

無人機應用於 偏遠崩塌地植生復育工作及 多光譜影像追蹤植生復育成效

撰文 | 許愷岐（中興大學水土保持學系博士生／通訊作者）
吳芝伶（易圖科技股份有限公司規劃師）
張信謙（林務局集水區治理組技士）

前言

林務局轄內國有林崩塌地多位於集水區上游較偏遠地區，近年來受極端降雨影響，使國有林多處生成深且廣的崩塌地，其自然復育緩慢甚至困難，而這些崩塌地往往位於集水區上游、交通不可及的偏遠山區，以致難以透過傳統人工方法加以復育。為克服偏遠地區及交通可及性低等問題，利用無人機具有高機動性、即時性與較不受地形所限等優勢，且搭載植生附掛系統後具有一定酬載能力，故使用無人機可縮短載運種子路程，節省時間、耗能以及克服大型機具無法前往

執行植生復育的問題，成為偏遠崩塌地之植生復育首選解決方案之一。

林務局於2019年委託易圖科技股份有限公司與中興大學林信輝教授共同研究，評估無人機運用於偏遠崩塌地植生復育之可行性，研究期間蒐集相關國內、外航空植生文獻與探討作為執行研究基礎，以及利用無人直昇機自主設計研發播種系統進行測試，成功完成3處不同類型之崩塌地植生復育。然而使用粒劑之種子，所選用水土保持草本種子材料，多為外來馴化種，為考量環境生態適宜性，評估以原生草本植生復育之可行性將是另一重要議題。2020—2021年再次進行原生種粒劑可行性評估、研發無人多旋翼

表1 2019年試驗區位資料

地點	區位資料		空拍影像
羅東處 太平山事業區 第77林班 (難度高)	崩場地坡度(°)	45.1	
	崩塌面積 (ha)	0.3	
	播種範圍 (ha)	0.2	
	範圍的西側為崩場地冠部，東側為下半部。		
東勢處 大甲溪事業區 第8林班 (難度低)	崩場地坡度(°)	30.9	
	崩塌面積 (ha)	0.4	
	播種範圍 (ha)	0.2	
	範圍內東南側為崩場地較上方，西北側為崩場地下半部。		
南投處 濁水溪事業區 第22林班 (難度低)	崩場地坡度(°)	30.9	
	崩塌面積 (ha)	0.4	
	播種範圍 (ha)	0.2	
	崩塌範圍北側為崩場地冠部，南側為崩場地下半部。		

機的植生附掛系統，於新的3處崩場地進行植生播種作業，此外利用無人機搭載多光譜相機持續追蹤前期計畫的播種植生復育成效。透過兩次的計畫評估過程，有關粒劑製作與飛行操作所累積之經驗與操作流程，未來可廣泛應用於國有林偏遠崩場地，以無人機方式快速的植生復育減少土壤沖刷之情形。

試驗範圍

2019年計畫3處試驗區

此3處試驗是以無人直昇機撒播粒劑幫助崩場地植生復育，於2019年4—6月完成撒播作業，3處播種面積範圍約為0.2ha，每處撒播量皆為210kg。此3處的崩場地基本資料以及空拍影像如表1。

2020年3處試驗區

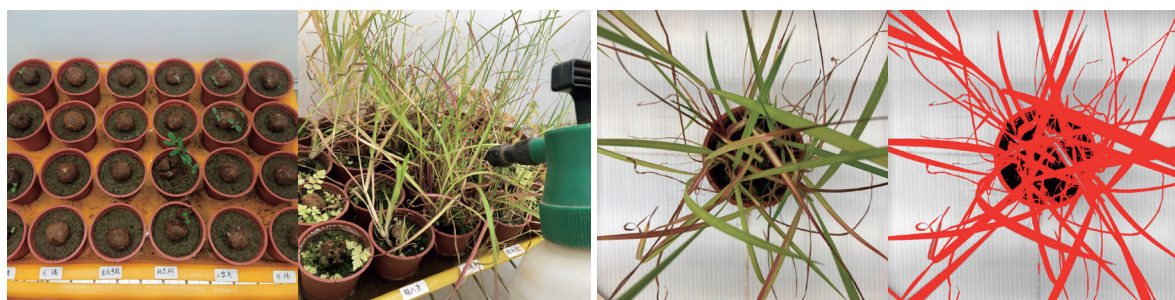
本期試驗選定3處崩場地進現場試驗，選定條件為深山或偏遠地區，地形陡峻、交通不便、植生條件不佳之地點，崩塌面積需大於0.2ha。

