀測與討論 37

六、計畫執行成果探討 60

七、結論 62

參考文獻 64

附件一 67

附件二　水保學報成果發表紀錄 68

附件三　113 年航太年會論文 68

一、計畫背景

本計畫為延續 112 年度從長榮大學申請執行之創新研究計畫，計畫名稱：「無人機邊坡噴植技術研發及測試驗證」(編號：ARDSWC-112-028)，主要計畫領域為「工程技術發展」，研究課題為「精進無人機噴植技術於崩塌地復育研究」，執行期限：112 年 02 月 08 日至 112 年 12 月 31 日。

由於本計畫工作團隊須經常進出來義鄉噴職場域，該地區原住民十分純樸，為避免村民的疑慮與擔心入侵，本計畫由成大研究發展基金會行文知會 屏東縣政府警察局、來義派出所等單位，如附件一。

由於 112 年度的經驗，植物發芽潛伏期無法預測，本年度在選定新的場址後，將繼續上一年度已經完成噴植的場址，提早在 3 至 5 月間大量噴植，以等待今年的梅雨季節。

本計畫以環保種籽子彈之設計開發製作，配合空氣壓力噴射機構之設計組裝，發展一套可安裝於多旋翼無人機上之噴植系統與工法，以進行崩塌的陡峭邊坡，做草本植物—百慕達草與波斯菊之噴植。經多重選擇，於苗栗明德水庫附近苗 26 線道邊坡上成功達成約 9%以上之發芽率。計畫成果值得後續繼續推動及觀測噴植成效。112 年度無人機噴植技術的開發為主，建立無人機噴植機構與作業程序，經過無

人機應用技術的開發與噴植實務的經驗，本究所採用之無人機噴植技術有可行之處，本計畫延續技術的發展，以應用與重點推廣為主，提出本年度計畫。

極端氣候下，世界各地天災造成環境變遷問題日益嚴重，影響民生經濟、危及社會安全。臺灣地區位處環太平洋地震帶、梅雨鋒面及颱風生成路徑上，近年來天然災害尤其以風災、水災，對公共設施的破壞、人民生命的威脅，造成嚴重的損失。台灣地區有三分之二是山地，地質脆弱且斷層多，具有坡度陡峭、岩層交疊及土層淺薄等地質特性。氣候變遷影響下的超級颱風所帶來的極端降雨，容易對地震發生後所造成之土石鬆動地區，可能衍生土石流、大規模崩塌或其他類型之複合型巨災。農業部從日常積極落實山坡地水土保持，改善坡地植被結構，降低災害風險是重要課題。

水土保持的研究過去近半世紀以來，針對陡峭邊坡、惡地均投入相當多的研究，建立有效的改善對策，以利用光、溫、水來恢復原來的土地生態。經濟部水利署 “工法-修坡植栽”資料[1]、農業部水土保持技術規範[2]，針對坡面植栽以基本植物根系之固土能力來補強土壤之保存力，憑藉植物根系之柔韌性與土壤本身具有之剛性相結合， 降低受控坡面之沖刷與滑動。

生態保育的工作上，在人員可及的坡地治理多以植生工法取代過 去的工法，如型框護坡、種籽直接噴植、種籽撒播、二次植生等[3,4,5]， 在人員不可及的地域利用直升機或無人機進行種籽拋投會噴植[6~9]， 獲得的效果可以穩定坡面，更有助於增加地表覆蓋、減少土壤沖蝕、 增加涵養水土，另可吸引動物坡地棲息，更有道路景觀綠化之功效。

無人機噴植發展出幾項核心技術：(1) 無人機噴植種籽子彈的製作，(2)安裝於無人機上的噴植機構，(3)以無人機對陡峭邊坡的噴植作業程序。112 年度計畫初期選擇：(1)牛埔實驗場區惡地[10, 11]，(2)陡峭邊坡，(3)噴植百慕達草及波斯菊草本植物，由於對選擇場域缺乏資訊與經驗，年度計畫選擇都是惡地，由於長期乾旱，成效極差。該計畫執行後，改變策略，改變至苗栗明德水庫附近潮濕的山坡地，如圖 1.2，仍然針對 60 度以上的中高難度陡峭邊坡。初期噴植百慕達草及波斯菊草本植物，獲得一些成效。在計畫執行中，使用本計畫之種籽子彈技術，明顯的看到種籽子彈攀附無陡峭邊坡的效果。

二、準備工作

本計畫經台南分署黃博輝科長推薦南部保育工程規劃的顧問公司，剴盛工程顧問有限公司楊旻穎經理，提供屏東縣來義鄉來義村邊坡為一個實驗點，進行探勘及噴植實驗，以屏東來義鄉崩塌邊坡為目

標，如圖 2.1 所示，該地區為陡峭的崩塌地，光禿的面積大約 8 公頃，經實地勘查，該邊坡中段以下為大塊礫石且十分乾燥，會與龍崎牛埔實驗場區類似，為無法種植之惡地。但是其高處，大約有 1.5 至 3 公頃是較濕潤的土地，可以嘗試。經空中測繪，該邊坡之面積如圖 2.2 所示。



圖 2.1：來義鄉崩塌邊坡，跨越河道約 150 公尺

Department of Rural Development & Soil and Water Conservation



圖 2.2：來義邊坡測繪，高度至坡頂上方約 190 公尺

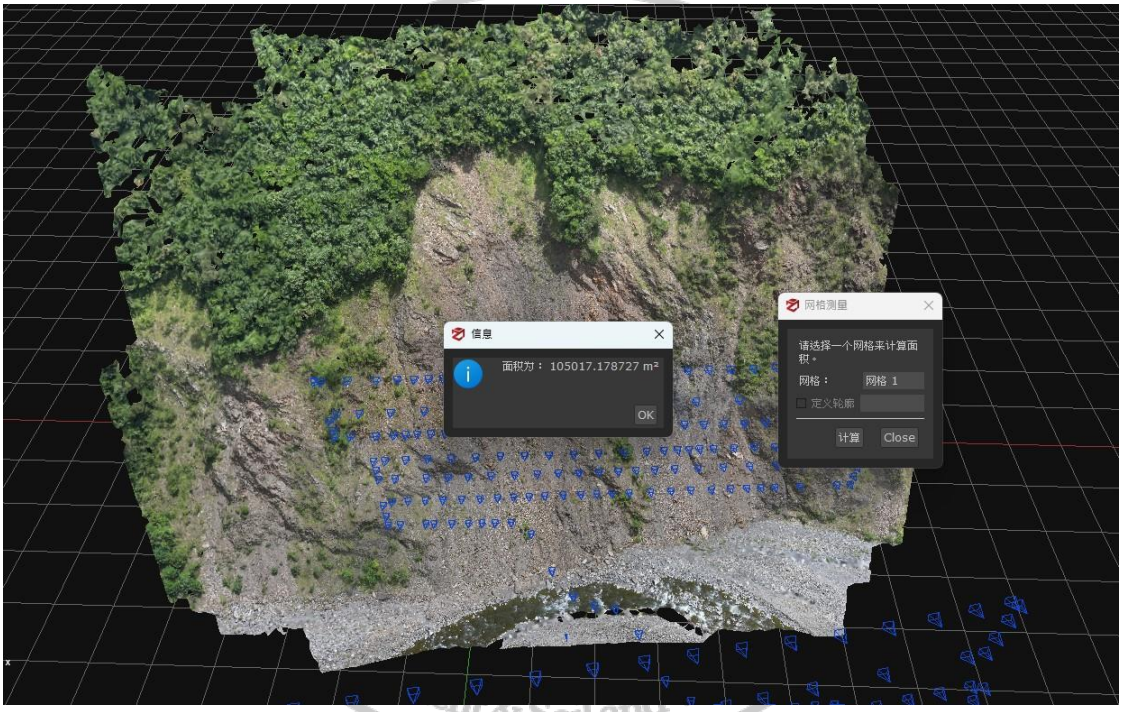


圖 2.3：來義邊坡測繪面積約 8.82 公頃

就來義地區崩塌邊坡狀況的研判，噴植的工作將如圖 2.4 所示，從低的河邊對岸往上飛行，飛手將很難掌握山坡地的狀況。

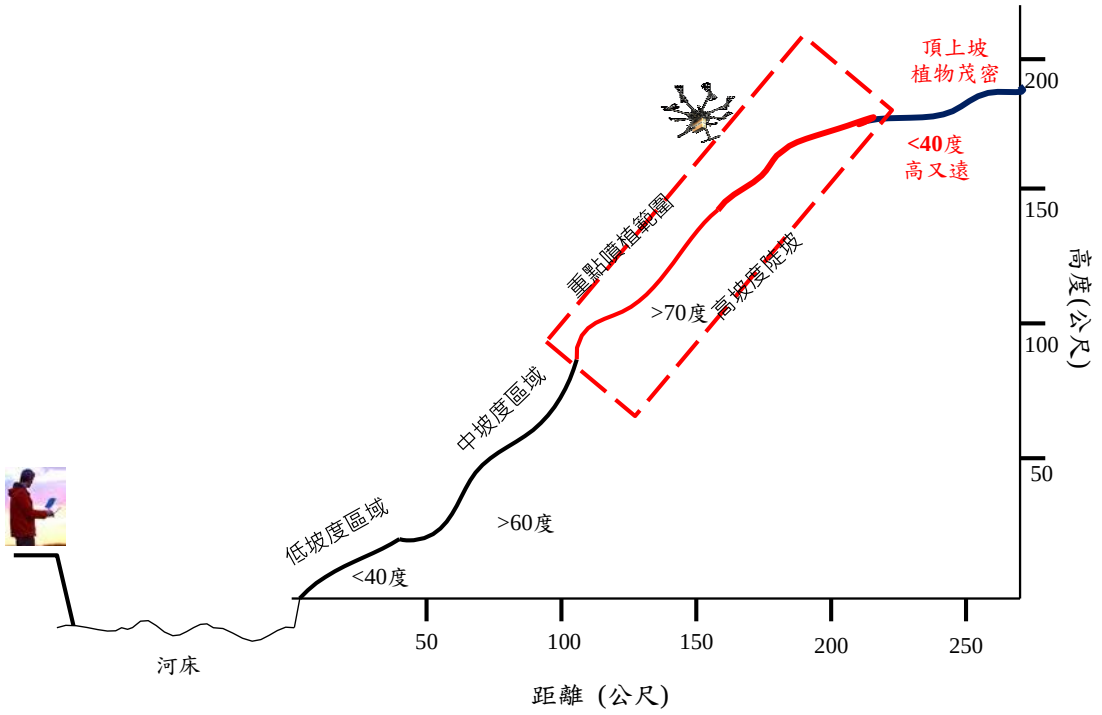


圖 2.4：陡峭崩塌邊坡噴植概況

來義崩塌邊坡高度大約 225 公尺(山頂約 200 公尺)、寬度 350 公尺，總崩塌面積約 8.82 公頃，噴植範圍在較高處約 4 公頃，較低處為石礫土惡地，暫不噴植，如圖 2.3 所示。邊坡下前方是河道寬 150 公尺，無人機噴植飛行操作必須從對岸跨過河到，才能看到較高的邊坡，另外飛行作業需輔助飛行小幫手，以5.8GHz 傳送畫面給飛行操作手，才能正確執行任務。在此狀況下，無人機的性能必須升高至 1300 軸距等級，如圖 2.5 所示，滯空時間要能滿足 40 分鐘以上。本年度以 1300 機與前一年度的 850 機共同執行飛行噴植任務，並搭配空中測繪機記錄。無人機的規格圖 2.6 及表 2.1 所示。



圖 2.5：本年度計畫使用的無人機噴植系統

(左圖為新 1300mm 大六軸機，右圖為前一年度 850mm 小六軸機)



圖 2.6：本年度計畫使用之 Apex1300 (左)及 Apex850 (右)六旋翼機

表 2.1：規劃無人機規格表

項目	Apex 850	Apex 1300
型式	VTOL 垂直起降	VTOL 垂直起降
任務功能	噴植作業	噴植作業、空中偵蒐
最大起飛重量	12 kgw	20 kgw
空重	7 kgw	9 kgw
動力電源	LiPo 8800mAh	LiPo 8000 mAh x2
續航力	<40 min	>50 min
巡航速度	<8m/sec, 28.8km/hr	>8 m/sec, 28.8 km/hr
航程	<5 km	> 12 km
航高 AGL	<100feet AGL	<1000 feet AGL
抗風	<12 m/sec (F5)	>12 m/sec (F5)
裝置	噴植機構發射器	噴植機構發射器
通訊	2.4GHz 數據 + 5.8GHz 影像，通訊範圍>3km	
飛行控制	自主自動駕駛	
遠端定位	Mission Planner 影像定位瞄準噴植位置	

「經濟部水利署施工規範第 02924 章鋪網噴植」之 3.1.1 一般通則[1]，提供邊坡噴植的通則，坡度 35°以下直接噴灑種籽，35°以上則均以鋪設鋼線網定錨後，再進行噴植。經凱盛工程顧問公司楊經理所提議，原定高雄市桃源區梅山里鋪網噴植場域因已經施工，不同意本計畫進行噴植，無法實施。

112 年計畫執行發現多樣種籽裝在一個子彈內，會發生互相排斥及抑制的現象，本年度更改為四種種籽材料個別填裝在種籽子彈內。包含草本百慕達草及波斯菊、木本馬棘與羅氏鹽膚木。經濟部施工規範 2.1.3 種籽材料，建議選擇草本種籽，百慕達草等 [12]。採用草本植物與木本植物的差異，在噴植的密度。為達到一定的覆蓋率，每一平方公尺草本植物所需噴植的密度約 30 顆種籽子彈，木本植物則只需 2~3 顆。木本植物每平方公尺大約 2-3 顆種籽子彈，每顆子彈難填裝 7~8 顆種籽，可以達到預期的效果[13]。因此本年度來義邊坡之噴植規劃以種籽子彈彈匣 40 顆子彈，木本種籽馬棘與羅氏鹽膚木各 5顆，草本百慕達草與波斯菊各 15 顆，不分區，直接噴灑於該邊坡上。來義地區氣候觀測，自 112 年 10 月以來雨量極少，至 113 年 2-3 月下過小雨，總量約略小於 10mm 雨量。至 5 月份起有較明顯降雨，且於 6 月間有充足的梅雨。

本年度種籽子彈先做改進實驗。112 年度執行的經驗，種籽子彈噴射後會發生縱向滾轉的現象，其原因在重心落在中間以後，造成後半的種量產生縱向滾轉的力矩。因此本計畫將種籽子彈填充方式做修改後，大幅改善種籽子彈縱向滾轉的問題。圖 2.7 為新的種籽子彈製作方式，其中填裝內容包含種籽數顆、當地的泥土、保水劑，填裝在子彈的前 1/3 部分，讓子彈有一個前方重心，避免飛行時前後翻滾。

112 年度使用的紙吸管材料製作的種籽子彈後，找到聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, **PVA)**環保材料來製作子彈，雖然在製作上更為繁複，但是初步實驗，PVA 在自然環境下 3~5 天內可以完全分解，於對照實驗中觀測到十分好的效益[15, 16]。本年度之種籽子彈將包含兩種材料之製作，期望明顯看到覆蓋率。

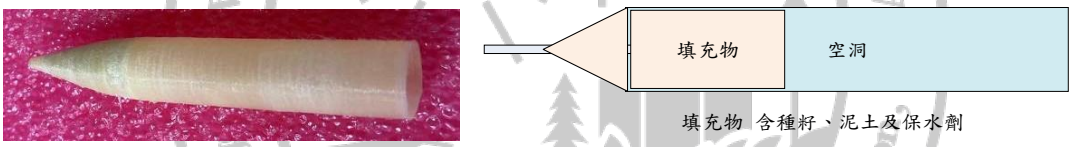


圖 2.7：PVA 製作之種籽子彈與填裝

由於執行無人機作業的團隊必須滿足下列條件：

(1) 執行團隊通過民航局核定的無人機操作手冊，規範作業方式；

(2) 操作人員取得適合的作證資格、個人之保險；

(3) 無人機辦理註冊、檢驗、第三責任險；

(4) 無人機的維護紀錄、起飛前檢查、飛行紀錄；

(5) 飛行操作人員之訓練與飛行紀錄；

(6) 飛行申請作業之逐次申請。

維持一個飛行團隊所需投資及維繫費用甚大，本計畫委託南部的無人機公司合作，協助執行所有的飛行任務，以減輕計畫的交通負擔。

本計畫將延續 112 年計畫，持續深入研發以種籽子彈為主之無人機噴植技術。為提升計畫的執行效率，本計畫將調整執行構想，包含：

(1) 提升噴植無人機技術

(2) 改變種籽子彈製作材料

(3) 選定來義邊坡場址

(4) 改進噴植機構設計

(5) 建立標準作業程序

(6) 行前氣象觀測

本計畫將由計畫主持人及協同主持人進行工作規劃，並將邀請種籽專家飛榮國際實業有限公司周榮豐董事長及凱威工程顧問有限公司楊旻穎經理，協助選擇種籽、噴植地點、制定工作程序，由計畫助理與執行團隊聯繫執行細節，並掌握全部過程及檢驗成果。

本年度計畫顧問周榮豐董事長建議將選擇多種木本植物如馬棘、羅氏鹽膚木為計畫噴植之植物。本年度計畫每顆種籽子彈內各自填裝，

(a) 木本種籽馬棘、羅氏鹽膚木，(b) 草本種籽波斯菊、百慕達草。

三、計畫執行

3.1 前期成果觀測

本年度計畫執行，仍將延續觀測 112 年度的噴植成果。由於植物發芽成長需要足夠的水分及緩慢的成長，因此針對 112 年度苗栗明德水庫附近苗 26 縣道及台南南化水庫噴植點觀測數據，繼續記錄觀測成果，綜整於表 3.1.1。後續觀測成果將繼續增列調整本表。

表 3.1.1：112 年計畫噴植效益觀測紀錄

分項		噴植場域
地區	苗 26 12k	南化水庫
種籽	C+D+B	C+D+B
坡度	60°	70°
面積 m^2	20	55
噴數	1	1
密度/m^2	20	20
基數	40	200
噴植日	10/06	9/28
觀測日	10/31	10/30
發芽數	7	78
發芽率%	17.5	39
覆蓋率 棵/m2	3.5	1.4

種籽　A 百慕達草、B 波斯菊、C 馬棘、D 羅氏鹽膚木
基數=地區噴植子彈數量，發芽率=發芽數/基數
覆蓋率=發芽數/檢測面積，木本植物>1 棵/m^2、草本植物>10 棵/m^2

3.2 來義會勘

有鑑於 112 年工作遲至 7 月才開始，直至計畫收尾階段 11 月，噴植之種籽上未能發芽。因此本年度提早準備於三月份就要投入噴植作業。

2 月 16 日赴屏東縣來義鄉崩塌山坡地探勘及測量

1. 該地土質採樣酸鹼性為 8，屬於微鹼性。

2. 崩塌面朝南，175 方位，2/16 已經面向陽光。

3. 崩塌地土質由上至下越來越硬，邊坡底部採樣幾乎為硬礫土，觀測高點土質可能比較鬆軟。

4. 崩塌邊坡傾斜度極陡峭，估計都在 70 度以上。崩塌面寬約 400 公尺、高度約 80 公尺。

5. 崩塌邊坡需跨越河道，無人機飛行可以從崩塌對岸台地起飛，水平距離約 150 公尺，飛行操作比較簡單，消耗電力有限。

6. 探勘當天陰轉晴，河道風速約 4~5m/sec，估計 4 月份以後會有落山風。

7. 當地部落居民多。將從基金會發文報備警察局來義派出所，說明團隊進出工作性質，以避免不必要的疑慮。

8. 該地噴植估計需要 600 個彈匣，24000 發種籽子彈，預計於 4 月份完成噴植工作，選定面積約 0.5 公頃範圍，如圖上方三個區塊。

(1)藍區目測土地比較鬆軟，坡度約 65 度，約 30m X 100 m 可以直接噴植草本及木本植物， (2)紅區土地以下，坡度 70 度，大部分是礫土，且坡度大於 70 度以上，約 60m x 150m，將嘗試噴植木本植物。

