



行政院農業委員會水土保持局

功能化植生粒劑對邊坡植生復育之 效益評估

研究分享報告



國立屏東科技大學 水土保持系

簡士濠 教授

shjien@g4e.npust.edu.tw

08-7740358



國立屏東科技大學

中華民國 110 年 04 月 20 日



內容大綱

●前言

●研究材料與方法

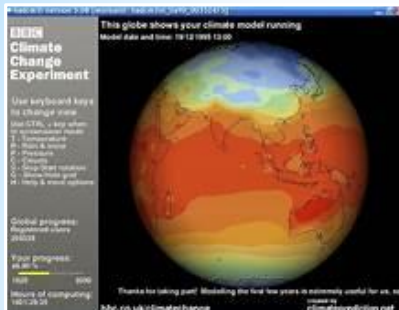
- 複合植生粒劑資材資材介紹
- 植生粒劑形狀因子
- 拋撒最佳環境條件

●結果與討論

- 室內撒播試驗結果
- 野外無人載具撒播結果

●結論與建議

前言



近年由於氣候變遷加劇，**高強度**且**長延時**的降雨趨頻繁，加上國土**山坡地超限利用嚴重**，破壞土壤資源而可能致使崩塌或土石流等重大災害，山坡地保育為臺灣目前當務之急。**(快速復育裸露邊坡)**



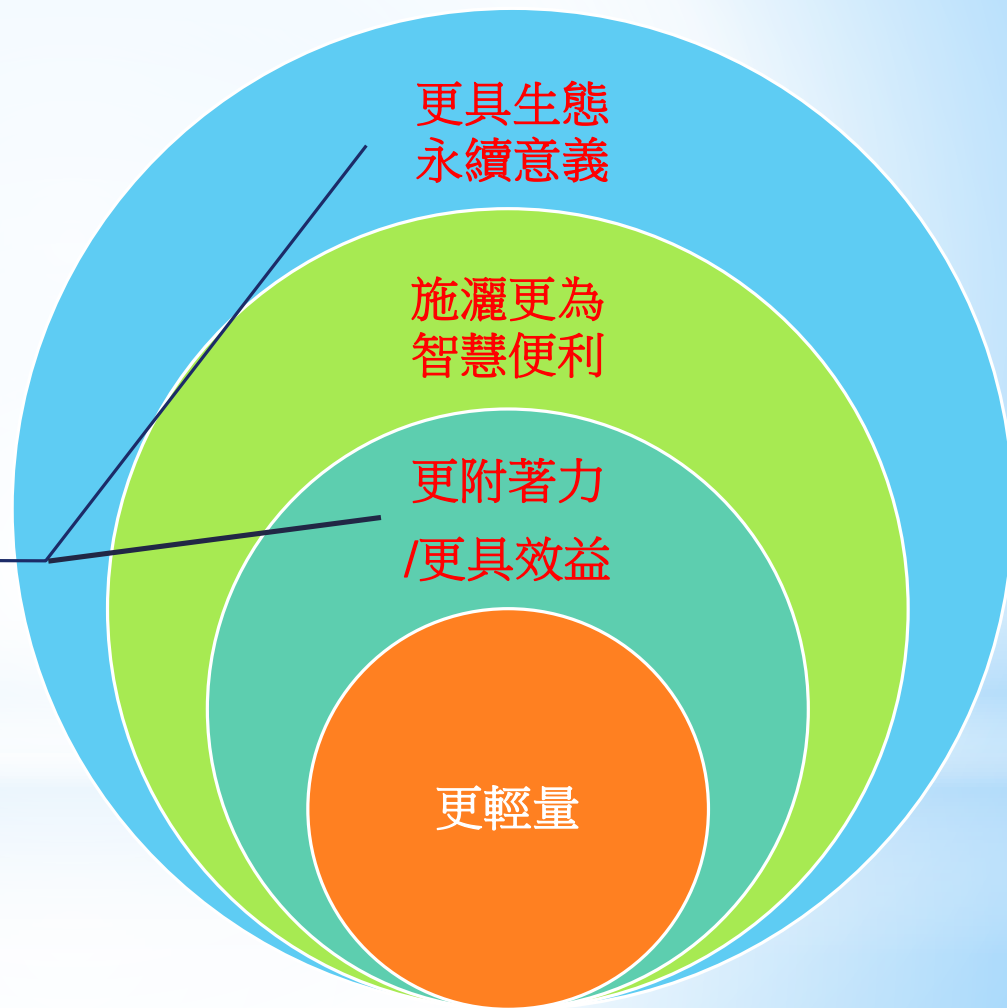
地形變化莫測或交通不利於到達該處造成種種限制，不易進行噴植及種植，因此想藉由**無人載具(UAV)**進行噴灑**植生粒劑**。**(更為智慧節省人力之方式)**



傳統植生工法於須快速而有效的邊坡植生復育情況下**已無法發揮植生復育應有之效應**。傳統方法的自然植生復育通常需時數年至數十年時間，恐無立竿見影的功效，因此，在考量安全性及時效性上，必須以**人工為輔**。**(環境永續)**

研究目的

1. 本計畫嘗試研製一款**功能化植生粒劑** (functionalizing seeding materials)，以符合未來的坡地災害管理或林業管理使用。
2. 粒劑同時搭載**生物炭**、**堆肥**與**草本種子**，經特製形狀化植生粒劑以適合臺灣複雜且崩坍高好發率之地形。

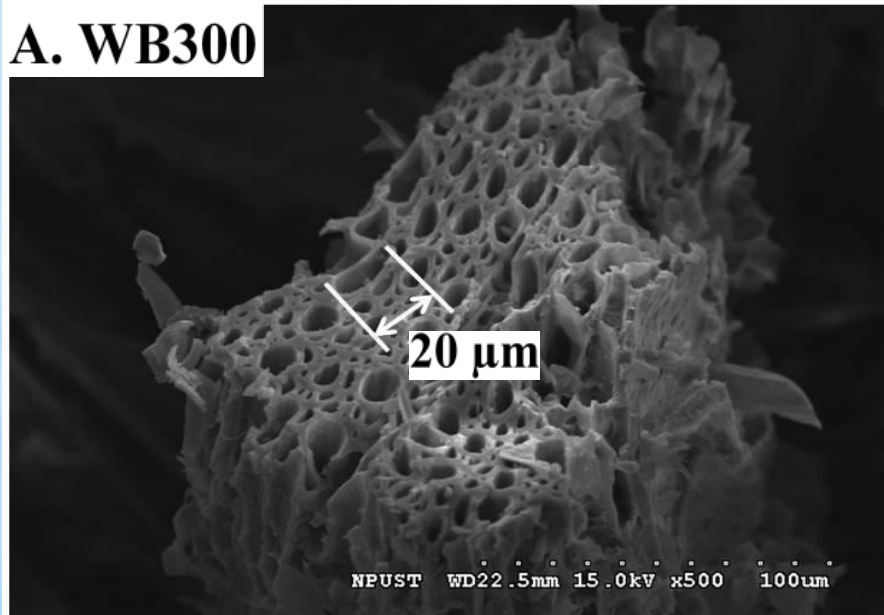


生物炭 Biochar (*slow pyrolization*)

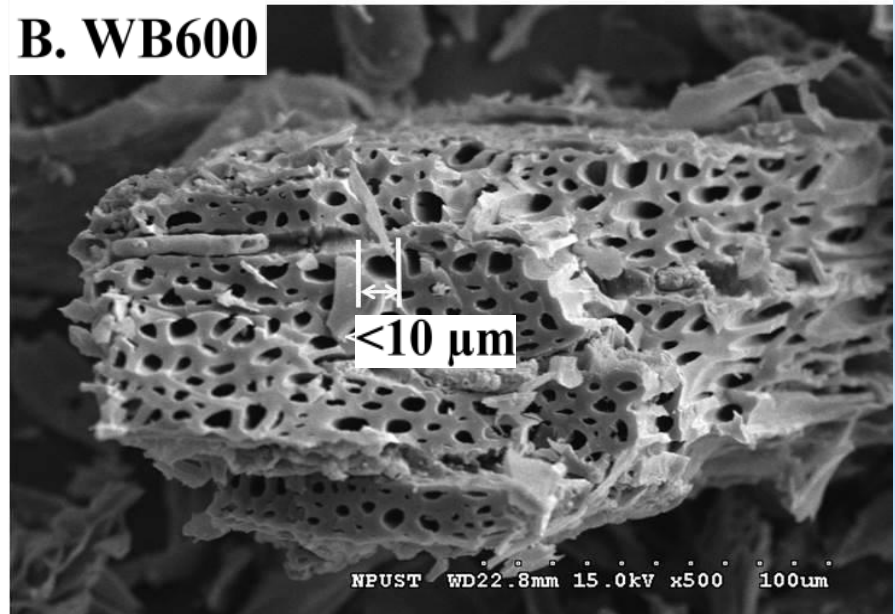
Different pyrolization temperature leads to different properties

- Honduran Mahogany (*Swietenia macrophylla*) Wood chips
- Low temp. (300°C)
- Mid temp. (600°C)

A. WB300

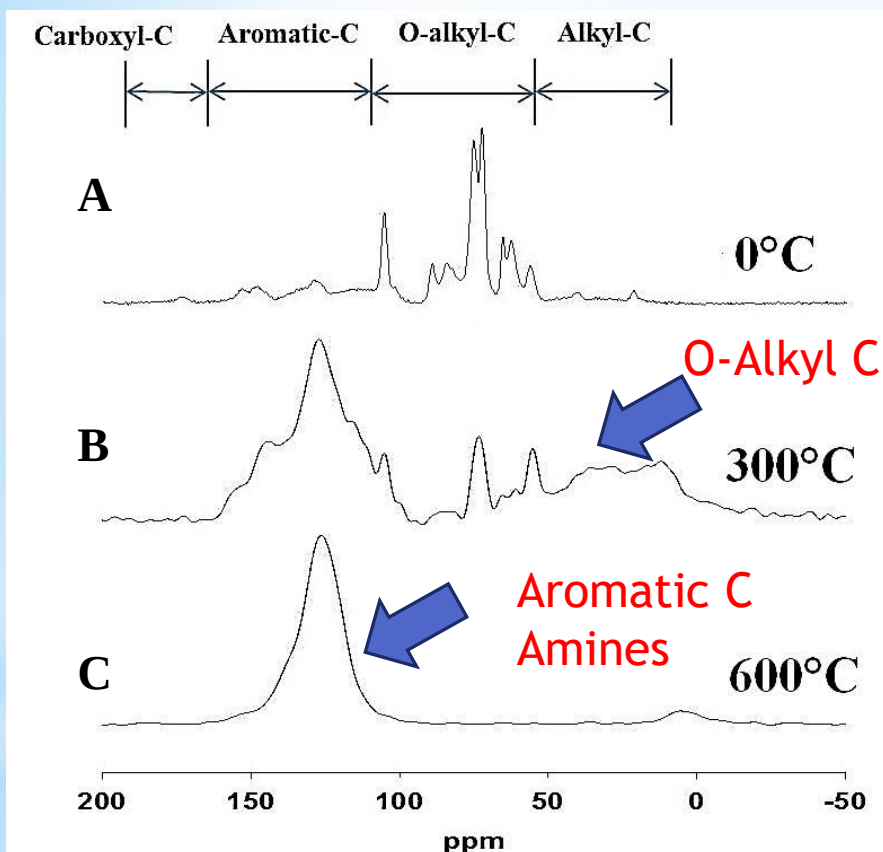


B. WB600



Scanning electron microscope (SEM) images of Honduran mahogany (*swietenia macrophylla*) wood sawdust biochar pyrolyzed at 300°C (A) and 600°C (B).

