

研究報告

植穴土壤與敷蓋對臺灣赤楊表現之影響- 以武陵廢耕地為例

邱瀚元¹ 柯志憲² 蔡智勇³ 曾彥學^{1,4} 楊佳蓉⁵ 邱清安^{1,5*}

【摘要】臺灣赤楊是臺灣中海拔生態復育造林的重要樹種，然出栽於高含石率之廢耕地的表現不佳，為此本研究於苗木出栽前篩除土壤中之石礫，再分組以過篩土、泥漿土栽植苗木，並對栽植後苗木周邊土表進行敷蓋，區分為無敷蓋、敷蓋泥炭土、敷蓋生物炭等3組。相較於過去以石礫土栽植赤楊之存活率甚低 (4.6%)，本研究經3年之監測結果顯示，植穴土壤改善及敷蓋具有提升苗木存活率之趨勢 (過篩土栽植存活46.7%、泥漿土栽植存活58.9%；無敷蓋48.3%、敷蓋泥炭土53.3%、敷蓋生物炭56.7%)，在苗木生長方面，植穴土壤改善及敷蓋略有提升苗木生長，但未達顯著差異。整體而言，赤楊苗木於每年4-9月有較高的生長量，且第2年之生長明顯優於第1年，栽植3年後平均地徑從7.8 mm生長至44.5 mm、苗高從102.3 cm生長至274.4 cm。泥漿土栽植與敷蓋對赤楊苗木地徑與苗高生長雖無顯著助益，然對綜合存活率與生長之累加效應的累積表現指數 (Accumulated Performance Index, API) 則有顯著提升。由於高含石率及強烈的太陽輻射會使土壤嚴重乾旱並造成苗木大量死亡，因此本文建議在土壤多石礫的武陵廢耕地栽植臺灣赤楊時，需先篩除植穴土壤中之石礫，並進行打漿及敷蓋，可減緩苗木所面臨的水分逆境，提升在山區高石礫廢耕地之赤楊造林成效。

【關鍵詞】廢耕地、臺灣赤楊、泥漿土栽植、敷蓋、生態復育。

-
- 1 國立中興大學森林學系
Department of Forestry, National Chung-Hsing University
 - 2 國立屏東科技大學森林系
Department of Forestry, National Pingtung University of Science and Technology
 - 3 臺北市立大學教育學系
Department of Education, University of Taipei
 - 4 行政院農業委員會林業試驗所
Taiwan Forestry Research Institute
 - 5 國立中興大學實驗林管理處
Experimental Forest, National Chung-Hsing University
- * 通訊作者，40227臺中市南區興大路145號。
Corresponding author. 145 Xingda Rd., South Dist., Taichung City 40227, Taiwan.
Email: cachieu@nchu.edu.tw

Research Paper

Effects of mud planting and mulching on the performance of *Alnus formosana* in Wuling abandoned farmland

Han-Yuan Chiu¹ Jih-Sian Ke² Chih-Yung Tsai³ Yen-Hsueh Tseng^{1,4}
Jia-Rong Yang⁵ Ching-An Chiu^{1,5*}

【Abstract】 *Alnus formosana* is an important tree species for mid-altitude ecological reforestation in Taiwan. However, it does not perform well when planted on abandoned farmland with high gravel content. In this study, the soil were sieved to remove gravels and the *A. formosana* seedlings were planted in either sieved soil or muddy soil each with different mulched covers. They are un-mulched, mulched with peat, and mulched with biochar. Seedling survival rate were after 3 years were 46.7% for sieving soil, 58.9% for muddy soil, 48.3% for un-mulched soil, 53.3% for soil mulched with peat, and 56.7% for soil mulched with biochar. In terms of growth performance, although muddy soil planting and mulching showed a trend of increased growth but the difference were not significant statistically. The seedlings showed a higher growth rate from April to September annually. The growth in the second year is significantly better than that the first year. The average stem ground diameter of the seedlings grew from 7.8 mm to 44.5 mm and the average seedling height grew from 102.3 cm to 274.4 cm. Although muddy soil planting and mulching did not show significant benefit to the growth of the seedlings, the accumulation performance index (API) were significantly increased. Because of the soil with high gravel content could dry severely under strong solar radiation, and resulted in the death for a large number of seedlings, we recommend that when planting *A. formosana* in the gravel rich soil, the gravels in the planting hole should be sieve out, then water should be added to create mud and then covered with mulch to reduce the drought stress of the seedlings, so that the effectiveness of *A. formosana* reforestation in the abandoned farmland can be improved.

【Key words】 abandoned farmland; *Alnus formosana*; mud planting; mulching; ecological restoration.

一、前言

近年來，由於社會經濟文化與環境保護意識的轉變，全球普遍出現許多農作地廢耕的現象 (Aide & Grau 2005; Benayas et al. 2007)；在臺灣的中海拔山區也因環境保護意識的覺醒，政府開始積極收回長期農作的超限利用地，其中，位於臺中市和平區的武陵廢耕地是過去長期種植高麗菜後廢耕的退化地，由於曾經大量施用雞糞及石灰，導致土壤理化性質改變，同時因外來入侵雜草優勢、表土乾旱、林木種源缺乏等多重阻礙，致使迄今仍完全無樹木天然下種更新，而形成以外來草種為優勢之草地 (邱清安等 2019)。當退化地之退化程度高、面積大、周邊植群遠而破碎、復原彈性差，由原生樹種之自然演替將十分緩慢或停滯，甚至發生持續性退化，因此有必要採行積極的人工生態復育 (邱清安&徐憲生 2015)。

將培育之苗木移植至退化地是森林復育最常用的方法 (Miyawaki 1993; Dostalek et al. 2007; Valliere et al. 2019)，以苗木出栽造林時，若選植演替早期樹種，不僅可加快成林速度，亦能促進演替後期樹種與森林結構之回復 (Gomez-Aparicio et al. 2004; Fagundes et al. 2018)。然而苗木栽植後的初期是對環境逆境最為敏感且死亡率最高的時期 (Chirino et al. 2009)，特別是在部分地區的夏季有嚴重乾旱和強烈輻射，種植於開闊地面的苗木在出栽初期常因乾旱與土壤乾燥而引發高死亡率 (Padilla & Pugnaire 2007; Siles et al. 2010)。當苗木從苗圃出栽至野地時，由於根被限制於植穴中，若土壤孔隙過大、與土壤的接觸不良 (poor root-soil contact) 和低滲透性，容易導致水分逆境的產生 (Burdett 1990)，因此，植物根系與土壤的充分接觸對於吸收水分和養分的