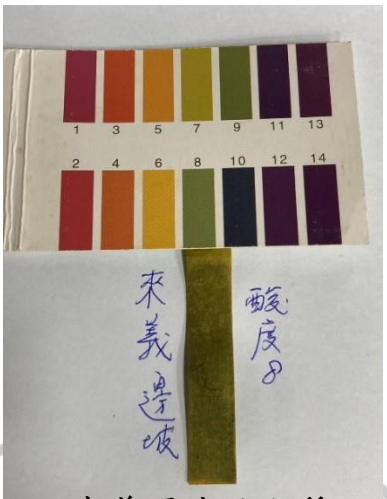


圖 3.2.1： 來義場域的土質，ph 8-9

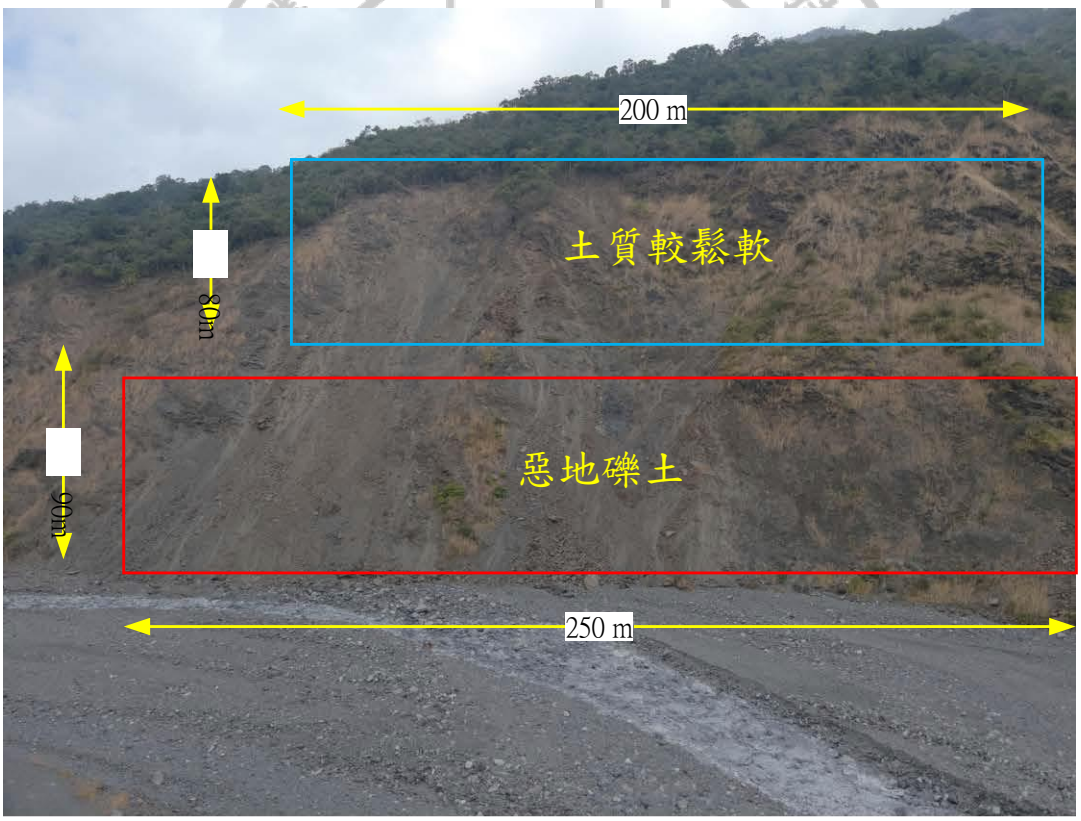


圖 3.2.2： 來義崩塌邊坡目測



圖 3.2.3：來義崩塌邊坡 2 月初乾燥狀況，溪流無水，七月份以後水量大增



圖 3.2.4：來義崩塌邊坡俯視全景

3.3 種籽子彈製作

新的種籽子彈

1. 種籽子彈的設計從原來的 7 公分縮減至 3 公分，填充於子彈內的包含四種種籽以及些許泥土。前一年度的子彈作法，由於取出子彈噴射後會有空氣動力的問題，重心不對，造成子彈旋轉或偏心。經調整後，減縮子彈的長度至 3 公分，獲得改善。

2. 本年度新作法，泥土混合保水劑，調和比 1kg 泥土+15g 保水劑+200g 的清水，均勻攪拌後，填塞於長度 5.5 公分長的紙吸管子彈殼內的前 1/3，完成後平均每顆子彈重量 4g。

3. 本年度計畫將子彈再作空氣動力的分析，發現重心落在彈體前方，子彈內部有大的氣體空間，子彈殼長度 5.5 公分之後 2/3 為空心，可以接受噴射氣體的推力，形成一個飽和艙推動子彈，重心在前，旋轉及偏轉的現象有大幅度改善。

4. 原計畫子彈設計包含突出的牙籤，以沾黏於泥土上。經過改善後，本年度以 PVA 材料 3D 列印彈頭，包含突出的牙籤及一個與彈匣子彈孔密接的彈頭蓋。當種籽子彈完成後，彈頭另外塞入，可以完全填滿彈匣彈孔，噴射空氣可以完全作用於子彈上，造成較大的推力、提高子彈噴射速度。

5. 子彈發射機構經過改造後，安裝於 1300 軸距大型無人機上。

飛機將使用兩顆 17600mAh LiPo 電池，估計每次飛來回兩趟~三趟，目前有 10 顆電池，做多可以完成 15 個彈匣，600 發子彈。

6. 子彈噴射劑調整為 120psi 可以讓目前子彈飛得更遠，著地力更強。




圖 3.3.1： 本年度計畫使用新的 1300 軸距無人機

7. 2 月 25 日至 29 日完成種籽子彈 600 發。



圖 3.3.2： 人工製作種籽子彈

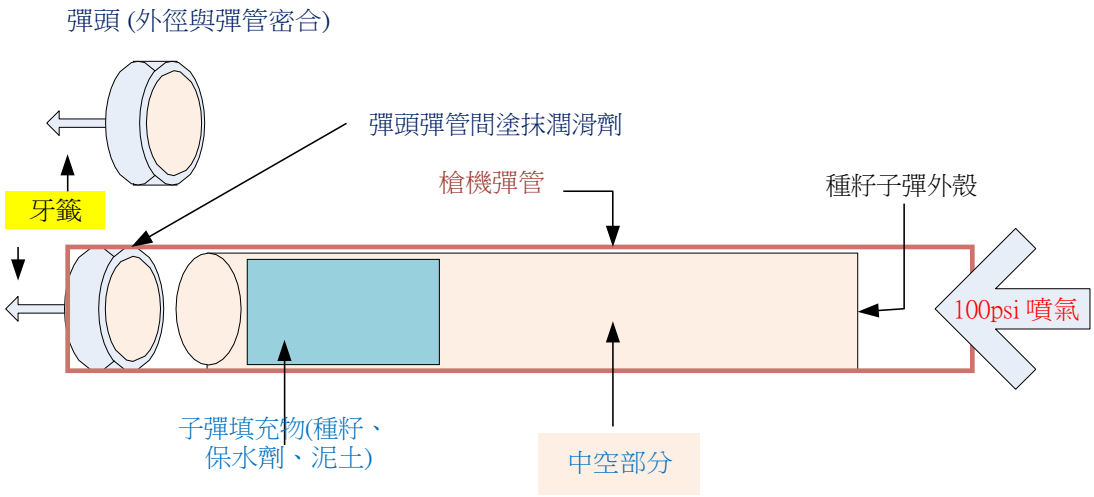


圖 3.3.3：實際種籽子彈設計修改

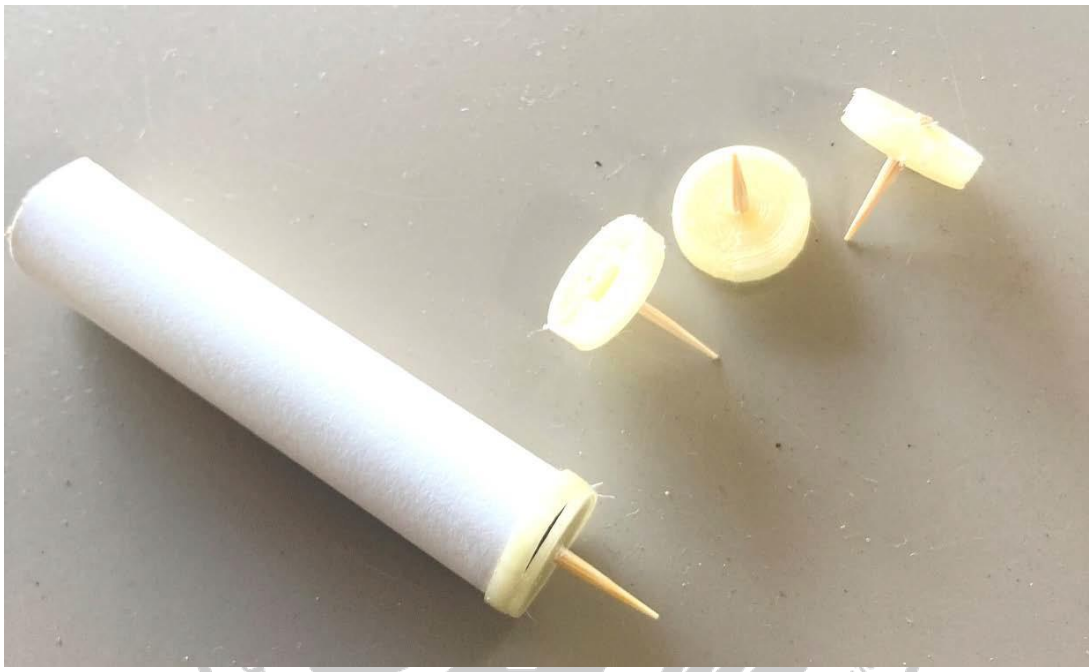


圖 3.3.4：實際種籽子彈製作

Development & Soil and Water Conser




圖 3.3.5：實際種籽子彈製作

3.4 噴植定位瞄準

高點遠距噴植須借用 Mission Planner 內的 Rangefinder (cm 等級)來確定噴植位置。由於崩塌陡坡會產生強烈的下午的上升氣流，或上午的下降氣流，噴灑出種籽只能概略落到期望位置。

圖 3.4.1、3.4.2 為 Rangefinder(cm)為測距儀顯示飛機與山壁的距離，飛行操作手藉著畫面資料接近預期範圍。



圖 3.4.1：Rangefinder 測距定位顯示



圖 3.4.2：打點座標為無人機噴灑位置

圖 3.4.3 為噴植飛行軌跡，黑色線為飛機飛行軌跡圖，藍色點為按下噴灑開關時飛機當前 GPS 座標位置，透過飛機前方感測器測量與山壁間的距離約為 10 公尺時開始噴植或噴撒。



圖 3.4.3：噴植飛行軌跡

3.5 對照植栽

本計畫於 3 月初自南化噴植場域移植一株剛發芽的馬棘，種到家裡的院子，馬棘在澆水照顧之下，成長十分優越，如圖 3.5.1 及圖 3.5.2 所示，約 130 公分高，至 9 月已經成長至 180 公分高。

農業部農村發展及水土保持署 Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA



圖 3.5.1 馬棘對照 5 月 10 日
長高約 120cm(綠竿子 100cm)



圖 3.5.2 馬棘對照 7 月 9 日
長高約 170cm(綠竿子躲在樹內)

對照組馬棘生長良好，四月起至七月都開粉紅色花，九月底開始結果。

四、噴植實施與成果檢視

4.1 來義噴植

4.1.1 來義噴植 3 月 1 日

3 月 1 日首次於來義執行噴植作業，鎖定該區域中間及左邊約 1.6 公頃面積進行噴植作業。

1. 3 月 1 日天氣，晴轉陰小雨，3 月 4 日陰轉晴，3 月 7 日陰天，傍晚細雨
2. 噴植設備 1300 六軸機
3. 3 月 1 日準備木本種籽子彈馬棘與羅氏鹽膚木各 290 顆
4. 3 月 1 日當天噴植 320 顆，面積約 400m^2
5. 3 月 4 日續噴，木本及草本共噴植 560 顆
6. 高度太高，且向山內縮，飛手很難操控，無法掌握精確位置

表 4.1.1： 來義噴植 3 月 1 日氣象資料

確認項目	內容	
日期	113/03/01	
前天天氣	晴出太陽	
當天天氣	陰天(午後下雨)	
座標	X:22.530216	Y:120.6811364
概略範圍面積	10x10平方公尺	
目測土地狀況	坡面下半部較陡，幾乎為堅硬石塊無黏性，上半部較為鬆軟土層，有附著性。	
可能發芽生殖條件	上半部較為鬆軟土層，有附著性，且坡度趨緩，並且坡地面積大，噴植機率高。	
噴植狀況	附著在邊坡上以及卡在邊坡裡。	
缺點	噴植面積大，不易尋找噴植的子彈。	

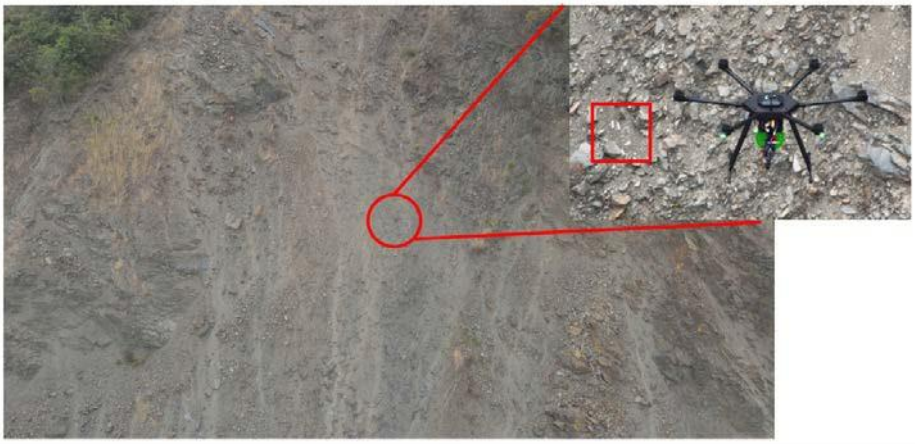


圖 4.1.1：噴植實況



圖 4.1.2：噴植作業，在河的對岸實施，左邊為噴植波



圖 4.1.3：噴植工作實施狀況，土地十分乾燥

3 月 1 日來義噴植狀況，土地十分乾燥，如圖 4.1.1~4.1.3 所示，惟工作人員於現場感受十分高的溼度，可能有利於植物噴植發芽。

4.1.2 來義噴植增加 3 月 5 日

1. 陰轉晴，3 月 5 日午後細雨，早上抵達時環境十分潮濕
2. 噴植範圍高度 60 公尺以下，全部寬面都噴植
3. 噴植木本約 620 顆及草本約 480 顆
4. 飛行次數 29 次。

表 4.1.2： 來義噴植 3 月 5 日噴植紀錄

確認項目	內容	
日期	113/03/05	
前天天氣	晴出太陽	
當天天氣	晴出太陽	
座標	X:22.530216	Y:120.6811364
概略範圍面積	100x30 平方公尺	
目測土地狀況	坡面下半部較陡，幾乎為堅硬石塊無黏性，上半部較為鬆軟土層，有附著性。	
可能發芽生殖條件	上半部較為鬆軟土層，有附著性，且坡度趨緩，並且坡地面積大，噴植機率高。	
噴植狀況	附著在邊坡上以及卡在邊坡裡。	
缺點	噴植面積大，不易尋找噴植的子彈。	

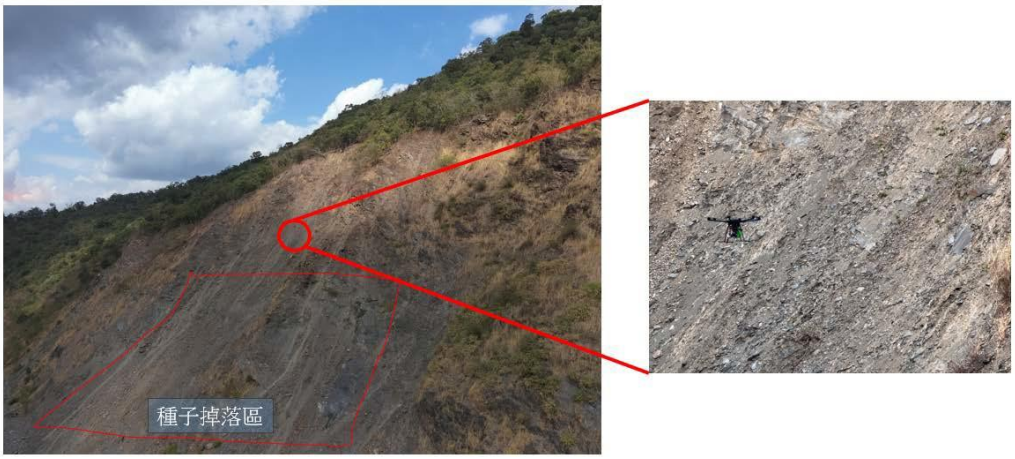


圖 4.1.4：噴植工作實施狀況

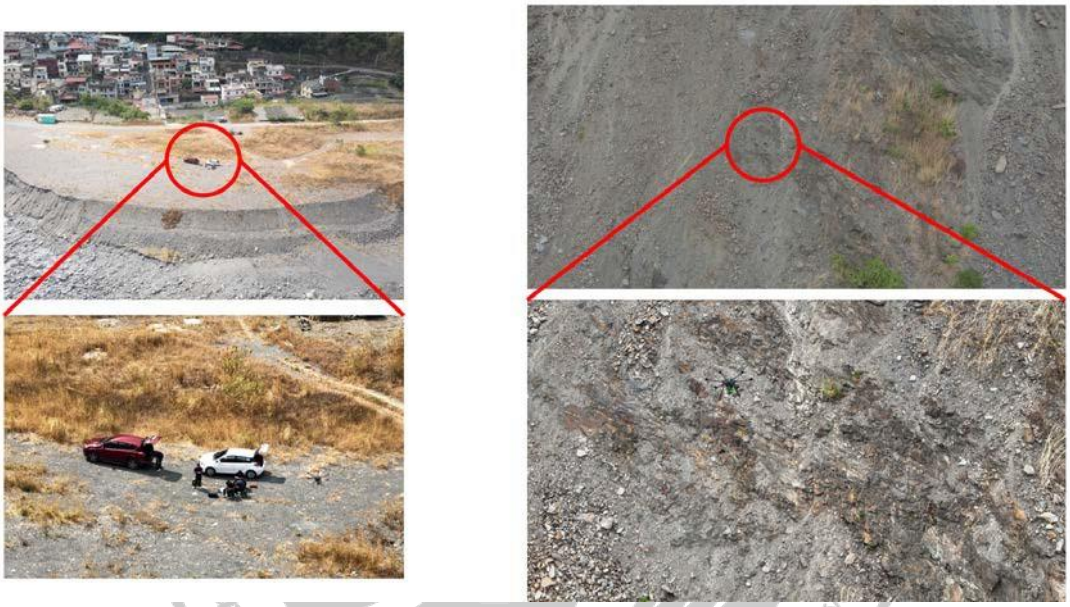


圖 4.1.5：噴植工作實施狀況

Development & Soil and Water Conserv

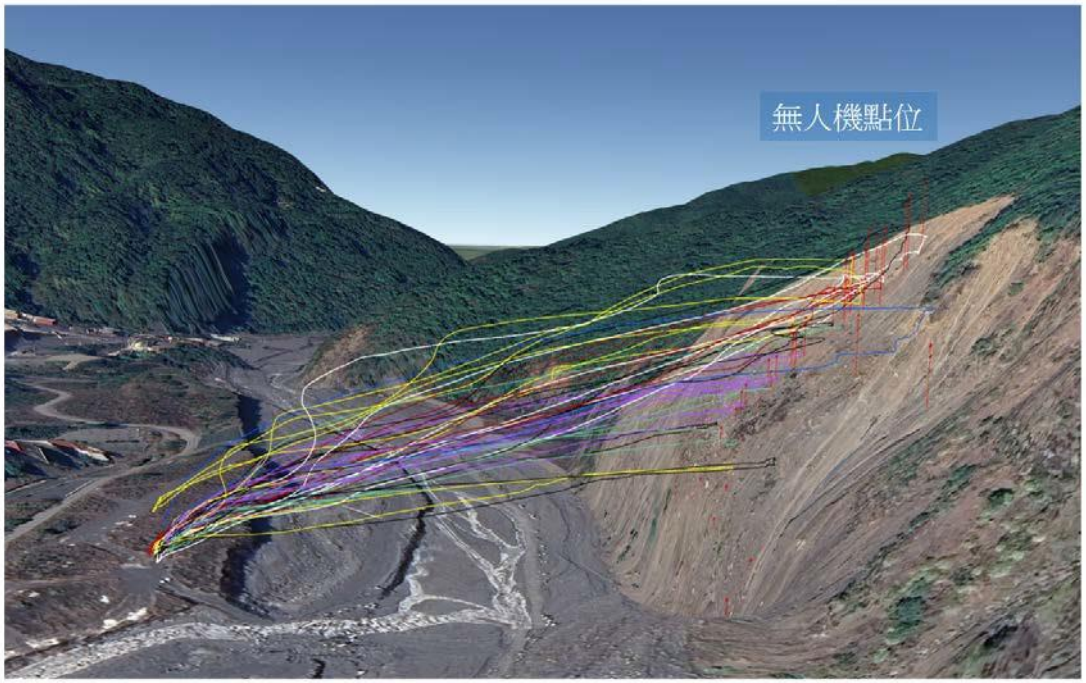


圖 4.1.6：噴植飛行軌跡，水平距離 250~350 公尺，高度 190 公尺

4.1.3 來義加強噴植 3 月 12 日

1. 天氣觀測，來義地區最近比較潮濕，有利於噴植作業。早上氣溫 15~18 度，濕度大於 85~90%。來義於 3 月 11 日晚間降雨。
2. 今天噴植木本種籽子彈為主，夾帶部分草本子彈。共噴植 17 彈匣，680 顆種籽子彈。
3. 噴植範圍於較低 30~50 公尺段之紅區礫石部分，約 0.3 公頃。
4. 今天觀測到 3 月 1 日故意埋藏於低處的種籽已經呈現發芽現象，應該是保水劑發揮作用。觀測地面十分潮濕。