生物炭的有機官能基



Solid State ^{13}C cross-polarization magic-angle nuclear magnetic resonance spectra for Honduran mahogany (*swietenia macrophylla*) wood sawdust biochar pyrolyzed at 0°C (A) 300°C (B) and 600°C (C).

Table 2. Properties of Honduran mahogany (*swietenia macrophylla*) wood sawdust biochar pyrolyzed at 300°C and 600°C

Properties	Biochar	
	300°C	600°C
pH	7.4	10.4
TC (%)	69.0	79.5
H (%)	4.48	2.85
O (%)	24.7	14.6
N (%)	0.92	0.82
H/C	0.06	0.04
O/C	0.36	0.18
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/kg)	56.7	41.7
$\text{NO}_3^-\text{-N}$ (mg/kg)	548	341
Ava. P (mg/kg)	5.29	3.30
Ex. K (mg/kg)	449	323

OC: Organic Carbon; TC: Total Carbon; H: Hydrogen; O: Oxygen; N: Nitrogen; $\text{NH}_4^+\text{-N}$: Ammonium-Nitrogen; $\text{NO}_3^-\text{-N}$: Nitrate-Nitrogen; Ava. P: Available phosphorous; Ex. K: Exchangeable Potassium



施用後 土壤團粒 的變化

Biochar 2%



Control



Biochar 2%
Compost 1%

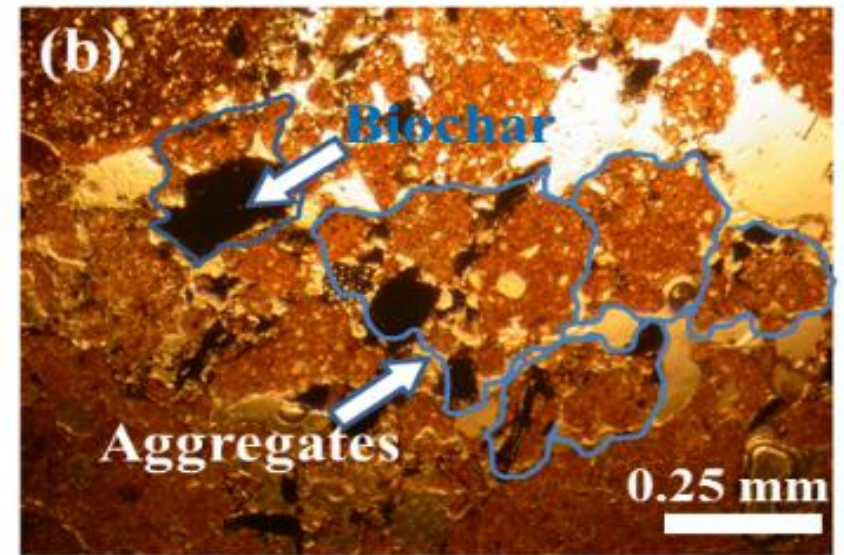
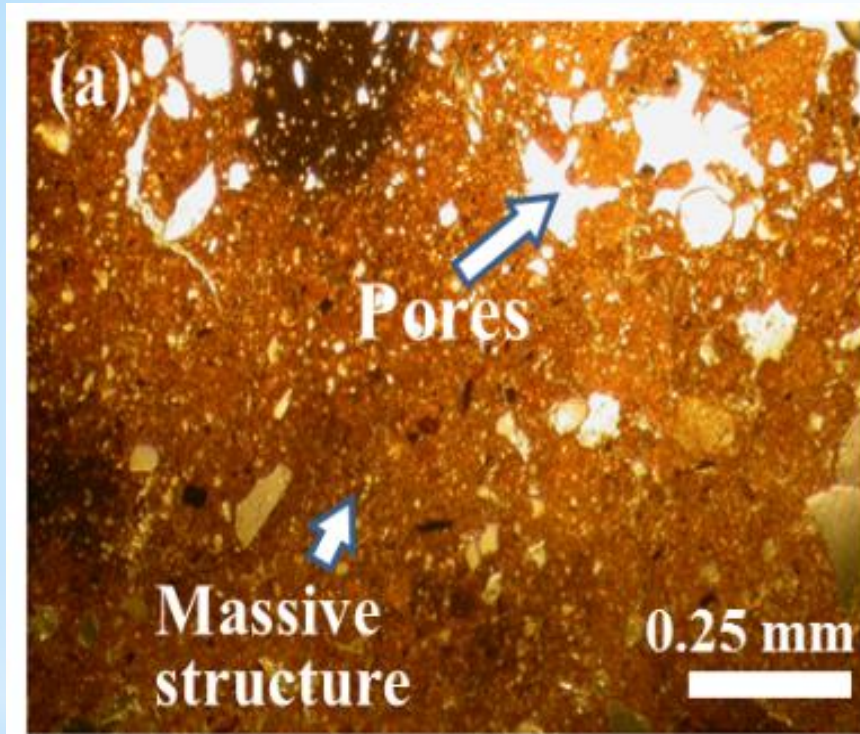


PAM 10 ppm

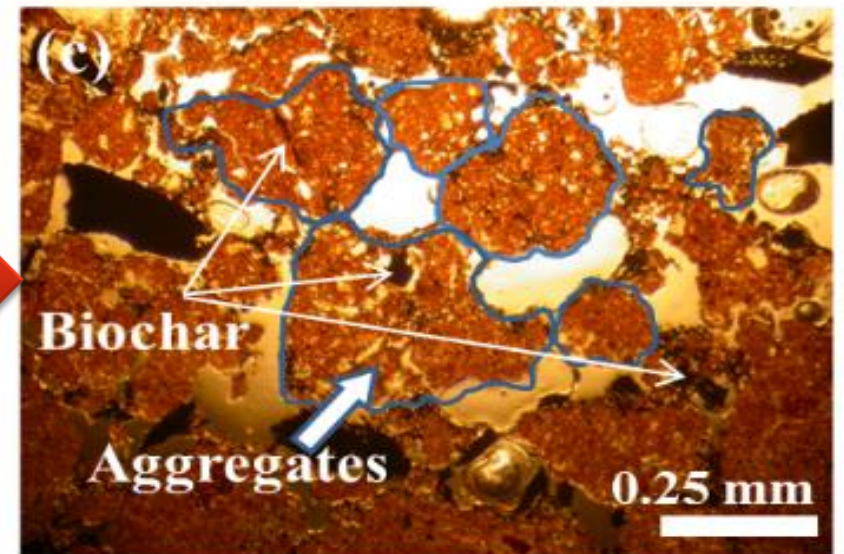


(Jien et al., 2019)

土壤團粒的重新排列



Formation of
“circular aggregate”
(Jien et al., 2019)



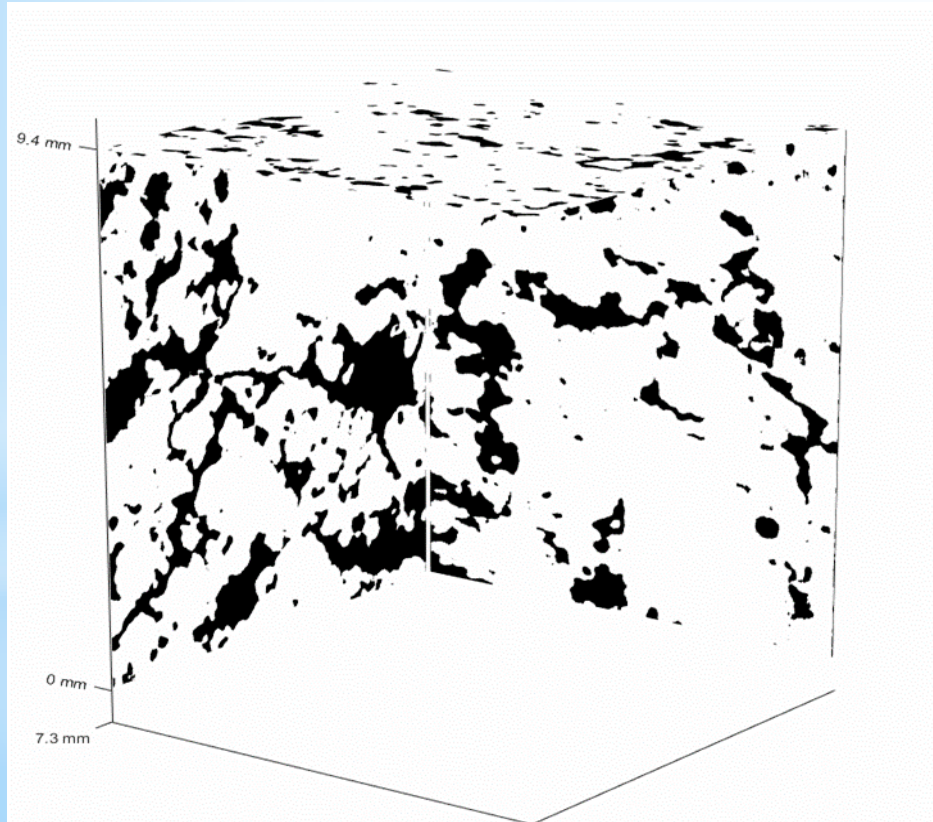


X-ray computed tomography (CT)