能力至關重要 (Schmidt et al. 2012)。然而武陵廢耕地表土含石率約達70% (邱清安等 2016)，大的土壤孔隙會導致土壤含水率下降並增加水分流失的速度 (Paruelo et al. 1987)，且夏季亦有高溫與烈日等加重乾旱之苗木生存壓力，致使以傳統方式栽植臺灣赤楊苗木之存活率僅有4.6% (邱清安等 2019)。

在傳統農耕社會，部分農民會藉由葉子、稻草或泥炭等有機物質平鋪在地上，稱為敷蓋 (mulching)，並可防止地表逕流與土壤流失，以減少土壤退化 (Patil et al. 2013)。另有許多研究，藉由不同的敷蓋物改善土壤水分、阻礙入侵雜草生長、減緩土壤溫度的變化幅度、增加土壤的水分滲透和蓄水，進一步提升苗木存活率與生長量 (Bakker et al. 2012; Jiménez et al. 2017; Silva & Vieira 2017; 谷婉萍 2016)，其中敷蓋有機物質可改善土壤孔隙及補充養分 (Patil et al. 2013)。

在武陵廢耕地復育造林行動中，邱清安 (2019) 嘗種植76種當地原生樹種，其中臺灣赤楊 (*Alnus formosana*) 具有高光飽和點、高氣孔導度、極高光合速率 (廖天賜 1998；郭耀綸&葉慶龍 2015)，加上其季節性落葉、具固氮菌根等特性，為武陵廢耕地復育造林樹種中生長表現最佳的樹種 (邱清安 2019)。鑑於武陵廢耕地植穴土壤之高含石率為導致臺灣赤楊苗木因乾旱死亡之主因 (邱清安等 2019)，且為瞭解敷蓋是否有助於出栽苗木之表現，本文將試驗以下方法對出栽臺灣赤楊苗木之影響：(1) 植穴土壤之石礫篩除並加水打泥漿，(2) 於苗木植穴周邊敷蓋不同介質。

二、材料與方法

(一) 研究區環境概述

本研究區位於雪霸國家公園內的武陵遊憩區(圖1)，鄰近七家灣溪，海拔約1,900 m，早期曾長年種植高山蔬菜，於2008年國家公園徵收後廢耕。此一廢耕地由於長期施用大量雞糞及石灰，現今該地表土石灰質甚高且偏鹼性(pH 7.6~7.8)，高出鄰近森林土壤(pH 4.7~5.4)甚多，而該地土壤之含石率很高(約70%)，雖無排水不良的情況，卻形成較差的保肥及保水能力(邱清安等 2016)。

由武陵廢耕地之生態氣候圖(邱清安等 2016)來看，該地全年都在潤濕以上，代表武陵廢耕地降水量充足；但由於石礫多、孔隙大，故水分流失快速，土壤保水不佳，且栽植時容易造成出栽苗木懸根，不利苗木後續存活；另外，廢耕地環境多為開闊地，水分易由表土蒸發，亦不利苗木存活。

(二) 實驗樹種

本研究以臺灣赤楊為實驗樹種，2017年自武陵地區採集種子，於中興大學惠蓀林場利用3.5吋加高黑軟盆(口徑10.5 cm，盆高16 cm)育苗，於2018年4月選擇形質相似之180株苗木進行出栽。

(三) 實驗方法

本研究位於武陵廢耕地152地號(圖1紅圈處)，首先將實驗地均勻除草後，利用6吋(15.2 cm)鑽頭之鑽孔機每隔100 cm鑽出深約20 cm的180個植穴，並分為下列方式進行實驗：

1. 植穴土壤實驗

傳統造林大多是直接以植穴掘出之土壤回填來種植苗木，武陵廢耕地之表土含石率約達70%，為多量碎石礫與砂質粘壤土之混合(以下簡稱石礫土)，石礫土保水性差以致苗木出栽後常遭遇缺水逆境(邱清安等 2016)。本研究為瞭解植穴栽植土質對臺灣赤楊苗木造林之影響，首先以網目約8 mm之鐵網篩除表土之石礫留下剩餘土壤(以下簡稱過篩土)，接著取1/2的過篩土加水打成泥漿(以下簡稱泥漿土)，再分組栽植(如圖2)：(1)過篩土栽植(soil planting, S)-隨機取90株苗木，植穴填入過篩土；(2)泥漿土栽植(mud planting, M)-隨機取90株苗木，植穴填入泥漿土。將過篩土栽植與泥漿土栽植以交叉間格排列，減少光照或風向等其他因素影響，並對每株苗木編號掛牌進行監測。

2. 敷蓋實驗

將已出栽的180株苗木均分為3組(圖2)：

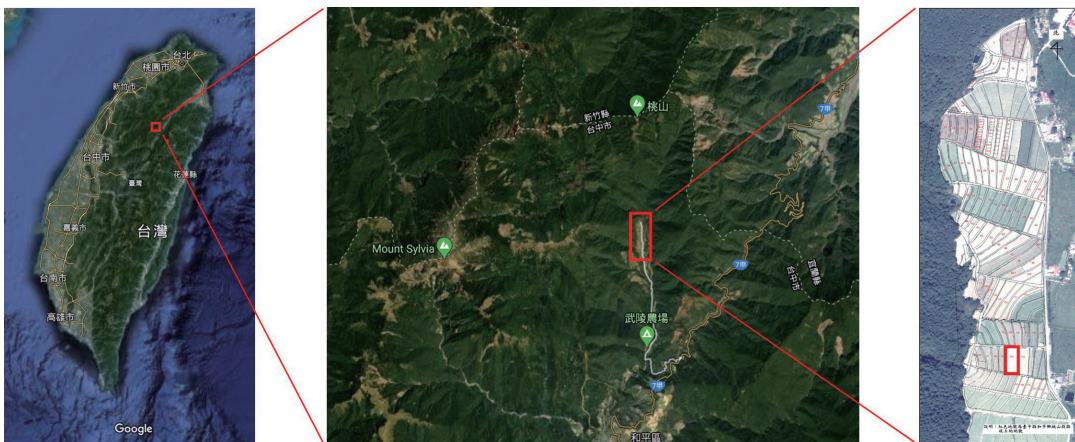


圖1. 武陵廢耕地及實驗地之位置。

Figure 1. Location of Wuling abandoned farmland and experimental site.