羅東林區管理處太平山事業區第54林班（馬當溪），播種範圍內中間幾乎沒有植

生，只有少數植生在西側；東勢林區管理處八仙山事業區第132林班（烏牛欄溪）播種範圍內有一些植物分布於東側，中間植生較少，少數植生分布於西北邊；臺東林區管理處臺東事業區第32林班（知本）位於知本國家森林遊樂區附近，播種範圍內已有一些植生，且範圍下方也有一些植生可提高粒劑之容留率，試驗範圍資料如表2。

表2 2020年試驗區位資料

地點	區位資料		空拍影像
羅東處 太平山事業區 第54林班 (難度中)	崩塌地坡度(°)	30.0	
	崩塌面積(ha)	5.0	
	播種範圍(ha)	0.2	
範圍的南側為崩場地冠部，北側為崩場地較下方。			
東勢處 八仙山事業區 第132林班 (難度低)	崩塌地坡度(°)	24.0	
	崩塌面積(ha)	1.76	
	播種範圍(ha)	0.2	
範圍的西南側為崩場地較上方，東北側為崩場地較下方。			
臺東處 臺東事業區 第32林班 (難度低)	崩塌地坡度(°)	27.0	
	崩塌面積(ha)	1.09	
	播種範圍(ha)	0.2	
範圍的北側為崩場地冠部，南側為崩場地較下方。			



◀ 植生粒劑發芽試驗
▶ 植生粒劑覆蓋率評估

原生種植生資材配比的適用初評

藉由文獻蒐集與專家學者訪談，彙整臺灣崩場地應有潛力之草本及木本植物，並針對草類進行發芽試驗與生產潛力評估，結果顯示原生草類之收穫指數較一般植物低，而對於種子生產效益仍需進一步試驗。此外，原生種子與植生粒劑結合進行試驗（上圖左）後發現，草本種子發芽有降低趨勢，其原因推測可能是種子轉化粒劑過程中遭受損傷，或因種子粒劑內部種子過多，導致養分與生長空間之競爭，未來仍需進行更多相關試驗了解及改善。而木本種子大多物種之發芽率則有上升趨勢，由此可見，透過植生資材的包覆，可提供種子良好生長環境，促使木本種子發芽生長，以達植生效果。經過不同原生物種進行植生粒劑之製作與發芽試驗得知，現階段可用於植生粒劑製作之原生物種包括：臺灣蘆竹、狗牙根、五節芒、龍爪茅與假儉草。而木本植物則包括九芎、月橘、臺灣赤楊、羅氏鹽膚木、臺灣山芙蓉、相思樹與臺灣欒樹。最後針對以上樹

種種植在兩吋苗盆使用影像分析軟體，進行地上部植株面積分析（上圖右），草本及木本種子之發芽覆蓋效果與種子生長皆相當良好，因此於崩塌現地，應可有效保護裸露坡面受降雨直接打擊，以減少沖蝕之發生。

無人機播種成效

羅東處太平山事業區第77林班 (2019年試驗地)

配合當地雨量站資料，因為2019年8—9月（播種後約2—3個月），連續兩個月超過500mm的降雨量，較大的降雨量使粒劑沖刷至崩場地較下部，又因地下部的原有植生較多，造成粒劑容留效果。於第二次、第三次追蹤影像中，崩塌範圍的西側有零散植生正在小面積增加。經過多次追蹤與NDVI影像分析成果顯示，可以明顯看到整體的植生覆蓋率增加。此試驗地透過影像看到幾乎無岩盤裸露，雖坡度較陡（45.1°），但崩場地範圍的東側有許多植生，增加了粒劑的容留率，並且此處終年有雨，是一個適合植生粒劑生長的地方。