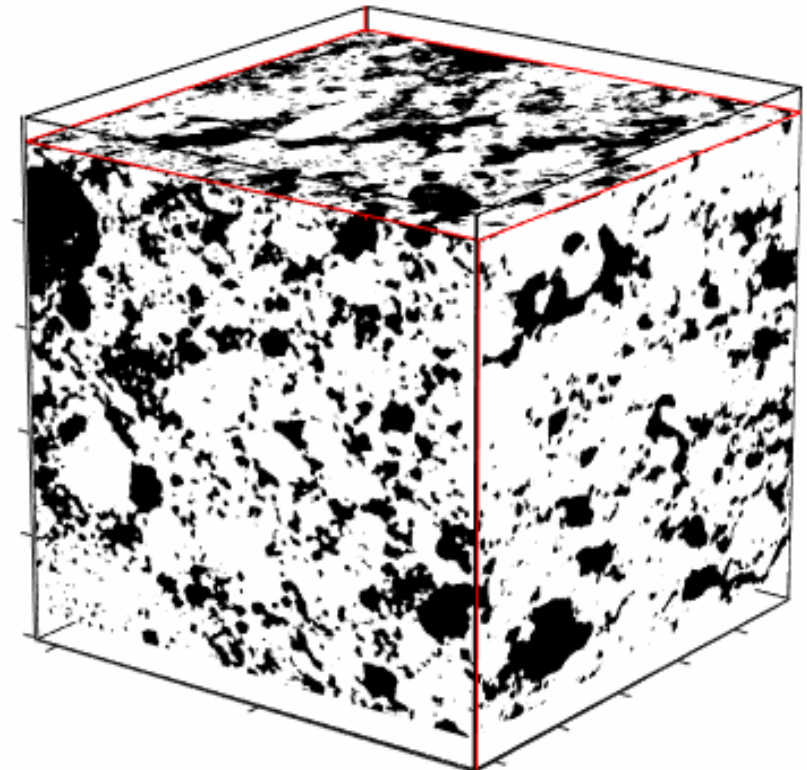
土壤的斷層掃描

(Jien et al., 2020)

Control (without amendments)

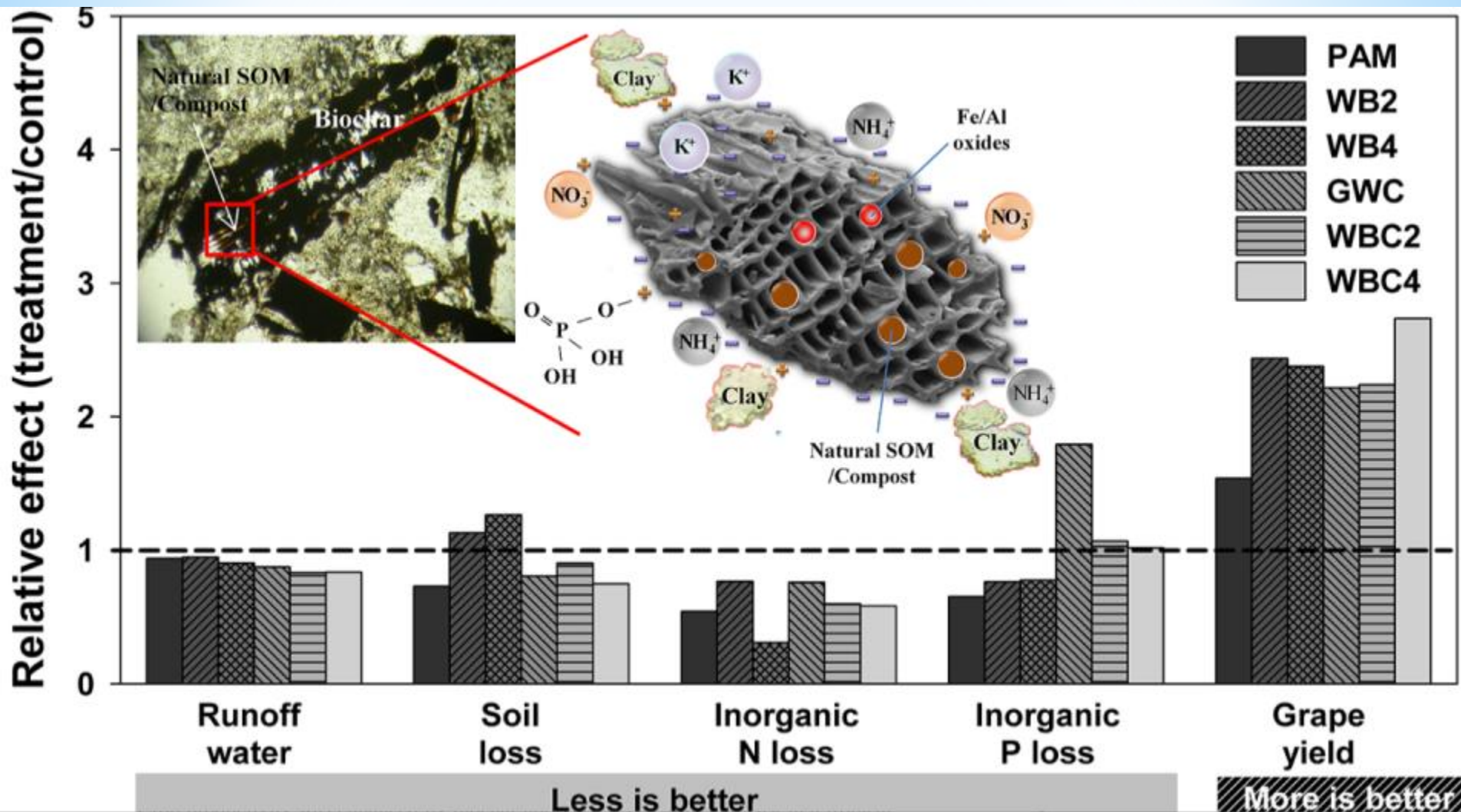


Compost + wood biochar-2%



* 土壤沖蝕與逕流

(Jien et al., 2018)





研究材料與方法

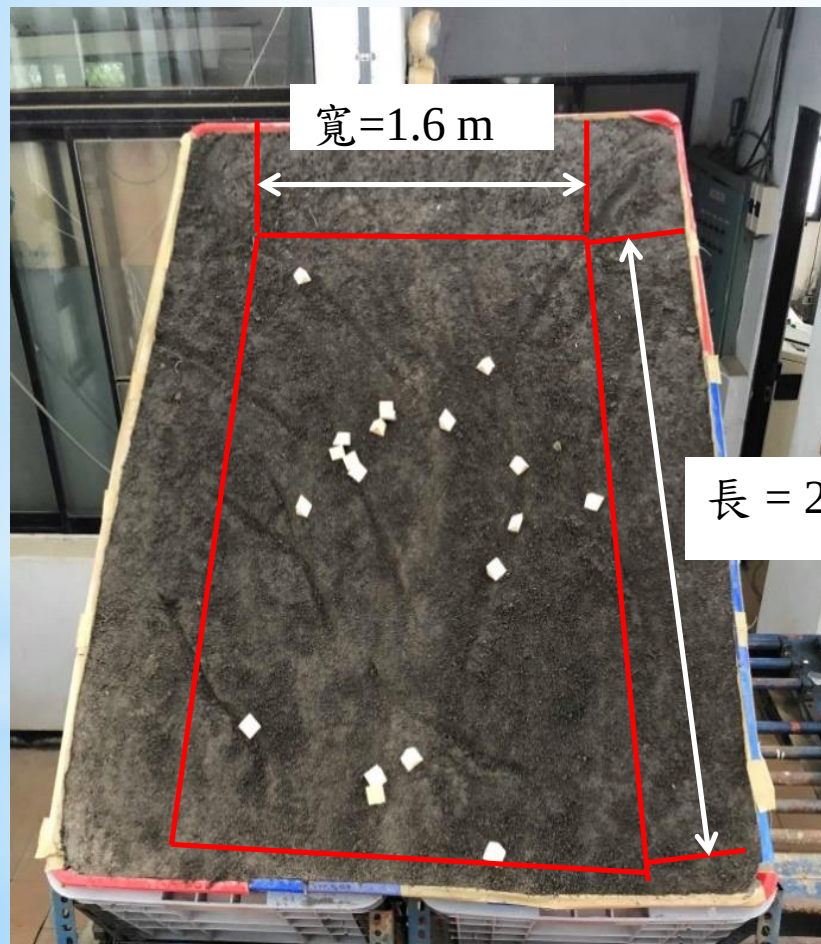
1. 本計畫利用“木粒”加工切割後模擬植生粒劑之形狀，預計利用人工拋撒(室內)與無人載具(室外)將種子撒播於一2.4 m*1.6 m，坡度為35%以上(四級坡)、45%以上(五級坡)及55%以上(六級坡，宜林地)的土壤沖蝕盆。撒播高度為3 m及7 m。坡面土壤種類以砂質土及黏質土(紅壤)之坡面為主。試驗處理分別為：(1) 2種土壤；(2) 4種形狀粒劑；(3) 3種坡度；(4) 2種撒播高度；(5) 2種表面粗糙度。
2. 試驗間評估投擲效益：包括植生粒劑的「撒播範圍」、「粒劑分布面積」及「滾落距離」，以及「殘留於坡面比例」。再經討論後選出一種最合適的粒劑形狀與撒播條件進行無人機撒播試驗。