(1) 無敷蓋物 (no mulching, N) -植穴周圍土表未進行敷蓋。(2) 敷蓋生物炭 (biochar, B) -於植穴周圍直徑約50 cm的土表鋪設厚度約0.5 cm的生物炭。(3) 敷蓋泥炭土 (peat, P) -於植穴周圍直徑約50 cm的土表鋪設厚度約1 cm的泥炭土。本試驗所使用之生物炭係購自埔光炭業有限公司，泥炭土為芬蘭Kekkila無肥酸性泥炭土。苗木出栽後，未再進行澆水，且僅於每季監測時將雜草清理至可調查之程度，無其餘撫育措施。

3. 監測與分析

本研究自2018-04出栽，監測至2021-04共3年，於每季(1月、4月、7月、10月)記錄苗木存活株數，量測每株苗木之地徑 (ground-level diameter, D)、苗高 (height, H)，並計算各組以下之介量：

- (1) 存活率 (survival percentage, $SP_{(n)}$)
= (存活株數/出栽總株數) × 100%
- (2) 累積地徑生長量 (accumulative growth of diameter, $A \Delta D_{(n)}$) = $D_{(n)} - D_{(0)}$
- (3) 累積苗高生長量 (accumulative growth of height, $A \Delta H_{(n)}$) = $H_{(n)} - H_{(0)}$
- (4) 生長指數 (growth index, $GI_{(n)}$) = $[D_{(n)} \times H_{(n)}] - [D_{(n-1)} \times H_{(n-1)}]$
- (5) 累積生長指數 (accumulative growth index, $AGI_{(n)}$) = $[D_{(n)} \times H_{(n)}] - [D_{(0)} \times H_{(0)}] = GI_{(1)} + GI_{(2)} + \dots + GI_{(n)}$
- (6) 表現指數 (performance index, $PI_{(n)}$) = $GI_{(n)} \times SP_{(n)}$
- (7) 累積表現指數 (accumulative performance index, $API_{(n)}$) = $PI_{(1)} + PI_{(2)} + \dots + PI_{(n)}$

上述式中，n表示調查的季數(2018-04為第1季...2021-04為第12季)，生長指數、累積生

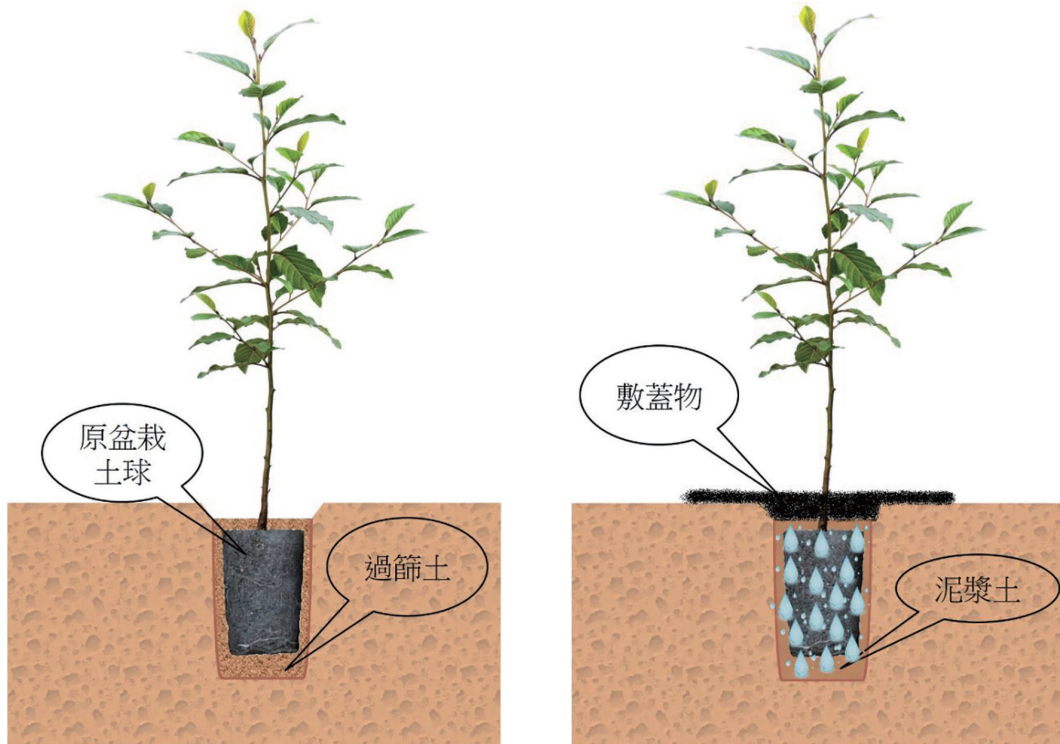


圖2. 本研究之苗木植穴土壤與敷蓋的示意。

Figure 2. Schematic diagram of seedling's planting-hole soil and mulching in this study.

長指數、表現指數及累積表現指數係參考De Steven (1991)、Quintana-Ascencio et al. (2004)、Mangueira et al. (2019)、邱清安 (2019) 等進行修訂。其中，綜合地徑與苗高的生長指數GI及累積生長指數AGI表示單株苗木的生長變化，而再加入存活率SP計算的表現指數PI及累積表現指數API表示整體造林的成效。上述各組介量計算後，因本研究無設計重複，存活率SP₁₂僅能分為植穴土壤及敷蓋等2實驗後，以單因子變異數分析 (One-way ANOVA) 檢定；其餘則以二因子變異數分析 (Two-way ANOVA) 檢定不同組別之D₁₂、H₁₂、A Δ D₁₂、A Δ H₁₂、AGI₁₂、API₁₂是否具有組間差異，並在事後檢定 (Post hoc) 中使用LSD檢視其差異。

三、結果

(一) 出栽前之苗木同質性

出栽前之180株苗木的地徑為7.8 ± 1.2 mm、苗高102.3 ± 13.5 cm，各組苗木經同質性檢定後，並無顯著差異 (表1)。

(二) 存活率

經3年監測之苗木存活率如圖3，最後一次調查 (2021-04，第12季) 時，植穴土壤實驗 (圖3A) 之苗木平均存活率為泥漿土栽植58.9% > 過篩土栽植46.7%。敷蓋實驗 (圖3B) 之苗木平均存活率為敷蓋泥炭土56.7% > 敷蓋生物炭53.3% > 無敷蓋物48.3%。綜合植穴土壤及敷蓋實驗 (圖3C) 之苗木平均存活率為泥漿土

