

中華民國108年12月3日

108年度創新研究計畫
(工程技術發展類)



陡坡崩塌地無人飛行載具 (UAV) 噴植工法作業與驗證

期末暨成果發表簡報

計畫主持人：詹勳全 教授

共同主持人：林政侑 台灣環境綠化協會研究員

協力廠商：陶林數值測量工程有限公司



水土保持局



國立中興大學水土保持學系

期初審查意見辦理情形

編號	審查意見	意見回覆
1	噴植後黏著問題，如何因應陡坡噴植或是噴植區位。	從本計畫之噴植成效調查，種子經包覆黏著劑與水後，可有效附著於邊坡上。
2	如何判定植生成效是因人工噴植或是自然形成。	可透過現場實際調查植生物種，判定使否為人工草種。
3	噴植工法價格與雇工購料之差異分析。	UAV噴植工法礙於驗收問題無法同雇工購料方式，因此本計畫無比較兩者之差異。
4	黏著劑成效試驗，是否有可能進行試驗，瞭解黏著劑成效。	本團隊過去曾對黏著劑進行相關沖蝕試驗，並以補充於內文，請參閱P48
5	土壤沖蝕對噴植成效之比較，例如有降雨沖蝕，對噴植是否有影響。	本團隊目前完成一次噴植試驗，雖當天午後有發生降雨，惟植生生長成效來看，尚無法說明土壤沖蝕對噴植成效之影響。
6	簡報P.11、P.12，適宜噴植時機-剩水量、最大蓄水量推估等，是否會製作全台灣的分析結果，可直接作為參考依據。	本計畫之剩水量、最大蓄水量已為全臺之分析成果。
7	簡報P.34，崩塌地試驗地點：和平區、信義鄉等地點，若依照坡度、地形粗糙度、地形濕度指數決定適宜噴植區位，其區位為何？	透過坡度、地形粗糙度、地形濕度指數可萃取噴植點位複合指標，而該指標相對較高之區位即為適宜噴植區位。
8	簡報P.43，裸地率指崩塌地中適宜噴植點位之比率，而植生成效監測時，應有一門檻值作為評估基礎。	本計畫今年度僅完成一次實作，實作至今僅兩個月之復育時間，因此門檻值須有更多實作案例，才可明確定訂。
9	P.12，第二段「第一場雨，依不同土壤分類，若大於37.93~8.11mm則可進行噴植作業」，若無後續降雨，此適當時機可持續多久？此評估方法是否合理，請再檢討。	透過剩水量之評估及第一場雨之紀錄，可初步確認濕季來臨之月份，並作為噴植準備之參考。



期初審查意見辦理情形

編號	審查意見	意見回覆
10	P.22，圖2-20MHSI之適宜噴植區位之高中低等級，請轉換成植生效果之量說明。圖中高中低面積比或分布度，對整區崩場地噴植效果如何評估，且三種等級區位，實際噴植作業，是否有選擇性。	MHSI之適宜噴植區位之高中低等級為崩場地中之相對位置，因此採用等級方式表示，在實際操作上，可透過座標定位方式，自動控制UAV飛行，惟GPS訊號不佳之區位，僅可手控操作。
11	目前噴植之飛控，仍為手控視距內操作，不易達到精確噴植於規劃區位，故實作上是否需先經過適宜地形區位分析或直接全面噴撒施作，建議再評估。	精確噴植需在GPS訊號良好之區位，故本計畫目前上採用全面噴植之方式未能達到精確噴植。
12	驗收合格規範，不建議直接引用水土保持技術規範之規定。	本計畫非引用水土保持技術規範之規定，而是說明規範不適用之原因。
13	適宜噴植區考量”濕度”、”粗糙度”是否有考量地質條件？	植生生長之難易與地形、土壤、天氣等因子關係較大，因此並無考慮地質條件。
14	噴植的精確度及準確度如何。	本計畫研發之噴頭，其機才噴射後之擴散程度並較低，因此尚可精準噴植於預噴植之區位。
15	每一趟噴植可達多少面積，而多少時間。	經本次噴植實作，每趟約可噴植100m ² ，時間約半天。
16	適宜噴植區位，於現地試驗場址是否以宜噴植區位進行噴植，其成果是否如預期？另適宜噴植區域，是否亦為容易自然植生區位？	現場坡度達40度以上，以達陡坡崩場地之標準，可嘗試作為UAV噴植之區位，且實作結果在噴頭及植生生長成效上皆符合預期。 適宜噴植區域指草籽容易附著之區位，因此亦為容易自然植生區位。
17	噴植作業時程規劃之飛行申請需15天，施工前置作業亦需7至14天，是否代表此工法無法因應緊急處理？	若要因應緊急處理時，可透過NCDR進行申請，而無需飛行申請。



前言



人工噴植工法



航空噴植

針對**交通可及性極低**之崩塌地，透過具有**高機動性**、**高解像力**、**即時性**及一定酬載能力等條件之無人飛行載具，開發**無人飛行載具航空植生系統**，並分析**適用**於無人飛行載具之**植生資材**，建立無人飛行載具航空植生**成果評估模式**。



陡坡崩塌地
UAV濕式噴植



工作項目



1

崩塌地無人飛行載具噴植前置作業申請與植生區位規劃流程

2

大型無人飛行載具植生噴頭之設計研發(15公斤級以上)

3

陡坡崩塌地應用無人飛行載具(UAV)噴植之植生資材配方試驗

4

崩塌地應用大型無人飛行載具(UAV)噴植實作與驗證

5

崩塌地應用無人飛行載具(UAV)植生成效之監測與驗收

工作進度及檢核表

計畫內容 \ 時程		2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月		
1. 崩塌地無人飛行載具噴植前置作業申請與植生區位規劃流程														
2. 大型無人飛行載具噴植高稠度含水植生基材之設計研發(15公斤級以上)														
3. 陡坡崩塌地應用無人飛行載具(UAV)噴植之植生資材配方試驗														
4. 崩塌地應用大型無人飛行載具(UAV)噴植實作與驗證														
5. 崩塌地應用無人飛行載具(UAV)植生成效之監測與驗收														
報告撰寫														
期中考評														
期末考評														
成果報告														
預訂進度累計百分比(%)		10	15	25	35	40	60	70	80	90	95	100		
查核點	預定完成時間	查核點內容說明												
期中簡報	108/8	完成(參)工作項目1~2項，部份完成(參)工作項目3~5項。												
期末簡報	108/11	完成合約所有工作項目。												

項次	工作項目	對應章節及頁碼	期中查核點	總計畫進度
壹	崩塌地無人飛行載具播種植生前置作業申請與植生區位規劃流程	第二章 (P.5~P.23)	100%	100%
貳	大型無人飛行載具植生噴頭之設計研發(15公斤級以上)	第三章 (P.25~P.41)	100%	100%
參	陡坡崩塌地應用無人飛行載具(UAV)噴植之植生資材配方試驗	第四章 (P.43~P.52)	100%	100%
肆	崩塌地應用大型無人飛行載具(UAV)噴植實作與驗證	第五章 (P.53~P.64)	100%	100%
伍	崩塌地應用無人飛行載具(UAV)植生成效之監測與驗收	第六章 (P.65~P.72)	100%	100%