研究材料與方法

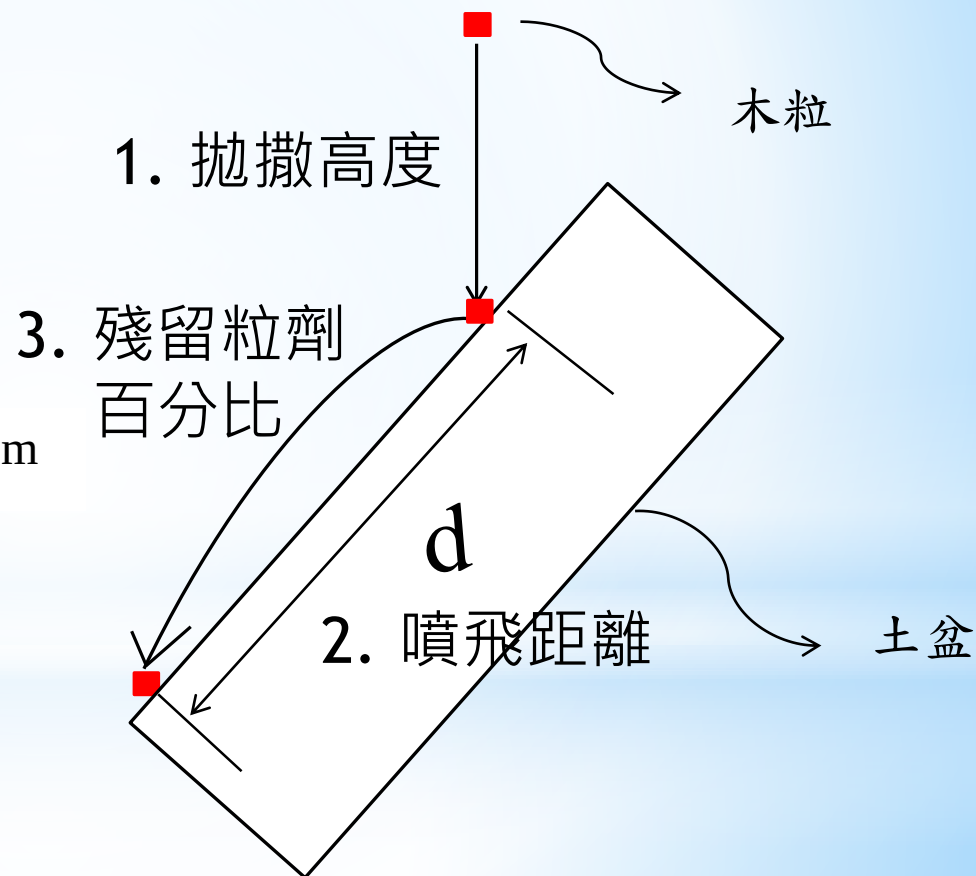
殘留於坡面(綠色範圍)、
滾落至坡下(藍色範圍)及滾落坡旁(其他範圍)示意圖



研究材料與方法



模擬粒劑噴飛距離示意圖



研究材料與方法

木粒切割後模擬植生粒劑之形狀

圓柱體	三角柱
	
長方體	半圓柱
	



研究材料與方法

供試邊坡土壤性質分析

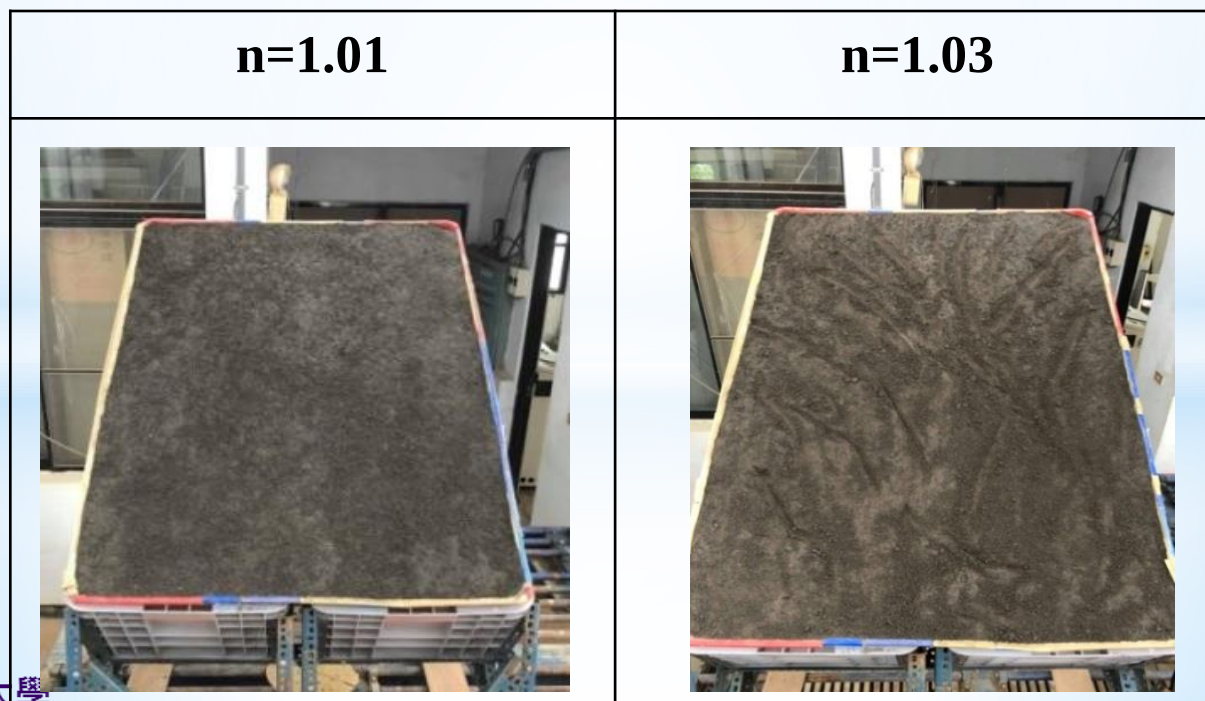
土壤性質	砂質土	黏質土
pH	6.7 ± 0.1	4.5 ± 0.4
有機碳 (%)	1.0 ± 1.3	0.75 ± 0.9
總氮 (%)	0.06 ± 0.02	0.06 ± 0.01
$\text{NH}_4^+\text{-N}(\text{mg/kg})$	4.4 ± 2.2	7.1 ± 3.1
$\text{NO}_3^-\text{-N}(\text{mg/kg})$	3.7 ± 1.3	27 ± 9.8
Av. P (mg/kg)	48 ± 0.9	33 ± 0.4
土壤質地	壤質砂土	黏土
砂粒含量(%)	80	33
粉粒含量(%)	14	27
黏粒含量(%)	6.0	40

研究材料與方法

土壤粗糙度(n)之計算：鍊條法 (Ali Salch, 1993)

1. 在目標土地內隨機固定兩點，兩點之直線距離為L；
2. 在兩點所在之直線上用無彈性軟繩緊貼土壤粗糙面，後量測其軟繩之長度為L'；
3. 據步驟(1)及(2)可得土壤粗糙度 $n = L'/L$ ；

本試驗將的砂土以平坦坡面 ($n=1.01$)及利用移植鋤畫出些微蝕溝之坡面 ($n=1.03$)，試驗中以該兩種粗糙度進行討論。





行政院農業委員會 適用UAV播種工法常見機型之功能屬性比較 (林信輝，2019)

機型(旋翼數量)		單旋翼 (成大研發)	單旋翼 (易圖公司研發)	六旋翼 (植播機 10K A 型)	六旋翼 (植噴機 16K)
機 體 尺 寸	旋翼大小	90cm	111cm	17 吋槳	28 吋槳
	機身總寬	65cm	52cm	106cm	170cm
	機身總長	180cm	260cm(含槳)	106cm	170cm
	機身總高	78cm	73cm	80cm	60cm
主要機架材質		碳纖	合金	碳纖	碳纖
空重		15kg	15kg	3.4kg	20kg
最大起飛重量		25kg	28kg	10kg	36kg
燃料/電池重量		1kg	1.6kg	1.4kg	3.1kg
動 力 系 統	型式	油機	油機	電機	電機
	引擎/馬達	100cc 四行程引擎	80cc 二行程引擎	LA5208 KV300	M10 KV120
	能源型式	95 無鉛汽油	95 無鉛預混機油	Li-Po	Li-Po
	標準油箱/電池容量	1400cc	2200cc	10000mah	22000mah x 2
最大起飛重量 滯空時間		30 分鐘	40 分鐘	10 分鐘	10 分鐘
不含植播設備 滯空時間		50 分鐘	60 分鐘	20 分鐘	30 分鐘
最長作業距離		2km	30km		3km
最大抗風等級		9 級(輕度颱風)	8 級以上	5 級	6 級
飛控系統		自行開發	自行開發	DJI V2	A3
圖傳 系統	型號	5.8GHZ	自行開發	5.8GHZ	2.4G/5.8G
	距離	5km	30km	5km	5km
植 播 裝 置	裝置重量	2kg	5-6kg	1.1 kg	5kg
	植播型式	噴出/投放	噴出/投放	投放	噴出
	驅動方式	離心力與開艙門	開艙門/客製化	開艙門	幫浦水壓
	適用材料	固態/液態	固態/液態/粉狀	固態/液態	液態
	植播材料負載 最大重量	8kg	10-12kg	4.5kg	5kg





研究材料與方法

撒播植生粒劑無人載具

規格表

機架

機軸距	1500 mm
單臂長度	619 mm
外型尺寸	MG-1P: 1460×1460×578mm(機臂展開,不含螺旋槳) 780×780×578mm(機臂摺疊)

飛行參數

總重量(不含電池)	9.7 kg
標準起飛重量	23.8 kg
最大有效起飛重量	24.8 kg (海平面附近)
最大推進力重量比	1.71 @ 23.8 kg 起飛重量
最大功耗	6400 W
懸停功耗	3800 W @ 23.8kg 起飛重量
*懸停時間為海平面附近,風速小於3m/s環境下測得,僅供參考	
最大作業飛行速度	7 m/s
最大飛行速度	12 m/s (P & F 模式, with GPS), 15 m/s (A模式)
最大起飛海拔高度	2000 m
推薦工作環境溫度	0 至 40°C

噴灑系統

液體作業箱	
容積	10 L
標準作業載荷	10 kg
電池安裝位置尺寸	151×195×70 mm
噴頭	
型號	XR11001VS
數量	4

高精度雷達模組

型號	RD2412P
高度測量範圍	1-30 m
定高範圍	1.5 - 3.5 m
測定精度	10 cm

避障系統

可感知範圍: 1.5 - 30 m (會因目標物體的材料、位置、形狀等不同而有所差異) 使用條件: 飛行器飛行相對高度高於1.5 m 且速度小於 7 m/s 安全距離: 3 m 避障方向: 根據飛行方向實現前後避障

動力電池

型號	MG-12000P
重量	4.0 kg
放電率	20 °C
容量	12,000 mAh
電壓	44.4 V

遙控器

型號	GL300N
工作頻率	2.400 - 2.483 GHz
信號有效距離 (無干擾、無阻擋)	5 km

顯示裝置

5.5英寸螢幕,解析度1920x1080, 亮度1000 cd/m ² ,Android系統, 系統記憶體4G RAM + 16G ROM
--

工作功耗

工作環境溫度	-10 - 40°C
充電溫度	5 - 40°C

遙控器智能電池

型號	WB37-4920 mAh-7.6 V
電池類型	鋰離子電池
容量	4920 mAh
電壓	7.6 V
能量	37.39 Wh
充電環境溫度	5 - 40°C