表3 羅東處太平山事業區第77林班（留茂安）追蹤成果比較

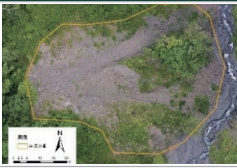
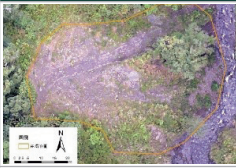
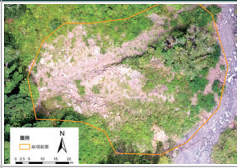
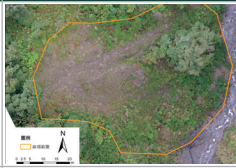
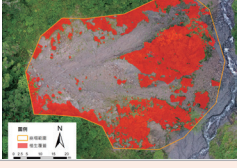
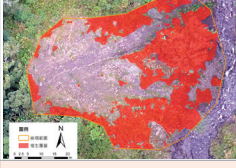
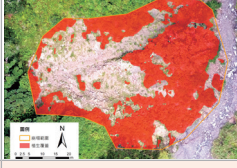
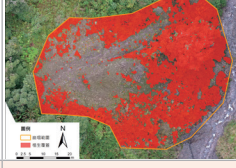
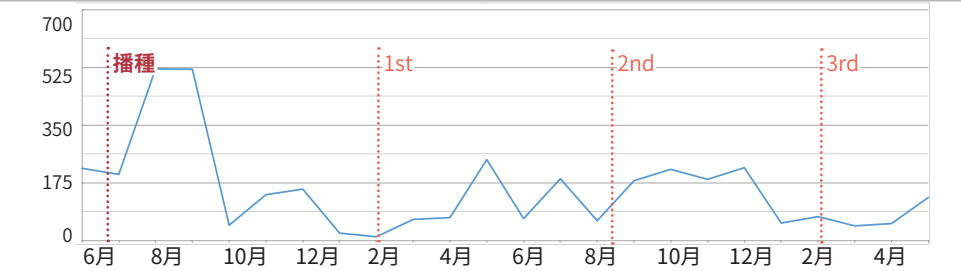
拍攝時間	2019年7月 (播種後)	2020年2月 (第一次追蹤)	2020年8月 (第二次追蹤)	2021年2月 (第三次追蹤)
RGB影像				
NDVI 分析影像				
植生覆蓋率	38.87%	44.70%	55.30%	57.03%
2020年6月 — 2021年6月 降雨資料 (mm)				

表4 東勢處大甲溪事業區第8林班（必坦溪）追蹤成果比較

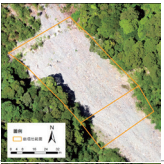
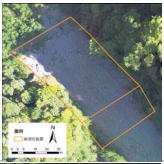
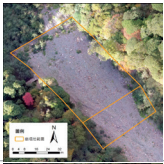
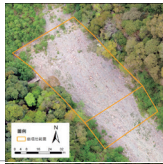
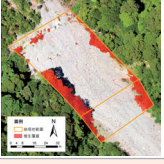
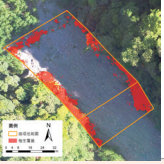
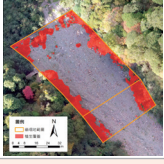
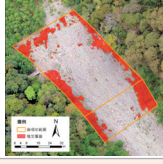
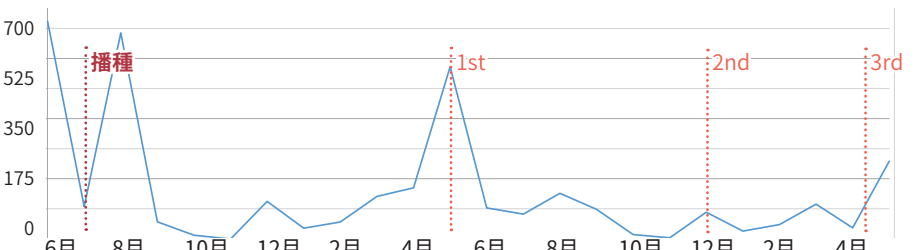
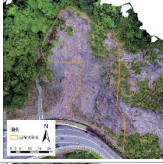