1

崩塌地無人飛行載具噴植前置 作業申請與植生區位規劃流程



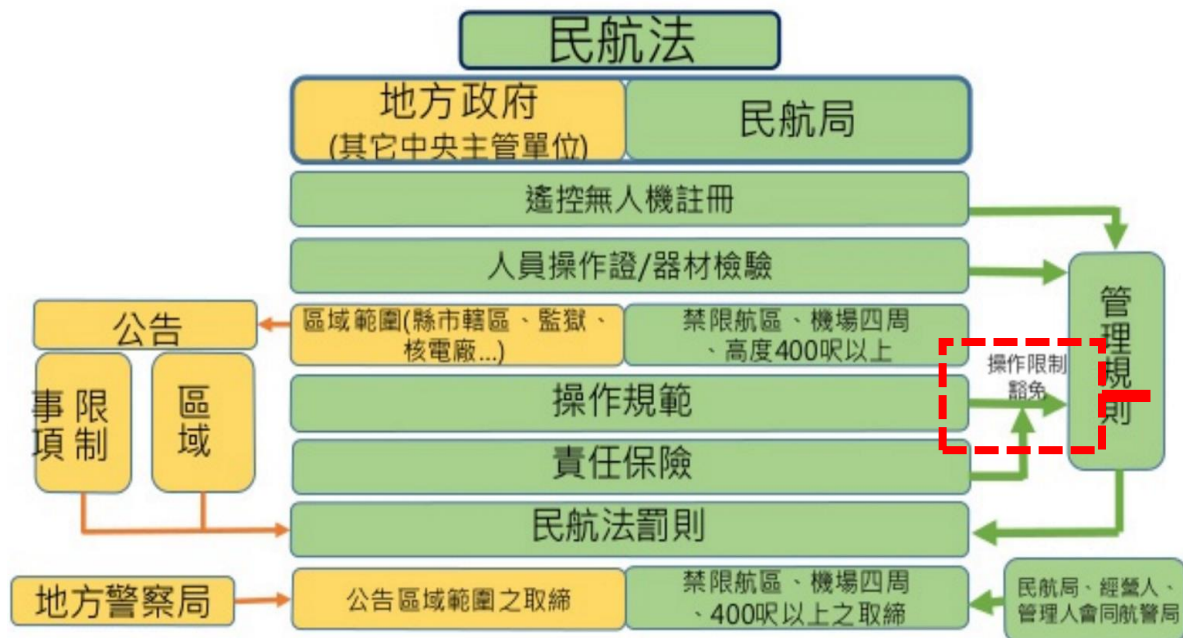
水土保持局



國立中興大學水土保持學系



擬定無人載具航空植生作業程序



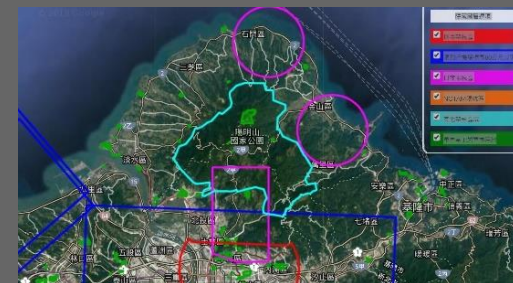
- 遙控無人機飛航活動之實際高度不得逾距地面或水面四百呎。
- 不得以遙控無人機投擲或噴灑任何物件。
- 不得裝載危險物品。
- 「遙控無人機管理規則」所訂定之操作限制。
- 不得於人群聚集或室外集會遊行上空活動。
- 不得於日落後至日出前之時間飛航。
- 在目視範圍內操作，不得以除矯正鏡片外之任何工具延伸飛航作業距離。
- 操作人不得在同一時間控制2架以上遙控無人機。

1. UAS器材及人員管理



- 政府機關(構)、學校或法人- 設備註冊、設計檢驗
- 人員UAV操作證

2. 飛航空域申請管理



- 航攝距地表高度四百呎
- 無人機投擲或噴灑限制

適宜噴植時機－剩水量

降雨量多於蒸發散量，則有餘水可留蓄於土中；反之，將極易發生旱害。

$$I_m = I_h - I_d$$

$$I_h = 100 \frac{S}{P_e}$$

$$I_d = 100 \frac{D}{P_e}$$

I_m 濕潤指數(moisture index)

I_h 為濕度指數(humidity index)

I_d 為乾旱指數(aridity index)

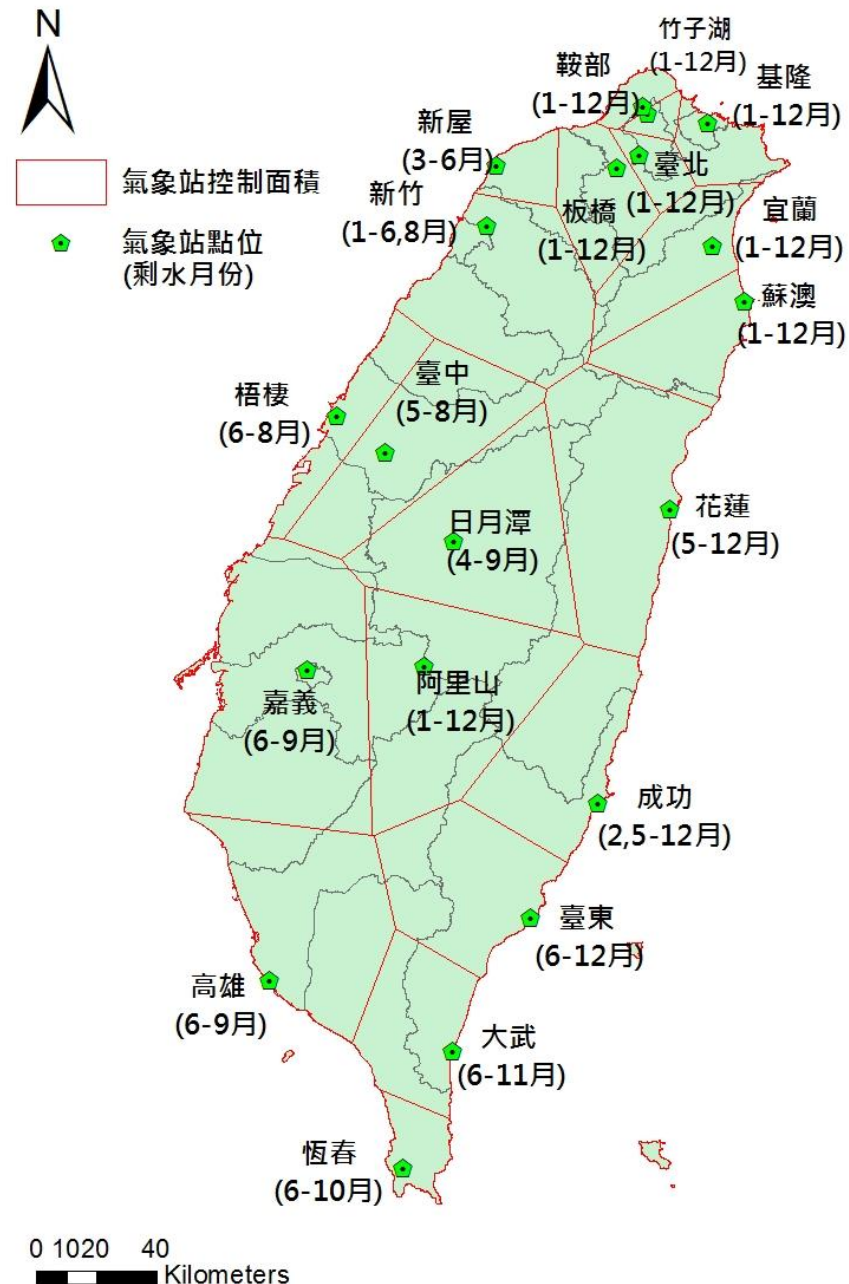
S 為剩水量($S=P-A_e$);

D 為缺水量 ($D=P_e-A_e$)

P = 降水量

A_e = 實際蒸發散量

P_e = 潛在蒸發散量





適宜噴植時機－最大蓄水量推估

分類	土壤質地	SCS土壤分類
0	粗砂土、砂土	A
1	細砂土、壤質砂土、壤質粗砂土	
2	壤質細砂土、粗砂質壤土、砂質壤土、細砂質壤土	
3	極細砂土、壤質極細砂土、極細砂質壤土	
4	坊質壤土、坊土	B
5	壤土	
6	砂質黏壤土	C
7	黏質壤土、坊質黏壤土	D
8	坊質黏土、砂質黏土	
9	黏土	

