

# 利用無人機於邊坡噴植－創新技術可行性研究

邵珮琪<sup>[1]</sup> 林清一<sup>[2]\*</sup>

**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<sup>[1]</sup> C.E. Lin<sup>[2]\*</sup>

**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<sup>2</sup> each. Furthermore, the germination coverage rates of tree species were 0.75, 2.1, and 2.84 saplings/m<sup>2</sup> over a region covering an area of 55 m<sup>2</sup>. 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、成大研究發展基金會

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)。

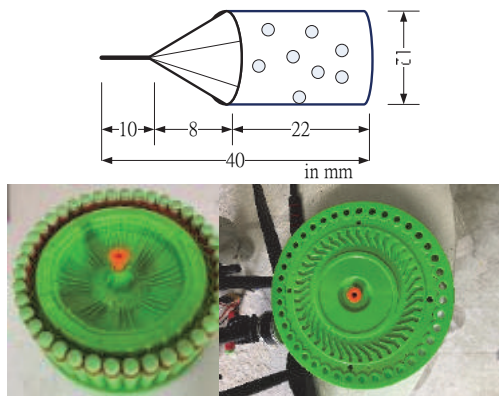


圖 1 種子彈和 40 發子彈的彈匣

Fig.1 The seed bullet and a 40 bullet magazine

在種子彈前端添加了一根牙籤，以幫助種子彈黏在陡峭的山坡上。種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子混合，並由煮熟的米飯封閉。每顆種子彈約重 8 克，含有約 300 顆種子。

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，種子彈的紙吸管已經分解，使種子散布到土壤上。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	種子彈	直接噴植
6月8日	百慕達草 波斯菊	20顆子彈/2平方公尺	1克種子 直接噴灑
		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。

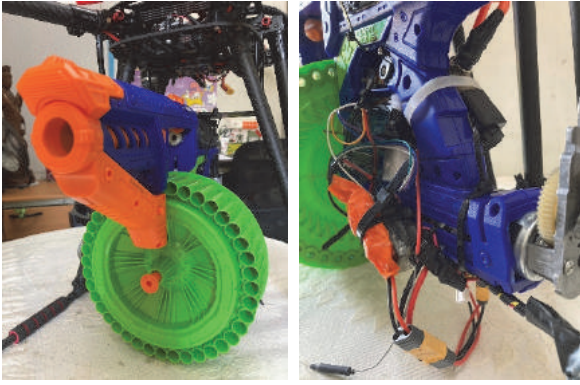


圖 3 種子彈匣和氣動氣體噴射控制

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

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 Miaoli (ML3)

## 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。

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 顆種子子彈 (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 顆種子子彈 (約 600 顆種籽) 的噴植量, 作為試驗的先導。

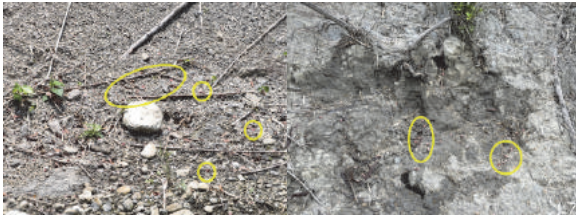


圖 6 5 月台南地區 (TN1、2) 首次噴播。每公尺噴霧量約 20 顆種子子彈。這個區域大約有 400 顆種子子彈

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



圖 7 六月在台南地區 (TN1、2) 進行的第二次噴植。每平方公尺的噴植量約為 20 顆種子子彈。該區域使用了約 600 顆種子子彈

**Fig.7 Second spray planting on Area Tainan (TN 1, 2) in June. The spray quantity is about 20 seed bullets/m<sup>2</sup>. 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 (一顆種子子彈), 草本則是每平方公尺 40 顆 (5 顆種子子彈)。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。

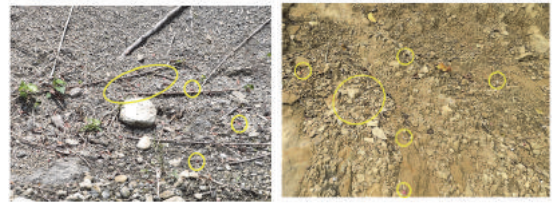


圖 8 苗栗地區 (ML3) 在 6 月 28 日的第一次噴植, 經過降雨後進行。每平方公尺的噴植量約為 20 顆種子子彈。該區域約有 600 顆種子子彈。噴植正在進行中, 照片如圖 9 所示

**Fig.8 First spray planting on Miao-Li (ML3) Area on June 28 after rain. The spray quantity is about 20 seed bullets/m<sup>2</sup>. 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 <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup> )	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/m<sup>2</sup>，目標：木本> 1 株/m<sup>2</sup>，
- (5) 每顆種子彈含 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

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

$$= 0.75, 2.34, 2.84 \text{ 幼苗株/m}^2$$

- (1) 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)。
- (2) 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<sup>2</sup>，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方公尺新台幣 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 x 5 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	

		種子子彈成本分析						
	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 <sup>2</sup>	5	16B+16C	19200	96,000
C	木本	8	1500	1g/m <sup>2</sup>	5	4M+4R	3200	16,000
			NT\$/kg		NT\$	每25 m <sup>2</sup>		

\*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  $A+B+C = 705,000+96,000+16,000 = \text{NT\$ } 817,000/\text{公頃}$ 。其單位成本為  $\text{NT\$ } 82/\text{平方公尺}$ 。這與土壤水源保護機構之前合同勞動力的  $\text{NT\$ } 2,000/\text{平方公尺}$ ，或每公頃  $850,000\sim 1,000,000$  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。

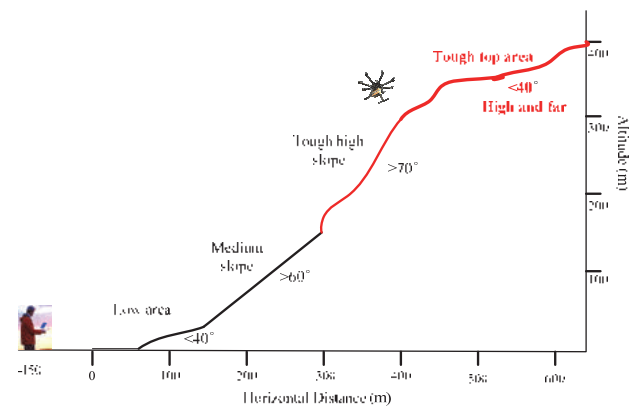


圖 15 建議的操作範圍至崩塌邊坡

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。

- (7) 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。
- (8) 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，種籽、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] Whitmore, T.C. (1983). "Secondary succession from seed in tropical rain forest." *Forestry Abstracts*, 44, 767-779. 28.
- [4] Whitmore, 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/FITaiwan2nd/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", 4<sup>th</sup> 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°C 且最適生長溫度在 24°C 至 37°C 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。扁平的果實小而乾燥，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子。種子有三片白色、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  $\alpha$ -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