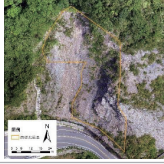

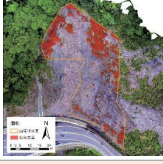
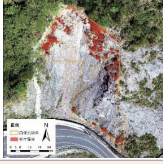
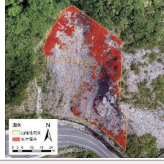
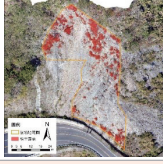
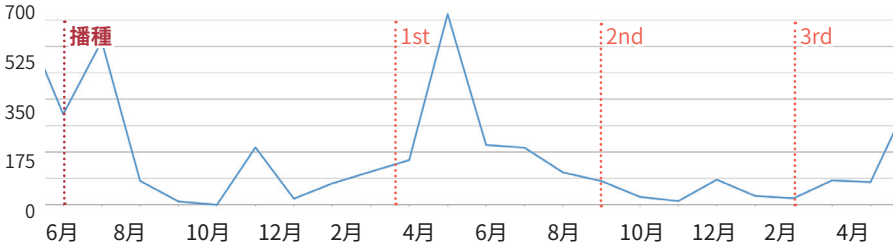
拍攝時間	2019年7月 (播種後)	2020年2月 (第一次追蹤)	2020年8月 (第二次追蹤)	2021年2月 (第三次追蹤)
RGB影像				
NDVI 分析影像				
植生覆蓋率	16.48%	19.79%	28.83%	24.53%
2020年6月 — 2021年6月 降雨資料 (mm)				

表5 南投處濁水溪事業區第22林班（奧萬大）追蹤成果比較

拍攝時間	2019年7月 (播種後)	2020年2月 (第一次追蹤)	2020年8月 (第二次追蹤)	2021年2月 (第三次追蹤)
RGB影像				
NDVI 分析影像				
植生覆蓋率	22.70%	12.78%	31.61%	16.86%
2020年6月 — 2021年6月 降雨資料 (mm)				

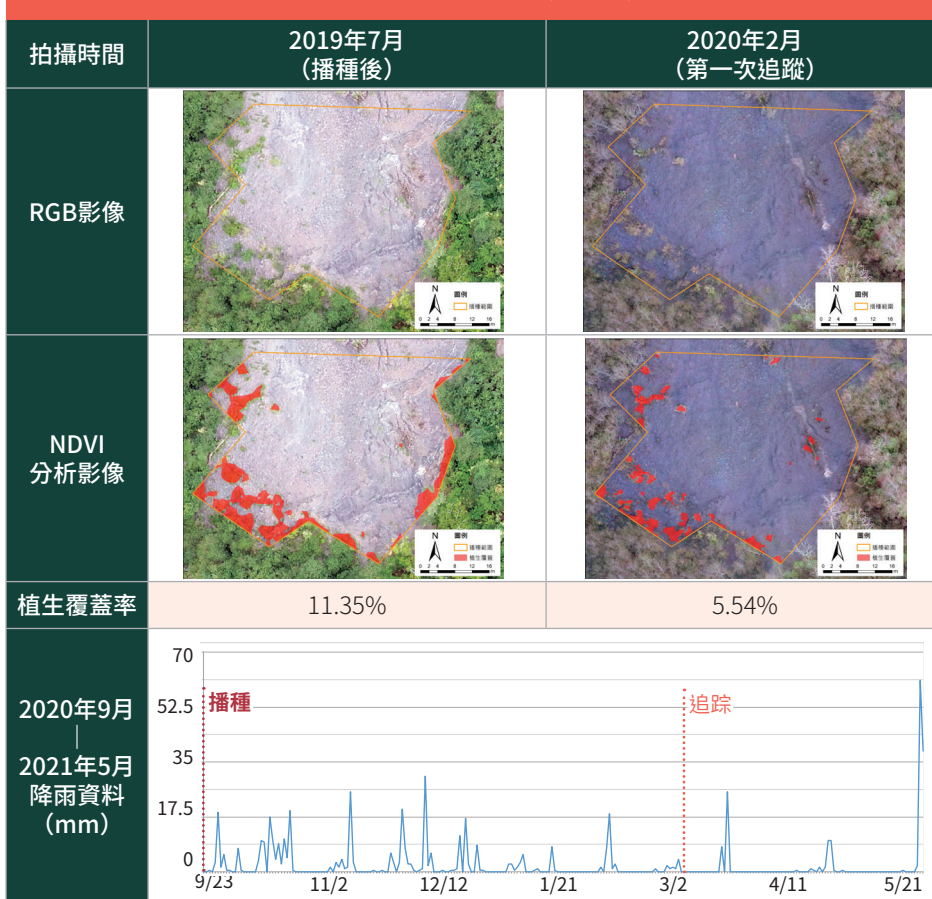
東勢處大甲溪事業區第8林班 (2019年試驗地)