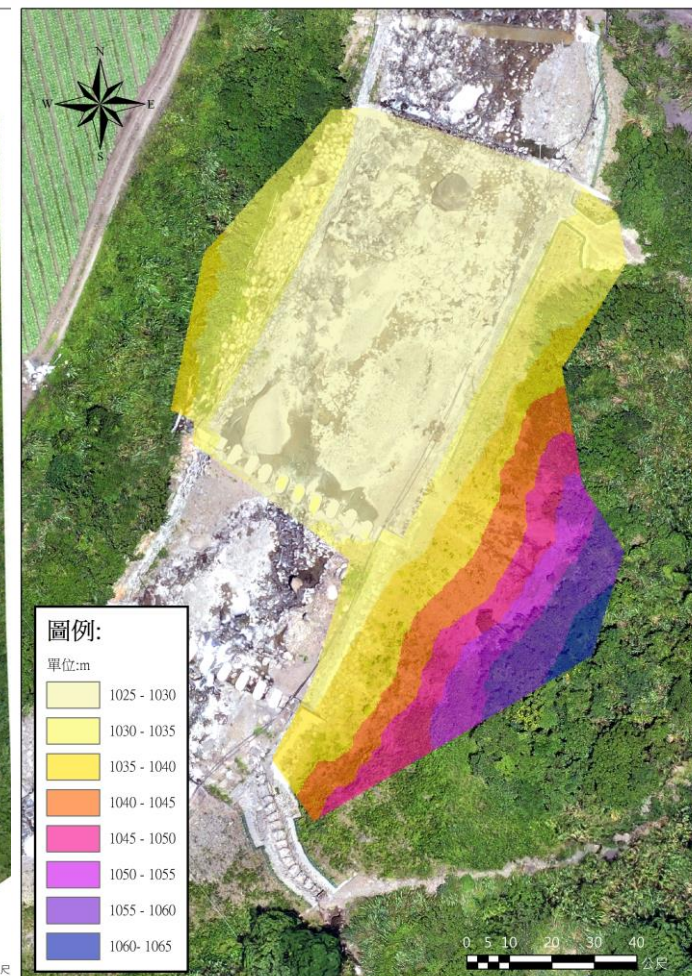
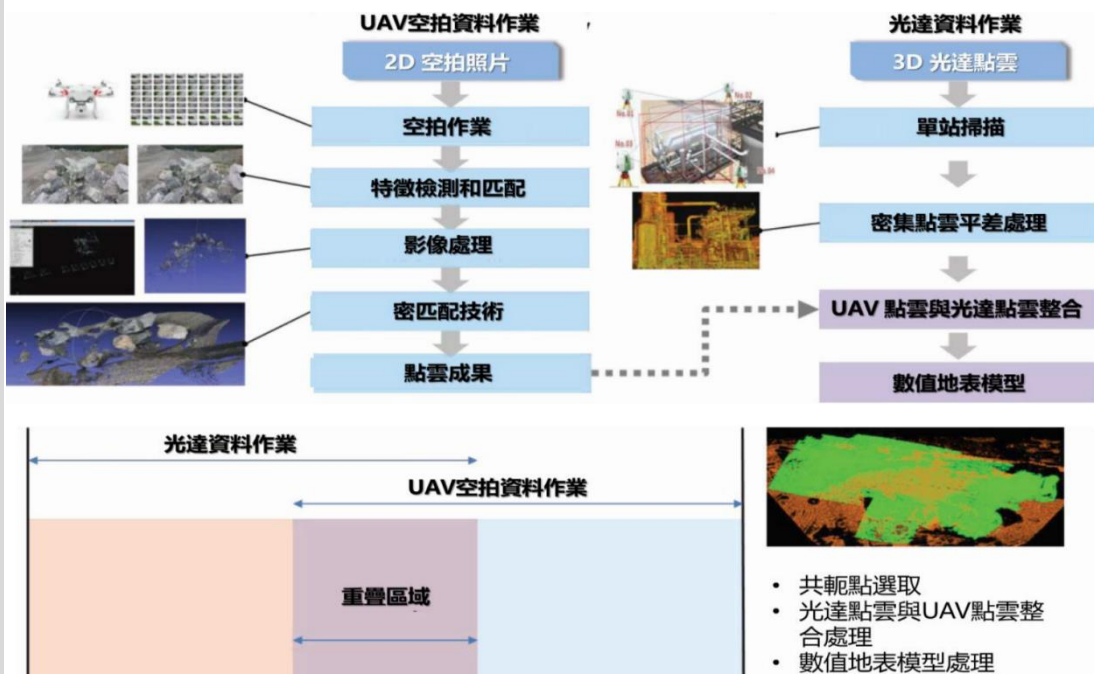
SCS土壤分類		A類土壤	B類土壤	C類土壤	D類土壤
土地利用					
建地		74	84	90	92
針葉林		25	55	70	77
地表水		94	93	95	96
旱田		62	71	78	81
公園、墓地		39	61	74	80
荒地		77	86	91	94
濕地		92	93	94	95
闊葉林		36	60	73	79
水田		70	79	84	88
果園		45	66	77	83
其他林地		38	62	74	80

$$S_{(mm)} = \frac{25400}{CN} - 254$$

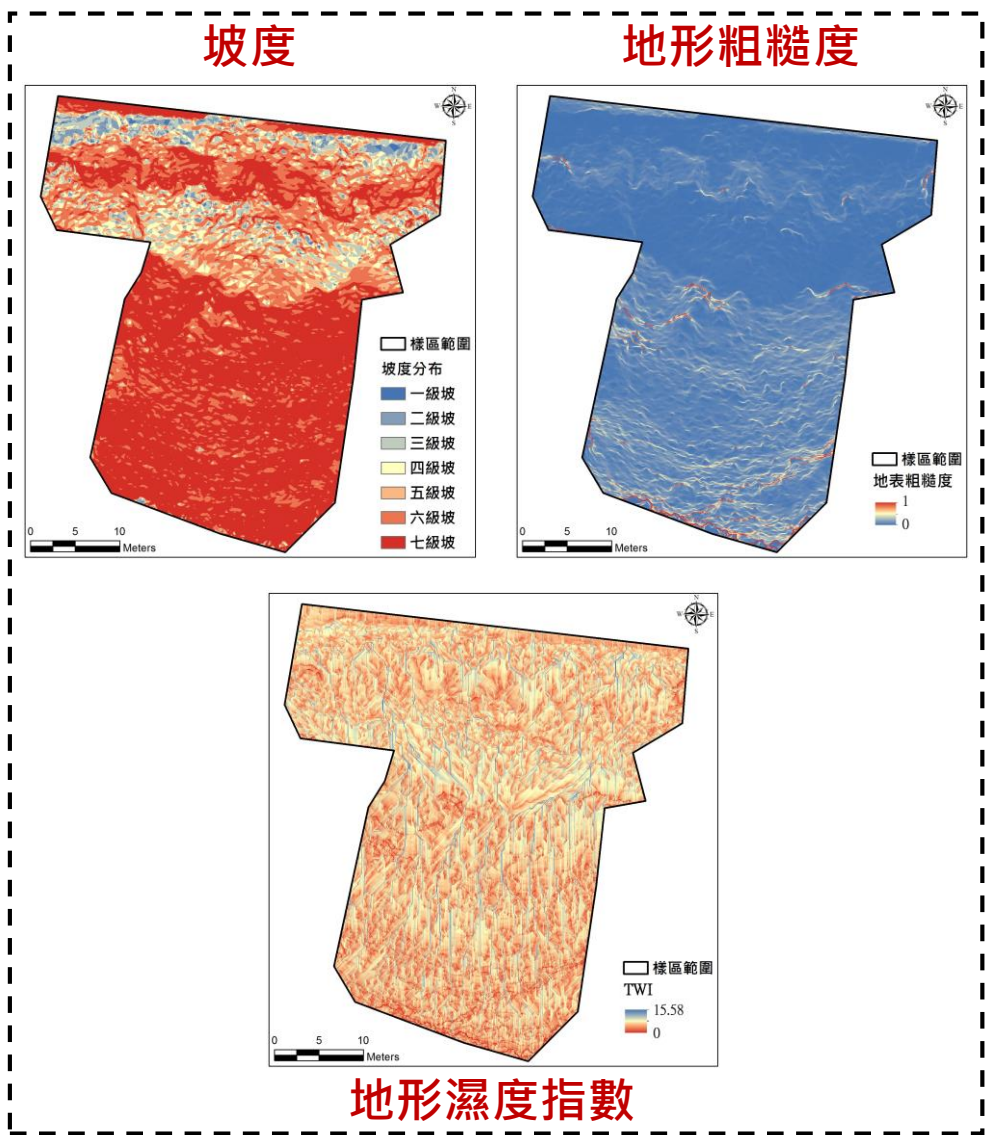
$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \text{ , } (P > 0.2S)$$

	A類土壤	B類土壤	C類土壤	D類土壤
CN值	77	86	91	94
最大蓄水量 (mm)	75.87	41.35	25.12	16.21
適宜噴植降雨量 (mm)	>15.17	>8.27	>5.02	>3.24

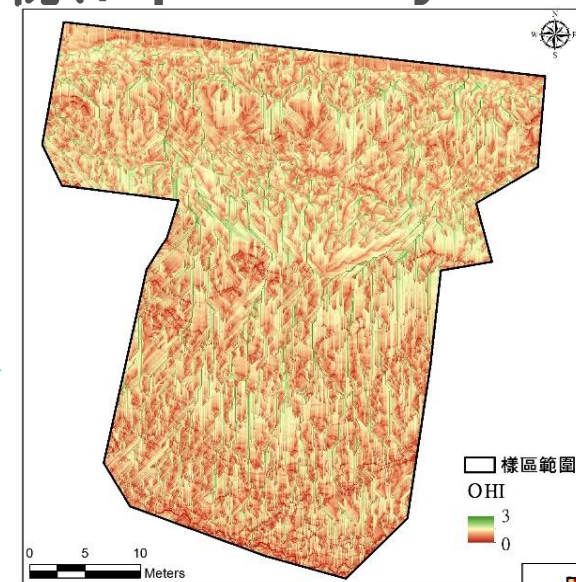
適宜噴植區位－地形資料建置



適宜噴植區位－最適噴植區位指標(Optimum hydroseeding index, OHI)