研究材料與方法

無人載具撒播情況 (1)





行



載重：10公斤；
距離：3公尺；
倉口（開口）50%；
轉速900 rpm/min

無人載具撒播情況（2）



工作項目與內容

3. 植生方法室內實驗

● 植生粒劑研發製作

- ✓ **蔗渣堆肥**：台糖出產之**田寶11號**，肥料品目5-10一般堆肥
- ✓ **木質生物炭**：利用美國Airburners Inc. Fire Box S-119氣簾式燃燒器以 $>600^{\circ}\text{C}$ 燒製**金門風倒木**(木麻黃、構樹及相思樹等)，經**高溫低氧無煙熱解**而成

性質	蔗渣堆肥	木質生物炭
pH	5.9 ± 0.1	8.9 ± 0.1
TC (%)	84 ± 2.0	41 ± 0.3
C/N	20	-
TN (g kg^{-1})	46.6 ± 1.78	3.67 ± 0.49
IN (mg kg^{-1})	453 ± 3.0	187 ± 38
Ex. Ca (mg kg^{-1})	242 ± 0.1	940 ± 40
Ex. Mg (mg kg^{-1})	75.0 ± 1.1	57 ± 2.0
Ex. K (mg kg^{-1})	15720 ± 110	188 ± 3.0



研究材料與方法

植生粒劑混合草種之選擇

本試驗預計採用三種臺灣常見之水土保持草種，分別為(1)百慕達草、(2)百喜草，及(3)黑麥草。

百慕達草	百喜草	黑麥草
		

研究材料與方法

功能化植生粒劑

植生粒劑之資材比例為 生物炭：肥料＝1:3，並在攪拌時混分別混入百慕達草、百喜草及黑麥草三種種子，混入粒數約為每種種子於每公斤粒劑30,000粒，倒入造粒機後進行造粒(圓柱體)後，再進行加工使粒劑變為半圓柱體，每顆粒劑約為1公克，推估每粒粒劑中約含有種子90顆種子，每種種子約30顆



粒劑平均斷面直徑為0.8 cm

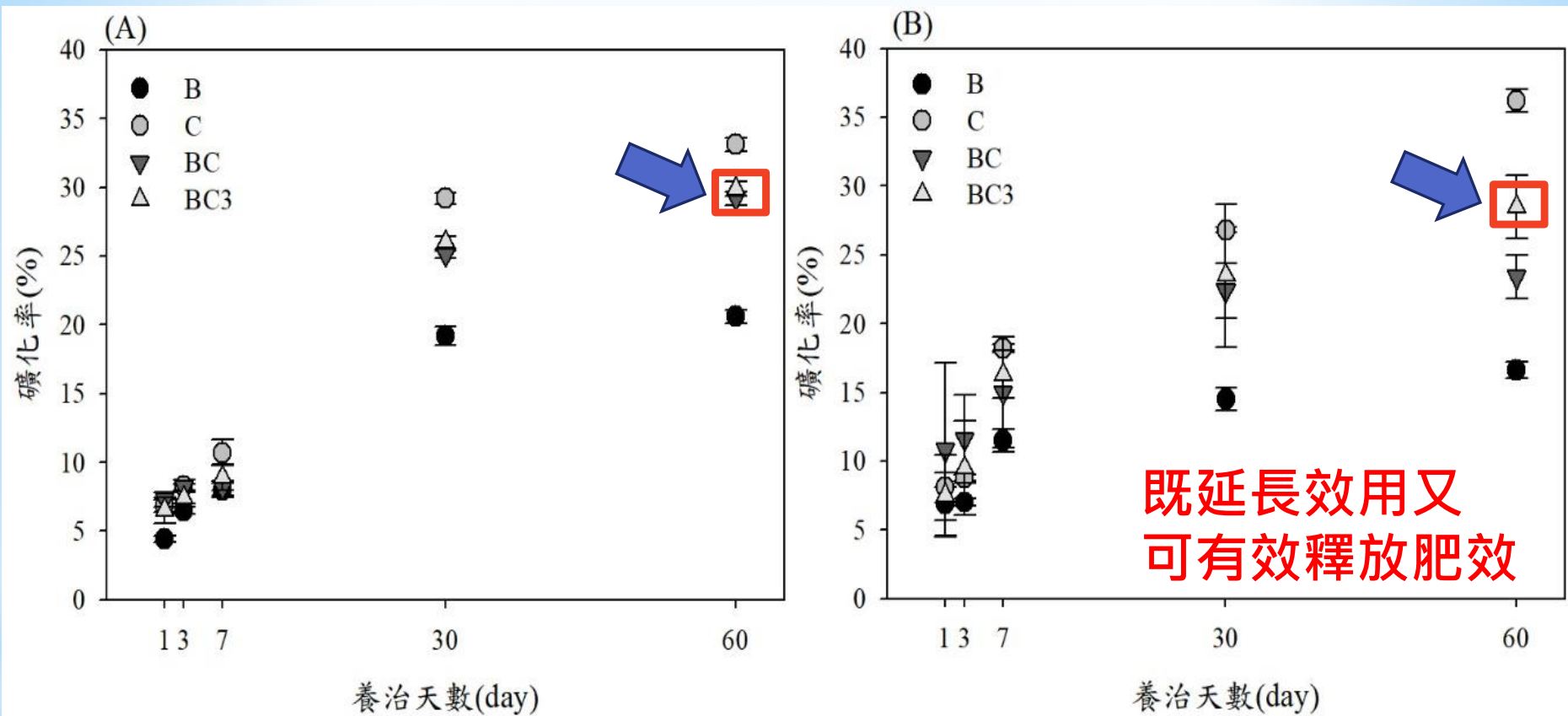


0

0.8 cm

資材	每10顆粒狀肥	每顆水分含量
	(g)	(%)
生物炭粒	13.4 ± 1.2	9.2 ± 0.3
堆肥粒	9.7 ± 0.4	13 ± 1.5
3:1 植生粒	12.4 ± 0.2	10 ± 0.9