與當地雨量站資料比對，2019年8月（播種後2個月）月降雨量達到600mm，如同羅東處追蹤試驗地，粒劑有可能被沖刷又因下半部有防砂壩的阻攔，使粒劑被攔截於此處，解釋了西北側明顯增加小面積的植生覆蓋。2020年6—10月逢梅雨季皆有降雨，故植生覆蓋率增加近10%，尤其崩塌地北側與東側明顯增加，表示經雨季後植生變得更加茂密。第三次追蹤，雖2020年11月至2021年4月與2019年11月至2020年4月的降雨量趨勢相似，但2020年11月至2021年4月每月降雨較前一年同時間少了10—20mm不等的降雨量，因此植物可能因次缺水而縮小植生面積的範圍。

南投處濁水溪事業區第22林班 (2019年試驗地)

與雨量資料比對，2019年的6—8月、2020年的5—7月有較多的降雨量，2019年7月與2020年8月的影像，位於範圍的南側偏西零星分布的植生變多，而原本位於範圍東北側植生面積也明顯擴張。而兩年的秋至冬季降雨量明顯較少，植生覆蓋率降低許多。此試驗地在冬季植生覆蓋率明顯減少，透過文獻蒐集，瞭解其當地木本植物具有楓香、臺灣檫、土肉桂、青剛櫟以及江某等優勢樹種，其中楓香、臺灣檫與江某為落葉樹種，冬季處於落葉狀態會大量減少植生覆蓋。當地草本植物屬先驅物種為距花黍、昭和草、淡竹葉、黃鵪菜、臺灣何首烏、直立假地豆、蛇根草、風藤、鵝仔草等，其中黃鵪

表6 羅東處太平山事業區第54林班（馬當溪）追縱成果比較



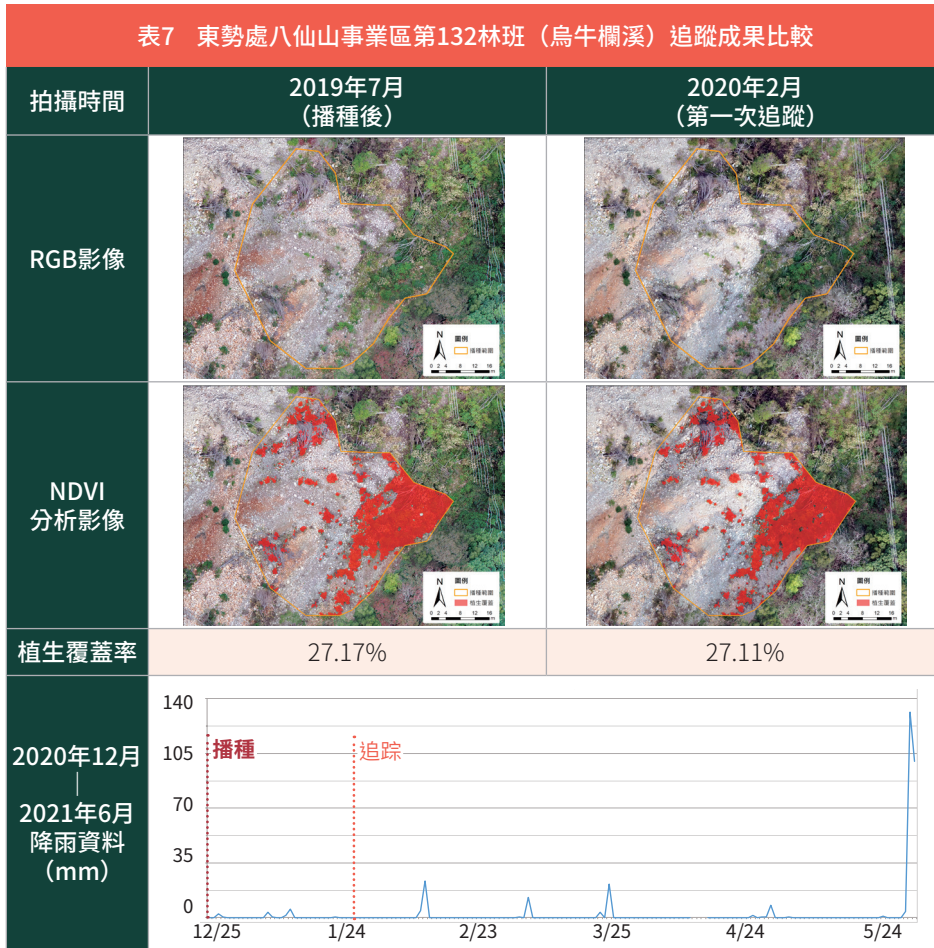
菜、臺灣何首烏以及鵝仔草皆有可能會影響到週期性的植生覆蓋率。

羅東處太平山事業區第54林班 (2020年試驗地)