栽植且敷蓋生物炭 (M+B=66.7%) > 泥漿土栽植且敷蓋泥炭土 (M+P=56.7%) = 過篩土栽植且敷蓋泥炭土 (S+P=56.7%) > 泥炭土栽植且無敷蓋物 (M+N=53.3%) > 過篩土栽植且無敷蓋物 (S+N=43.3%) > 過篩土栽植且敷蓋生物炭 (S+B=40.0%)；將此6組分為2實驗分別進行One-way ANOVA分析顯示，不同植穴土壤實驗下，臺灣赤楊平均存活率沒有顯著性差異 ($p=0.257$) (表2、圖3A)；不同敷蓋實驗下，臺灣赤楊平均存活率亦沒有顯著性差異 ($p=0.721$) (表2、圖3B)。

(三) 生長

圖4顯示地徑的生長測量值，最後一次調查 (2021-04) 時，植穴土壤實驗 (圖4A) 之苗木平均地徑為泥漿土栽植46.6 mm > 過篩土栽植41.7 mm；敷蓋實驗 (圖4B) 之苗木平均地徑為敷蓋泥炭土45.4 mm > 敷蓋生物炭44.0 mm > 無敷蓋物 43.8 mm。綜合植穴土壤及敷蓋實驗 (圖4C) 之苗木平均地徑為泥漿土栽植且敷蓋生物炭 (M+B=47.8 mm) > 泥漿土栽植且敷蓋泥炭土 (M+P=46.4 mm) > 泥漿土栽植且無敷蓋物 (M+N=45.4 mm) > 過篩土栽植且敷蓋泥炭土 (S+P=44.4 mm) > 過篩土栽植且無敷蓋物 (S+N=41.8 mm) > 過篩土栽植且敷蓋生物炭 (S+B=37.8 mm)。進一步計算各組之累積地徑生長量 (A Δ D) 亦同於上述之趨勢，且各組之地徑及其A Δ D進行Two-way ANOVA分析後，顯示無顯著差異 (表3)。

表1. 出栽前各組苗木地徑與苗高之同質性檢定。

Table 1. Test of Homogeneity of the ground-level diameter and height for each group of seedlings before planting.

		自由度	F值	p 值
同質性檢定	地徑	5	0.392	0.853
	苗高	5	1.302	0.272

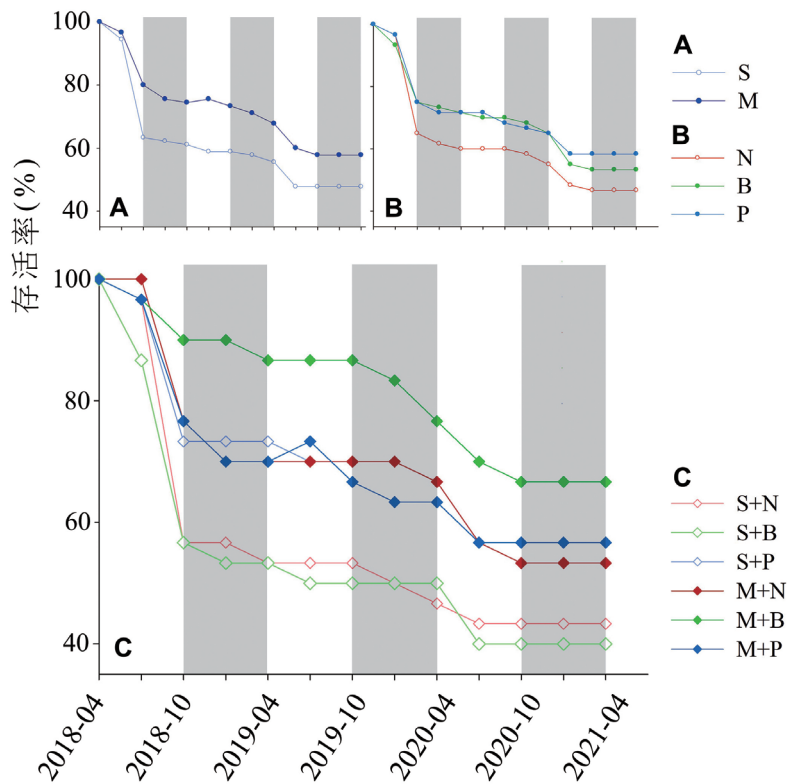


圖3. 不同植穴土壤、敷蓋及綜合之苗木存活率。A為植穴土壤實驗之存活率，B為敷蓋實驗之存活率，C為植穴土壤實驗與敷蓋實驗綜合分析之存活率。白底代表生長季(4-9月)，灰底代表非生長季(10-3月)。S=過篩土栽植，M=泥漿土栽植，N=無敷蓋物，B=敷蓋生物炭，P=敷蓋泥炭土。

Figure 3. Survival percentage of seedlings among different groups of planting-hole soil, mulching, and complex. A, B, and C: survival percentage in the planting-hole soil and mulching, and both complex experiments. White and gray backgrounds: growth season (Apr.-Sep.) and non-growth seasons (Oct.-Mar.). S: planting in sieved soil. M: planting in muddy soil. N: no mulching. B: mulching biochar. P: mulching peat.

表2. 苗木存活率之One-way ANOVA分析。

Table 2. One-way ANOVA of seedling survival percentage.

實驗	處理方式	平均值 ± 標準差	F值	p值
植穴土壤	過篩土栽植	46.7 ± 8.8%	2.469	0.257
	泥漿土栽植	58.9 ± 6.9%		
敷蓋	無敷蓋物	48.3 ± 7.1%	0.388	0.721
	敷蓋生物炭	53.3 ± 18.9%		
	敷蓋泥炭土	56.7 ± 0.0%		

圖5顯示苗高的生長測量值，最後一次調查 (2021-04) 時，植穴土壤實驗 (圖5A) 之平均苗高為泥漿土栽植280.4 cm > 過篩土栽植266.8 cm；敷蓋實驗 (圖5B) 之平均苗高為敷蓋泥炭土292.2 cm > 敷蓋生物炭264.8 cm > 無敷蓋物264.1 cm。綜合植穴土壤及敷蓋實驗 (圖5C) 之平均苗高為過篩土栽植且敷蓋泥炭土之苗木 (S+P=292.8 cm) > 泥漿土栽植且敷

蓋泥炭土 (M+P=291.5 cm) > 泥漿土栽植且敷蓋生物炭 (M+B=278.4 cm) > 泥漿土栽植且無敷蓋物 (M+N=271.2 cm) > 過篩土栽植且無敷蓋物 (S+N=255.5 cm) > 過篩土栽植且敷蓋生物炭 (S+B=242.2 cm)。進一步計算各組之累積苗高生長量 ($A \Delta H$) 亦同於上述之趨勢，且各組之苗高及其 $A \Delta H$ 進行Two-way ANOVA分析後，顯示無顯著差異 (表3)。