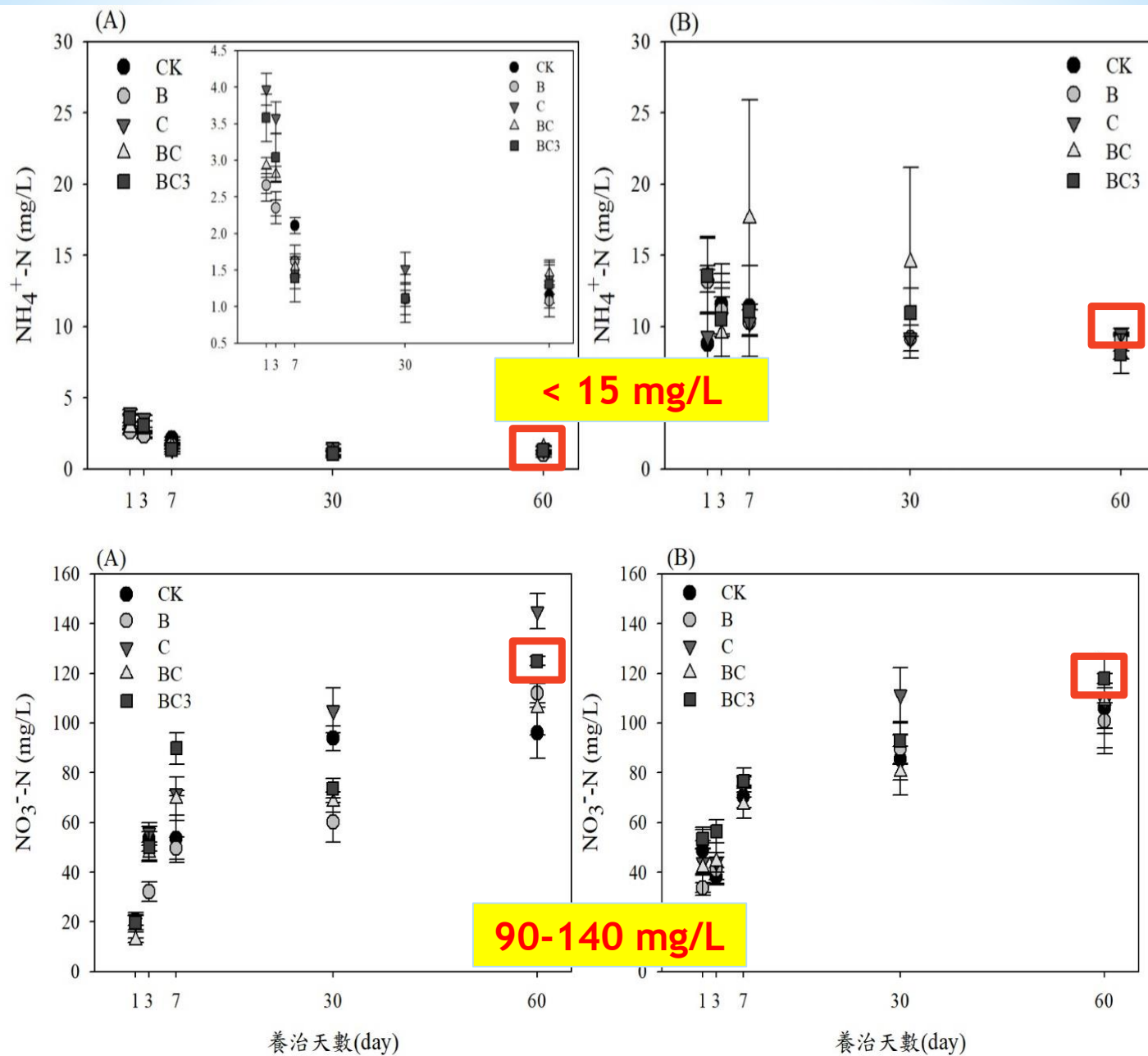
複合植生粒劑 於 土壤中之礦化率



試驗期間各資材礦化率之動態變化：(A)砂質土；(B)粘質土。



土壤溶液中 氨氮與硝酸態氮 之變化



土壤中有效磷之變化

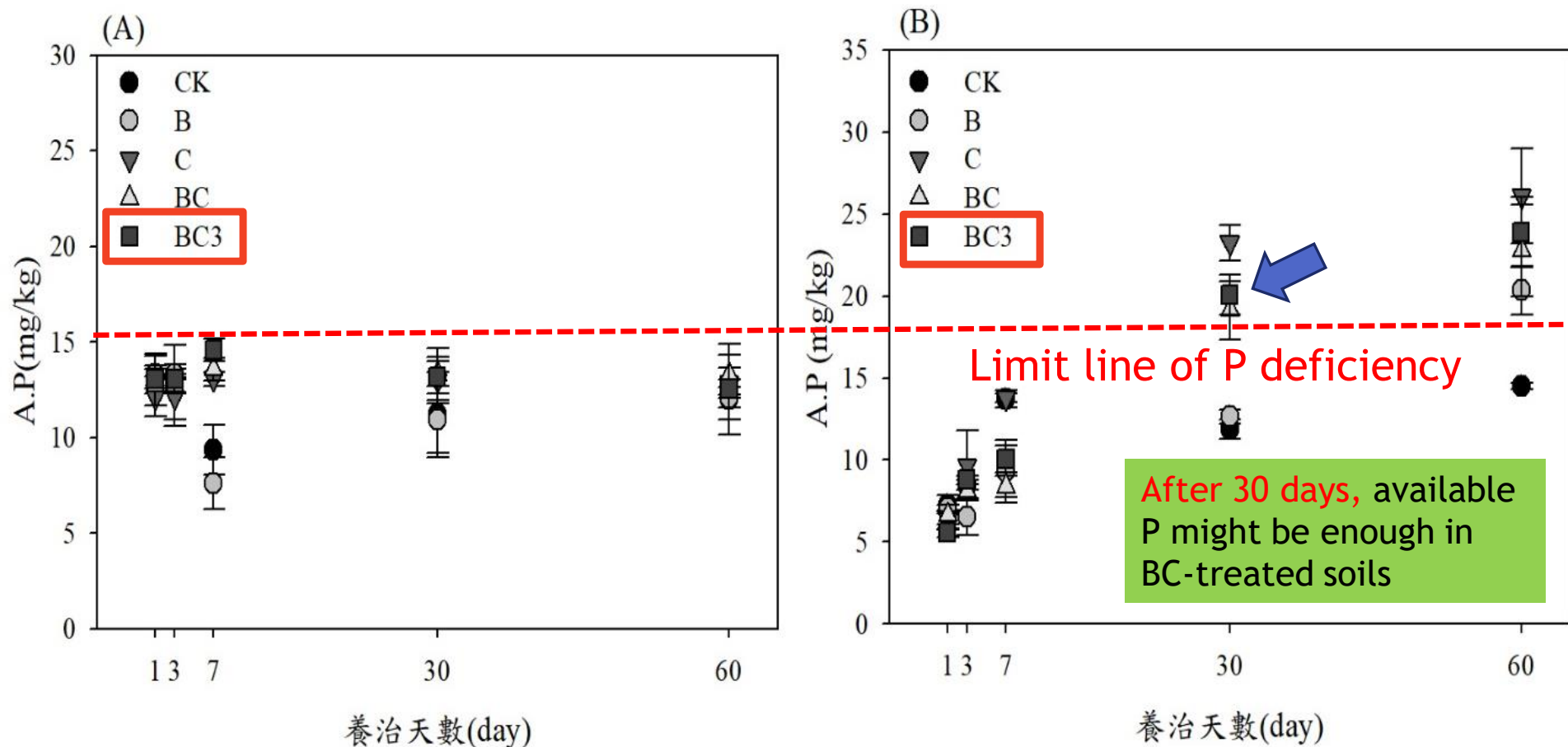


圖4 試驗期間土壤有效磷之動態變化：(A)砂質土；(B)粘質土

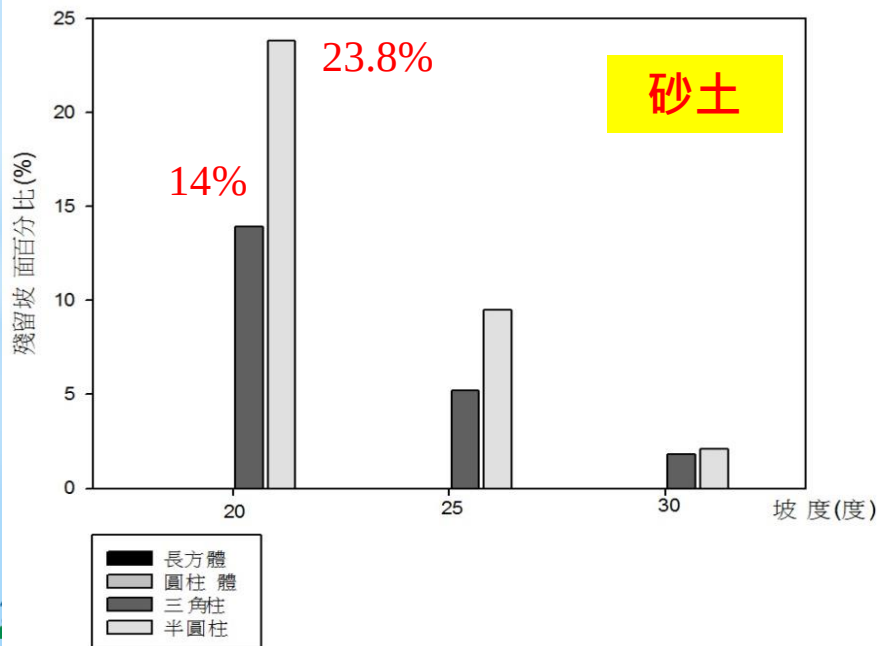


結果與討論-形狀因子影響

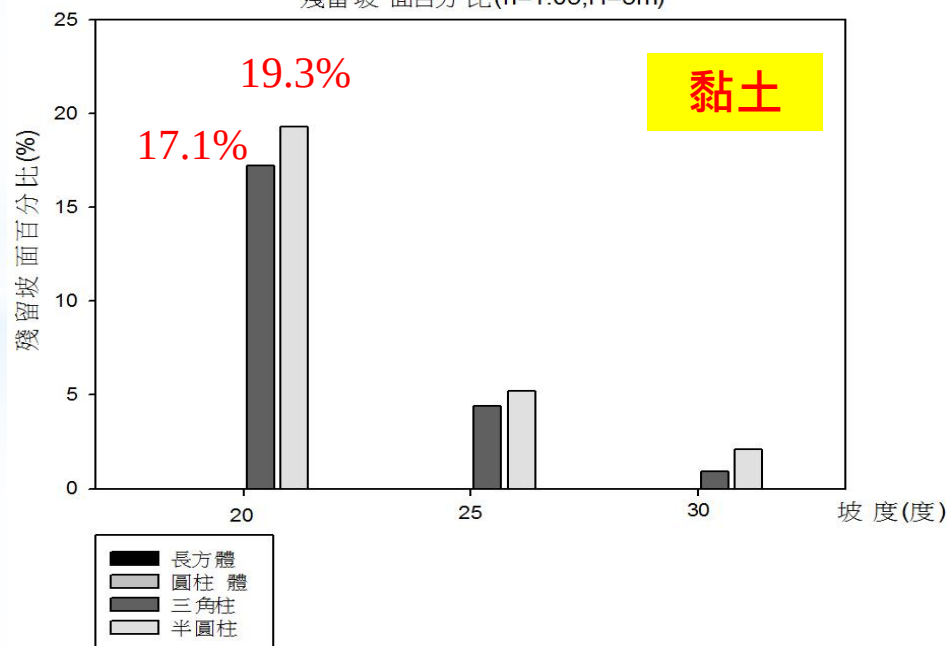
經試驗過後得知拋撒的四種形狀中，能夠集中在坡面及坡下的形狀依百分比多寡依序為半圓柱 > 三角柱 > 圓柱體 > 長方體

- 砂質土時之殘留率約為 2%-16%。將粗糙度提高後則殘留率可達24%，其中以半圓柱在高度為3公尺拋撒至20° 坡 (n=1.03)時最好，坡面殘留率為23.8%；相同條件下，三角柱殘留率為14%。
- 黏質土(紅壤)時，殘留於坡面百分比約為 1.8%-14%，而粗糙度提高後可至20%，其中半圓柱在高度為3公尺時拋撒至20° 坡 (n=1.03)時最好，坡面殘留率為19.3%，在相同情況下三角柱為17.1%。

殘留坡 面百分比 (n=1.03, H=3m)

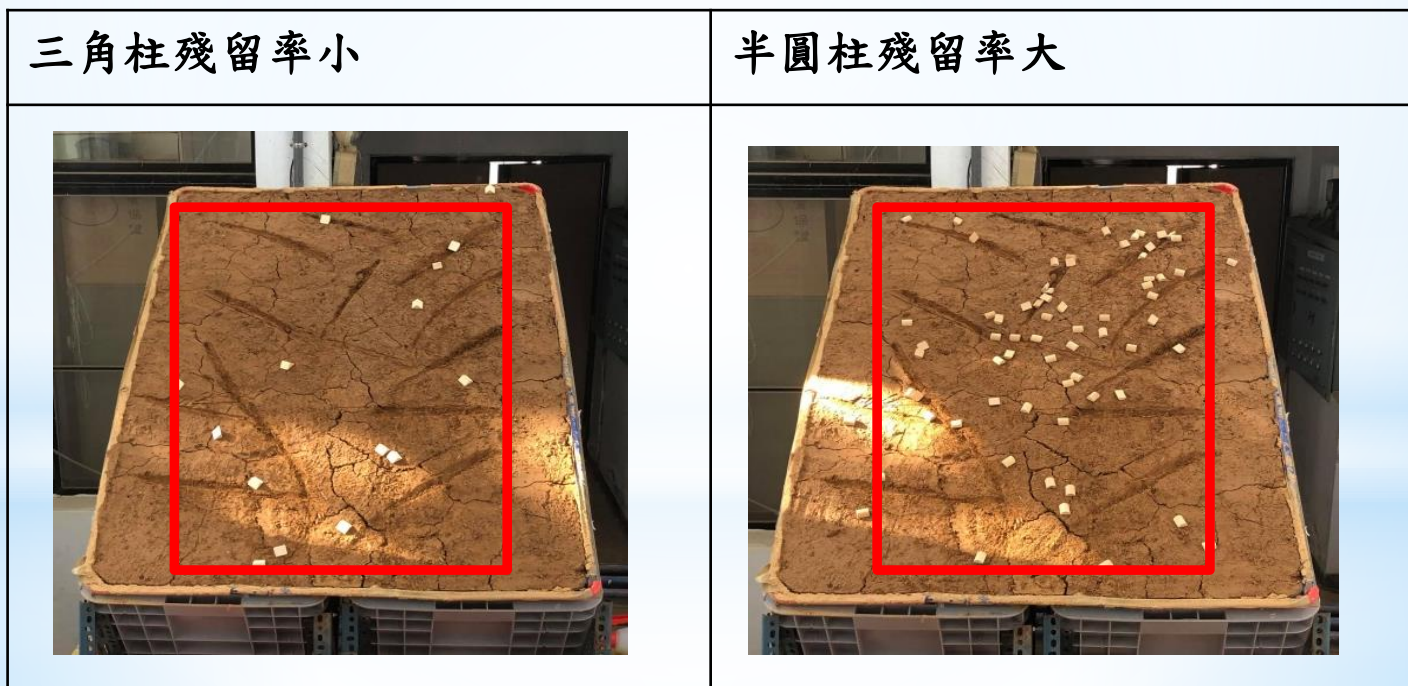


殘留坡 面百分比 (n=1.03, H=3m)