此處於2020年9月23—24日進行播種，經過5個月後，於2021年3月9日至此處進行播種成效監測，追縱影像的植生覆蓋明顯減少，推測時節剛進入春季，植生明顯處於枯萎狀態，此處因海拔1,600m具有落葉性樹

種，透過文獻瞭解此區域的野核桃、合歡、牛奶榕、野桐、山漆、羅氏鹽膚木、山胡椒屬於陽性之落葉性樹種。因為追縱時間為冬末春初，當地植物的落葉狀態影響了植生覆蓋率，並透過雨量資料分析，播種後進入冬季，因試驗地位處臺灣東北方，故在冬季會因為東北季風帶來不少降雨，自播種至當年10月底幾乎每日有降雨，此降雨量應具備粒劑發芽效果，但透過追縱影像沒有太明顯的變化，故需花一段時間才可觀察到成效。

表7 東勢處八仙山事業區第132林班（烏牛欄溪）追蹤成果比較



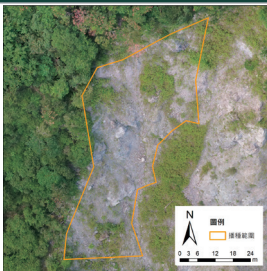
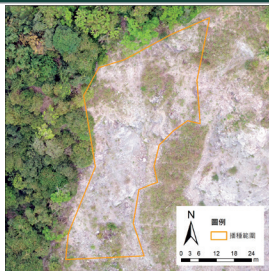
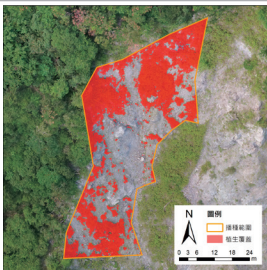
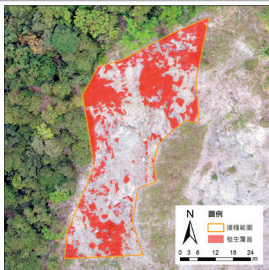
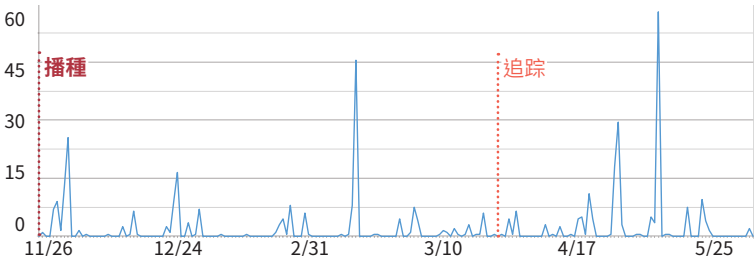
東勢處八仙山事業區第132林班 (2020年試驗地)

此處於2020年12月25日進行播種，經過1個月後，於2021年1月29日進行追蹤，植生覆蓋率無明顯變化。配合自播種日至追蹤日之降雨資料進行探討，期間降雨天數只有4天，並且降雨量不到8mm，故粒劑較困難發芽，因次追蹤植生覆蓋率無明顯變化。

臺東處臺東事業區第32林班 (2020年試驗地)

臺東林區管理處臺東事業區第32林班（知本）於2020年11月進行撒播，並於隔年3月進行追蹤，前後期比較下，植生覆蓋率稍有減少。配合雨量資料分析，從播種到追蹤日（2021年3月22日）期間雖斷斷續續有一些降雨，但日降雨量較分配不均，多數日降雨皆小於10mm，可能使植生處於缺水狀態，而造成植生覆蓋減少。但因臺東地區