正規化
套疊

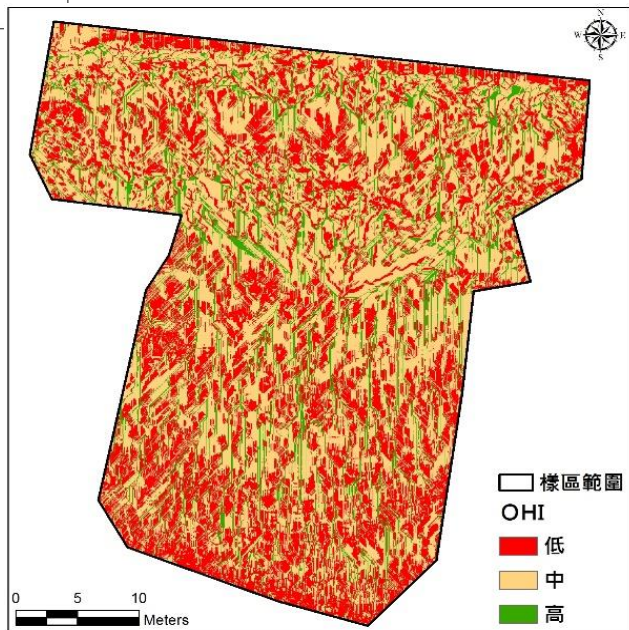


最適噴植
區位指標

分類



正攝影像



2

大型無人飛行載具植生噴頭 之設計研發(15公斤級以上)



水土保持局



國立中興大學水土保持學系



無人飛行載具(15公斤級以上)優選評估

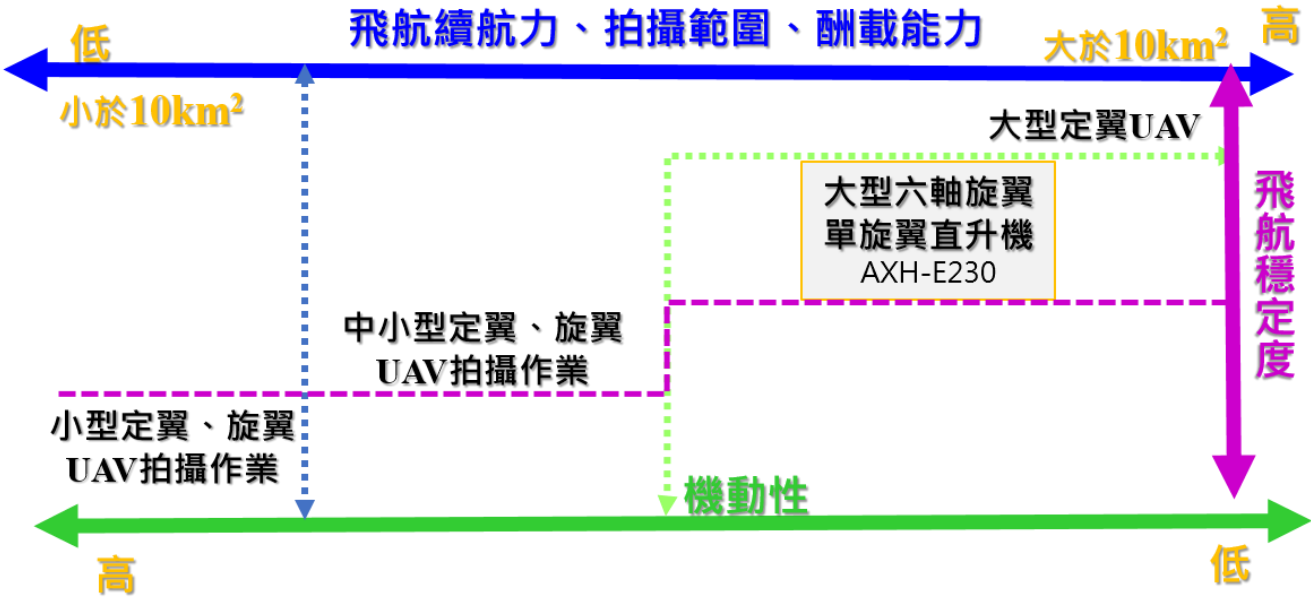
蒲福風級	3 (和緩 / 緩風)	4 (和緩 / 和風)	5 (清勁)	6 (強風)	7 (強風 / 疾風)	8 (烈風 / 增強烈風)
風速 (km/h)	13 ~ 19	20 ~ 30	31 ~ 40	41 ~ 51	52 ~ 62	63 ~ 75
風速 (m/s)	3.6~5.3	5.6~8.3	8.6~11.1	11.4~14.2	14.4~17.2	17.5~20.8
UAS機型						

飛航申請許可

- 一般飛機:約2個月
- UAV載台:約1~2星期

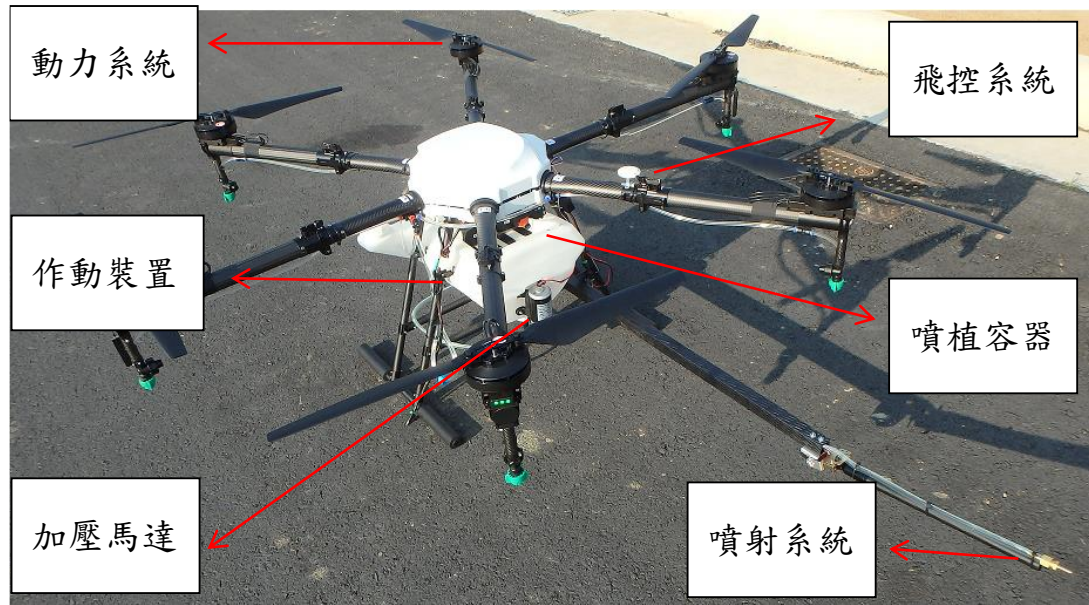
飛行高度

- 400呎以上屬中央管
- 400呎以下屬地方





本計畫採用之噴植設備

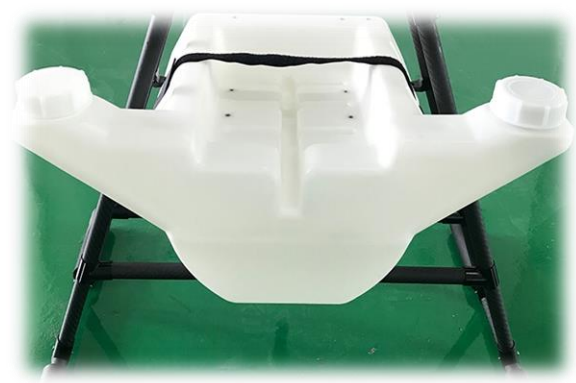


濕式噴頭

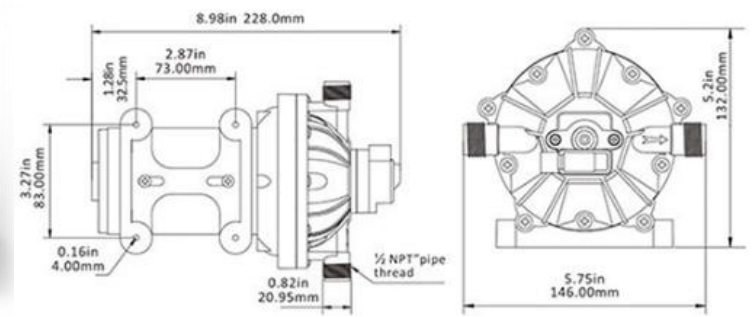
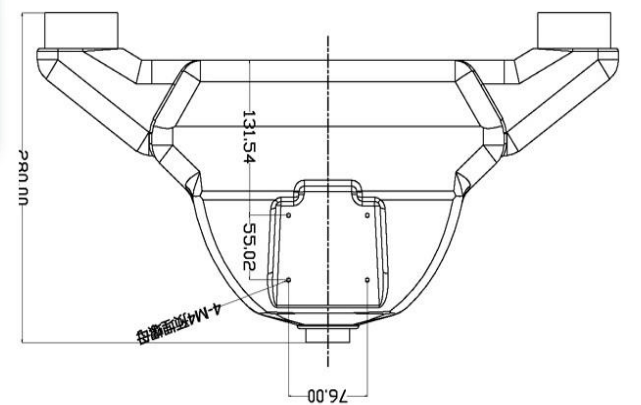