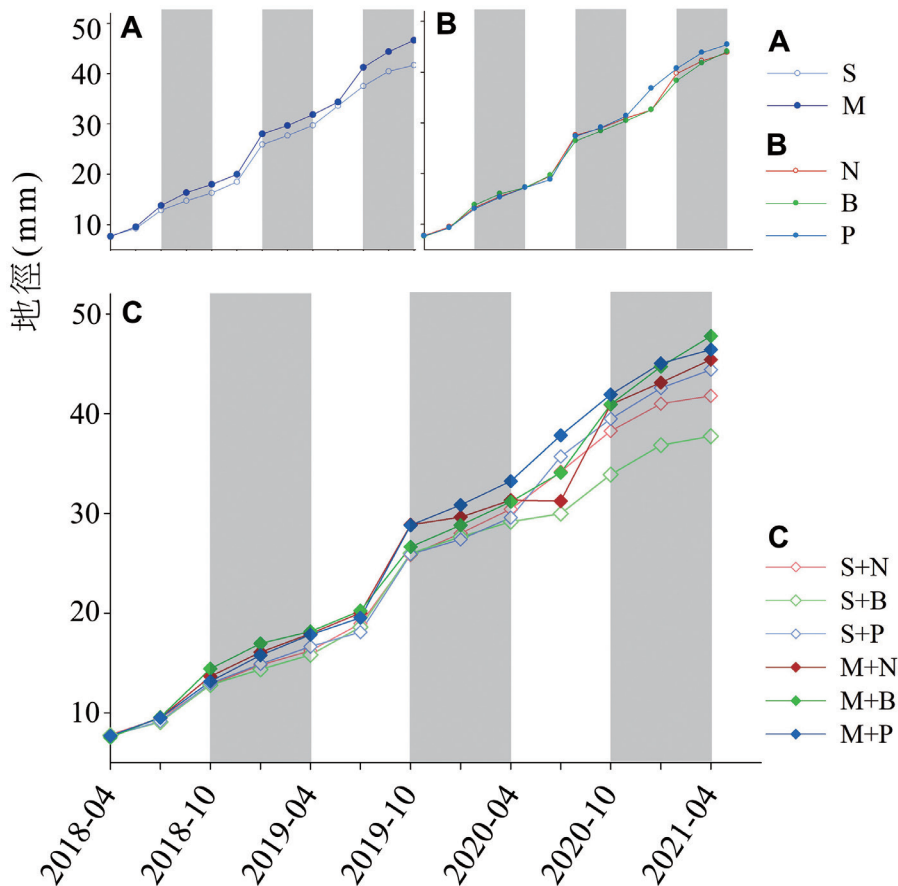


圖4. 不同植穴土壤、敷蓋及綜合之地徑監測。A為植穴土壤實驗之地徑，B為敷蓋實驗之地徑，C為植穴土壤實驗與敷蓋實驗綜合分析之地徑。白底代表生長季 (4-9月)，灰底代表非生長季 (10-3月)。S=過篩土栽植，M=泥漿土栽植，N=無敷蓋物，B=敷蓋生物炭，P=敷蓋泥炭土。

Figure 4. Ground-level diameter of seedlings among different groups of planting-hole soil, mulching, and complex. A, B, and C: survival percentage in the planting-hole soil and mulching, and both complex experiments. White and gray backgrounds: growth season (Apr.-Sep.) and non-growth seasons (Oct.-Mar.). S: planting in sieved soil. M: planting in muddy soil. N: no mulching. B: mulching biochar. P: mulching peat.

圖6顯示累積生長指數AGI的計算值，最後一次調查 (2021-04) 時，植穴土壤實驗 (圖6A) 之平均AGI為泥漿土栽植12,992.9 > 過篩土栽植11,134.2。敷蓋實驗 (圖6B) 之平均AGI為敷蓋泥炭土13,253.3 > 敷蓋生物炭11,773.3 > 無敷蓋物11,341.6。綜合植穴土壤及敷蓋實驗 (圖6C) 之平均AGI為泥漿土栽植且敷蓋

泥炭土 (M+P=13,513.7) > 泥漿土栽植且敷蓋生物炭 (M+B=13,245.8) > 過篩土栽植且敷蓋泥炭土 (S+P=12,992.9) > 泥漿土栽植且無敷蓋物 (M+N=12,123.5) > 過篩土栽植且無敷蓋物 (S+N=10,379.1) > 過篩土栽植且敷蓋生物炭 (S+B=9,319.1)；且各組之AGI進行Two-way ANOVA分析後，顯示無顯著差異 (表3)。