圖 4.1.7：3 月 12 日觀測稍早 3 月 1 日的對照實驗種植，有發芽跡象

4.1.4 來義加強噴植 4 月 19 日

來義崩塌邊坡甚大，土地極端乾燥，因此採用多次噴植，期望提高覆蓋及發芽。

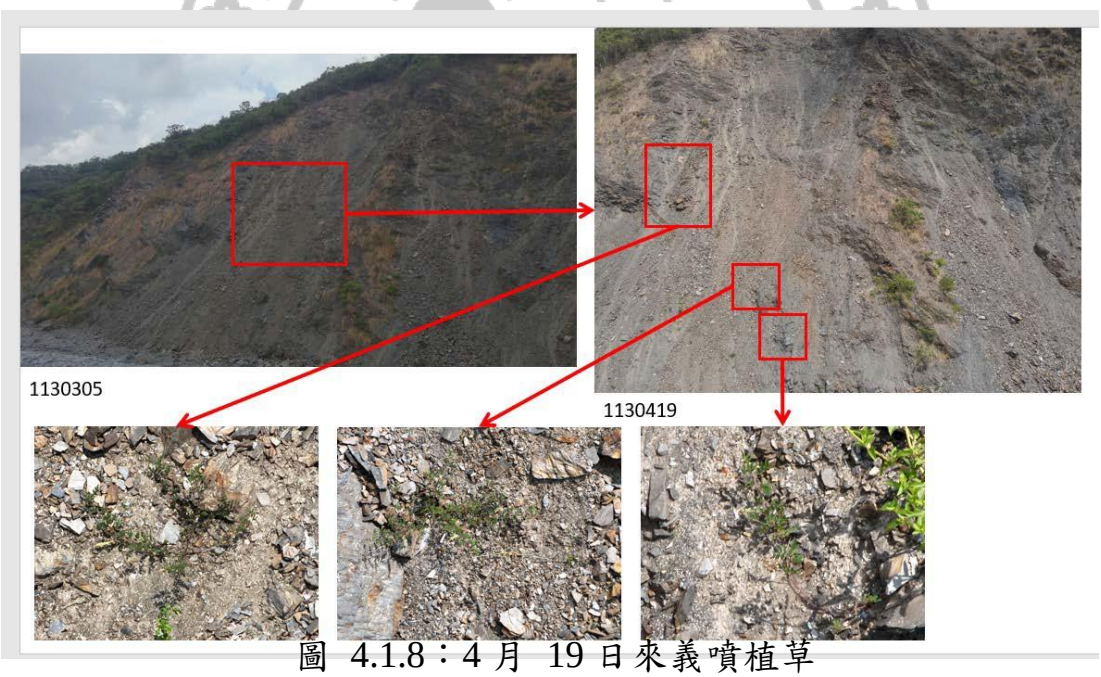


圖 4.1.8：4 月 19 日來義噴植草

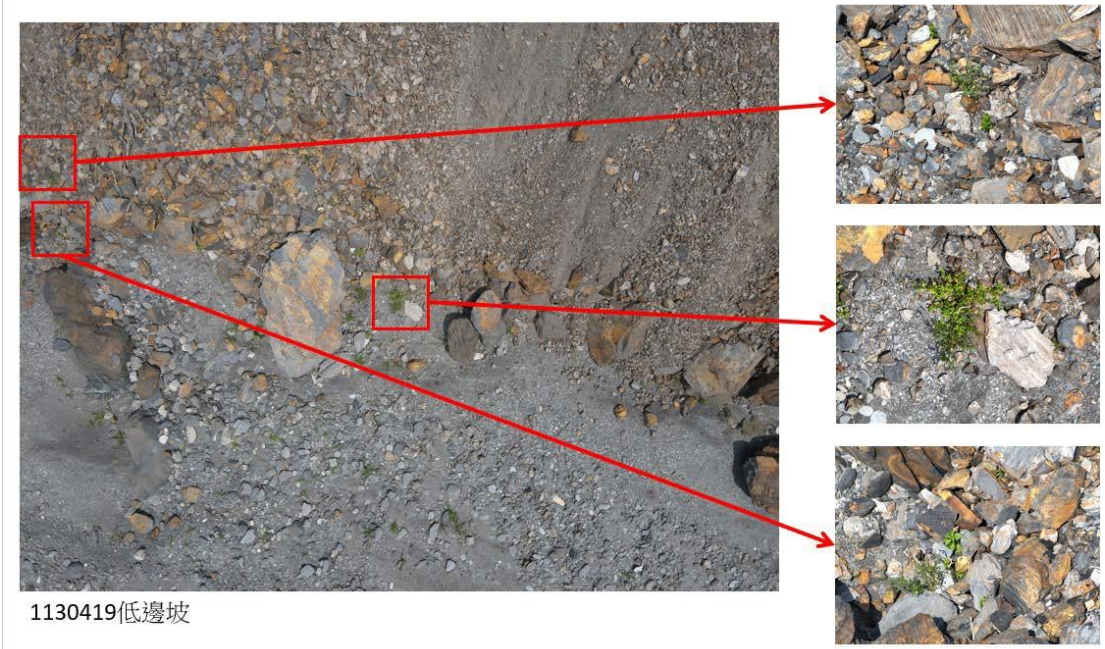


圖 4.1.9：4 月 19 日來義噴植草

農業部農村發展及水土保持署 Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

4.1.5 來義高密度噴植

a. 高位置木本植物

來義崩塌邊坡因受 7 月 25 日凱米颱風侵襲，造成左側大面積再度崩塌，為補救來義地區的噴植成果，於圖 3.2.2 所標示之高度上方藍色區域，本計畫於 8 月 7 日趁新一波雷雨天氣來臨前，進行一次高密度木本植物噴植。新的雷雨包於 8 月 10 日至 22 日連續於南部及來義地區降大雨，可能帶來益處，也可能受到大雨沖刷。

由於惡地的發芽率甚差，高密度噴植以種子直接噴灑於崩塌波表面，等待後續較豐沛水分滋潤發芽。

高密度噴植在該崩塌地上方原實施的 1.6 公頃(80mx200m)範圍，主要是以較低空貼近地面直接噴灑種籽。由於崩塌山坡地的上升氣流，噴灑之種籽將借氣流帶動向上擴散，因此在噴植區中段以下進行橫向 方形噴灑。飛行操作員借無人機觀測噴灑狀況，調整種籽噴口開啟與 關閉，讓種籽散步於崩塌坡上。種籽噴灑速度甚快。該區塊約 2 公頃範圍噴撒了 1 公斤的羅氏鹽膚木及馬棘，期待木本植物可以攀附嶙峋地表生根發芽。



圖 4.1.10：改裝的高密度噴植管(左)及空中噴灑情形(右)



圖 4.1.11：高密度噴植作業(藍圈為已發芽之羅氏鹽膚木)

b. 中低位置草本植物

9 月 6 日在來義崩塌區如圖 3.2.2 所示之紅色區域，約 2.25 公頃(90mx250m)區域高密度噴灑百慕達草，讓草種籽直接貼附於礫石縫內等待發芽。於 9 月 6 日執行噴植，圖 4.1.12，計 8 趟飛行，每趟噴灑約 0.5kg 百慕達草種籽，總計約 4kg，大概觀測分布於期望範圍內。



圖 4.1.12：低高度高密度噴植作業
(藍圈羅氏鹽膚木、紅圈馬棘、黃圈百慕達草)

來義崩塌邊坡於 9 月 6 日再度加強噴植，撒下約 1000 顆木本植物(羅氏鹽膚木及馬棘)種子。

4.2 南化水庫場域

南化水庫場域位於玉井區南化台 20 線(南迴公路)46.5k 處之旁邊進入南化水庫管制區之小道。本場區於 112 年度計畫後期才開始執行噴植作業，本年度計畫持續加強噴植，並追蹤其生長成效。

4.2.1 南化追加噴植 0306

1. 天氣陰天，28 度 C

2. 施打面積約高 X 寬= 12 m x 25 m = 300 m^2，坡度>60 度

3. 施打草本及木本種籽子彈，共約 500 顆

4. 3/7 陰天，傍晚細雨



圖 4.2.1：南化水庫場域 113 年 1 月 5(左)日及 2 月 6(右)日狀況

4.2.2 南化成果觀測 113 年 4 月 18 日



圖 4.2.2：4 月 18 日南化羅氏鹽膚木(藍)與馬棘(紅)



圖 4.2.3：4 月 18 日南化羅氏鹽膚木(藍)與馬棘(紅)



圖 4.2.4：4 月 18 日南化羅氏鹽膚木(藍)與馬棘(紅)



圖 4.2.6：4 月 18 日羅氏鹽膚木(藍)與百慕達草(黃)

4.2.3 噴植觀測 6 月 18 日

南化水庫在 112 年的噴植成果不彰，主要原因在高點連續崩塌，原已經噴植草木都被掃掉了，本年度重新噴植。圖 4.2.1 之紅圈處為主要噴植區塊。

該場域經過邊坡施工，將電線桿移除，做了矮的擋土牆，以防止土石流淤塞排水道。如圖 4.2.1 所示，以電線桿為標記，紅色區為噴植區，6 月 18 日可以觀測到噴植植物發芽，局部很茂密，但仍有部分被施工及新崩塌破壞了。



圖 4.2.7：南化水庫補充噴植場域，對照圖 4.2.1



圖 4.2.8：發芽成長的馬棘，高度大約 50 公分高，且開花(粉紅色)



圖 4.2.9：發芽成長的馬棘，右圖含馬棘(粉紅花)與羅氏鹽膚木(藍圈)



圖 4.2.10：發芽成長的馬棘(粉紅花)與羅氏鹽膚木(藍圈)



圖 4.2.11：發芽成長的羅氏鹽膚木(藍圈)

6 月 18 日檢視南化水庫的成果長出的馬棘與羅氏鹽膚木都十分健康。馬棘均開出粉紅色的花。該噴植區快水土保持復育的狀況仍須再加強， 將於七八月份追加被掃掉的部分。

五、噴植成果觀測與討論

本計畫執行於期中報告前進行第一階段成果檢視(3 月至 7 月)，並於 7 月 25 日凱米颱風後陸續進行成果觀測及補強工作。本年度成果檢視除檢視來義成果外，仍將包含 112 年執行的苗栗 26 線道、南化水庫。

5.1 苗栗 26 縣道後續觀測

苗 26 縣道於 112 年 8 月開始進行本計畫的邊坡噴植後，112 年 12 月、113 年 4 月均再度追加噴植木本種籽，且持續觀測。圖 5.1.1 為該地區 112 年 10 月(圖左)與 113 年 9 月位置對照(圖右)。



圖 5.1.1： 為苗 26 縣道 12k 噴植狀況對照
羅氏鹽膚木(藍圈)、馬棘(紅圈)、百慕達草(黃圈)

明德水庫苗 124、126、26 縣道於 112 年 8 月首次噴植，後經多次補噴，以百慕達草及波斯菊為主，但是生長狀況欠佳。但苗 124、126 線道邊坡經過水泥覆蓋工程後，原噴植區塊全部被毀。於 112 年 12 月僅於苗 26 縣道 12k 位址改噴植木本植物之羅氏鹽膚木及馬棘。苗 26 縣道 12k 位址約 200m^2 (20m x 20 m 之三角形)。113 年並未再加強噴植，僅就前一年度的成果繼續檢視。113 年 7 月 18 日觀測結果只有草本植物生長，木本植物並未見成果經半年多的發芽成長，該區塊略有明顯成果如圖 5.1.2 所示。



藍: 百慕達草 6棵(左) 、6棵(右)

圖 5.1.2：苗 26 縣道 12k 位址 113 年 7 月 18 日之成果

113 年 9 月 26 日苗 26 縣道 12k 處的生長狀況觀測結果，生長狀況甚佳。如圖 5.1.3 及圖 5.1.4 所示。



圖 5.1.3： 苗 26 縣道噴植成果 9 月 26 日狀況之一

羅氏鹽膚木(藍圈)、馬棘(紅圈)、百慕達草(黃圈)



圖 5.1.4： 苗 26 縣道噴植成果 9 月 26 日狀況之二

苗 24 縣道 12k 位址於 112 年噴植數量為 160 顆種仔子彈，

112 年 11 月底統計之草本發芽率為 15/160 = 9.375%。(112 年報告[20])

113 年 7 月 18 日圖 5.1.1 及圖 5.1.2 觀測發芽百慕達草數量為 24 株。

統計 113 年 7 月 18 日草本發芽率為 24/160 = 15%。

比較該場址新近觀測成果圖中，顯示噴值的百慕達草植物有明顯成長，噴植成果對崩塌邊坡有一定的效果。參考 113 年 9 月 26 日檢視之結果，如圖 5.1.3~5.1.4 所示增列數據於表 5.1.1 中。

表 5.1.1： 苗 26 縣道草本植物發芽率觀測估算

觀測日期	噴植數/面積	發芽數	發芽率	
112.11.30	160/ 200 m^2	15	9.375%	
113.07.18		24	15%	有增長
113.09.26		42	26.25%	有增長茂盛

農業部農村發展及水土保持署 Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

5.2 南化水庫觀測成果

5.2.1 113 年期中前觀測

南化水庫編號 TN3 地區，台 20 道 46.5k 處，為 112 年噴植的區塊全部崩塌移平，後續於 113 年 3 月重新強噴植約 600 顆種籽子彈，範圍約 300 平方公尺，期間至 7 月 18 日觀測結果，累計統計數據。



圖 5.2.1：南化水庫噴植 4 月檢視成果



圖 5.2.2：南化水庫噴植 113 年 7 月 18 日成果對照



圖 5.2.3：南化水庫噴植 7 月 18 日成果，羅氏鹽膚木 6 棵(計 6+0)

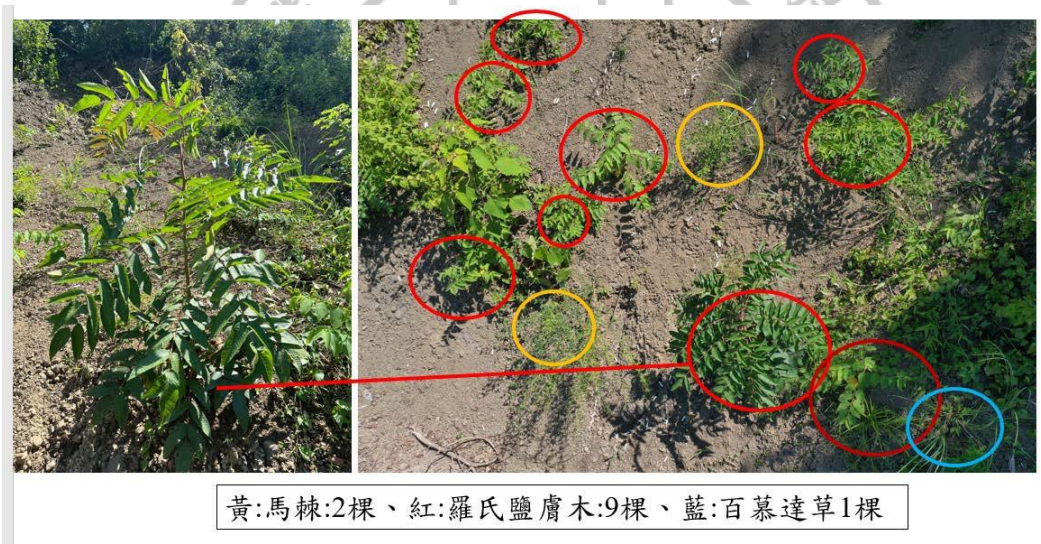


圖 5.2.4：南化水庫噴植 7 月 18 日成果，羅氏鹽膚木 9 棵、馬棘 2 棵、百慕達草 1 棵(計 11+1)



圖 5.2.5：南化水庫噴植 7 月 18 日成果，羅氏鹽膚木 10 棵、馬棘 2 棵(計 12+0)



圖 5.2.5：南化水庫噴植 7 月 18 日成果，羅氏鹽膚木 9 棵、馬棘 2 棵、百慕達草 1 棵(計 11+1)



圖 5.2.6：南化水庫 8 月 2 日再度觀測結果，羅氏鹽膚木成長旺盛



圖 5.2.7：南化水庫 8 月 2 日再度觀測結果，羅氏鹽膚木成長旺盛

5.2.2 南化水庫觀測 10 月 12 日

南化水庫 10 月 12 日觀測結果，發芽生長部份十分茂密，惟部分仍再度崩塌，如圖 5.2.8 左側。該場域於 113 年 5 月進行路邊擋泥水能矮牆增建，有稍作整修較低坡面，耙除噴植植物。



圖 5.2.8：南化水庫噴植前 2 月 6 日(左)與 10 月 12 日(右)對照



圖 5.2.9：南化水庫生長之羅氏鹽膚木(左圖藍圈、右圖全部)



圖 5.2.10：南化水庫生長之羅氏鹽膚木(藍圈)



圖 5.2.11：南化水庫生長之馬棘(紅圈)，右圖為放大之左圖，紅圈內為馬棘開粉紫色花，詳見對照培養圖 3.5.1

南化水庫場域約 300 平方公尺，10 月 12 日觀測大約其中左邊 1/3 面積再度崩塌、下方約 1/6 面積因護堤施工被刨除，剩餘部分約 240 平方公尺為觀測面積，噴植發芽生長良好，其中羅氏鹽膚木如預期的十分茂密，馬棘生長比較零星，有明顯開粉紅色花成株，如圖 5.2.11。

表 5.2.1：南化水庫新噴植木本植物覆蓋率

觀測日期	噴植數	發芽數	面積	發芽率	覆蓋率
113.07.18	600	40	240 m^2	6.7%	0.16 棵/m^2
113.10.12		56		9.3%	0.23 顆/m^2

(南化水庫 TN2 區塊約 300 m^2，因施工刨除及新崩塌坡面，有效面積調整為 240m^2。)

5.3 來義觀測成果

5.3.1 來義期中前觀測

本計畫於今年度提早執行噴植，主要是希望有更長的時間能夠讓種籽潛伏並遇到梅雨發芽成長，因此在 2 月份開始準備，3、4、5 月進行來義邊坡大面積的噴植。該崩塌邊坡經無人機實際拍攝兜圖，丈量得面積為 8.82 公頃，比原來目測的面積大出甚多。

表 5.3.1： 來義崩塌邊坡場域噴植數量

日期 113 年	噴植種籽 子彈數量	新噴植
3 月 1 日	290+320	四種種籽子彈 40 顆彈匣比例 馬棘+羅氏+百+波 15+15+5+5
3 月 4 日	560	
3 月 5 日	620+480	
3 月 12 日	680	
4 月 19 日	600	
合計	3550	

來義崩塌邊坡於 2 月份探勘時整個崩塌面都是光禿禿的，如圖 5.3.1 ，沒有任何植物，於 6 月 20 日檢視成果時，遠端觀測，崩塌面上已經長出部分的綠色植物，如圖 5.3.2 所示，須以無人機接近拍攝。



圖 5.3.1：來義崩塌邊坡 2 月初的狀況



圖 5.3.2：來義崩塌邊坡 6 月 20 日的對應狀況，表面有植物發芽



圖 5.3.3： 來義崩塌邊坡羅氏鹽膚木(藍圈)馬棘(紅圈)一窩一窩生長



圖 5.3.4： 來義崩塌邊坡羅氏鹽膚木(黃圈)與馬棘(紅圈)混生



圖 5.3.5： 來義崩塌邊坡馬棘(紅)