噴植前

噴植後

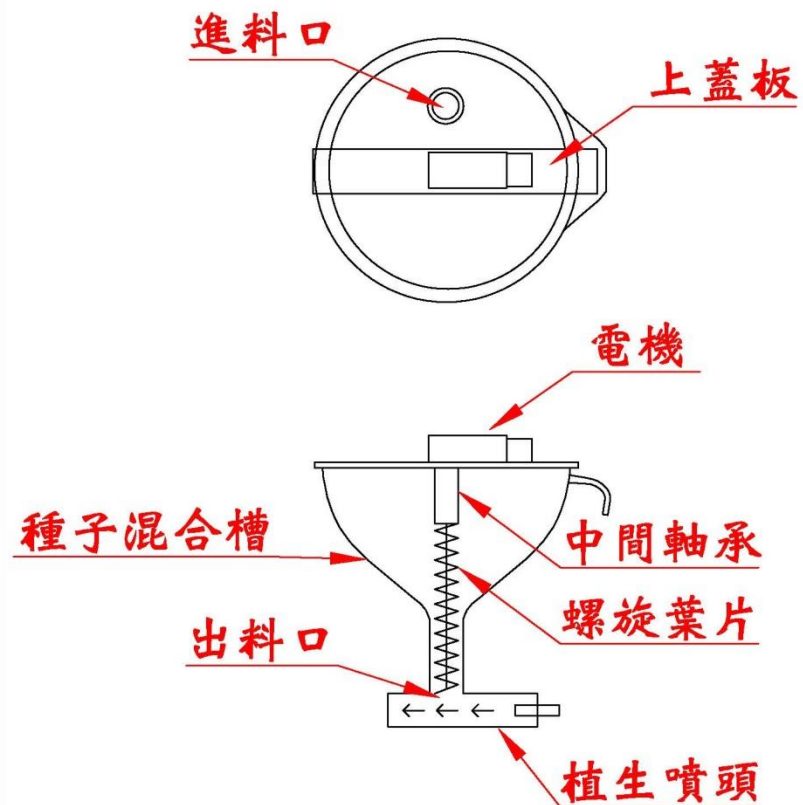


植生資材材料桶(16L)



壓縮動力水泵

噴頭改良設計－種子分離式



種子分離式噴頭之戶外噴灑實驗



UAV組裝



添加種子



添加黏著劑



定點噴射

種子分離式噴頭之戶外噴灑實驗



種子均勻撒佈

噴灑距離約5米

種子分離式噴頭試驗(不同種子處理及形狀)

實驗一、泡水種子(律柏草)噴灑實驗

- ◆實驗目的1：測試草籽**預先泡水**4小時，以提高發芽率。
- ◆實驗目的2：測試泡過水的草籽放入**種子攪拌槽**的**噴射效果**。
- ◆實驗步驟：
將律柏草仔浸泡自來水4小時後，倒入種子攪拌槽並啟動加壓馬達讓水柱噴出，以測試種子發射出的成效。
- ◆實驗結果：
泡過水的律柏草籽，難以透過種子攪拌裝置將草籽帶出。
- ◆原因推論為：
 - 1.種子泡水後增加了體積。
 - 2.種子泡水後，**其外表附著的水份增加了摩擦力**。
 - 3.律柏草為**瘦長型**的種子容易卡住。



種子分離式噴頭試驗(不同種子處理及形狀)

實驗二、瘦長型種子噴灑實驗

◆實驗目的：

測試瘦長型的草籽(如：律柏草籽、黑麥草籽)放入種子攪拌槽的噴射效果。

◆實驗步驟：

將全滿的碗裝草籽倒入種子攪拌槽並啟動電力讓攪拌棒將種子帶出，以觀察種子被帶出的成效。

◆實驗結果：

- 1.全滿的碗裝黑麥草，倒入種子攪拌槽。
- 2.啟動攪拌棒一分鐘後切斷電源，草籽幾乎沒有被帶出，維持一碗的量。
- 3.種子攪拌槽的出口阻塞，需透過外力才能將洞口清理乾淨。



種子分離式噴頭試驗(不同種子處理及形狀)

實驗三、圓型種子噴灑實驗

◆實驗目的：

測試圓型的草籽(如：速綠草籽)放入種子攪拌槽的噴射效果。

◆實驗步驟：

將全滿的碗裝速綠草草籽倒入種子攪拌槽並啟動電力讓攪拌棒將種子帶出，以觀察種子被帶出的成效。

◆實驗結果：

- 1.全滿的碗裝黑麥草，倒入種子攪拌槽。
- 2.啟動攪拌棒一分鐘後切斷電源，草籽全數被帶出，攪拌槽沒有剩餘草籽。



種子分離式噴頭試驗(不同種子處理及形狀)

實驗四、混合種子噴灑實驗

◆實驗目的：

測試**瘦長型**的草籽(如：律柏草籽、黑麥草籽)**混合圓型**的草籽(如：速綠草籽)放入**種子攪拌槽**的噴射效果。

◆實驗步驟：

將**圓型之速綠草籽混合瘦長型之黑麥草籽(2:1)**倒入種子攪拌槽並啟動電力讓攪拌棒將種子帶出，觀察種子被帶出的成效。

◆實驗結果：

- 1.圓型之速綠草籽混合瘦長型之黑麥草籽(2:1)倒入種子攪拌槽。
- 2.啟動攪拌棒一分鐘後切斷電源。
- 3.混合的草籽**被帶出約三分之二的量**。



3

陡坡崩塌地應用無人飛行載具(UAV)噴植之植生資材配方試驗



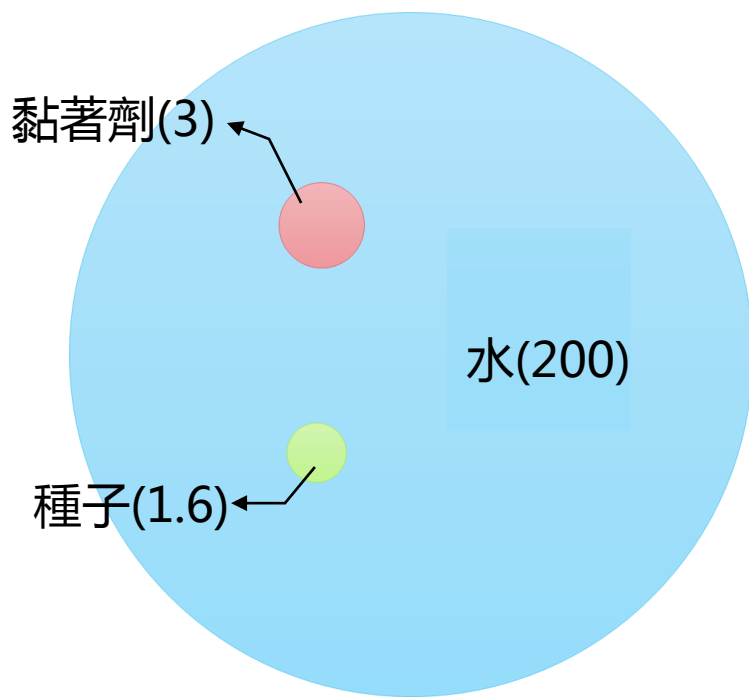
水土保持局



國立中興大學水土保持學系



噴植資材配比



註：資材(比例)

由於陡坡崩塌地因地形陡峭，採用人工植生時種子不易附著，考量交通不易到達，無法預先進行開溝穴植，因此種子如何附著成為UAV噴植是否成功之主要關鍵。

UAV噴植受限於酬載能力之限制，無法全面進行噴植，考量種子附著及UAV酬載能力，噴植觀念宜有所改變，透過選擇適當區位及可快速生長草種，與陡坡崩塌地上呈現數個樹島效應，藉由速生草種改變崩塌地之粗糙度，此外，種子本身有水即可發芽，因此可不需考量加入肥料。

人工噴植常用草種



高狐草(律柏草品系)