表8 臺東處臺東事業區第32林班（知本）追蹤成果比較

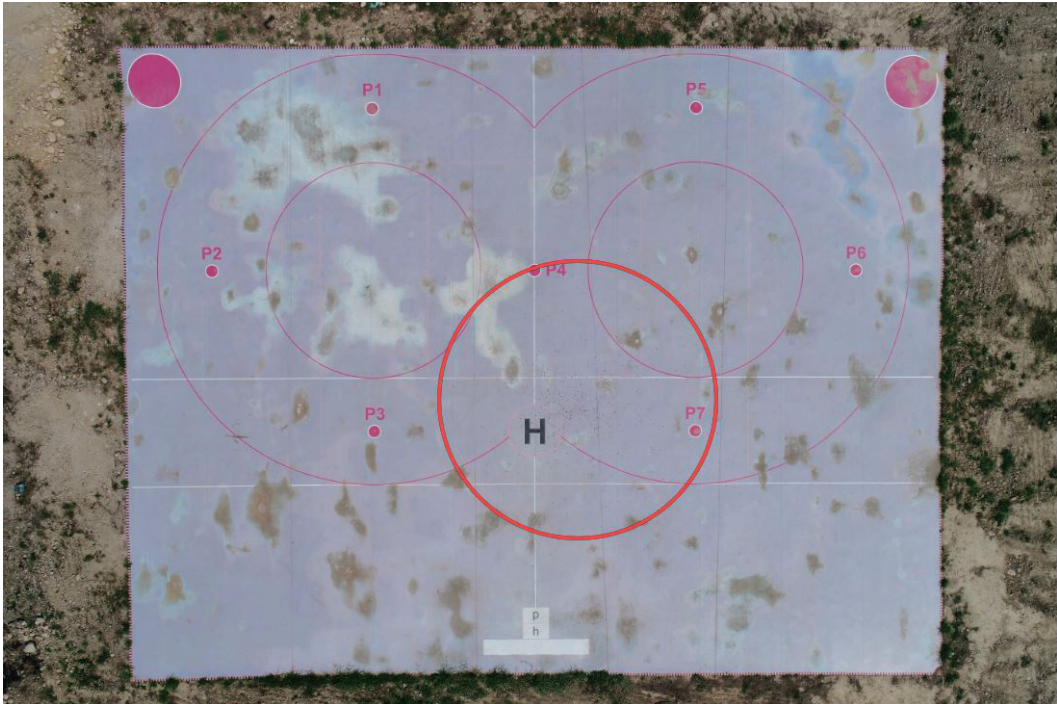
拍攝時間	2019年7月 (播種後)	2020年2月 (第一次追蹤)
RGB影像		
NDVI 分析影像		
植生覆蓋率	49.76%	39.35%
2020年11月 ↓ 2021年6月 降雨資料 (mm)		

多為常綠性植物，故在春季初期追蹤，相較於同時間追蹤的羅東處馬當溪試驗地，植生覆蓋率減少的幅度小，未來降雨量增加並進入夏季，建議再進行追蹤。

無人機播種高度播種量修正

因不同高度播種至地面的撒落範圍與準確度會不同，故也進行了不同高度投擲之

精確度與準確度之測驗。試驗是以試驗地的地標H點作為投擲目標，當粒劑散落至地面再以空拍記錄當時影像，內業以直徑10m圈選粒劑集中散落的區域，同時測量圓圈中心點至H點之距離作為準確度數據，計算10m圓圈內的粒劑數量與總粒劑數量的比例作為精確度數據。結果顯示隨著播種高度越高，精確率越低，成反比關係，其中可能影響的主要因素為風速。精準率與播種距離亦



播種粒劑場地示意

呈反比關係，影響精準率因素為風速及風向。另次要因素是人為誤差，在播種過程，協助人員會透過下視鏡頭即時畫面確認播種目標位置，故投擲高度越高，越考驗協助人員的眼力。其可以透過長期的訓練與經驗來克服，提高精準率；也可考慮GPS航線規劃進行定點投放，但須考量山區GPS誤差較大的問題。以綜合試驗結果，依照其精確度與播種高度的趨勢，建置播種粒劑的修正量表（表9），可供未來執行單位進行播種作業參考。

表9 不同高度之播種量修正表

高度條件	修正值 (%)
20(含) m以下	+10
20—40(含) m	+15
40—60(含) m	+20
60—80(含) m	+25
80—100(含) m	+30
100—120(含) m	+45