圖 5.3.6： 來義崩塌邊坡羅氏鹽膚木(藍圈)與馬棘(紅圈)混生



圖 5.3.7： 來義崩塌邊坡馬棘(紅圈)

從維基百科文獻上讀到，羅氏鹽膚木偏好鹼性及鹽性土地，2 月初在來義地區土質採樣檢測的結果傾向於鹼性ph 8-9，如圖 3.2.1，因此本地區觀測的結果會適合羅氏鹽膚木的發芽生長。

因為崩塌地十分陡峭且高度超過 80 公尺，飛手至噴植距離超過 200 公尺，噴植種籽很難均勻分布，形成一窩一窩的發芽兩種混生。

屏東來義地區三月份以前比較乾旱，五月份的梅雨季開始陸續雨水比較充沛，直至七月底颱風入侵，南部地區雨勢甚大，對噴植的植物成長有兩個極端的效應，缺點是大量雨水沖刷，陡峭的崩塌坡很容易被沖刷清洗，但是優點是若 3 月份噴植已經發芽，則可能有機或存活成長。本年度工作將陸續觀測成果。

113 年度為了迎接雨水到來，噴植工作計畫提早在計畫啟動就進行。如前述紀錄噴植作業始於 3 月 1 日，及後續的加強噴植。南部地

區於五月下旬梅雨季節開始多雨，至七月(22-25 日)下旬的凱米颱風至八月中旬(8-19 日)連續雷陣雨，來義地區水分充沛。

唯一可惜的是陡峭的崩塌邊坡，受到颱風侵襲，一大片噴植成功區塊再度崩踏。

由於地質甚差，觀測結果差強人意。加上颱風侵襲，造成新的崩塌，原已發芽部分均被弭平，需重新補強。

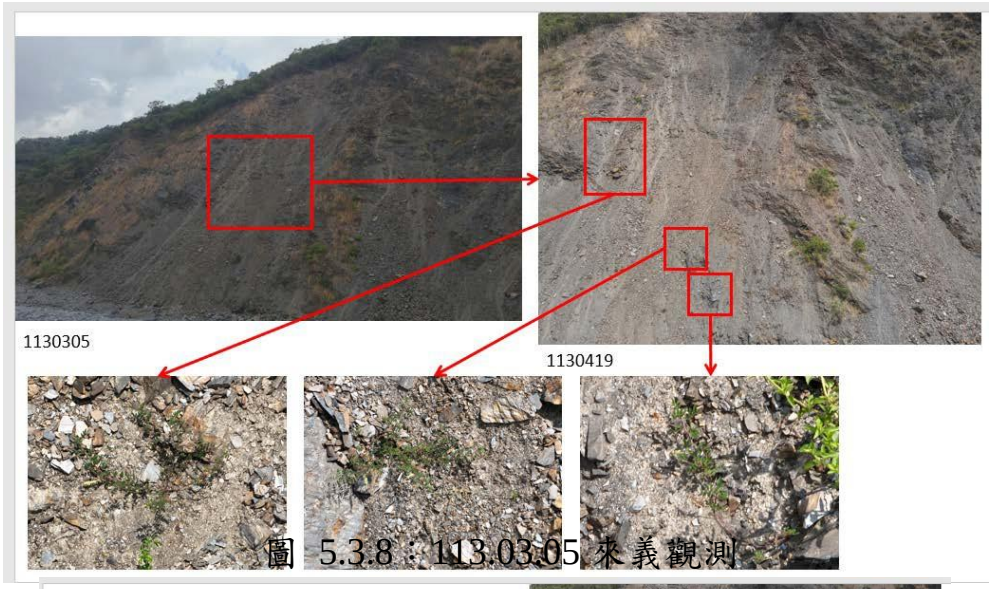


圖 5.3.8：113.03.05 來義觀測

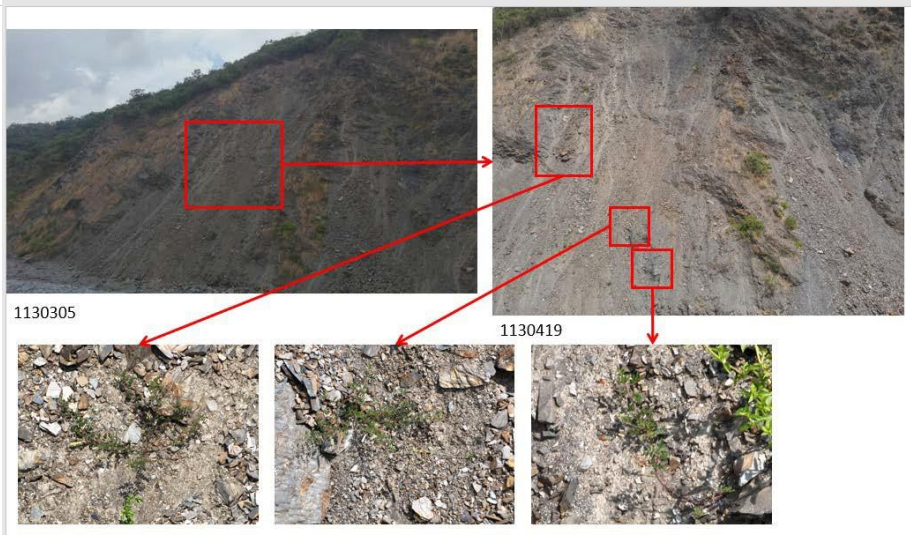


圖 5.3.9：113.03.05 來義觀測



圖 5.3.10：113.07.25 來義觀測，凱米颱風過後



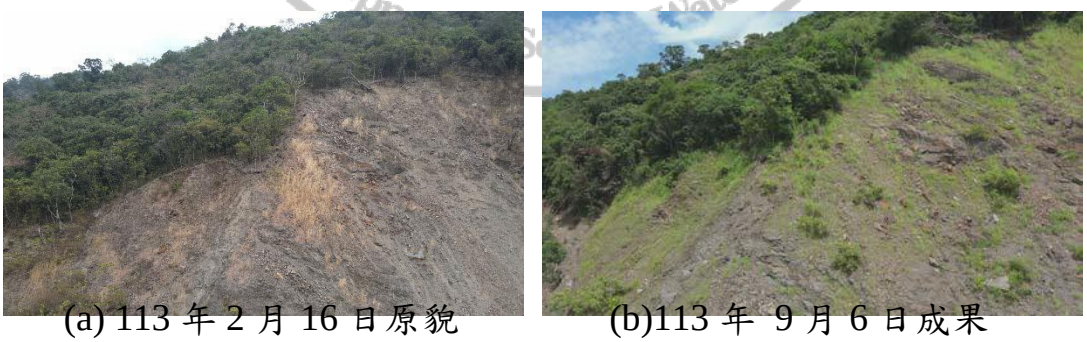
圖 5.3.11：113.07.25 觀測，凱米颱風過後，來義左區紅圈新崩塌



圖 5.3.12：113.07.25 凱米颱風過後來義殘株觀測

5.3.2 來義成果觀測 9 月 6 日

9 月 6 日當天同時觀測來義地區的噴植成果，如圖 5.3.13(a)所示，對照 2 月 16 日會勘之崩塌地原貌，如圖 5.3.13(b)所示，該範圍百慕達草發芽與覆蓋狀況良好，但是無法精確計數。



(a) 113 年 2 月 16 日原貌　(b)113 年 9 月 6 日成果

圖 5.3.13：來義地區觀測成果對照

圖 5.3.13 來義噴植區塊，面積大約 1.6 公頃(80mx200m)，未再度崩塌部分約 1.0 公頃。



(藍圈羅氏鹽膚木、紅圈馬棘、黃圈百慕達草)

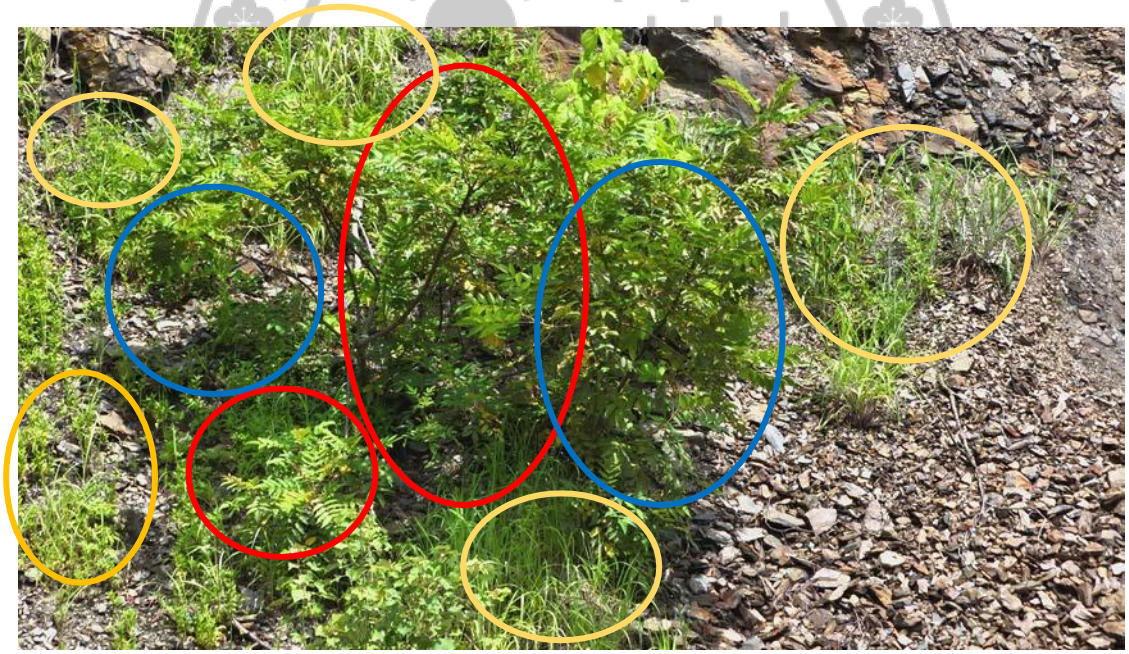


圖 5.3.14：113 年 9 月 6 日來義地區觀測成果
(藍圈羅氏鹽膚木、紅圈馬棘、黃圈百慕達草)

5.3.2 來義成果觀測 10 月 30 日

因受凱米颱風破壞，來義崩塌邊坡於 9 月 6 日再度加強噴植，撒下約 1000 顆木本植物(羅氏鹽膚木及馬棘)種子。計畫期末及康芮颱風將至於 10 月 30 日做最後成果檢視，獲得結果差強人意，因為來義崩塌邊坡持續再崩落。圖 5.3.15 為 10 月 30 日遠視照片。



圖 5.3.15：來義崩塌邊坡 10 月 30 日結果，再度崩塌

本場域大部分噴植種籽發芽不甚明顯，可能是種籽潛伏期較長，其中如圖 5.3.16 所標的幾個區域有 113 年 3 月噴植的羅氏鹽膚木明顯發芽成長，觀測對照羅氏鹽膚木開出黃花或淺紅紫花。



圖 5.3.16：來義崩塌邊坡，3 月噴植的羅氏鹽膚木，長大開花
(紅圈為羅氏鹽膚木)

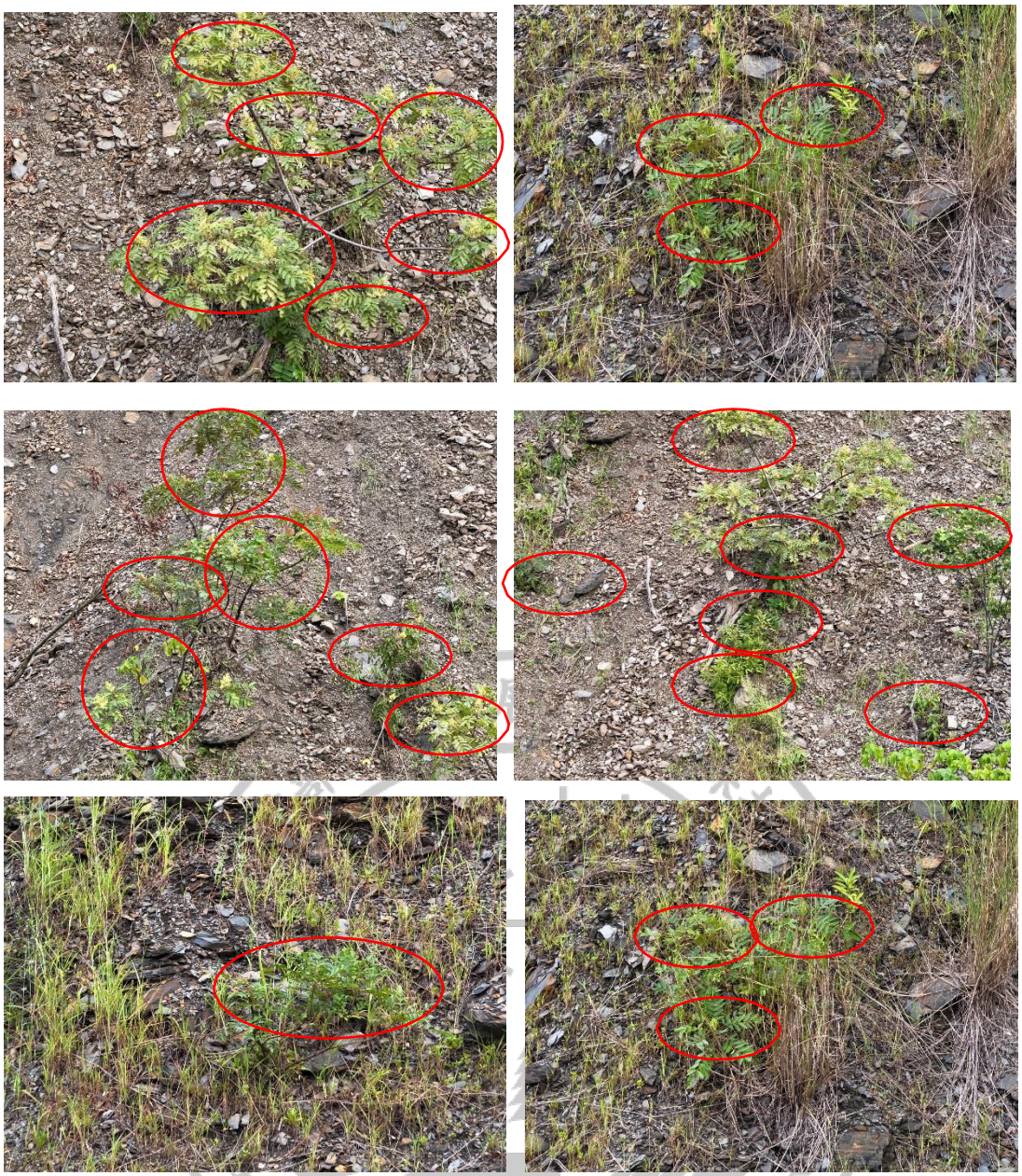


圖 5.3.17：來義崩塌邊坡，6 月噴植的羅氏鹽膚木，尚未長大開花



圖 5.3.18：來義邊坡再度崩塌被毀(黃圈)的羅氏鹽膚木
(紅圈活的羅氏鹽膚木)



圖 5.3.19：來義邊坡 3 月初噴植的百慕達草與其他植物混生
(紅圈為羅氏鹽膚木)

表 5.3.2： 來義崩塌邊坡場域噴植

日期 113 年	噴植種籽 子彈數量	新噴植
3 月 1 日至 4 月 19 日	3550	四種種籽子彈
9 月 6 日	1000	羅氏鹽膚木與馬棘
合計	4550	

表 5.3.1：來義崩塌邊坡木本植物覆蓋率 9 月 6 日增修數據

觀測日期	噴植數	發芽數	面積	發芽率	覆蓋率
113.08.01	3550	93	16000 m^2	2.6%	0.0058 棵/m^2
113.09.06		367		10.3%	0.0229 棵/m^2
113.10.30	4550	382	10000 m^2	8.4%	0.0382 棵/m^2

(來義邊坡實施 16,000 m^2，因其中左側部分再度崩塌無法納入評估，僅就殘餘 10,000 m^2 做評估。)

來義崩塌邊坡觀測結果，因受再度崩塌之影響，部分羅氏鹽膚木崩倒，如圖 5.3.18 所示。10 月 30 日觀測與 9 月 6 日觀測新增數量不多，新成長與被再度崩塌摧毀的結果，9 月 6 日的噴植效果尚未出現。圖 5.3.19 觀測到仍有續多其他植物混雜生長。

圖 5.3.16 顯示 113 年度 3 月噴植之羅氏鹽膚木長大到 60~90 公分，且已經開花，羅氏鹽膚木對本區域的崩塌鞏固應該會有效果。惟該區塊噴植之馬棘完全不見蹤跡，可能與植物與地質環境的屬性有關，尚待後續觀察。

六、計畫執行成果探討

從前面第四章及第五章所拍攝的噴植場域狀況及成果對照，可以明顯看到本計畫執行的成效，將苗栗明德水庫附近苗 26 線道 12k 處(面積約 50 平方公尺)、台南玉井南化水庫附近台 20 道 46.5k 處(面積約 300 平方公尺)、以及屏東來義鄉崩塌邊坡(實作面積約 1.6 公頃)，將觀測道的發芽木本與草本植物概略紀載於表。下表數據只能代表本噴植任務的概略成果數值，因為噴植場域人員無法攀爬，只能利用無人機拍攝，可能錯過部分發芽成長的植物。

表 5.1.1： 苗 26 縣道草本植物發芽率觀數據

觀測日期	噴植數/面積	發芽數	發芽率	
112.11.30	160/ 200 m^2	15	9.375%	
113.07.18		24	15%	有增長
113.09.26		42	26.25%	有增長茂盛

表 5.2.1：南化水庫噴植木本植物覆蓋率數據

觀測日期	噴植數	發芽數	面積	發芽率	覆蓋率
113.07.18	600	40	240 m^2	6.7%	0.16 棵/m^2
113.10.12		56		9.3%	0.23 顆/m^2

(南化水庫 TN2 區塊約 300 m^2，因施工刨除及新崩塌坡面，有效面積調整為 240m^2。)

表 5.3.1：來義崩塌邊坡木本植物覆蓋率數據

觀測日期	噴植數	發芽數	面積	發芽率	覆蓋率
113.08.01	3550	93	16000 m^2	2.6%	0.0058 棵/m^2
113.09.06		367		10.3%	0.0229 棵/m^2
113.10.30	4550	382	10000 m^2	8.4%	0.0382 棵/m^2

(來義邊坡實施 16,000 m^2，因其中左側部分再度崩塌無法納入評估，僅就殘餘 10,000 m^2 做評估。)

從三個噴植場域的觀測成果，本計畫所執行的成效有達到一定的貢獻，該區塊原來是一片光禿的崩塌邊坡，至計畫期限內最後的觀測，都已經轉成綠油油的邊坡，對水土保持與植栽復育，有明顯的成果。惟

本計畫主持團隊不甚清楚復育地區的發芽率及覆蓋率是否有特定的水準，將諮詢計畫顧問及水保署長官提供意見，以為後續維護本噴植績效的參考指標。

本計畫本年度完成水土保持學報(113 年 6 月刊登)及航太年會(12 月 7 日)各一篇投稿，以展顯本計畫之技術成果，詳如附件二、附件三，無人機的應用帶給航太領域學者專家重要參考價值。

七、結論

本計畫執行陡峭崩塌邊坡之職務噴植任務，主要是選擇坡度陡峭60%以上、人員難以攀爬接近的崩塌邊坡，利用無人機、特殊的設計噴植機構及種籽子彈，噴植根部密集抓地力較強的本土植栽草本植物(百慕達草、波斯菊)及木本植物(馬棘、羅氏鹽膚木)，於 112 年及 113 年兩年的工作成果。本計畫 112 年原選擇台南龍崎牛埔及玉井沙田極端惡地，無法獲得成果，收後更換至苗栗明德水庫附近的苗 124、126、26 線道邊坡、玉井南化水庫台 20 道邊坡，獲得顯著成效。113 年選擇屏東來義地區陡峭邊坡，進行本計畫的噴植技術，獲得初步成果。

本計畫受邀於 113 年 9 月 24 日於水保署「減災監測專題分享視訊會議」分享本計畫 112 年成果，會議中參與長官提示本計畫宜持續跟蹤觀測已經噴植之場域，長期追蹤後續成果。本計畫確實已經持續觀測明德水庫苗 26 線道 12k 處及南化水庫省 20 道 46.5k 處之噴植成果，紀錄於本計畫報告中，觀測結果該兩處噴植場域均有持續的擴充成果，紀錄統計數據。