學名：Festuca arundinacea

科別：禾本科

莖葉：多年生牧草，稈直立叢生，高60~100cm。

習性：適生長於臺灣中高海拔(3000公尺以下)地區

耐寒、耐旱，可於全日照或為遮陰下生長，喜中性或微酸性土壤，品系甚多，但通稱為高狐草。



簡介：原產地為美國，在美國育有多種品系，台灣於1957年自美國Kentucky州引進(A15)，目前台灣地區主要應用品系為肯特基31F及律柏草，為水土保持邊坡覆蓋用草種，**發芽率高**，做為噴播種子及果園覆蓋植物材料。



黏著劑選用評估

侵蝕防止劑定義為**施工初期**的種子發芽到形成植物覆蓋這段時間中，能發揮**防止沖蝕效果**的一種短暫性藥劑，一般黏著劑之濃度越高，用量越多，黏滯度通常也會越大，保護坡面的效果越好。

高分子黏著劑



C-710



團粒化劑



黏著劑C-710簡介



1

良好的防止降雨沖蝕效果

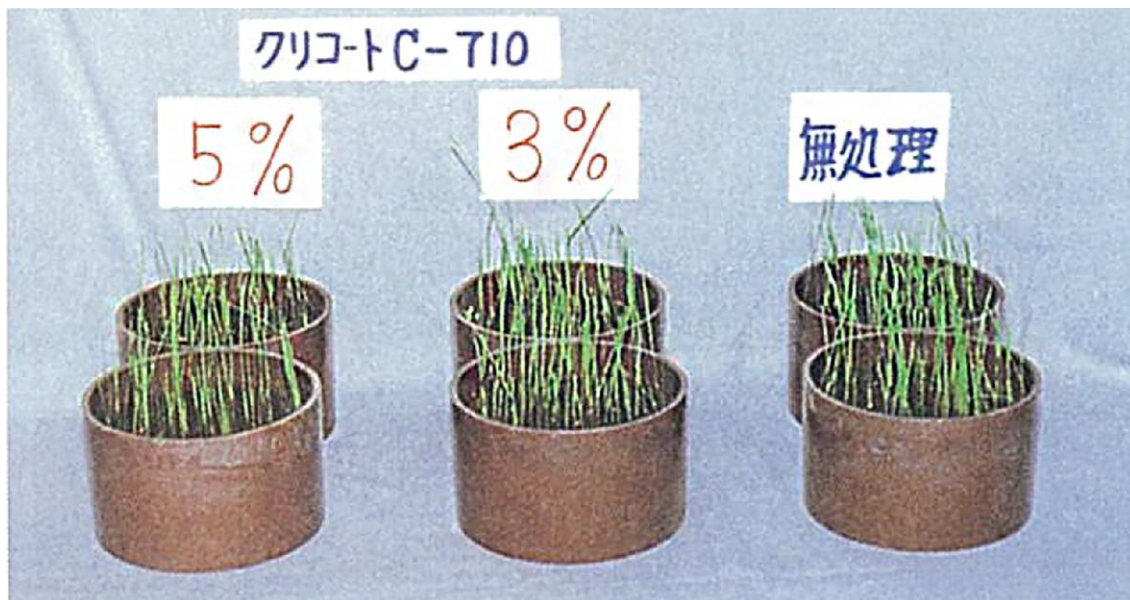
2

具有保水、保溫及通透性的效果，
滿足種子發芽及生長條件

3

防止鳥類啄食種子及螞蟻搬運種子

黏著劑之相關試驗



試驗種子：高狐草(Tall fescue)

試驗條件：

1. 將土壤與化肥混和均勻後，填入發芽
2. 撒播種子後，覆上薄土輕壓。
3. 將一定份量3%(60g/m²)及5%(100g/m²)的C-710均勻散佈在土壤表面。

試驗結果：

播種後第五日發芽，第十二日生長高度平均為7.6cm，C-710對發芽成長**無不良影響**。



本團隊已針對C-710之防沖蝕能力進行試驗，**左側為添加C-710之土壤樣本**，**右側則無添加**，經人工灑水一段時間後，左側土壤幾乎停留於木板上，而右側則大多數被沖走，可見C-710對於降雨之防沖蝕有其成效。

4

崩塌地應用大型無人飛行載具 (UAV)噴植實作與驗證



水土保持局

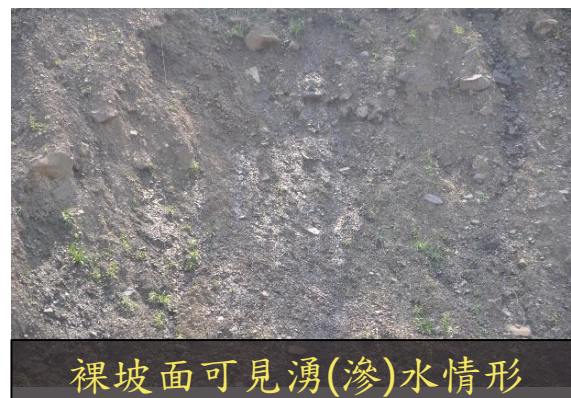


國立中興大學水土保持學系



崩塌地試驗地點

行政區域	南投縣信義鄉
WGS84座標	23° 35'36.2"N 120° 52'02.8"E
地點描述	阿里不動溪右岸邊坡
崩塌面積	約0.1 ha



UAV噴植實作(2019/09/03)



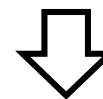
抵達試驗場及各項設備檢查



混合草籽(圓型：狹長型=2:1)



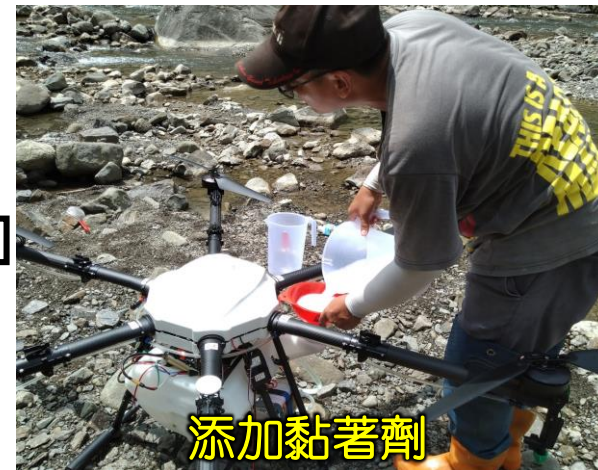
加入十公升的溪水



UAV空中噴灑實作



地面噴灑測試



添加黏著劑

UAV噴植實作(2019/09/03)



速綠草草籽



本次噴灑作業於2019/09/03上午
進行一次性噴植，噴植範圍約**50平方公尺**，噴植後以人工攀爬崩塌地，
利用相機進行草籽散布紀錄，結果
顯示，由於草籽較小且輕，在包附
黏著劑之情形下，**容易附著於崩塌
地之凹槽或岩石上**，草籽透過**乾濕
分離式噴頭**帶出效果佳。

噴植後植生生長情形(2019/09/16)

2019/09/16 現地觀察結果



2019/09/03 地面噴灑測試



速綠草與黑麥草近照

約兩個禮拜後(2019/09/16)在同一地點進行相關之植生成效觀察，結果顯示，沿地面噴灑測試區之直線區域恰可作為邊坡之對照組，該直線區植生生長良好，其原因在於河床區有充足之水源，提供草籽發芽，由於9/3當天噴植午後有降雨發生，9/16河床區位植生仍可生長，代表這兩個禮拜之降雨，未產生較大之逕流量將河床草籽帶走。



噴植後植生生長情形(2019/09/16)



從坡面植生成效結果顯示，可明顯觀察到速綠草及黑麥草皆有發芽，其中又以速綠草分布最廣，其原因乃該草籽在本次噴植使用上比例較高，且屬於圓形草籽，較容易被帶出，此外，9/3當日午後發生一場降雨，提供種子發芽之水源，從本次噴植結果而言，利用本團隊開發之UAV噴植系統，在配合適當天氣及草種下，可有效完成陡坡崩場地之UAV噴植工作。

日期	9/3	9/4	9/5	9/6	9/7
降雨量(mm)	9.5	17	16	11.5	1
日期	9/8	9/9	9/10	9/11	9/12
降雨量(mm)	0.5	0	0.5	0	0
日期	9/13	9/14	9/15		
降雨量(mm)	0	0	7		





噴植實作成本評估

工料預算分析表

項次	項目及說明	單位	工料數量	單價(元)	複價(元)
1	土壤侵蝕防止劑	KG	0.15	980	147
2	環保型綠色色料	KG	0.05	800	40
3	水土保持草種(律柏草)	KG	0.25	300	75
4	水	KG	10	2	20
總計		趟			282