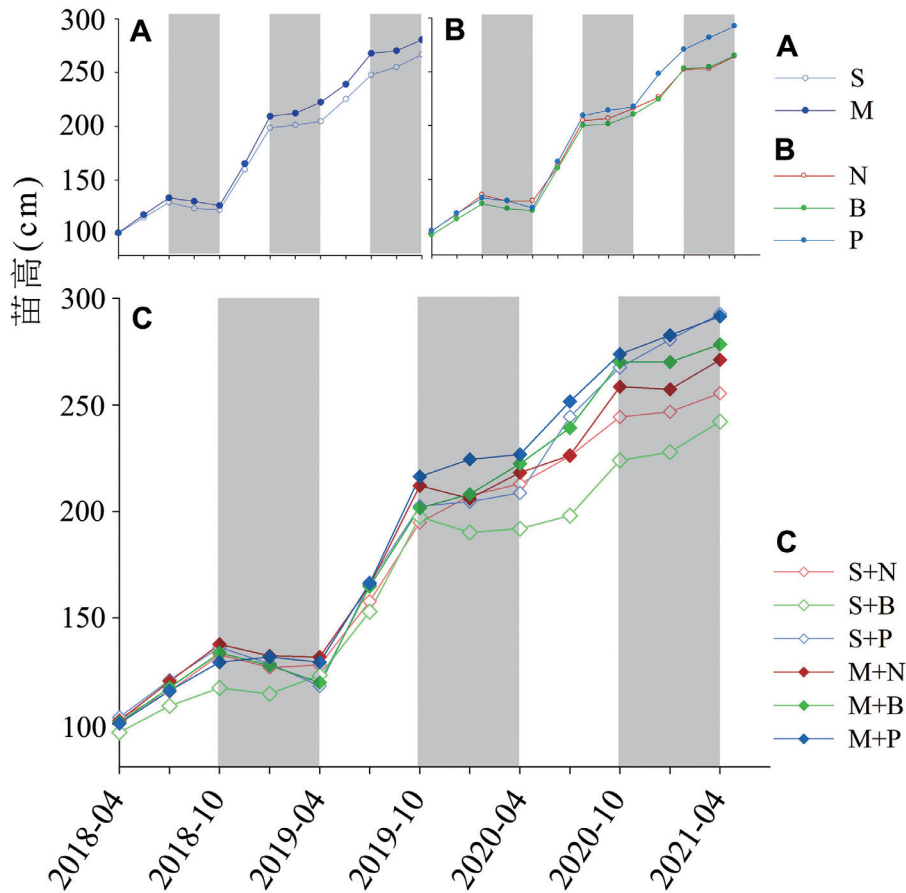


圖5. 不同植穴土壤、敷蓋及綜合之苗高監測。A為植穴土壤實驗之苗高，B為敷蓋實驗之苗高，C為植穴土壤實驗與敷蓋實驗綜合分析之苗高。白底代表生長季 (4-9月)，灰底代表非生長季 (10-3月)。S=過篩土栽植，M=泥漿土栽植，N=無敷蓋物，B=敷蓋生物炭，P=敷蓋泥炭土。

Figure 5. Height of seedlings among different groups of planting-hole soil, mulching, and complex. A, B, and C: survival percentage in the planting-hole soil and mulching, and both complex experiments. White and gray backgrounds: growth season (Apr.-Sep.) and non-growth seasons (Oct.-Mar.). S: planting in sieved soil. M: planting in muddy soil. N: no mulching. B: mulching biochar. P: mulching peat.

表3. 苗木地徑生長、苗高生長、累積地徑生長量、累積苗高生長量、累積生長指數之Two-way ANOVA分析。

Table 3. Two-way ANOVA of seedling ground-level diameter growth, height growth, accumulative growth of diameter, accumulative growth of height, and accumulative growth index.

	植穴土壤	敷蓋	平均數 ± 標準差	F值	p值
地徑 D (mm)	過篩土栽植	無敷蓋物	41.8 ± 10.2	1.052	0.354
		敷蓋生物炭	37.8 ± 12.3		
	泥漿土栽植	敷蓋泥炭土	44.4 ± 10.9		
		無敷蓋物	45.4 ± 10.8		
		敷蓋生物炭	47.8 ± 11.3		
		敷蓋泥炭土	46.4 ± 13.5		
苗高 H (cm)	過篩土栽植	無敷蓋物	255.5 ± 91.5	0.382	0.684
		敷蓋生物炭	242.2 ± 82.6		
	泥漿土栽植	敷蓋泥炭土	292.8 ± 90.2		
		無敷蓋物	271.2 ± 86.8		
		敷蓋生物炭	278.4 ± 82.1		
		敷蓋泥炭土	291.5 ± 81.9		
累積地徑生長量 A Δ D (mm)	過篩土栽植	無敷蓋物	33.4 ± 10.0	1.041	0.357
		敷蓋生物炭	30.5 ± 12.2		
	泥漿土栽植	敷蓋泥炭土	36.6 ± 10.9		
		無敷蓋物	37.6 ± 10.5		
		敷蓋生物炭	40.4 ± 11.4		
		敷蓋泥炭土	38.4 ± 13.5		
累積苗高生長量 A Δ H (cm)	過篩土栽植	無敷蓋物	147.5 ± 99.4	0.341	0.712
		敷蓋生物炭	146.8 ± 81.2		
	泥漿土栽植	敷蓋泥炭土	189.2 ± 90.2		
		無敷蓋物	169.1 ± 88.2		
		敷蓋生物炭	178.6 ± 79.5		
		敷蓋泥炭土	186.7 ± 77.7		
累積生長指數 AGI	過篩土栽植	無敷蓋物	10379.1 ± 5259.5	0.594	0.554
		敷蓋生物炭	9319.1 ± 5789.3		
	泥漿土栽植	敷蓋泥炭土	12992.9 ± 7404.5		
		無敷蓋物	12123.5 ± 5971.8		
		敷蓋生物炭	13245.8 ± 5919.5		
		敷蓋泥炭土	13513.7 ± 6789.9		

(四) 造林表現

將各季生長指數GI加入存活率SP計算所得出之表現指數PI後，可計算出3年的累積表現指數API (圖7)，以代表整體的造林表現。經3年的監測，在最後一次調查 (2021-04) 時，植穴土壤實驗 (圖7A) 之平均API為泥漿土栽植 9,079.4 > 過篩土栽植6,315.9。敷蓋實驗 (圖7B) 之平均API為敷蓋泥炭土8,583.5 > 敷蓋生物炭8,162.1 > 無敷蓋物6,670.7。綜合植穴土壤及敷蓋實驗 (圖7C) 之平均API為泥漿土栽植

且敷蓋生物炭 (M+B=10,409.1) > 泥漿土栽植且敷蓋泥炭土 (M+P=8,720.3) > 過篩土栽植且敷蓋泥炭土 (S+P=8,446.7) > 泥漿土栽植且無敷蓋物 (M+N=7,798.8) > 過篩土栽植且無敷蓋物 (S+N=5,282.2) > 過篩土栽植且敷蓋生物炭 (S+B=4,417.0)。在植穴土壤實驗中，各組之API經Two-way ANOVA分析後有顯著差異 ($p=0.019$) (表4)，進一步以主效果分析後發現，在過篩土栽植條件下，敷蓋泥炭土在造林表現都比無敷蓋物與敷蓋生物炭兩者來得佳