結果與討論—不同形狀植生粒劑落於坡面後之散佈範圍

本研究結果顯示，植生粒劑撒播過程散佈面積可能無顯著差異，但殘留於坡面百分比卻具顯著差異。如坡度25度、拋撒高度為7公尺及 $n=1.01$ 時，三角柱的面積為 $10,200 \text{ cm}^2$ ，但殘留坡面百分比卻僅有2.62%；而半圓柱散落面積與三角柱體無統計上差異，但殘留坡面百分比卻為較高之9.12%。





結果與討論—不同形狀植生粒劑落於坡面後之散佈範圍

相同條件下，「三角柱」及「半圓柱」兩種形狀粒劑撒播的坡面殘留率相近，若將殘留率 $\leq 5\%$ 的情況去除，本試驗可由下列八種情況來評估該兩種形狀植生粒劑灑於坡面之分布面積，以評估該兩種粒劑形狀之優劣：

1. 坡面為砂質土、坡度 20° 、拋灑高度3公尺、 $n=1.01$ 。
2. 坡面為砂質土、坡度 20° 、拋灑高度7公尺、 $n=1.01$ 。
3. 坡面為砂質土、坡度 25° 、拋灑高度3公尺、 $n=1.03$ 。
4. 坡面為砂質土、坡度 30° 、拋灑高度7公尺、 $n=1.03$ 。
5. 坡面為黏質土、坡度 20° 、拋灑高度3公尺、 $n=1.01$ 。
6. 坡面為黏質土、坡度 20° 、拋灑高度7公尺、 $n=1.01$ 。
7. 坡面為黏質土、坡度 25° 、拋灑高度7公尺、 $n=1.01$ 。
8. 坡面為黏質土、坡度 30° 、拋灑高度3公尺、 $n=1.01$ 。

半圓柱比三角柱粒劑的撒播面積高出 $1,500 \text{ cm}^2$

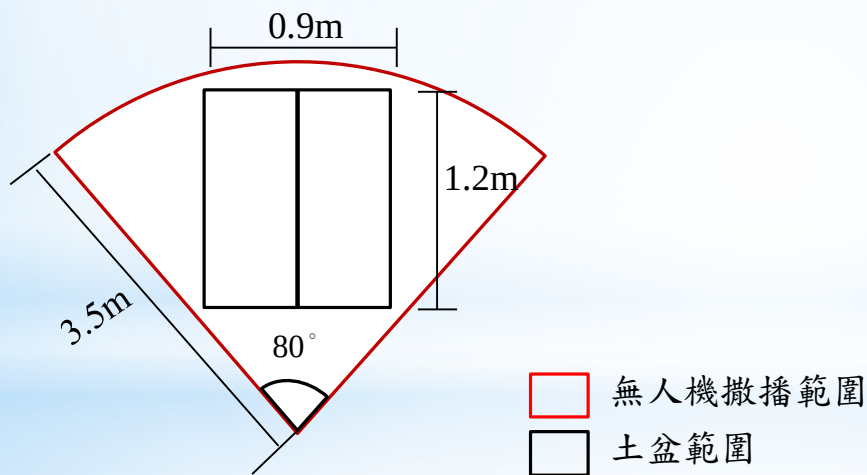
半圓柱比三角柱粒劑的撒播面積高出 800 cm^2

半圓柱比三角柱粒劑的撒播面積高出 900 cm^2

試驗結果顯示未來邊坡植生撒播時，「半圓柱體」粒劑可能使得植生範圍將較為廣泛。

結果與討論_室外無人載具噴灑試驗

本試驗利用無人機拋灑機器之開口(80°)及拋灑距離(3.5m)，估算其拋灑總面積(5.34m^2)及各坡面(2m^2)之比例，再利用每粒粒劑之重量推算留於坡面的重量(紅壤約1.25 kg、砂土約1.0 kg)，估算其粒劑留於「目標坡面面積內 (4m^2)」的百分比分別為，**紅壤：66.8%**及**砂土：53.5%**。



無人機撒播範圍示意圖

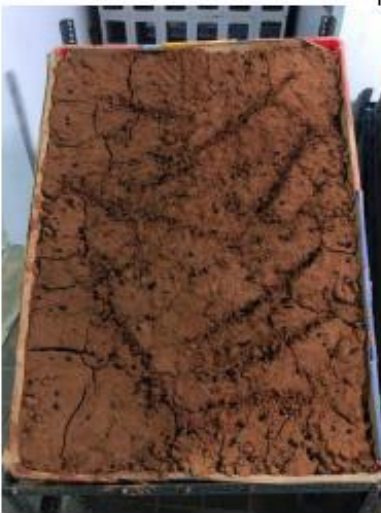




結果與討論_覆蓋率評估

本試驗於拋灑後第1、3、7、14、28、35、42、49及56天利用相機固定距離拍攝照片，並利用影像辨識軟體Image J (1.53e Ver., National Institutes of Health, NIH, USA)判斷坡面植生覆蓋率。植生期間，團隊於每天8:30 AM及4:30 PM澆灌水分，使坡面土壤保持濕潤。澆灌水量每次約1500 mL，並將土盆分為上中下三個部分，在早上澆水後10分鐘後及下午澆水前量測土壤水分含量，每10天記錄一次。