※本計畫UAV噴植之試驗地約0.1公頃，試驗一次(半天)約0.005公頃之面積。

每0.1ha為單位之UAV施工作業費 (水平噴植式)

項次	工料名稱	單位	數量	單價	複價
1	植生資材	趟	20	282	5,640
2	技術工	工	10	3,000	30,000
3	小工	工	10	2,000	20,000
4	車輛租金	天	10	3,000	30,000
5	UAV租金	天	10	2,000	20,000
6	UAV機具折損	式	0.1	150,000	15,000
總計					120,640

※若每趟完成0.005公頃，因此0.1公頃約20趟(10天)，實際趟數需視適宜噴植區位數量多寡而定。

5

崩塌地應用無人飛行載具(UAV) 植生成效之監測與驗收



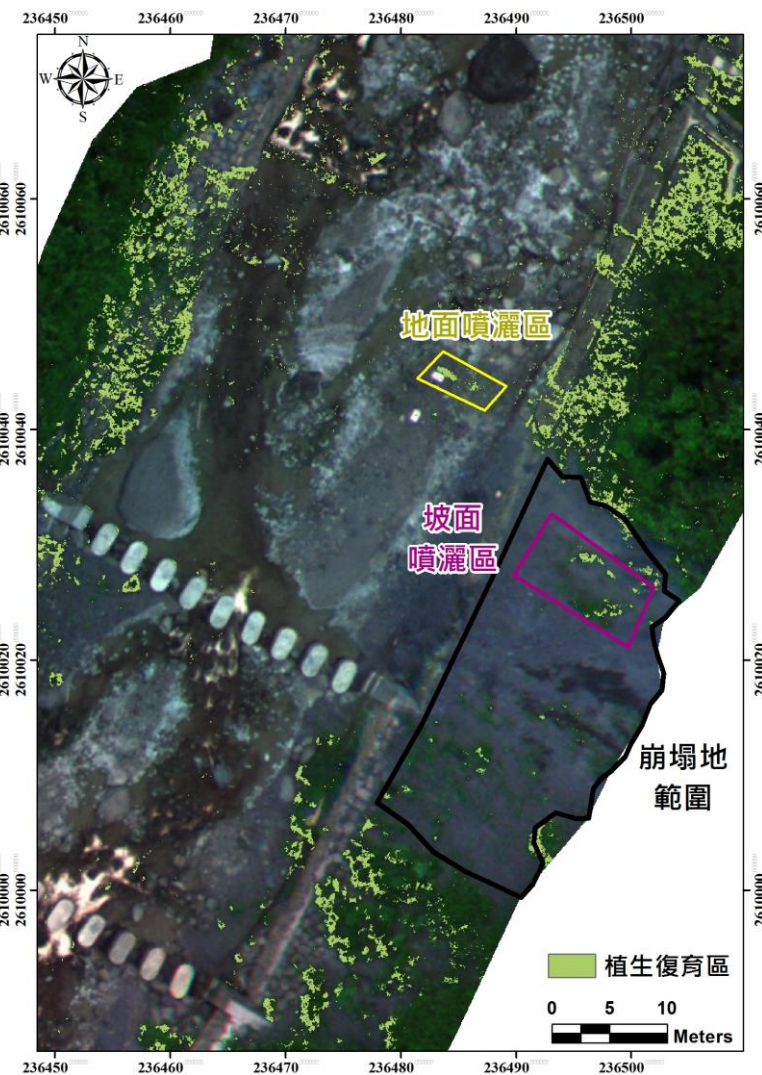
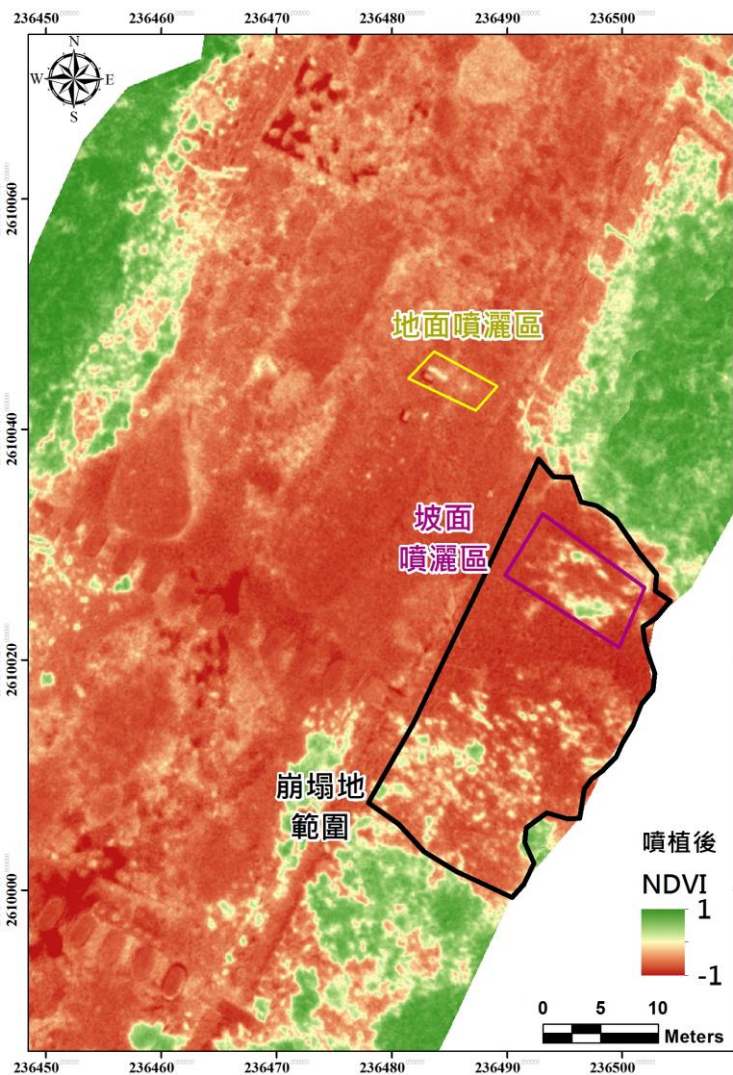
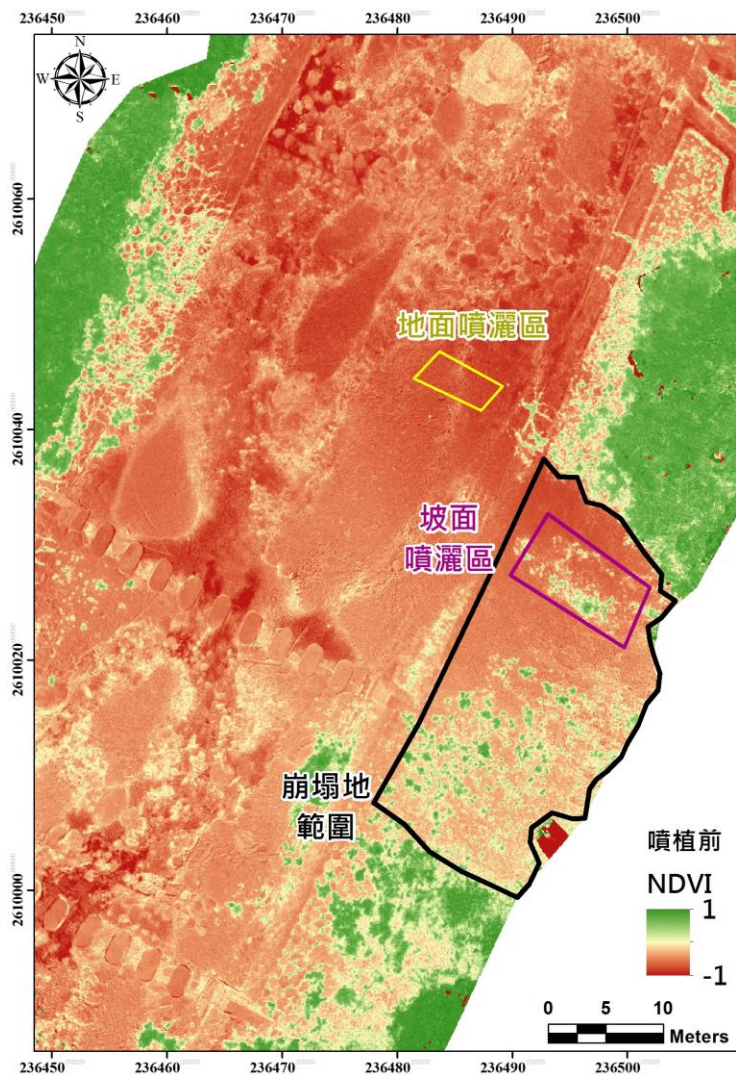
水土保持局