本年度計畫以屏東來義崩塌邊坡為主，該場域有大約 8 公頃坡度超過 70%之崩塌邊坡，雖然 7 月 25 日凱米颱風造成其中約 0.5 公頃再度崩塌，毀掉本年度的噴植覆蓋面積，但綜觀來義邊坡之噴植成效

仍然有充分的成果證據，以支撐本計畫執行方法的技術可行性。

本計畫執行兩年期間，參與之團隊員工，出勤次數超過 57 次，均在十分安全的狀況下執行任務業務，這也是水土保持工務安全十分重要的參考指標。執行期間所有參與人員均加保第三類工業安全保險，含交通意外等。

為了延續崩塌邊坡水土保持工作的重要需求，本研究將申請下一年度計畫，執行兩大工作項目：

(1) 進行來義崩塌邊坡 8 公頃面積全面噴植，採用過去兩年的經驗，將以木本的馬棘與羅氏鹽膚木為主、草本的百慕達草為輔的噴 植；

(2) 持續觀察 112、113 年在苗栗明德水庫苗 26 線道 12k、台南玉井南化水庫台 20 道 46.5k、屏東來義邊坡所執行的噴植成果，紀錄噴植成效及分析水土保持的價值。

參考文獻

[1] 經濟部水利署施工規範第 02924 章鋪網噴植，110 年 02 月 05 日經水工字第 11005038590 號函頒訂，網路資料：https://wralaw.wra.gov.tw/Law_Content.aspx?n=9334&s=11857&sms=9191。

[2] 農業部“水土保持技術規範”， 網路資料: https://law.moa.gov.tw/GLRSnewsout/LawContent.aspx?id=FL014521。

[3] 經濟部水利署“工法-修坡植栽”，https://www.wra.gov.tw/cp.aspx?n=25176#，2022 年 8 月網路資料。

[4] 行政院農業委員會水土保護局第 0940030270 號函發布，第 02921 章“噴植草”， https://www.swcb.gov.tw/Home/。

[5] 李元智、李錦浚、黃育珍、張禎顴，“不同噴植植生工作法應用於道路邊坡之研究”，水土保持學報，39(2):201-215(2007)。

[6] 巫清志、張瑋珈， 國立嘉義大學，“無人機載具噴灑植生粒劑之研究成果報告書”， 行政院農業委員會水土保持局(2018)。

[7] 張集豪，“無人飛行載具(UAV)播種作業機具與噴植設備之精進研發成果報告書”，行政院農業委員會水土保持局(2019)。

[8] 詹勳全、林政侑，“ 陡坡崩塌地無人飛行載具(UAV)噴植工法作業與驗證成果報告書”， 行政院農業委員會水土保持局(2019)。

[9] 林政侑， 陡坡崩塌地無人飛行載具 UAV 噴植工法之精進研究”，

水保局計畫報告：109 保發-11.1-保-01-06-001(13)。

[10] 黃國峰，“荒月變綠洲 泥岩創生機－牛埔泥岩水土保持教學園區”，農政與農情，第 206 期 (2009)，https://www.coa.gov.tw/ws.php?id=20026

[11] 臺南市龍崎區公所，龍崎悠遊樂－牛埔泥岩教學園區，2022 年 10 月 22 日，取自臺南市龍崎區公所網頁：https://longci.tainan.gov.tw/cp.aspx?n=7371

[12] 新校植物名實圖考”，世界書局股份有限公司出版，第一版 2018 年 07 月，ISBN: 978-957-06-0473-3。

[13] 陳彥宏、林信輝， 崩塌地應用無人機播種植生工法技術研發與試驗性研究”，專輯: 治山防災工程及無人機應用，2020。

[14] 郭玉麟、簡士豪， 坡地人工噴植復育區植生演替趨勢調查分析”，水保技術 2020.11， Vol. 14, No. 3, pp. 42-57。

[15] 邱創益、謝衫舟，“農業技術在坡面植生方面應用之方法”，農業綜合調整方案試驗研究年度總報告，1995。

[16] 簡士豪，”功能化植生粒劑對邊坡植生復育之效益評估”， 水保局報告，109 保發-11.1-保-01-06-004(33)。

[17] 許愷岐、宋國彰、林信輝、蕭惠民， UAV 於崩塌地植生播種作業與實施應用”， 中華水土保持學報 52(1):16-26(2021)，Doi: 10.29417/JCSWC.20210352(1).0002。

[18] 林信輝，“噴植工法不同資材種籽發芽與覆蓋率比較分析”， 水土保持學報，45(3):737-752(2013)。

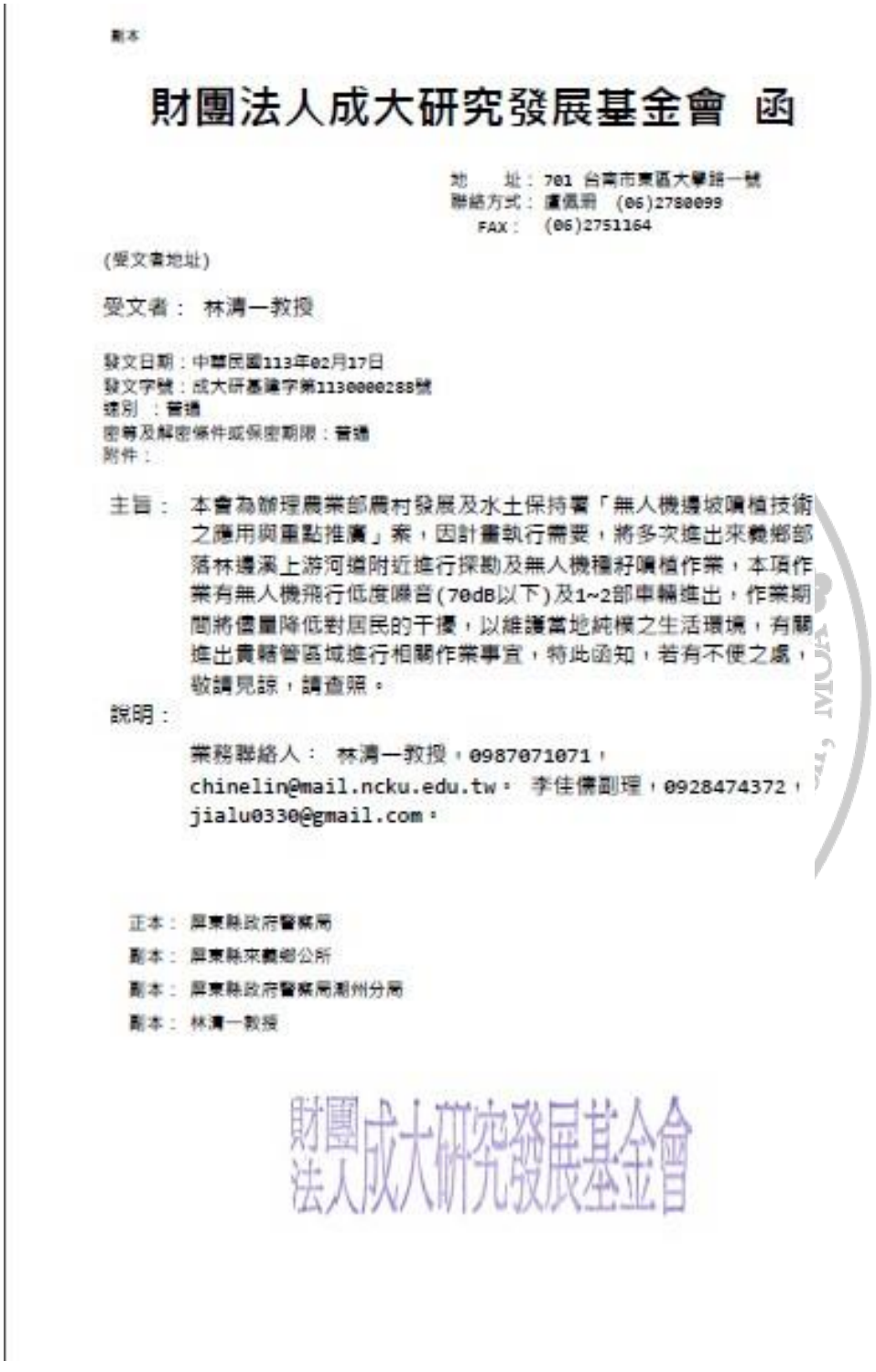
[19] 巫清志、章瑋珈、林信輝， 噴植工法不同材質種籽發芽與覆蓋率比較分析”，水土保持學報 45(3):737-752 (2013)。

[20] 邵珮琪、林清一， 利用無人機於邊坡噴植 創新技術可行性研究”，水保學報，JCSWC 55(2):73-83(113)，
DOI: 10.29417/JCSWC.11306_55(2).0003

農業部農村發展及水土保持署
Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

附件一

由於本計畫工作團隊須經常進出來義鄉噴職場域，成大研究發展基金會行文知會 屏東縣政府警察局、來義派出所等單位



副本

財團法人成大研究發展基金會 函

地　　址：701 台南市東區大學路一號
聯絡方式：盧佩珊 (06)2780099
FAX：(06)2751164

(受文者地址)

受文者： 林清一教授

發文日期：中華民國113年02月17日
發文字號：成大研基識字第1130000288號
速別 ：普通
密等及解密條件或保密期限：普通
附件：

主旨： 本會為辦理農業部農村發展及水土保持署「無人機邊坡噴植技術之應用與重點推廣」案，因計畫執行需要，將多次進出來義鄉部落林邊溪上游河道附近進行探勘及無人機種籽噴植作業，本項作業有無人機飛行低度噪音(70dB以下)及1~2部車輛進出，作業期間將儘量降低對居民的干擾，以維護當地純樸之生活環境，有關進出貴轄管區域進行相關作業事宜，特此函知，若有不便之處，敬請見諒，請查照。

說明：

業務聯絡人： 林清一教授，0987071071，chinelin@mail.ncku.edu.tw； 李佳儒副理，0928474372，jialu0330@gmail.com。

正本： 屏東縣政府警察局
副本： 屏東縣來義鄉公所
副本： 屏東縣政府警察局潮州分局
副本： 林清一教授

財團法人成大研究發展基金會

附件二　水保學報成果發表紀錄

利用無人機於邊坡噴植 ── 創新技術可行性研究

附件三　113 年航太年會論文

113 年 12 月 7 日於成功大學，無人機邊坡噴植技術 ── 驗證與發展

農業部農村發展及水土保持署
Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

中華水土保持學報, 55(2):73-83(2024)
Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 55 (2)*: 73-83* (2024)
DOI: 10.29417/JCSWC.202406_55(2).0003

利用無人機於邊坡噴植－創新技術可行性研究

邵珮琪[1] 林清一[2]*

摘　要　陡峭崩塌邊坡很難接近去執行復原的植栽工作。在此情況下，利用無人機遠端操作的噴植技術能夠找到安全可行的方法，對施工困難的區域進行植栽。本文提出一個新的噴植技術，達成測試實驗。以本土的種籽填塞在子彈型外包，裝載在無人機上噴射至邊坡上。透過 GPS 定位瞄準與飛行路線規劃，種籽子彈可以精確的噴植到規劃的區域。本技術發展一套噴植機構、製作種籽子彈、40 發子彈的彈匣、以及 100psi 的噴壓系統，噴射種籽子彈沾黏到邊坡上等待發芽。種籽子彈為環保材料，包含本土適用的種籽品種、當地的泥土、紙吸管、牙籤等，可以完全分解於大自然。創新的實驗包含系統規劃、設計製造、場域選擇、噴植測試、紀錄及改進，以建立一套可用的標準作業程序以符合未來的推廣。無人機噴植過程可以飛到陡峭邊坡 (>60%)
上去發射種籽子彈，有 60%的沾粘成功率。在雨季降臨後，歷經 2 至 3 個月的發芽期，觀測到好的初步成果。在兩個 20 平方公尺的面積內，草本植物發芽率達到 37.5%及 58.5%；一個 55 平方公尺的面積內，木本植物覆蓋率達到 0.75 至 2.84 棵幼苗/平方公尺。本研究的結果發展出對陡峭的崩塌邊坡做植栽復原方便可用的技術， 可以安全有效的完成任務。
關鍵詞：噴植技術，無人機應用，種籽子彈，泥土催化，噴植機構。

Spray Planting on Side Slopes Using an Unmanned Aerial Vehicle: An Innovation and Feasibility Study

P.C. Shao[1] C.E. Lin[2]*

ABSTRACT Steep and collapsed side slopes pose challenges for recovery planting. Spray planting using a remotely operated unmanned aerial vehicle (UAV) can serve as a safe and feasible solution for recovery planting under such circumstances. In this study, native seeds were molded into bullets and mounted onto a UAV to be precisely shot onto side slopes with the assistance of the Global Positioning System and path planning. The proposed technology comprises a spray mechanism, seed bullets, 40 bullet magazines, and a 100-psi air blast system to inject the seed bullets into the side slope for germination. The seed bullets were composed of ecofriendly materials-including native species, local soil, paper straws, and tooth sticks-all of which decompose naturally. The proposed innovative experimental plan comprises multiple stages-namely system planning, design and manufacture, site selection, spray planting tests, and recording and improvement-to establish a standard operation procedure for future application. The spray planting technique accomplished an attachment rate of 60% on side slopes steeper than 60%. After the monsoons and 2-3 months of germination, the planting site exhibited favorable preliminary results. Specifically, the germination rates of grass species were 37.5%, 58.5%, and 71% over two regions with areas of 20 m^2 each. Furthermore, the germination coverage rates of tree species were 0.75, 2.1, and 2.84 saplings/m^2 over a region covering an area of 55 m^2. This study demonstrated a feasible and useful technology for effectively accomplishing recovery planting on steep side slopes.
Key Words: Spray planting, unmanned aerial vehicle application, seed bullet, soil catalyzing, injection mechanism.

引　言

台灣位於地震斷層，颶風襲擊海岸，自然災害經常造成嚴重的土地破壞。透過水土保持來恢復土地非常重要，目前很多地方都在進行邊坡人工林復育工作。由於邊坡是一種地理結構，1：1 至 1：2 的坡度在重力作用下會導致潛在的崩塌、甚至擴大面積而產生危險。為了減少山體邊坡災害，採用噴植法穩定崩塌區，加速地表綠化具有重要意義。

《國家土壤水資源保護技術規範》「Water and Soil Conservation Technical Regulations, Forestry and Nature Conservation Agency, Ministry of Agriculture」(2020) 中描述了土壤水資源保護中的調查方法和工程、農學、植被應用於治理和維護的應用，其目的在於保護水資源、自然生態和環境，防止沖刷、崩塌、滑坡、泥石流、洪水、土石流等地質災害的發

〔1〕長榮大學航運管理學系
Department of Aviation & Maritime Transportation Management, Chang Jung Christian University, Tainan, Taiwan
〔2〕成功大學航太系、成大研究發基金會
Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University, NCKU Foundation, Tainan, Taiwan
* Corresponding Author. E-mail: chinelin@mail.ncku.edu.tw

生。在生態保育中，大部分地方採用框架護坡、直接噴灑種籽或二次植被等方式，在工作人員可及的地方採用植被方法。這些方法可以有效穩定邊坡，增加地表覆蓋率，減少土壤沖刷，增加水源保護，甚至吸引動物休息。此外，道路和山區景觀也變得更好。

對於恢復和保護種植園，種植機制與選擇噴灑種籽同樣重要。植物和種籽的物理和化學特性與土地和土壤特性有關 (Lemaire, F., 1995)，應提前進行土地調查。對於每塊土地，可以選擇一些開拓物種來適應特定地區的氣候 (Whitemore, T.C., 1983) 和特定的生態群體 (Whitemore, T.C., 1989)。大多數情況下，應僅考慮原始本地物種，以防止衍生的生態影響。

要進行坡度邊坡復原，必須進行地質勘測，包括基本岩石和地下水的土壤結構。將收集信息，以評估保護區域內種植的可行物種。依照規定，選擇一個約 20～25 平方公尺的實驗噴植地點。參考過去的研究報告，大部分平原、丘陵都容易恢復植被 (Lin et al., 2011)。只有坡度較高 (> 50%) 或距離較遠的邊坡，例如偏遠的山坡，可能需要更進一步的解決方案。

台灣植物研究提供了一個重要的指南，可以找到適合的物種、劑量和種植季節。(Huang, T.C., 1997-2003)。台灣經常下雨，大多數農業物種在正常的氣候循環下，只要澆水施肥即可發芽生長。邊坡人工林可分為草種和樹種兩類。草種主要採用噴施；而樹種可以透過播種來施用。為了消除外來物種對台灣生態的影響，選擇物種是重要的考量。透過諮詢種植專業人士的意見，本實驗選取草種為百慕達、大波斯菊， 樹種為羅氏鹽膚木、馬棘等 (Huang, T.C., 1997-2003)。它們被稱為本土物種，對台灣的生態系統友善。

在自然災害發生後，除了山區外，還需要通過種植來恢復危險的崩塌區域。這項工作應遵循《土地和水資源保護技術規定》，採用適當的工程、土壤栽培和植被方法進行處理和維護「 Water and Soil Conservation Technical Regulations, Forestry and Nature Conservation Agency, Ministry of Agriculture」(2020)。對於陡峭的邊坡，使用噴植和水土保持技術來恢復不穩定的邊坡 (Lin et al., 2011)。一些主要的研究團隊已經投入了大量的努力進行這些項目的研究，但這也對恢復種植的人力構成了威脅。這些研究的重點主要集中在對陡峭的山區和邊坡進行復育，而是不同的高速公路旁邊的種植。已開發的方法設計了大型種籽包，在邊坡上進行種植。根據結果雖然成功，但困難度高「Forestry and Nature Conservation Agency, Ministry of Agriculture」(2019) (Lee et al., 2007)。另外噴植與水混合噴灑的水研究有所不同。本文中，噴植專注於採用獨特機制的播種過程 (Lee et al., 2007)。陡峭的側坡大多遠離人員可達的距離或環境，例如遠離道路、在河床上方或在山後。對於那些坡度大於 1：2 或 60%甚至更高的斜坡，人們很難攀爬並到達進行播種。即使使用懸吊纜索，進行種植工作也很危險。

目前無人機技術已成熟可用，使用無人機可以將人類視野延伸到無法觸及的地區 Fahlstrom and Gleason (2012)。多旋翼無人機設計為在狹窄空間中輕鬆起飛和降落，無需跑道。小型多旋翼無人機可以輕鬆將種籽運送到山區，並以適當的飛行控制噴灑到被毀壞的地區。除了空中監視外，本研究提出了一種替代設計，將噴植機構安裝到無人機上，並飛往崩塌區域進行噴植。但是對種籽如何黏附到陡峭的邊坡上是比較值得擔憂的問題。

對於噴植，噴植機構和選擇種籽一樣重要。在實際實施之前，應提前研究種植區域的植物物種識別 (Lemaire, F., 1995)，水和土壤 (Whitemore, T.C., 1983)、地區氣候和生態 (Whitemore, T.C., 1989) 以及採用的方法是成功的關鍵因素。為了刺激種籽發芽，可以利用本地土壤、保水劑和陽光等自然材料的混合 Mustart and Cowling(1993)。但在土壤堅硬且坡度陡峭的地區，噴植工作變得更加困難。

根據研究論文，許多有效的方法被採用於噴植 (Lee et al., 2007)。無人機噴植系統的替代提議將試圖簡化進行噴植工作的繁重、繁瑣及危險的過程。過去，曾有幾起引進外來物種進行種植的案例。這對環境造成了生態災難。因此，噴植物種的選擇應該能夠適應的草本或木本的本地物種。

在噴植過程中，草本種籽和木本種籽都是可能的選擇目標，這將影響噴植的密度和面積。草本或木本的發芽覆蓋面積有不同的基準，取決於水土保持目標。通常，我們根據播種數量的幼苗數來計算草本類的發芽數量；而木本類則以每平方公尺的發芽幼苗數來計算 (Wu et al., 2013)。

本研究試圖通過使用種籽彈的無人機噴植機制來實現這一想法。在本研究中，設計和製造了一個方便的系統進行創新性實驗。選擇了土壤環境惡劣的山區地區進行噴植測試並記錄。但事實上，那些極其惡劣的地區在早期測試中並沒有十分成功，只有溫和的生態環境才能生存。在我們的實驗中，我們首先從 2023 年 5 月至 10 月噴植了草本植物，然後從 2023 年 9 月至 10 月噴植了木本植物。由於植物發芽需要時間，觀察結果直到 2024 年 2 月為期 97 天。整體結果顯示，所提出的無人機噴植計劃技術的可行性和努力是值得進一步擴大規模執行的。