無人機播種植生工法成本分析

經過2年的粒劑研發與無人機播種的測試，透過大量的粒劑製作經驗瞭解所需之材料及製作過程所需之人力、時間；在多次的無人機播種作業，也建置出一套流程及必備之耗材。透過2年的研究所蒐集之經驗，瞭解到粒劑製作與無人機播種作業所花費之費用，相關費用如下：

粒劑資材成本分析

1. 以目前所設計的資材，15kg約3,000—3,500粒。相關材料成本約4,000元。
2. 植生粒劑材料費以每平方公尺約10粒計算，每公頃約需100,000粒，合計約500kg，合計材料成本約133,334元。
3. 植生粒劑成品含植生粒劑材料費，每公頃植生粒劑製作相關工資成本與材料耗損成本約250,000元，共計躉售商品物價約每公頃成本約400,000元。

無人機與投擲箱之成本分析

無人機成本分析包含無人機設備攤提、噴植系統研發及製造與相關人事成本。

1. 無人直昇機

費用包含無人機含噴植系統與保險攤提、人力、差旅、交通、油料耗材、保養維修雜支等計算，每公頃作業成本約542,000元。其中無人直昇機硬體與保險費用為22,000元，其餘人事、耗材、其他設備等費用為520,000元。

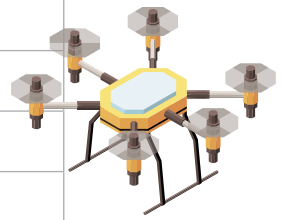
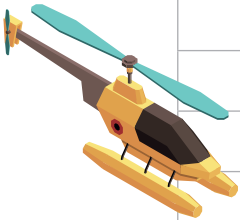
2. 無人多旋翼機

費用包含無人機含噴植系統與保險攤提、人力、差旅、交通、電池、發電機租借、油料耗材、保養維修雜支等計算，每公頃作業成本約344,355元。其中無人機硬體與保險費用為4,455元，其餘人事、耗材、其他設備等費用為339,900元。綜合以上兩項無人機播種作業成本差異

表10 無人直昇機與無人多旋翼機作業成本比較表

無人直昇機	項目	無人多旋翼機
22,000	機體與保險	4,455
354,000	人力及差旅	198,400
46,000	油料與其他設備	61,500
120,000	維護、雜支與稅金	80,000
542,000		344,355

(單位：元/ha)



比較如表10，總計作業成本無人直昇機約為無人多旋翼機之1.5倍。無人直昇機與無人多旋翼機的成本差異甚大，其因當時的時空背景，無人直昇機原始總價較高，相對於無人多旋翼機而言，高出約4倍費用，以及無人直昇機需要較多的人力支援以確保飛行作業安全，故總成本相對差異較大。

無人機播種植生工法不僅可以取代人工噴植機具，到達道路不可及之處，且有保全對象的崩塌地施作、統一施作零星分布的崩塌地、作業人員的安全考量面也較安全，以及可短期分批作業等優點，使得無人機播種植生工法在一些情況下成為相對較佳選擇的植生復育方法。

結論

林務局管轄之國有林地多位於集水區上遊較偏遠地區，其因天然災害所造成的崩塌地往往交通可及性極低，以致無法使用人工工程方法進行復育。近年因無人機研發技術成熟，以無人機應用於交通性不佳的崩塌地，進行人工的植生復育成為植生工法的新選擇。

過去我們使用的崩塌地復育草本種類常為外來馴化種，透過此次研究計畫，嘗試以原生種與粒劑結合，進行發芽試驗，雖需再進一步試驗瞭解及提升發芽率，但在崩塌治理領域已跨出創新的一步，期望未來長期試驗能有更好的結果。

透過近年的研究試驗評估無人機播種植

生工法之可行性，在長期的追蹤下具有預期的成效。在不同高度測試播種散布程度後，建立各播種高度的粒劑修正量參考表，可有效增加粒劑播種至崩塌地指定地點之確定性。未來無人機科技越發進步，無人機播種植生工法將會普及化，相關單位亦參考此工法的粒劑、無人機作業的成本分析，以供後續進行相關作業編列預算參考。

目前因臺灣先前無人機相關工法之案例甚少，因此近年之試驗操作經驗建立了無人機播種植生工法的基礎，未來仍有許多須待進一步研究精進的空間，例如植生粒劑製作技術、原生草仔之篩選及量產、無人機效能及灑播技術等，期待未來能加以有效推廣，並廣泛使用此工法解決偏遠崩塌地植生復育之境。 