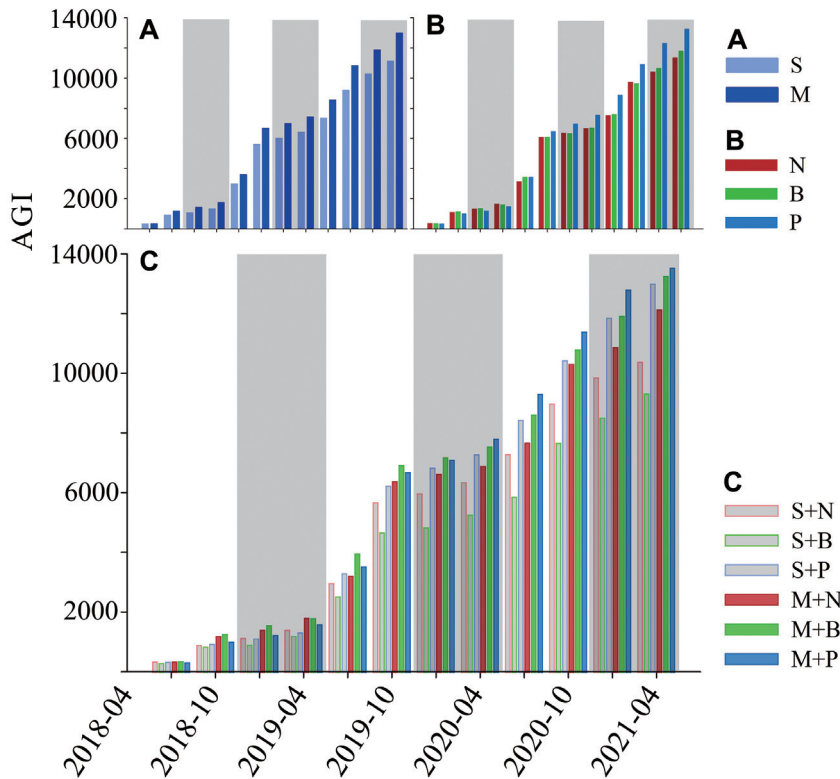


圖6. 不同植穴土壤、敷蓋及綜合之苗木的累積生長指數 (AGI)。A為植穴土壤實驗之AGI，B為敷蓋實驗之AGI，C為植穴土壤實驗與敷蓋實驗綜合分析之AGI。白底代表生長季 (4-9月)，灰底代表非生長季 (10-3月)。S=過篩土栽植，M=泥漿土栽植，N=無敷蓋物，B=敷蓋生物炭，P=敷蓋泥炭土。

Figure 6. Accumulative growth index (AGI) of seedlings among different groups of planting-hole soil, mulching, and complex. A, B, and C: survival percentage in the planting-hole soil and mulching, and both complex experiments. White and gray backgrounds: growth season (Apr.-Sep.) and non-growth seasons (Oct.-Mar.). S: planting in sieved soil. M: planting in muddy soil. N: no mulching. B: mulching biochar. P: mulching peat.

(圖7A、表4)；其次在無敷蓋的條件下，泥漿土栽植的造林表現優於過篩土栽植，而在敷蓋生物炭的條件下，泥漿土栽植的造林表現亦是優於過篩土栽植(圖7B、表4)。

四、討論

(一) 苗木之死亡高峰期

在本研究監測的3年期間，赤楊苗木最大的死亡高峰出現於出栽後第1個生長季(2018-04 ~ 2018-10)(圖3)，印證了苗木於出栽初期

對環境逆境最為敏感且死亡率最高(Chirino et al. 2009)，而苗木移植的壓力主要是水分逆境(Burdett 1990)。武陵廢耕地之含石率高，土壤保水性差，當夏季高溫且多日無雨的情形下，苗木易因乾旱缺水而死亡(Pinto et al. 2016; 邱清安 2019)，因此減緩苗木出栽後第1個生長季的水分逆境為確保造林成功的首要關鍵。由圖3可見，武陵廢耕地赤楊苗木至第2年後即較少死亡，唯於2020-04 ~ 07有另一次死亡高峰，配合當地之氣象資料及現地觀察，可

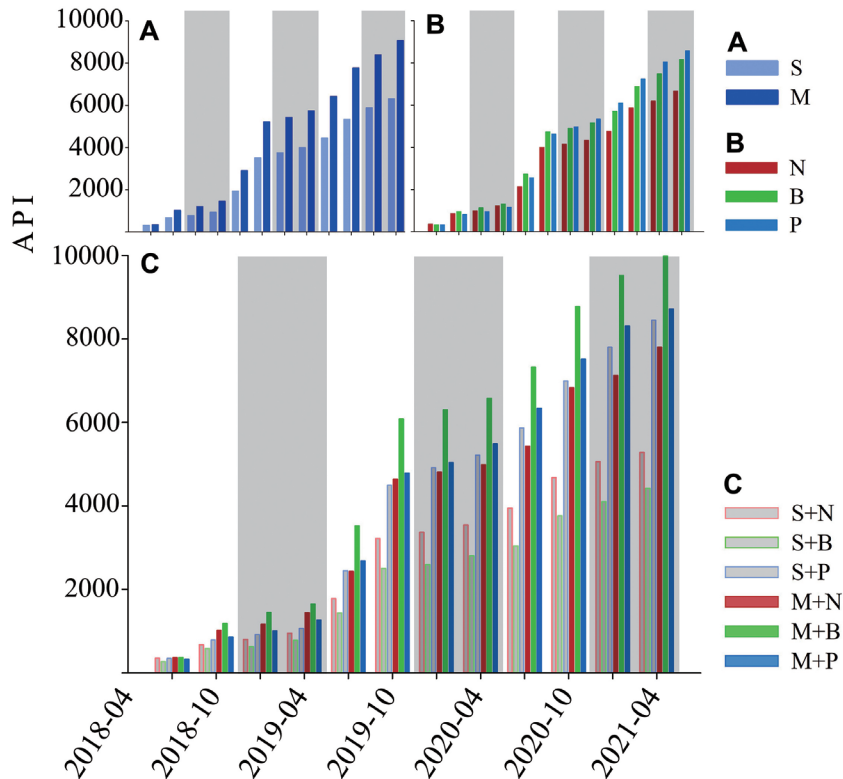


圖7. 不同植穴土壤、敷蓋及綜合之苗木的累積表現指數(API)。A為植穴土壤實驗之API，B為敷蓋實驗之API，C為植穴土壤實驗與敷蓋實驗綜合分析之API。白底代表生長季(4-9月)，灰底代表非生長季(10-3月)。S=過篩土栽植，M=泥漿土栽植，N=無敷蓋物，B=敷蓋生物炭，P=敷蓋泥炭土。

Figure 7. Accumulative performance index (API) of seedlings among different groups of planting-hole soil, mulching, and complex. A, B, and C: survival percentage in the planting-hole soil and mulching, and both complex experiments. White and gray backgrounds: growth season (Apr.-Sep.) and non-growth seasons (Oct.-Mar.). S: planting in sieved soil. M: planting in muddy soil. N: no mulching. B: mulching biochar. P: mulching peat.

表4. 苗木累積表現指數之Two-way ANOVA與單純主效果分析。

Table 4. Two-way ANOVA and simple main effect of seedling accumulative performance index.