無人機噴植系統

1. 種籽彈噴植

根據一些參考文獻「Forestry and Nature Conservation Agency, Ministry of Agriculture」(2019) (Lee et al., 2007)，種籽子彈通常用於投擲種植。製造過程繁瑣，流程複雜，而且將種籽子彈投擲出去也受到山坡傾斜角度和釋放位置的限制。所提出的無人機種籽噴植計畫試圖設計種籽子彈，並從空氣噴射機構中注入。這個想法是受到一個玩具組合的啟發並重新配置而來。

子彈設計有 12 毫米的紙質吸管，如圖 1 所示，可裝入玩具槍彈匣中。

這顆種籽子彈是由長度 50 至 70 毫米的一段紙吸管製成，取決於需求。它內部填充濕潤的泥土和草籽。在第一階段，本研究選擇了兩種草種，分別是百慕達草和波斯菊。它們在台灣的熱帶氣候中易於發芽，並且在各個季節都有充足

的溼度可以滋潤 (Huang, T.C., 1997-2003)。

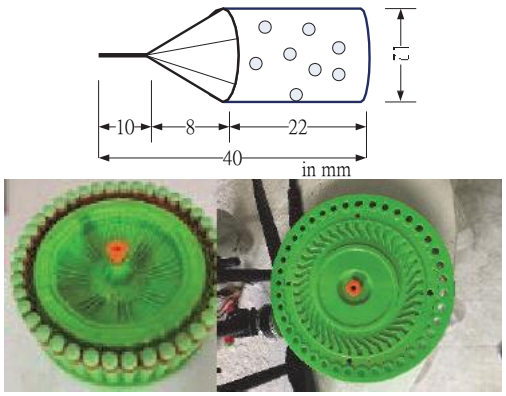


圖 1 種籽子彈和 40 發子彈的彈匣

Fig.1 The seed bullet and a 40 bullet magazine

在種籽子彈前端添加了一根牙籤，以幫助種籽彈黏在陡峭的山坡上。種籽子彈需要一定的重量才能獲得足夠的動能黏在上面。濕潤的泥土與兩種種籽混合，並由煮熟的米飯封閉。每顆種籽彈約重 8 克，含有約 300 顆種籽。

為了減少對環境的影響，所選材料包括(1) 紙吸管、(2) 草籽、(3) 牙籤、(4) 煮熟的米飯。這些材料易於分解並吸收到地球的土壤中。

2. 對照試種

如圖 2 所示，進行了試種實驗以觀察種籽子彈材料的老化和分解過程。試驗使用了四季豆進行觀察發芽。這些種籽子彈不會對環境造成污染。圖 2 僅用於觀察紙吸管的老化和分解情況，持續幾天。結果顯示，這個想法對種植土壤沒有污染問題。



圖 2 四季豆自然分解、2 天、10 天、30 天的子彈

Fig.2 Bullet of String Bean in natural decomposition, 2 days, 10 days, and 30 days

3. 對比種植

進行了直接噴灑和種籽子彈噴植兩種方式的比較種植。每個區域是 1 公尺x1 公尺的正方形。14 天後，種籽彈的紙吸管已經分解，使種籽散布到土壤上。兩種草本類都生長良好。

根據一本電子書 (Huang, T.C., 1997-2003)，百慕達草適合炎熱或寒冷、乾燥或潮濕的環境，但不能在沒有陽光的情況下遮蔭，它幾乎在台灣的各個地方都有分布。波斯菊草也是一種喜歡陽光的品種，適合寒冷或炎熱的環境。它容易培育成一片花海。這兩種草本類都可以長到 1 公尺高，有著大型纖維根。纖維根對於山坡斜坡上抓牢土壤非常有用。

對照實驗是在後花園劃出兩個 1 平方公尺的區塊，分別進行了兩種草類的比較測試。第一個測試是應用在百慕達草上。但是很難與其他當地原生草區分開來。第二個測試在每個區塊中混合了兩種草。由於種籽子彈可以很容易地分解， 所以在 14 天後的生長中幾乎沒有差異，如表 1 所示。兩種草類都生長了，但從波斯菊來看更容易分辨出來，在比較播種中，波斯菊更難發芽。

它們的特性是在所有季節都很容易發芽，一顆種籽子彈將波斯菊和百慕達草混在其中。相比之下，這兩種草都可以長到 70 公分或更高。但是百慕達草的根比其他草要長。這是在山坡上生長以抓住土壤以防止滑動或崩塌的重要特性。

表 1 兩種草類的比較發芽情況

Table 1 Comparison germination of two grass species

日期	樣本	種籽彈	直接噴植
	百慕達草 波斯菊	20顆子彈/2平方公尺	1克種籽 直接噴灑
6月8日		400 seeds	300 seeds
		發芽苗木(百分比)	
6月22日	百慕達草	63 (15%)	77 (26%)
7月15日	百慕達草	85 (21%)	115 (38%)
7月15日	波斯菊	4 (1%)	7 (2.3%)

噴射裝彈機構

當子彈裝入彈匣時，採用氣動衝壓裝置設計了噴射機構。它包括一個氣泵、一個小氣罐、一個壓力設定裝置、一個釋放開關和一個自動重新加壓過程，如圖 3 所示。彈匣經過詳細設計和製造，可在射擊後轉動每一步。氣泵經過測試， 可以設定足夠的壓力，以所需的速度發射子彈。經過先鋒測試後，更換了更大的氣泵。其壓力高達 100 psi，可向 8 公尺牆目標發射 8 克子彈。由於無人機應避免距離邊坡距離太近，根據邊坡風流的情況，5~8 公尺的距離是可控安全飛行的必要條件。瞄準角度設定為與無人機 X 軸水平。這也方便飛行員從操作畫面查看目標。



圖 3 種籽子彈彈匣和氣動氣體噴射控制

Fig.3 Bullet magazine and pneumatic air blast control

圖 4 展示了氣動氣體噴射裝置安裝在軸距 850mm 六軸無人機上，該無人機攜帶 40 個子彈的彈匣進行試飛。該無人機有效載重小於 5 公斤，不會影響最大起飛重量限制，可以搭載 8700 mAh 的鋰聚電池 (LiPo) 以確保足夠的飛行續航力。本計畫完成三架無人機組裝，均可掛載噴植系統供使用。



圖 4 裝配完成的噴植物種植無人機，並進行了飛行測試

Fig.4 Complete assembly of spray plating UAV with flight test

噴　　植

1. 場地及環境

台南南化水庫區域 (TN 1、2、3) 和苗栗明德水庫區域 (ML 1、2、3) 的噴植情況已記錄在表 2 中。由於苗栗 1 和 2 的崩塌工程摧毀了測試場地，故某些植栽飛行未予記錄。在 TN3 和 ML3 的 9 月 28 日和 10 月 6 日標記的測試相當成功。地理上，台南位於台灣南部，而苗栗則位於台灣北部。北部地區降雨豐沛。

在準備首次噴植之前，台灣地區自 2022 年 9 月以來一直遭受極端乾旱的天氣，尤其是在台南地區。預計在 5 月中旬後才可能逐漸轉入梅雨季節。噴植將等待到 5 月 15 日開始的梅雨季節。

在這個專案的提案中，首先選定了三個地區，沒有關於乾旱條件的信息。從所選地區中挑選了超過 12 個地點進行測試。大多數選定的地點都太乾燥，無法進行任何種植。三個地區分別是 (1) 台南玉井、(2) 高雄牛埔，以及(3) 苗栗 126 縣道，如圖 5 所示。從 2022 年 9 月至 2023 年 5 月期間都沒有下過雨，一直持續乾旱。每個地區都在 2023 年 4 月進行了航空攝影，如圖 5 所示。土壤又硬又乾。從先驅的角度來看，顯然苗栗地區 (圖 5 右側) 可能更適合進行噴植。苗栗和台南的地點靠近明德水庫和南化水庫。

表 2 噴霧種植記錄

Table 2　Spray planting records

日期	種籽	地點/土質	坡度	濕度	溫度	數量	紀錄/觀測日期/植物
5/19	B	TN1, 3/SS	65%	40%	30˚C	2000	全部乾死
5/26	B+C	TN2/SS	70%	30%	30˚C	2000	乾死或雨水沖刷
6/28	B+C	ML1/SM	70%	75%	29˚C	400	發芽, 7/19. C
6/28	B+C	ML2/SM	65%	75%	29˚C	400	發芽, 7/19. B+C
6/28	B+C	ML3/SM	65%	75%	29˚C	400	發芽, 7/19, B
9/28	M+R	TN3/SM	65%	60%	30˚C	200	發芽, 11/04, 1/5, R
10/6	M+R	ML3/SM	65%	70%	28˚C	200	發芽, 11/5, 12/4, R

備註：物種為草本：百慕達草 (B) 和波斯菊 (C)，木本：馬棘 (M) 和羅氏鹽膚木 (R)，地點：台南南化水庫 (TN1、2、3)， 苗栗明德水庫 (ML1、2、3)，土壤：砂頁岩 (SS) 和軟泥岩 (SM)，數量：該區域內總噴植種籽子彈數量。



圖 5 選定的三個不適合噴植的區域，包括台南 (TN1、TN2) 和苗栗 (ML3)

Fig.5 Three bad areas for selected spray planting, Tainan (TN1, TN2) and Miao-Li (ML3)

第一次噴植始於 (1) 玉井和 (2) 牛埔，於 5 月 18 日至 30 日進行，每個地點使用 250 顆種籽子彈 (5000 顆種籽)，如圖 6 所示。直到六月底，噴植地點仍然非常乾燥。在季節性降雨後，於六月進行了第二次噴植，如圖 7 所示。在噴植過程中，我們試圖保持每平方米 20 顆種籽子彈 (約 600 顆種籽) 的噴植量，作為試驗的先導。



圖 6 5 月台南地區 (TN1、2) 首次噴播。每公尺噴霧量約 20 顆種籽子彈。這個區域大約有 400 顆種籽子彈

Fig.6 First spray planting on Area Tainan (TN1, 2) in May. The spray quantity is about 20 seed bullets/m2. This area is about 400 seed bullets



圖 7 六月在台南地區 (TN 1、2) 進行的第二次噴植。每平方公尺的噴植量約為 20 顆種籽子彈。該區域使用了約 600 顆種籽子彈

Fig.7 Second spray planting on Area Tainan (TN 1, 2) in June. The spray quantity is about 20 seed bullets/m2. This area is about 600 seed bullets

噴植工作轉移到了苗栗地區 (ML3)，這是台灣北部地區，降雨較多，氣溫較低。第一次噴植如圖 8 所示。地面狀況看起來比台南地區 (TN1、TN2) 要多，土壤潮濕。

在早期階段，噴植主要集中在百慕達草和波斯菊等草種，後來在九月份，我們轉為木本種籽，包括馬棘和羅氏鹽膚木。這個改變是來自於種籽和種植專家的建議，即木本的噴植數量可以比草多少許。建議的噴植量是每平方公尺木本為 2-4 顆樹種籽 (一顆種籽子彈)，草本則是每平方公尺 40 顆(5 顆種籽子彈)。從草本轉換到木本的噴植工作量會減少。但在實驗中，我們僅是混合不同的種類進行噴植。噴植工作持續了六個月，從 5 月 5 日到 10 月 6 日，隨後結束了項目工作。每個噴植點在觀察後 30 天記錄結果。然而，結果並不理想。

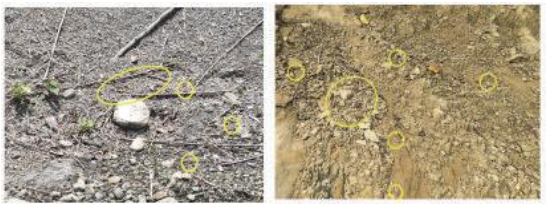


圖 8 苗栗地區 (ML3) 在 6 月 28 日的第一次噴植，經過降雨後進行。每平方公尺的噴植量約為 20 顆種籽子彈。該區域約有 600 顆種籽子彈。噴植正在進行中，照片如圖 9 所示

Fig.8 First spray planting on Miao-Li (ML3) Area on June 28 after rain. The spray quantity is about 20 seed bullets/m2. This area is about 600 seed bullets



圖 9 在苗栗地區 (ML3) 進行的噴植作業

Fig.9 A spray operation in Miao-Li Area (ML3)

在噴植中最重要的是，植物種類和種子的物理和化學性質對土地性質的影響，參考 Lemaire 的研究 (Whitemore, T.C., 1989)。對於每個土地性質，都應該進行早期的土壤調查，以選擇一些先驅種類，以適應所選定的氣候和某一生態群，確定適當的噴植，參考 Whitemore 的研究 (Lin et al., 2011)、(Huang, T.C., 1997-2003)。在進行植物種植區域的土壤 PH 值粗略測試時，我們發現台南地區的PH 值為 7-8，而苗栗地區的PH 值為 8-9。

2. 乾燥而堅硬的地區

在本計畫中，台南的地點被選定作為第一次實驗的地點。然而，自從 2022 年 9 月以來，直到 2023 年 5 月都沒有降雨。過去 9 個月的降雨記錄是 0。溫度通常為 20~35°C。土壤樣本含有少量的岩石和礫石，含水量不到 10%。截至 2023 年 8 月 15 日，在自從 5 月以來進行了三次噴植後，台南的三個選區域都進行了觀察。由於土壤仍然又乾又硬，即使種籽從子彈暴露到地面上，TN 1 和 2 自 5 月以來已經過了 75 天仍然沒有發芽的跡象。

根據觀察到的發芽結果，所有的台南地點都沒有發芽。在台南的實際噴植區域有超過 6 個地點。但是環境對任何種子的發芽都不理想。這與Lemaire 和 Whitemore 在參考文獻 (Whitemore, T.C., 1989)、(Lin et al., 2011) 中的評估相符。噴植地點與自然作對。

3. 苗栗地區

苗栗位於台灣的北部。該地區的天氣比南部的台南更加潮濕。苗栗的選定地點靠近明德水庫，在過去 9 個月的降雨量約為 60 毫米。土壤含水量為 40%，含有 60%的黏土。

在苗栗 3 號區域，由於該地區的降雨量較多，土壤含水

量較高。如圖 10 所示，可見在 8 月 28 日(種植後 40 天)開始發芽。在苗栗地區，土壤濕潤而軟化，氣溫約為 20~30˚C，通常比台南地區低。



圖 10 在苗栗(ML3)地區的波斯菊發芽情況(在 7 月 19 日噴植後 40 天觀察)

Fig.10 Germination of Cosmos in Miao-Li (ML3)(observed 40 days after July 19/spray planting)

噴植在 TN3 地區進行了多次觀察。最後一次觀察是在 2024 年 1 月 5 日，最後一次噴植是在 9 月 28 日和 10 月 6 日進行的。圖 11 顯示了 TN3 的陡峭邊坡。圖 12～13 顯示了 TN3 站點在不同日期的成功種植結果。

在六月至八月的失敗之後，我們將種植區域轉移到了以苗栗地區和台南南化水庫附近 (TN3) 為重點。土壤狀況與 TN1 和 TN2 有很大不同，濕度更高，為 30%的濕度和 40%的軟黏土。噴植物種增加馬棘 (M) 和羅氏鹽膚木 (R) 的種籽，獲得有一些值得記錄的成就。



圖 11 TN3 的陡峭邊坡

Fig.11 Steep side slope of TN3



圖 12 在噴植 67 天後，TN3 的健康羅氏鹽膚木

Fig.12 Healthy Rhus Chinensis in TN3 after 67 days of spray



圖 13 在噴植 97 天後，TN3 的羅氏鹽膚木稠密發芽

Fig.13 Dense Rhus Chinensis germination in TN3 after 97 days of spray

樹木噴植在南化水庫區域 (TN3) 於九月二十八日進行，在苗栗區域 (ML3) 於十月六日進行。噴植數據如表 3 所示。所有噴植區域都是陡峭的 65%且乾燥的。但所選的土壤是軟泥岩，適合種子發芽。在這兩次噴植中，子彈中填充了多種種子。分別在 40 平方公尺 (ML3)噴植 40 枚子彈， 和 55 平方公尺 (TN3) 噴植 200 枚子彈。截至 2024 年 1 月 5 日的觀察數據如表 3 所示，苗栗(ML3)的發芽率為 37.5%，而台南 (TN3) 的發芽率分別為 58.5%和 71%，覆蓋率為 0.75 株/平方公尺 (在 ML3)，2.34 和 2.84 株/平方米 (在 TN3)，如表 3 所示。表 1 中的發芽結果是一個比較實驗。結果比在降雨較少的實驗地點ML3 和 TN3 進行的噴植要好得多。

表 3 2024 年 1 月 5 日的發芽觀察

Table 3 Germination observation on January 5

區域	ML3	TN3	
種子類別	Grass B+C + Tree M+R		
坡度	65˚	70˚	
噴植次數	1	1	
噴植日期	10/06	9/28	
噴植區域基準 m^2	40	55	
總種籽子彈 (草本+木本)	40+20	200+40	
觀測日期	12/3	12/4	1/5
噴植發芽區間	58	67	97
草本發芽幼苗數	15	117	142
草本發芽率%	37.5	58.5	71
木本發芽幼苗數	30	129	156
母本發芽覆蓋率(苗株/m^2)	0.75	2.34	2.84

*表3內數據說明：
(1) 草本植物：百慕達B，波斯菊C，木本植物 馬棘M，羅氏鹽膚木
(2) 噴植地基準面積為噴植區域面積概估
(3) 草本發芽率=發芽幼苗株數/噴植數量%, 目標：草本>30%.
(4) 木本覆蓋率=發芽幼苗株數/m2, 目標：木本> 1 株/m2,
(5) 每顆種籽子彈含 20-25顆草本種籽，或 8-9 木本種籽。

分　　析

發芽率是根據發芽的幼苗數目與種植區域面積之比來計算的，對於草本種籽和木本種籽而言，評估方法有所不同。草本種籽的發芽率是根據播種區域的面積內 (以平方公尺為單位) 總噴植種籽數與發芽株數的推算，而木本種籽則是

根據每平方公尺的發芽株樹苗木數目計算的。在表 3 中，收集的數據是根據每顆子彈含有的草種種籽數量為 20-25 粒或樹種種籽數量為 8-9 粒進行分析的。

草種發芽率 = 觀察到的草本幼苗數目 / 該區塊總噴植種籽數目

= 15/40, 117/200, 142/200

= 37.5%, 58.5%, 71%

樹木發芽覆蓋率 = 觀察到的木本幼苗數目 / 每平方公尺的噴植數

=30/40, 129/55, 156/55

=0.75, 2.34, 2.84 幼苗株/m^2

- 在 ML3 觀察到的草本植物發芽百分比為 15/40 = 37.5%，在 12 月 4 日觀察的TN3 為 117/200 = 58.5%(總計 67 天)，或在 1 月 5 日觀察的 TN3 為 142/200 = 71%(總計 97 天)。
- 木本幼苗覆蓋率是根據每平方公尺的幼苗數計算的，木本植物的發芽覆蓋率分別是 0.75、2.34 和 2.84 株/m^2，如表 3 所示。稍晚的觀察日期在 TN3 相同地點可能會發現更多幼苗。

討　論

1. 發芽現象

植物播種需要一定的發芽期，主要受土壤乾旱和酸鹼度、濕度、天氣、植物種籽、播種過程等因素的影響。在陡峭的山坡上，噴植的黏附率是成功的另一關鍵。從我們的測試中，種子彈的設計對於在山坡上進行黏附播種非常有效， 特別是在陡峭的部分。在這項研究中，種子彈被設計用於攜帶種子進行噴植。子彈的設計考慮了使用綠色材料進行環境保護。幾周後，子彈材料全部溶解於大自然中。

另一個關於種植工作量擔憂的是，樹種的數量在每平方公尺的發芽覆蓋率方面可能會大幅減少。從後期開始，將馬棘和羅氏鹽膚木的樹種加入到百慕達草和波斯菊的草種中。最後的觀察結果如圖 12-13 所示。由於在大多數地區水土保持仍然需要草種植物，所以草本物種和木本物種都將在今後的發展中使用。

種籽的發芽需要在噴植到土壤上後經過 3 至 4 周以上，天氣、濕度、環境溫度是噴植成敗的關鍵因素。由於台南 (1) 和 (2)選定的區域非常難以生存，因此無人機噴植試驗還將探索可能的突破性解決方案。