國立中興大學水土保持學系



植生成效監測



經計算兩期NDVI相減可初步發現，在**地面噴灑區**恰有一**直線植生復育區**，而**坡面噴灑區**亦有植生復育，另崩塌地邊緣則易有植物入侵，因此部分植生復育良好。

植生成效監測

依水土保持技術規範第六十一條之規定，植生工程檢查應依施工地區之立地條件、應用植物種類及植生方法，設計覆蓋率。**一般土質坡面**噴植或水土保持植生施工後並經維護管理之**覆蓋率應達百分之九十以上**。**地被植物栽植**施工後並經維護管理之覆蓋率應達**百分之八十**以上。崩塌地、泥岩惡地、砂礫岩或其他立地條件不佳的地區，覆蓋率之設計標準得依實際現地狀況調整之。



陡坡崩塌地屬特殊立地，且UAV噴植工法無法全面噴植，對於**覆蓋率之門檻**應有所調整。

水土保持技術規範第六十一條第三款之規定，植株成活之判定，**應符合原規劃設計之植株尺寸**、正常生長且無病蟲害及枯萎現象。

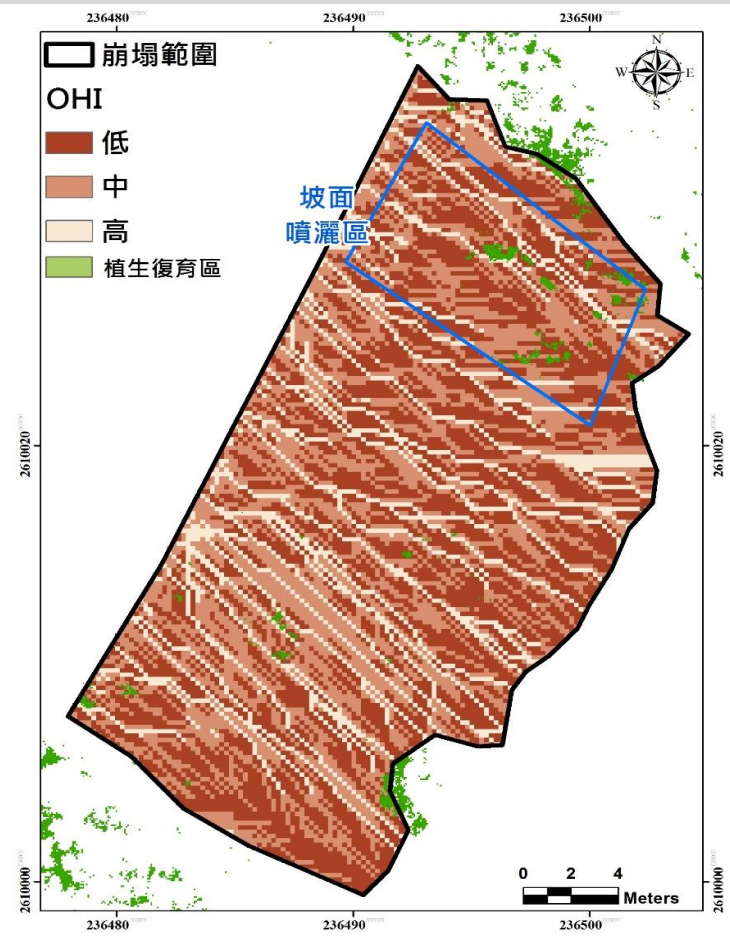
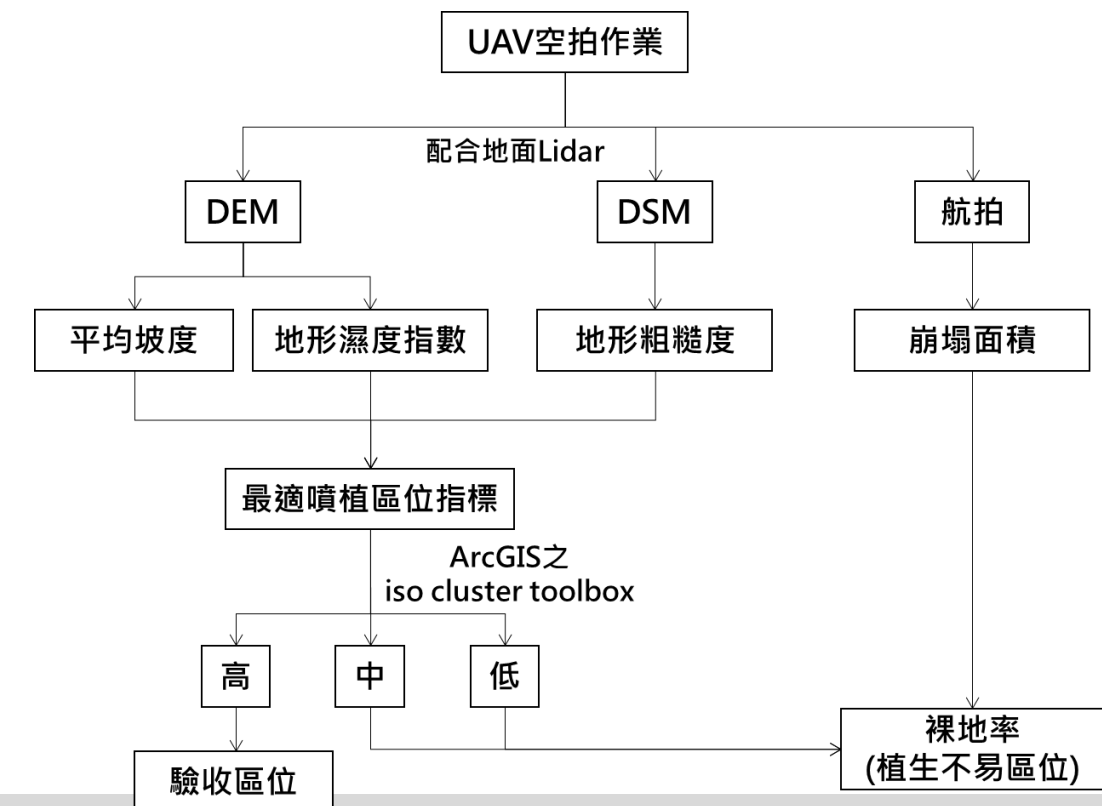


UAV噴植工法所生長之草種，以**改善粗糙度及肥力**等立地環境為主，對於**植株尺寸、生長情形**等條件之規定宜有所改變。



植生成效驗收

裸地率指去除土木構造物、岩石、浮石、極陡坡地區等植物無法生長之區域，播種植物種子沒有發芽生長之面積比率，亦即植生不易生長之區位，其量化方式恰與本計畫提出之最適噴植區位指標(OHI)相反。



OHI值域分布	高	中	低
植生復育區面積(m ²)	0.57	2.36	3.54

UAV噴植乃採手動操作，視覺上易有誤差，較難精準噴植於高OHI值處，此外，原崩場地之樹島易附著種子，因此植生復育佳之區位多鄰近該處。

6

結論與建議



水土保持局



國立中興大學水土保持學系



結論與建議

- 一、本計畫針對噴植時機及區位等前置作業，提出以剩水量及最大蓄水量，計算全臺適宜噴植時機於北部地區全年皆可施作，臺中及花蓮以南則約6~10月；噴植區位則以平均坡度、地形粗糙度及地形濕度指數套疊而得最適噴植區位指標，透過該指標之萃取可提供未來航空噴植工法於噴植區位設定之參考。
- 二、在飛行載具部分採用六旋翼且可酬載15公斤以上之UAV，噴頭設計則採用乾濕分離式，將草籽至於噴頭上方之攪拌裝置，在以水結黏著劑混和成液體動力噴出，藉此可防止植生資材阻塞問題。
- 三、植生資材採用人工噴植常用之比例，種子採用圓形與狹長形草種混和，黏著劑採用C-710，噴植成果顯示，植生資材附著於崩塌地之成效極佳。
- 四、本計畫以阿里不動溪崩塌地為UAV噴植實作樣區，於2019/09/03上午進行一次性噴植，約完成50平方公尺之噴植範圍，由於草籽較小且輕，在包附黏著劑之情形下，易附著於崩塌地之凹槽或岩石上，本計畫亦據此成果訂定UAV水平噴植之流程及成本評估，以0.1公頃為例約需120,640元。
- 五、從本次噴植後之植生生長成效觀察結果，本團隊開發之UAV噴植系統，在配合適當天氣及草種下，可有效完成陡坡崩塌地之UAV噴植工作。



中華民國108年12月3日

108年度創新研究計畫
(工程技術發展類)



簡報結束
敬請指教



水土保持局



國立中興大學水土保持學系