天數	紅壤	砂土
1		
3		

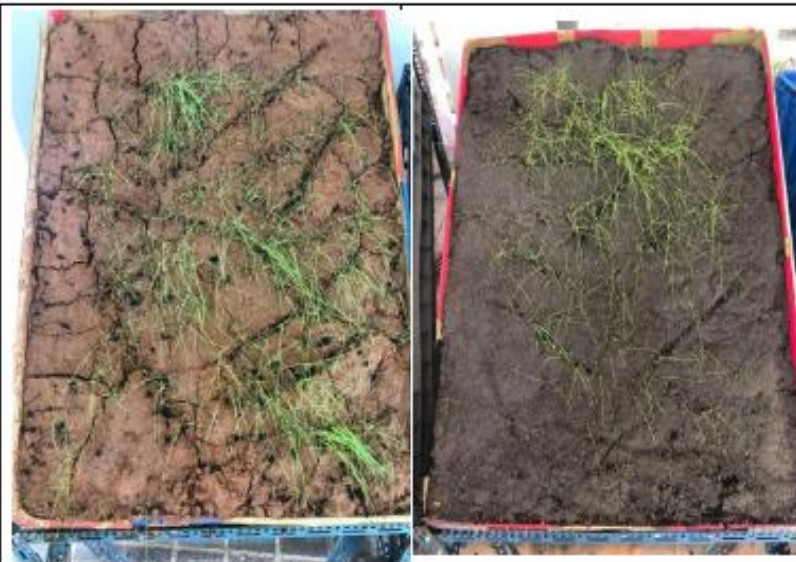
7		
14		



21



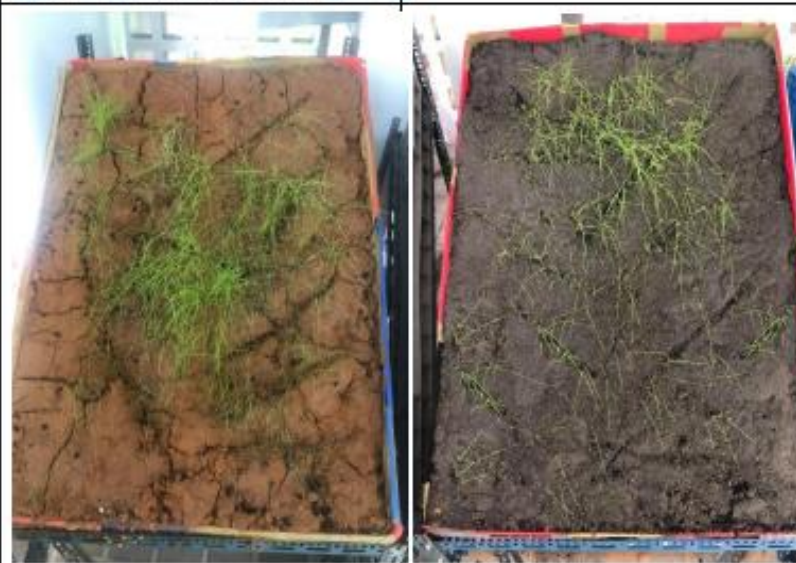
35



28

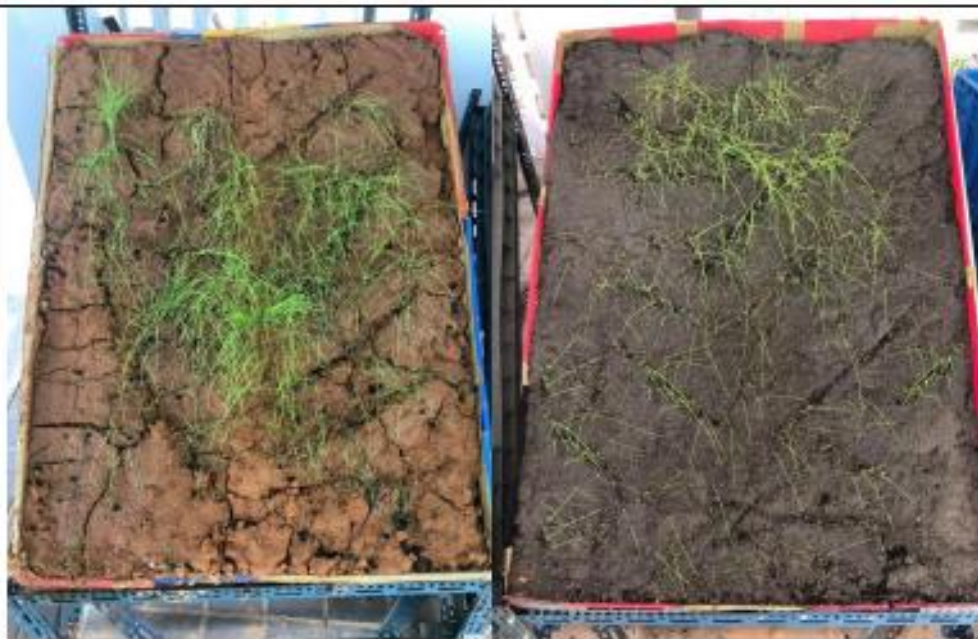


42

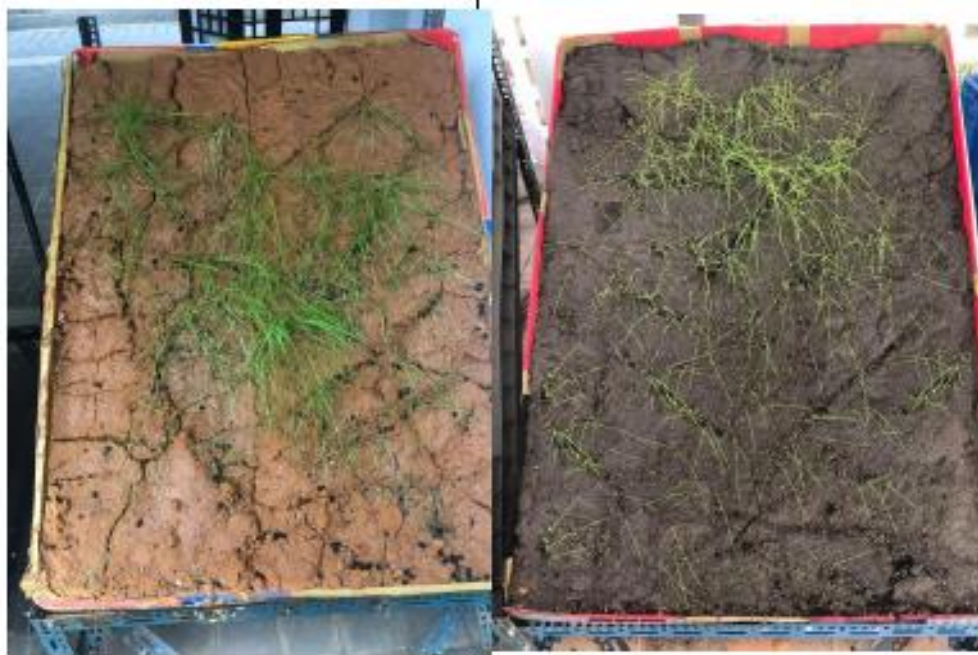




49

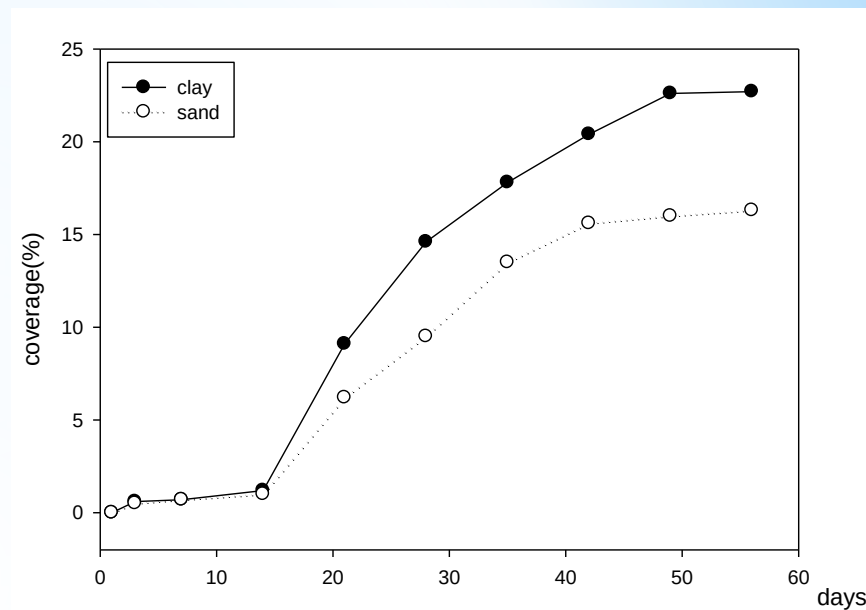


56



結果與討論

天數	覆蓋率(%)	
	紅壤	砂土
1	0	0
3	0.6	0.5
7	0.7	0.7
14	1.2	1.0
21	9.1	6.2
28	14.6	9.5
35	17.8	13.5
42	20.4	15.6
49	22.6	16.0
56	22.7	16.3



第14-21天間其覆蓋率增加較多，推測原因為種子大多於這期間發芽成長，因其後續天數中每星期增加的覆蓋率約為**1-2%**，並沒有像14-21天間相同的情況。最終，於第56天，兩種坡面的覆蓋率分別是**紅壤為22.7%**及**砂土16.3%**，兩者間差異原因為粒劑留於坡面百分比的差別，以及砂土較紅壤不易保持水分導致。



結果與討論_生長勢比較

本試驗於拋灑後第1、3、7、14、28、35、42、49及56天分別量測生長勢，其方法為於坡面生長之植物中隨機挑選三株後固定量測。約在第14至28天植生的生長勢有較明顯的成長而在第35天過後其生長勢並沒有明減增加。

天數	生長勢(cm)	
	紅壤	砂土
1	0	0
3	0.20±0.04	0.21±0.03
7	0.55±0.10	0.87±0.34
14	0.68±0.21	1.24±0.33
21	3.81±1.61	4.42±2.35
28	10.5±3.33	9.87±2.48
35	16.6±3.75	18.3±2.55
42	17.5±3.13	19.0±2.70
49	17.7±2.88	19.1±2.56
56	18.2±2.47	19.2±2.42



結果與討論_效益評估計算

在相同施用面積的狀況下，使用無人機撒播的成本較傳統人工噴植低，且於施作時不需由人力至坡面操作，只需要在坡腳或坡頂上操作無人機撒播即可，危險性大幅度降低，但於施作前須先進行造粒，準備天數較長。而且撒播過後留於坡面的功能性粒劑多寡將會直接影響其發芽率，這個方面傳統人工噴植則可以避免，因其覆蓋物(肥料及生物炭)及種子皆是直接黏著於坡面。

工法	材料品項	價錢	假設所需量	面積0.1ha工程 總成本分析
傳統人工噴植	生物炭	10元/kg	$700\text{kg/m}^3 \times 30\text{m}^3 = 23,100\text{kg}$	$10\text{元/kg} \times 23,100\text{kg} +$
	田寶11號	10元/kg	$1540\text{kg/m}^3 \times 30\text{m}^3 = 46,200\text{kg}$	$10\text{元/kg} \times 46,200\text{kg} +$
	種子	500元/kg	$1\text{kg/m}^3 \times 30\text{m}^3 = 30\text{kg}$	$500\text{元/kg} \times 30\text{kg} +$
	工人 (含噴植機具)	1,000元/人/hr	8hr×13人	1,000元 / 人
	菱形鐵絲網	5元/m ²	1,000m ²	/hr×8hr×13人+
	鉚釘	20元/支	$4\text{支/m}^2 \times 1,000\text{m}^2 = 4,000\text{支}$	$5\text{元/m}^2 \times 1,000\text{m}^2 +$
	抗沖蝕劑 (DP-850)	400元/kg	$1\text{kg/m}^3 \times 30\text{m}^3 = 30\text{kg}$	$20\text{元/支} \times 4,000\text{支} +$
無人機撒播	生物炭	10元/kg	$0.375\text{kg/m}^2 \times 1000\text{m}^2 = 375\text{kg}$	$400\text{元/kg} \times 30\text{kg} =$
	田寶11號	10元/kg	$1.125\text{kg/m}^2 \times 1000\text{m}^2 = 1,125\text{kg}$	909,000元
	種子	500元/kg	$0.026\text{kg/m}^2 \times 1000\text{m}^2 = 26\text{kg}$	$10\text{元/kg} \times 375\text{kg} +$
	無人機租借 (含操作人員)	20,000元/天	3天	$10\text{元/kg} \times 1,125\text{kg} +$
	造粒機租借	2,000元/天	25天	$500\text{元/kg} \times 26\text{kg} +$
	臨時人員	160元/人/hr	8人×200hr	$20,000\text{元/天} \times 3\text{天} +$
				$2,000\text{元/天} \times 25\text{天} +$
				$160\text{元/人/hr} \times 8\text{人} \times 200\text{hr} =$
				394,000元



結論與建議(1)

1. 功能化植生粒劑(functional seedling materials)灑播結果顯示，本計畫建議以「**半圓柱體**」為佳，平面處面積應為各形狀最大。
2. 坡度提升後，無論坡面粗糙度，植生粒劑殘留率皆顯著減少，於 30° 之坡度時接近臨界值，殘留率皆小於2%，**顯示該粒劑噴灑方法較適用於坡度 <30^{\circ} 之邊坡**。
3. 由粒劑噴飛距離試驗得知，於相同環境條件下，以半圓柱體粒劑之噴飛距離為最短，三角柱體次之，而圓柱體及長方體相近，皆較其他兩種形狀噴飛距離較長，**顯示圓柱體及長方體較不易殘留於坡面**。
4. 試驗結果可得知拋撒高度3公尺較7公尺較適合；**於3公尺拋撒粒劑於坡面之殘留率較7公尺顯著高**。此外，粒劑噴飛距離在同樣的坡度下拋撒高度3公尺亦具較短之噴飛距離。





結論與建議(2)

5. 本試驗運用無人機現地噴灑植生粒劑試驗顯示，即便控制閘門方向及開口，仍無法有效明確控制粒劑拋灑範圍面積，主要由於無人機的螺旋槳造成的風壓使粒劑噴灑範圍受到影響。
6. 現地無人機噴灑植生粒劑試驗顯示，如以受噴面積回推粒劑留存量與覆蓋率，回推之坡面覆蓋率約為28~30% (8週)，建議未來須更長時間觀察植生生長情形。
7. 於相同施作面積下，雖無人機撒播準備材料的天數較長，但於成本及操作危險程度皆明顯較傳統人工噴植低出許多，仍為可於未來作為節省成本與人力之創新方法，然而，未來仍可持續研究裡劑資材與條件以加強植生粒劑於坡面之殘留率與發芽率。



簡報完畢 恭請指教