在本計畫的噴植過程中，陡峭的山坡大多陡於 65%以上，對人力來說攀爬進行播種工作非常艱難和危險。在圖 14 中，一個角落在 9 月 28 日進行了噴植測試，以觀察 12 月 4 日、1 月 5 日和 2 月 6 日的發芽結果。羅氏鹽膚木生長良好。在圖 14 中，地標清晰可見。在我們的觀察中，我們使用望遠鏡和無人機拍攝照片以確認和計數幼苗。另外還攀爬到山坡上撿起一些幼苗進行對照培養。

在過去九個月的實驗中觀察到了一個奇怪的現象。我們將不同物種的種籽塞入小的種籽子彈內可能會互相排斥的效應。在我們的測試中，只有在八月的第一個月觀察到了一株大波斯菊，後來就沒有再發現波斯菊了。在稍後的百慕達草和羅氏鹽膚木種籽子彈也觀察到了同樣的現象。只有羅氏鹽膚木茁壯生長。大波斯菊和馬棘是兩種發芽活力較低的植物。未來繼續的實驗會將種籽個別分開，分別製成種籽子彈進行噴植。

2. 成本分析

提議使用 UAV 進行噴植的方法進行了時間、成本和安全性估算，以便與人工播種進行比較。根據土地與水利保育委員會發包的種植勞動成本為每平公尺新台幣 2000 元。這個價格之所以高，是因為其高風險和安全威脅。工人們需要攀掛在陡峭的山坡上進行工作，每天大約可完成 40~60 平方公尺的工作。但是 UAV 噴植可以由兩個飛行員小組根據天氣和風力條件每天完成約 1000 平方公尺的工作。根據每公頃的情況，噴植的成本分析如表 4 所示。

在這項研究中，透過對草本種籽和木本種籽的播種特性進行估算，草本種籽的播種密度為每平方公尺超過 30 顆種籽，樹種為每平方公尺超過 3 顆種籽，這意味著每平方公尺使用 2 顆草本種籽和 1 顆木本種籽的子彈。在我們的實驗中，我們發現種籽有互相排斥的現象。為了避免這種現象，未來每個子彈只裝填一種物種。準備了四種種籽子彈，分別是百慕達草和波斯菊的草本種籽，以及羅氏鹽膚木和馬棘的木本種籽。在每個 40 發子彈的彈夾中，我們裝填了 16 個草本子彈和 4 個木本子彈，以約 5 公尺x5 公尺 (25 平方公尺) 的單位面積來噴植。總共需要噴植的彈匣數為 10,000/25 = 400(16,000 顆種籽子彈)。



圖 14 在台南 (TN3) 觀察到的羅氏鹽膚木發芽情況，分別為 12/04 (左)、01/05 (中)、02/06 (右)

Fig.14 Germination observations of Rhus Chinensis on 12/04 (left), 01/05 (middle), and 02/06 (right) at Tainan (TN3)

表 4 UAV 噴植成本分析 (每公頃)

Table 4 UAV spray planting cost analysis per hectare

每公頃噴植所需器材及人員成本					
	品項	單價/天	數量	需求	小計
1	無人機	6000	2	10	120,000
2	噴植機構	4000	2	10	80,000
3	飛行組員 (4人組)	6000	4	10	240,000
4	器材維護	3000	2	10	60,000
5	器材保險	12500	2	1	25,000
6	人員保險	200	4	20	16,000
7	交通及住宿	8200	2	10	164,000
A		成本 NT$			705,000

種籽子彈成本分析								
	種類	種子數量	價格	每顆子彈種籽	種子成本	種籽彈匣數	每公頃子彈	成本
B	草本	32	1500	1g/m^2	5	16B+16C	19200	96,000
C	木本	8	1500	1g/m^2	5	4M+4R	3200	16,000
			NT$/kg		NT$	每25 m^2		

*種籽成本每公斤新台幣 1500 元，每顆子彈需 1 公克，單價新台幣 1.5 元。
子彈成本包括製造工資和種籽 = 新台幣 5 元/顆。
每個彈匣中含有 16 顆 B&C 和 4 顆 M&R。
種子：草本 B：百慕達草，C：波斯菊，木本 M：馬棘，R：羅氏鹽膚木
包含：種籽 + 土壤 + 保水劑 + 紙吸管

混合物種的每公頃噴植成本為 A+B+C = 705,000+96,000+16,000 = NT$ 817,000/公頃。其單位成本為 NT$82/平方公尺。這與土壤水源保護機構之前合同勞動力的 NT$ 2,000/平方公尺，或每公頃 850,000~1,000,000 的分配相比要便宜得多。之前使用的花格網絡植被建設方法成本更高「Wu, C. H. (et al., 2013)」「Lattice Vegetative Construction Standards, Chapter 02924, Water Resource Agency, Ministry of Economic Affairs」。無人機噴植似乎比使用勞動力更便宜，且更安全。

從本研究的實驗中，有幾個重要的觀察結果值得紀錄討論：

1. 使用無人機進行噴植可以提供一種有效的方式，在陡峭的邊坡上進行植被復育工作。實驗是在陡峭的邊坡上進行的，傾斜度超過 60%以上。過去，這項框網植栽的工作需要特殊的勞動人力，利用懸吊索道攀爬於斜坡。這是一項成本高且危險的工作。
2. 由於種子發芽的特性不同，種籽在雨水後仍需要一段較長的時間才能發芽。在潮濕的地區，條件有利於播種。我們的經驗發現，對於特定潮濕地點來說，種子發芽在 6 週或更長時間內是樂觀的，除了不良土壤地區。種籽子彈應該填充有保水劑和潮濕土壤。
3. 實驗中選擇的無人機通常可以攜帶 5 公斤的有效載荷，包括 100psi 的氣體噴射機構和 40 發子彈的彈匣。噴射槍口應該幾乎設置在與無人機X 軸幾乎相同的水平方向上，以便無人機飛行員瞄準目標。
4. 透過使用無人機進行噴植，需要在與崩塌區域的水平距離 (100～200 公尺) 運行無人機，以監視無人機靠近山頂區域，以避免盲目飛行，如圖 15 所示。每個彈匣需要 10～15 分鐘的時間才能在垂直 400 公尺的陡峭邊坡 (>60%) 上完成噴射，距離邊緣至少 200 公尺水平距離。兩個無人機小組可以在每天的工作中完成 1400～1600 顆種子彈，使用 35～40 個彈匣。

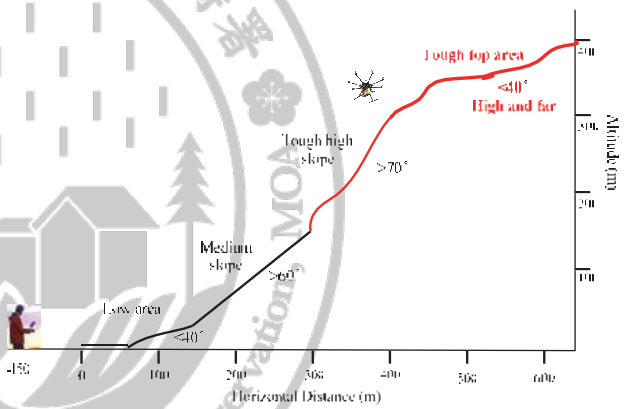


圖 15 建議的操作範圍至崩塌邊坡

Fig.15 The suggested operating range to collapse side slope

5. 由於種籽在同一顆子彈中明顯彼此排斥，因此應該分別準備含有單一物種的子彈。這意味著每次任務需準備四種不同的子彈。建議將草本種籽子彈和木本種籽子彈結合在一次噴植任務中。每個混合的 40 發子彈彈匣中裝載 16+16 發草本子彈和 4+4 發木本子彈，用於約 25 平方公尺的範圍，如表 5 所示。這估計了每公頃需要 400 個彈匣進行噴植。成本估算如表 4 和 5 所示，每平方公尺約新台幣 82 元。由於崩塌區域碎片化，可能不像一公頃那麼大，因此無人機噴植可以非常靈活地進行任何大小的邊坡。
6. 應注意天氣和氣象預報，以避免噴植後的大雨。大雨

將會沖走崩塌邊坡上的種籽子彈。最好在幾天的雨後進行噴植。

- 由於無人機飛行儘可能接靠近坡地，如圖 15 所示，側向下沖氣流明顯變得危險並可能引發亂流。
- 種籽子彈需要分析其重心，以保持彈頭穩定地飛向土壤。我們的經驗發現，種子、土壤和保水劑應填充在彈頭的前 1/3 處，尾部留空，以利重心的平衡。

在本文中，選擇了本地物種使用無人機進行噴植。觀察到草本和木本的發芽在崩塌邊坡上茁壯生長，並且幾乎不受其陡峭度的影響。在我們的實驗中，使用種籽子彈技術進行噴植的方法對於陡峭邊坡是有效的。這實現了無人機在崩塌邊坡上的 3D 特性 (danger, dirty, dull)。結果證明了使用種籽子彈技術的無人機應用的有效性，但也通過與人力勞動等其他方法進行效率和成本的比較來檢驗其效率和成本。

結　論

這研究提出了一種利用特殊設計的種籽子彈進行噴植的無人機系統。使用玩具槍重新構建了自動氣動噴射系統用於噴植。該無人機系統在每次飛行中會對陡峭的邊坡噴植 40 顆子彈。在實驗中，每次任務飛行可以在陡峭的邊坡上投射超過 4,000 顆子彈。由於乾燥而堅硬的土壤環境不利於種籽發芽。然而，在潮濕的地區，這種條件有利於使用無人機噴植的應用。在我們的實驗中，TN3 和 ML3 地點對種植來說比較潮濕，儘管是陡峭的邊坡。使用無人機進行種籽子彈的噴植非常成功地達到了目標。

本計畫所提出的無人機噴植技術在陡峭的邊坡上進行土壤和水源保護工作方面是可行且安全的。需要更高密度的種籽噴植。除了選擇的百慕達草和波斯菊等草種外，在本計畫 112 年後期實驗還選擇了馬棘和羅氏鹽膚木等木本樹種來進行實驗，獲得十分顯著的成果。

為了消除對自然生態的影響，所選的草本或木本樹種應該是對環境友好的本地物種。應該從參考文獻 Water and Soil Conservation Technical Regulations, Forestry and Nature Conservation Agency, Ministry of Agriculture (2020) ，Huang, T.C., (1997-2003) 中研究一些特定領域的先鋒物種，以找到更適合當前台灣山區氣候和土壤環境的物種。

本計畫使用一個創新噴植機構與作業方法，有效地在 60%以上的陡峭崩塌邊坡完成草本與木本之噴植。後續研究將以諮商顧問的意見，113 年將以屏東縣來義鄉崩塌邊坡開闢 0.5 公頃範圍進行噴植實驗，如圖 16 所示。為避免種籽互相排斥的現象，未來將以單一物種的種籽子彈來噴植草本與木本植物。



圖 16 後續研究屏東來義邊坡噴植實驗場地

Fig16. The experiment site in Lai-Yi, Ping-Tong of the continuing studies

致　謝

本研究獲得農業委員會農村發展及水土保持署的計畫支持，研究計畫編號為 SWCB-112-028 及 113 保發-5.1-保-01-06-001(7)。

文　獻

[1] Water and Soil Conservation Technical Regulations, Forestry and Nature Conservation Agency, Ministry of Agriculture, March 21, 2000, retrieved May 4, 2023, https：//law.moa.gov.tw/GLRSnewsout/LawContent.aspx?id=FL014521. (in Chinese)

[2] Lemaire, F. (1995). “Physical, chemical and biological properties of growing medium.” *Acta Hort*, 396, 273-284. 26.

[3] Whitemore, T.C. (1983). “Secondary succession from seed in tropical rain forest.” *Forestry Abstracts*, 44, 767-779. 28.
[4] Whitemore, T.C. (1989). “Canopy gaps and the two major groups of forest trees.” *Ecology*, 70, 536-538.
[5] Lin, S.H., Wang, Y.J., and Hsu, H.S. (2011). “Vegetative Restoration and Vegetation Materials Used on Hydroseeding of Landslide Areas.” *Journal of Soil and Water Conservation*, 43 (2), 147-170. (in Chinese)
[6] Huang, T.C. (1997-2003). “Flora of Taiwan”, 1-6, https：//tai2.ntu.edu.tw/ebooks/FlTaiwan2nd/1. (in Chinese)
[7] Forestry and Nature Conservation Agency, Ministry of Agriculture, “The Feasibility Study on UAV Plantation Applications to National Forest Collapse.” 2019 Report, retrieved July 13, 2021, available on web： https：//www.forest.gov.tw/report/0003887.
[8] Lee, Y.C., Chang, J.H., Huang, Y.J., and Lee, C.C. (2007). “A Study on The Application with Different Spray Planting Methods on Road Side- Slopes.” *Journal of Soil and Water Conservation*, 39(2), 201-215.
[9] Fahlstrom, P.G., and Gleason, T.J. (2012). “Introduction to UAV Systems”, *4th edition*, Wiley On-line Library, DOI：10.1002/9781118396780. Available on web： August 24, 2012, https：//onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118396780.
[10] Mustart, P.J., and Cowling, R.M. (1993). “Effects of soil and seed their possible roles in determining field emergence patterns of four Agulhas plain (South Africa).” *Proteaceae*, Can.J.Bot.71, 1363-1368, 27.
[11] Wu, C.H., Chang, W.C., and Lin, S.H. (2013). “Analysis on the Seed Germination and Coverage of Different Vegetation Materials Tested at Laboratory and Field Hydroseeding in the Field and Indoor.” *Journal of Soil and Water Conservation*, 45(3)：737-752.
[12] “Lattice Vegetative Construction Standards.” 02924, *Water Resource Agency*, Ministry of Economic Affairs, https：//www.bing.com/search?q=%E9%8B%AA%E7%B6%B2%E6%96%BD%E5%B7%A5%E6%B3%95&form=ANNH01&refig=a84f9117121c4aafbf3be05420cdf1bc&pc=ACTS. (in Chinese)

附　　錄

本研究中選擇的四種本地物種，圖片來源於維基百科。

草類 B：百慕達草，C：波斯菊，樹木 M：馬棘，R：羅氏鹽膚木

1 百慕達草在台灣是一種常見的草類植物。它原生於歐洲、非洲、澳大利亞和亞洲大部分地區。葉片呈短灰綠色，通常長 2-15 公分，邊緣粗糙，或直立莖高 1-30 公分。莖稍扁平，常帶有紫色調。它具有深根系，在可滲透的土壤中耐旱。其根系可以生長到超過 2 公尺深，雖然大部分的根塊少於地表 60 公分。草類沿著地面爬行，利用匍匐莖在任何節點觸及地面的地方生根，形成緊密的草叢。百慕達草通過種籽、匍匐莖和根莖繁殖。這個特性對於坡地來說非常有用，可以抓住土壤進行恢復。在溫度超過 15℃ 且最適生長溫度在 24℃ 至 37℃ 之間開始生長；冬天時，草變成休眠狀態並變成褐色。全日照促進生長，全日照抑制生長，例如，靠近樹幹的位置。百慕達草廣泛栽培在全球溫暖氣候地區，緯度約在南 30°至北 30°之間，年降雨量在 625 至 1750 毫米之間。在台灣的大多數地區都很受歡迎並有種植。



2 波斯菊是菊科植物的一個屬。常見的名稱包括玉葉金花和金銀花，這些名稱也與其他各種植物共享。這些植物的高度範圍從 46 至 120 公分不等。花通常呈黃色，帶有齒狀的尖端，也可能是黃紅雙色。它們有顯眼的花頭，在每個花序包被有兩排各八片的苞片，外圍通常在基部融合。扁平的果實小而干燥，看起來像昆蟲。全世界有許多不同的品種。在台灣，玉葉金花主要在冬季大量生長於休耕稻田中，以在春季耕作之前恢復、更新和肥沃土壤。它在台灣的農民中相當受歡迎。



3 馬棘 (學名：Moringa oleifera) 是馬棘科的快速生長、耐旱的樹木，原產於印度次大陸，在南亞和東南亞被廣泛使用。在亞洲，常見的名稱包括馬棘、豆蔻樹、樹蘿蔔、馬鈴薯。它可以達到 10-12 公尺的高度和 46 厘米的樹幹直徑。樹皮呈白灰色，被厚厚的軟木包圍。幼枝具有紫色或綠白色的多毛樹皮。該樹有一個散開的冠，由下垂、易斷裂的樹枝組成，葉子形成了一片葉面繁茂的羽狀複葉。它被廣泛種植，以其幼嫩的莢果和葉子而聞名，可作為蔬菜和傳統草藥使用，也用於水的淨化。雖然在一些國家被列為入侵物種，但尚未觀察到馬棘入侵完整的棲息地或取代當地植物。目前，在台灣被視為一種廣泛栽培的物種， 入侵潛力較低。其花香氣怡人，是雌雄同株的，被五片不等長、細脈、淡黃白色花瓣所包圍。花大約長 1-1.5 公分，

寬 2 公分。它們生長在纖細、多毛的花梗上，形成散開或下垂的花序，花序長 10-25 公分。在栽培區域，花期在種植後的前六個月開始。在季節性較涼的地區，花期只在每年晚春和初夏發生 (北半球在 4 月至 6 月間，南半球在 10 月至 12 月間)。在氣溫較穩定且降雨持續的地區，花期可以一年開花一次甚至全年開花。果實是懸垂的、三角形的、棕色的，長 20-45 公分的莢果，內含直徑約 1 公分的深棕色球形種仔。種仔有三片白色、紙質的翅膀，由風和水傳播。在栽培中，通常每年剪斷至 1-2 公尺，讓其重新生長，以便莢果和葉子保持在手臂可及的範圍內。馬棘被當地人用作保健食品或調味品。



4 羅氏鹽膚木 (學名：Rhus chinensis)，又稱中國漆樹或圓果漆，是漆樹屬的一種落葉灌木或小喬木。它可以長到 6 公尺高，有著被絨毛的嫩枝和由幾片小葉組成的葉子。這些葉子在秋天變紅後會落葉。這種植物在東亞和南亞地區很常見，在溫帶氣候中作為觀賞樹木栽培。植物上生產的蟲蛾，稱為中國槲寄生 (Galla Chinensis)，是一種可水解單寧的分子。中國酸楊樹蚜蟲的侵襲可能會導致產生一種在中國被商業價值很高的蟲蛾。一些研究表明，中國酸楊樹中的化合物具有體外抗病毒、抗菌、抗癌、肝保護、止瀉和抗氧化活性。然而，這些證據未得到多個國際研究者的證實。槲寄生的水提取物還能體外抑制α-葡萄糖苷酶的活性。



2024 年 02 月 25 日 收稿
2024 年 03 月 11 日 修正
2024 年 04 月 24 日 接受

農業農村發展及水土保持署 Agency of Rural Development & Soil and Water Conservation, MOA

無人機邊坡噴植技術 –驗證與發展
Side Slope Spray Planting using Unmanned Aircraft System – Verification and Evolution

林清一 邵珮琪 裴輝進 李佳儒 尤琮翰 陳威伸
成大研究發展基金會 長榮大學航運管理學系 上暘飛行股份有限公司
chinelin@mail.ncku.edu.tw; pcshao@mail.cjcu.edu.tw; jialu0330@gmail.com;

摘要

高斜度陡峭的崩塌山坡進行人工植栽，對崩塌坡地植物生態復育極為重要。如何利用無人機協助在地人跡難以接近的地區，進行大面積噴植草本與木本植物，觀察植物發芽生長之結果，統計其發芽率與覆蓋率，期望達到復育的目標。本研究從前一年度的初期技術研發，至選定一個大 4 公頃的屏東來義高坡度崩塌區域進行噴植復育。由於噴植地面寬度 250 公尺、高度超過 150 公尺、邊坡陡峭程度達 75 度以上，無人機噴植須以影像輔助，確定噴植位置進行空中噴植。延續本研究創新的種籽子彈噴植技術，每顆種籽子彈包含四種各自分開的種子、保水劑、當地泥土，填裝於 7 公分紙吸管之前端 1/3 內， 加上能沾黏於土地的牙籤組成。種籽子彈將重量推積到前端，以利發射後的空氣動力維持一個飛行方向。無人機噴植技術可以適當的噴植在所期望的區塊內。經過多個月後的觀測，統計其草本發芽率及木本覆蓋率，在來義崩塌邊坡及前一年度的苗栗地區獲得顯著成果。

關鍵詞：種籽噴植技術、無人機應用、種籽子彈、發射機構、環保材料

Abstract

The manual planting to high inclination steep collapse side slopes is very important to eco-recovery plantation. This project adopts UAVs to conduct large area wood and grass plantations in non-reachable areas and observe their germination and coverage toward the recovery goal. This research extends previous technical development to choose a large area of more than 4 hectares for spray planting in Laiyi, Pingtung. The selected area is wider than 250 m at 150 m altitude with slope inclination of more than 75 degrees. The UAV needs to assist with video guidance to precisely locate the target spots. The seed bullets are made with separate grass or wood seeds plus water retention and local soil. The materials are stuffed into the front 1/3 of the 7 cm bullets onto the soil. This design keeps the aerodynamic to maintain a straight flight direction. The UAV spray planting can precisely spray the seed bullets onto certain assigned block areas. After several month, the observation of germination rate and coverage rate are roughly calculated in Laiyi, Pingtung and previous planting area in Miaoli with signification results.

Keywords: Spray planting, application of UAS, seed bullet, injection machine, environmental protection material.

一、前言

水土保持在國土維護上是一項十分艱辛的工作，尤其是台灣地區位處於地震帶及颱風帶，每年受到的天然災害，山坡地崩塌帶來土石流破壞民宅道路、河川水道淤塞等破壞。崩塌山坡地的復育，是水土保持相當繁重的工作[1]。過去以人工攀爬植栽的工作，在高陡峭坡度超過 60%以上的危險性極高，發包工作需入籍龐大經費。

無人機技術成熟可用後，如何利用無人機支援艱難的陡峭崩塌坡健行噴植復育

工作，有深入的探討[2, 3, 4, 5]，採用不同的種籽球體製作與無人機拋投，都有顯著貢獻。

本團隊於 2022 年投入於無人機的噴植研究[6]，設計小型種籽子彈的製作與無人機噴植技術，成功地完成了苗栗 26 縣道及南化水庫地區之邊坡噴植復育。

2021 年的水土保持研討會，對陡坡坡面的工法試驗[7]、地形特徵與崩塌發生的關聯性[8]，崩塌邊坡的防治與保護，植物復育是一個主要選項。在人力施工無力可及的高度、陡峭崩塌邊坡上，均有需付出的重點。

坡地人工噴植復育的施工趨勢，從植栽的選擇至植栽作業，都有可行的方案，提供業界的參考。

無人機噴植技術的研發，仍須注意植物的選擇與生存條件。為了防範物種的侵害，噴植作業選擇的植物以國內常見的品種為主[11]。本研究從 112 年計畫即選用百慕達草、波斯菊、馬棘與羅氏鹽膚木作為噴植的樣品。經過 112 年計畫的成果，現象十分適合繼續發展。

二、研究工作

本研究的工作以協助解決高難度崩塌地區之植物復育為主。從本計畫顧問獲得訊息，屏東來義鄉之崩塌邊坡為一個是試驗目標，如圖 1 所示。



圖 1：來義鄉崩塌邊坡

來義崩塌邊坡約 8 公頃，坡度 60~80 度，高度 293 公尺、寬度大於 350 公尺，人員可及地跨越河道約 150 公尺。

圖 2 為無人機觀測來義地形，該地區陡峭且十分遙遠，飛行操作必須依靠適當的影像導引，以精確掌握噴植位置。

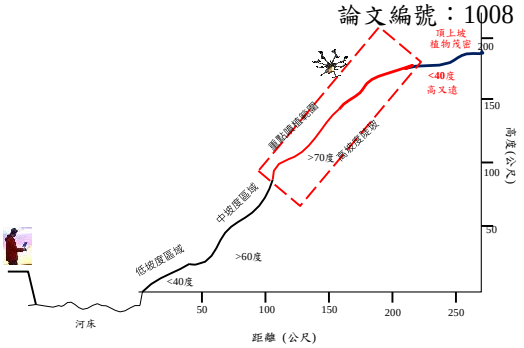
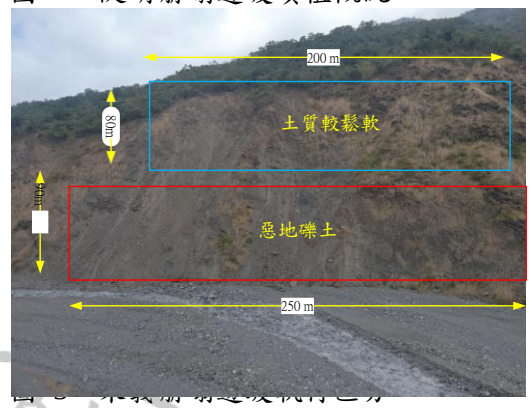


圖 2：陡峭崩塌邊坡噴植概況



本計畫延續已經完成的噴植機構，並提升無人機載具的飛行能力，改為 1300 軸距之六軸旋翼機，如圖 4, 5 所示。



圖 4：配置噴植機構六旋翼機



圖 5：利用玩具槍改裝的噴植機構



圖 6：子彈彈匣與槍機

彈匣可裝填 40 發子彈，每次飛行前卡入槍機內，經過影像追瞄標定，飛行員可以看到實際位置噴射子彈。子彈為 12 mm 紙吸管製作投入崩塌地約 2 週可以完全分解。

噴植的種籽子彈設計如圖 6 所示，包含填充的種籽、保水劑、泥土，並配置在 7 公分子彈前方 1/3 處，以適當配置空氣動力的重心。

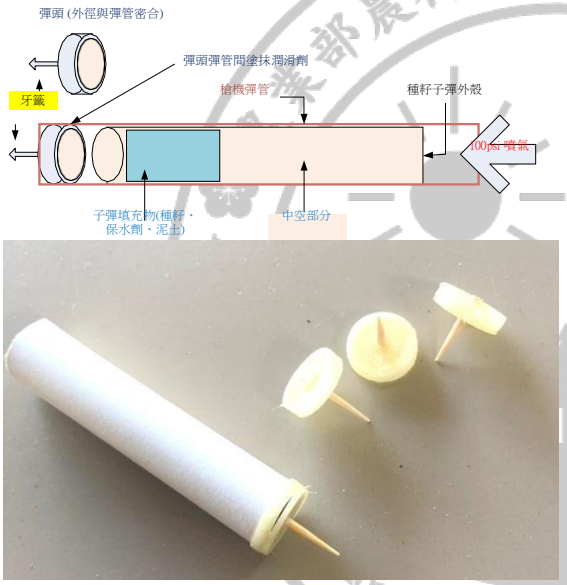
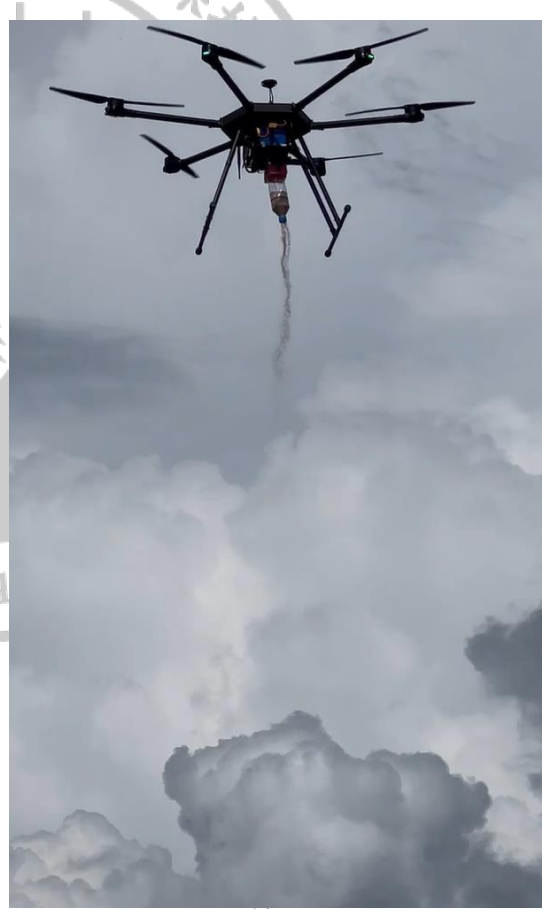


圖 7：種籽子彈之設計與製作

由於噴植崩塌邊坡都是惡地，種籽子彈的附著力也十分有限。為補強嶙峋惡地礫土的噴植，本計畫另以高密度噴灑草本植物種籽的方法，加強圖 3 來義地區較低層礫土範圍直接大密度噴灑。圖 8 為高密度噴灑支寶特瓶管，開口控制由遙控器操作。從 Mission Planner 觀測到飛至目標區，遙控啟動瓶蓋，將種籽撒出，如圖 9 所示。





高點遠距噴植須借用 Mission Planner 內的 Rangefinder (經度為 cm 等級)來確定噴植位置。由於崩塌陡坡會產生強烈的下午的上升氣流，或上午的下降氣流，噴灑出種籽只能概略落到期望位置。

圖 10 為 Rangefinder(cm)為測距儀顯示飛機與山壁的距離，飛行操作手藉著畫面資料接近預期範圍。



圖 10 Rangefinder 測距儀位顯示

圖 11 為噴植飛行軌跡紀錄，黑色線為飛機飛行軌跡圖，藍色點為按下噴灑開關時飛機當前 GPS 座標位置，透過飛機前方感測器測量與山壁間的距離約為 8~10 公尺時開始噴植或噴撒。



圖 11：來義噴植之軌跡紀錄

無人機安裝上彈匣後，即可以起飛。本研究之飛行工作為兩名飛手為一組，一為操作手、一為觀測手，可以精確導引飛行至所規劃之位置及噴植。圖 12 為本計畫之無人機噴植工作流程圖，因為崩塌坡山壁陡峭，觀測手確定位置後噴投種籽子彈。

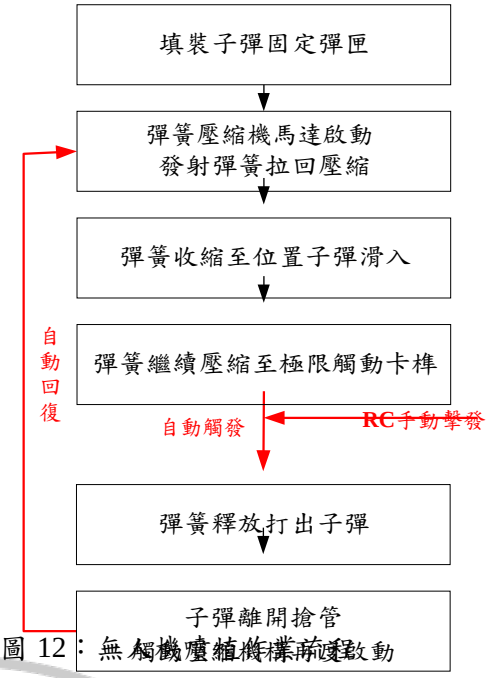


圖 12：無人機噴植作業流程

三、噴植作業

由於 112 年度之種籽子彈將多種種籽混合填裝於一顆子彈內，造成種籽互相排斥的現象[6]。本年度工作將每顆種籽子彈各自填裝不同種籽，草本的百慕達草及波斯菊，木本的馬棘與羅氏鹽膚木。

本計畫自 113 年 2 月開始進行來義崩塌邊坡之探勘，並於 3 月初開始陸續進行噴植。由於南部地區仍與往年一樣，自前一年度 11 月開始乾旱至預期今年的梅雨季，因此提早噴植，可以迎接梅雨季前的小雨。113 年如預期 3 月下旬開始陸續有雨，至 5 月起有比較豐沛的降雨。圖 13 為無人機噴植作業。



圖 12：無人機噴植作業，背景為來義崩塌惡地

四、成果檢視

崩塌邊坡之噴植工作，受到惡地環境影響甚大，需噴植後的降雨量適中，種籽才能發芽。種籽子彈噴植後大約 2 週將會分解，讓種籽散入土地上，並經過 4 至 8 週種籽才有可能發芽。

本計畫於 3 月初至 8 月底陸續進行噴植作業。為延續 112 年之工作成果，113 年工作仍回到延續上一年度進行的苗 24 縣道及南化水庫進行補強及檢視成果。

為凸顯噴植前後的草本植物發芽率與木本植物覆蓋率，本計畫之成果將以噴植前的照片與噴植 3 個月後之觀測成果做對照顯現。

4.1 苗栗 24 縣道明德水庫附近

苗栗明德水庫附近苗 24 縣道 12k 處小塊崩塌邊坡，從 112 年 12 月進行噴植後，113 年度繼續觀測其結果。

苗 24 縣道 12k 處噴植後陸續觀測其成果。由於植物發芽生長緩慢，觀測期限甚長，112 年度啟動太晚，至 113 年度的觀測成果則相對良好。



圖 13：苗 24 縣道邊坡原貌



圖 14：苗 24 縣道邊坡 7 月 18 日觀測

4.1 南化水庫附近



圖 15：南化水庫 2 月原貌



圖 16：南化水庫 8 月 2 日成果



圖 17：南化水庫 8 月 2 日成果



圖 18：南化水庫 8 月 2 日成果



羅氏鹽膚木成長旺盛

4.3 來義崩塌邊坡

來義崩塌邊坡是極惡劣的環境，高度 290 公尺、寬度範圍 350 公尺，坡度 60~80 度，跨越河道 150 公尺，工作範圍面積 8 公頃。該地探勘時暫分兩區，如圖 3 所示，高區土質較鬆可以立即噴植，低區為礫土惡地，須待水分較足才能實施，或施以高密度種籽噴灑。



圖 20：來義崩塌邊坡 2 月底原貌



圖 21：來義崩塌邊坡 9 月 6 日成果

對照圖 20 及 21，來義邊坡的噴植有顯著的成效，圖 21 範圍大約 1.6 公頃。該地區發芽成長之近距離拍攝如下所列。

113 年 7 月 25 日凱米颱風來襲，圖 21 之左邊地區約 1 公頃再度發生崩塌，噴植成果全毀。9 月 6 日之檢視，新崩塌地仍保留殘餘幼苗，保留區域則發芽茂盛。





圖 23：來義發芽之羅氏鹽膚木與百慕達草



圖 24：來義發芽之羅氏鹽膚木與百慕達草





圖 23：來義發芽之羅氏鹽膚木與百慕達草

圖 24、24、25 顯示空拍生長健全的羅氏鹽膚木及百慕達草。

五. 發芽率與覆蓋率統計

以邊坡噴植來促進崩塌地的生態復育，噴植的草本植物估算其發芽率，木本植物則估算其覆蓋率：

發芽率= 發芽草本數/噴植種籽數

覆蓋率= 發芽木本數/平方公尺

經過 112 年的實驗，苗 24 線道與南化水庫的成果已經有足夠時間讓種籽發芽，來義地區則需給予更充足的發芽潛伏期。經估算結果討論如下。

5.1 苗栗 24 縣道

苗 24 縣道 12k 位址於 112 年噴植數量為 160 顆種仔子彈，112 年 11 月底統計之草本發芽率為 15/160 = 9.375%。(112 年報告[20])。113 年 7 月 18 日圖 14 觀測發芽百慕達草數量為 24 株。統計 113 年 7 月 18 日草本發芽率為 24/160 = 15%。比較該場址新近觀測成果圖中，顯示噴值的百慕達草植物經過 8 個月有明顯發芽數成長，顯示噴植成果對崩塌邊坡有一定的效果。

表 1：苗 24 縣道草本植物觀測統計

觀測日期	噴植數/面積	發芽數	發芽率
112.11.30	160/ 200 m^2	15	9.375%
113.07.18		24	15%

5.2 南化水庫

南化水庫於 7 月 18 日檢測成果如圖 17、18 所示，將該區的羅氏鹽膚木發芽數統計於表 2。

表 2：南化水庫場域木本植物觀測統計

觀測日期	噴植數	發芽數	面積	覆蓋率
113.07.18	600	40	50 m^2	0.8 棵/m^2

5.3 來義地區

來義地區 3 月及 5 月各進行噴植，於 9 月 6 日做一次檢測，觀測數據誤差甚大。以全區 1.6 公頃來計算，表 3 為來義地區的數據。

表 3：來義崩塌場域草/木本觀測統計

觀測日期	噴植數	木本發芽數	面積 m^2	覆蓋率 棵/m^2
113.09.06	1200	257	16000	0.16

觀測日期	噴植數	草木本發芽數	面積 m^2	發芽率
113.09.06	2600	820	16000	31.5%

然而，因為崩塌邊坡，土地十分惡劣，草本植物的發芽率，如圖 21 所示，顯然較高層區域已經達到 70%以上的發芽率了。另外，因礫土惡劣，羅氏鹽膚木發芽零散， 局部地區成長十分茂密，如圖 23、24、25 所示，覆蓋率小是因為區域太大，有 1.6 公頃，造成比率稀釋了。



圖 26：來義邊坡之木本植物茂盛

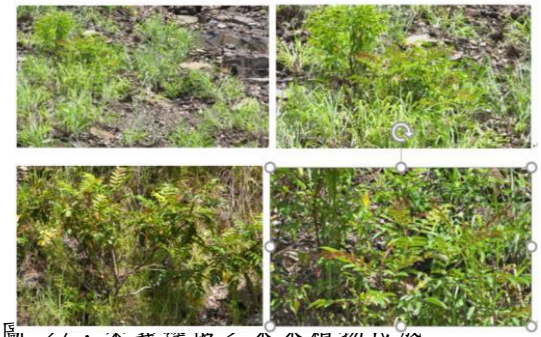


圖 27：來義邊坡之木本植物成益

以噴植工作的經驗估算，該區經適當噴植，木本植物覆蓋率可以達到 0.5 顆/m^2 以上。

六.結論

本研究為利用無人機做高陡坡草本與木本植物的噴植實驗，研究及驗證所提出的噴植技術。經 112 年之可行性實驗，已經建立一套簡易的標準作業程序。113 年進行大面積驗證與發展，選擇來義崩塌邊坡，具有挑戰性，經一系列的噴植實驗，並給予種籽十分充裕的潛伏與發芽時間，達半年以上，來義地區顯現重要成果。

從延續苗 24 縣道、南化水庫兩區域的觀測，噴植工作絕對需要有充分的時間給予發芽，兩場域都有獲得充分的證據，木本植物的覆蓋率都達到相當好的成果。

來義崩塌邊坡十分陡峭，坡度 60~80%，選擇噴植地面積達 1.6 公頃，稀釋了發芽率與覆蓋率。從實際的成展觀測，本計畫仍有相當的成果。從過去苗栗及南化的經驗，未來幾個用仍將有更多的發芽植物，有待觀測。

本研究建立無人機於陡峭崩塌邊坡的植物噴植復育作業，可以提供水土保持工作廣泛推廣應用，

謝誌:

本研究為農業部農村發展及水土保持署 113 年度創新技術研究計畫，計畫編號 ARDSWC-113-058。

參考文獻

[1] 經濟部水利署(111 年網頁)。工法-修坡植栽。經濟部水利署生態工程網頁。https://www.wra.gov.tw/default.aspx。

[2] 林政侑，“陡坡崩塌地無人飛行載具 UAV 噴植工法之精進研究”，水保局計畫報告：109 保發-11.1-保-01-06-001(13)。

[3] 巫清志、張瑋珈， 國立嘉義大學，“無人機載具噴灑植生粒劑之研究成果報告 書”，行政院農業委員會水土保持局(2018)。

[4] 張集豪，“無人飛行載具(UAV)播種作業機具與噴植設備之精進研發成果報告書”， 行政院農業委員會水土保持局(2019)。

[5] 詹勳全、林政侑，“ 陡坡崩塌地無人飛行載具(UAV)噴植工法作業與驗證成果報告書”， 行政院農業委員會水土保持局(2019)。

[6] P. C. Shao, C. E. Lin, “Side Slope Spray Planting Using Unmanned Aircraft System – An Innovation and Feasibility Study”, 中 華水土保持學報，55 (2): 73-83 (2024), DOI: 10.29417/JSCWC.202406_55(2).0003.

[7] 林凱立、詹勳全，”陡坡面排水設施與工法試驗-以梨山地區為例”， 2021 中華水土保持研討會，p. 128。

[8] 李品翰、吳俊毅，”地形特徵與崩塌發生之關聯性分析，2021 中華水土保持研討會，p. 137。

[9] 邱創益、謝衫舟，“農業技術在坡面植生方面應用之方法”，農業綜合調整方案試驗研究年度總報告，1995。

[10] 郭玉麟、簡士豪，“ 坡地人工噴植復育區植生演替趨勢調查分析”，水保技術 2020.11， Vol. 14, No. 3, pp. 42-57 。

[11] 行政院農業委員會水土保護局第 0940030270 號函發布，02921 章“噴植草”，https://www.iachu.nat.gov.tw/iachu/redirect_file.php?theme=web, file:///C:/Users/user/Downloads / 第 02921 章 %20 噴植草.pdf。