	植穴土壤	敷蓋	平均數 ± 標準差	F值	p值	單純主效果
累積表現指數 API	過篩土栽植	無敷蓋物	5,282.2 ± 2,555.9	4.145*	0.019	S+P>S+N S+P>S+B M+N>S+N M+B>S+B
		敷蓋生物炭	4,417.0 ± 2,648.8			
	泥漿土栽植	敷蓋泥炭土	8,446.7 ± 4,791.3			
		無敷蓋物	7,798.8 ± 3,660.3			
		敷蓋生物炭	10,409.1 ± 4,529.3			
		敷蓋泥炭土	8,720.3 ± 4,296.2			

註：*表示具有顯著性 (p值<0.05)。

推論此次苗木死亡係因晚春霜凍 (late spring frost damage) (2020-04-13武陵氣象站夜間低溫-1.0°C)，此時赤楊苗木已開春展葉，零下低溫致使讓多數嫩芽、新葉凍枯，導致至2020-07時部分苗木因未能重新展葉而死亡。在未來氣候變遷環境下，氣候暖化與極端事件將加劇，冬末和早春氣溫升高可能會引發所謂的"假春 (false spring)"，許多植物會提前萌芽展葉生長，隨後若遭遇寒潮，常導致凍害風險增加 (Ma et al. 2019)，Zohner et al. (2020) 估計約有歐洲35%、亞洲26%、北美10%的溫帶森林面積未來將經歷更高的晚霜損壞；除了赤楊之外，此一晚春霜凍現象亦出現於廢耕地其他樹種之苗木 (如山桐子 *Idesia polycarpa*)，且於廢耕退化地的造林苗木之晚春霜凍更常見於其周邊未退化林地之自生苗木，推論主因為廢耕地之植物生長條件劣於周邊未退化林地、武陵廢耕地位置的霜袋效應 (frost pocket) 所致，然觀察未退化林地赤楊或山桐子大樹之恢復情況，可推測此種晚春霜凍之傷害將隨著苗木的成長而逐漸減緩。

(二) 植穴土壤與敷蓋對苗木存活率之影響

由於植物根系與土壤的充分接觸對於吸收水和養分至關重要 (Schmidt et al. 2012)，苗木根系與土壤的接觸不良是造林失敗的常見因

素 (Burdett 1990)，其中，產生水分逆境的原因之一，與移植後植物根部與土壤接觸的面積有關。植物根系吸收土壤水分的範圍主要集中於根系周邊幾毫米內 (Metselaar & de Jong van Lier 2011)，特別是在武陵廢耕地此種高含石率之造林地，根系與土壤若只有部分接觸可能會降低根系吸收水分和養分的有效性 (Van Noordwijk et al. 1993)。相較於過去在武陵廢耕地以原有石礫土用平植法栽植赤楊苗木1年半後的存活率僅4.6% (邱清安 2019)，本研究以篩除石礫之過篩土來栽植赤楊苗木，經1年半後之存活率高達57.8%，3年後仍有46.7% (圖3A)，顯示以過篩土栽植苗木可明顯提升存活率，此係由於過篩後的土壤粒徑較小，增加了土壤含水率及根系與土壤的接觸面積，因而提升苗木之存活率 (Paruelo et al. 1987)，此外圖3A也顯示以泥漿土栽植苗木，於2018-10第1個生長季 (過篩土栽植62.2% vs. 泥漿土栽植81.1%) 及出栽3年後 (過篩土栽植46.7% vs. 泥漿土栽植58.9%) 均可進一步提升存活率 (2組各90株苗木中，過篩土栽植vs. 泥漿土栽植於4-7月枯死6株vs. 2株、7-10月枯死28株vs. 15株)，推論其主因為植穴泥漿土較易填補根系與土壤之縫隙而避免懸根情況，可於栽植初期提供苗木水分 (袁海龍&楊才剛 2006；張德才&朱曉

紅 2006)，且泥漿土栽植苗木的根-土接觸較過篩土栽植更密合 (Paruolo et al. 1987)。一般以裸根苗進行造林，在運送或出栽前將苗木根系以泥漿浸泡，可保持苗木生機並提升其存活率 (Mellor et al. 1971; 潘曉 2005；行政院農業委員會林務局 2011；黃作舟 2011；吳長銓 2012)，因此本研究以泥漿土栽植赤楊容器苗亦能達到提升存活率之效果，特別是在苗木對環境逆境最敏感的第1個生長季。

圖3B顯示在第1個生長季之苗木存活率，相較於無敷蓋物 (66.7%)，只要有敷蓋物 (敷蓋泥炭土75.0%，敷蓋生物炭73.3%，二者平均74.2%) 即能提升苗木之存活率；至最後一次調查 (2021-04) 苗木存活率仍是敷蓋泥炭土56.7% > 敷蓋生物炭53.3% > 無敷蓋物48.3%。敷蓋對苗木存活率之助益，主要原因為敷蓋可以減緩苗木之逆境的機制，包含利用敷蓋物阻擋陽光直接照射於地表，並藉敷蓋物本身之成分改善土壤微環境如水分、溫度、養分等 (Truax & Gagnon 1993; Katra et al. 2008; Tailong et al. 2010; 谷婉萍 2016)，進而減少草本植物之競爭 (Haywood 2000; Bautista et al. 2009; Ceacero et al. 2012)，許多文獻 (Jimenez et al. 2016; Gonzalez-Tokman et al. 2018) 均曾報導敷蓋石塊及有機物均有利於提升苗木的存活率，且敷蓋有機物可補充土壤之有機質並增加土壤含水量 (Hueso-Gonzalez et al. 2017)。另外從圖3B可看到在2020-07後敷蓋泥炭土之苗木存活率皆高於敷蓋生物炭者，推測為2020-04晚霜過後，加上梅雨較往年少的情況，敷蓋泥炭土可能令苗木更適應寒冷氣候，或能提升土壤水分的涵養。

(三) 植穴土壤與敷蓋對苗木生長之影響

地徑與苗高是監測新植苗木生長最常用的參數 (Alvarez-Aquino et al. 2004)，進行臺灣赤

楊地徑 (圖4) 及苗高 (圖5) 生長的測量時，可看到大多的苗木發育在每年4至10月時較為快速，係因本地雨季可提供較充足之水分，加上氣候溫暖無寒害，配合臺灣赤楊發展葉芽之物候特性，讓生長集中在4至10月之間，是謂生長季。然而霜凍的危害從地徑 (圖4) 及苗高 (圖5) 亦可看出影響，由於出栽後第1個生長季 (2018-04 ~ 10) 苗木尚處於移植後之適應階段，至第2個生長季 (2019-04 ~ 10) 地徑及苗高才有較大幅度的生長，表示無論苗木地下或地上部皆較適應武陵廢耕地之環境。然而至第3個生長季 (2020-04 ~ 10) 時因4月中旬的晚春霜凍讓苗木必須重新發育嫩芽及新葉，導致生長量下降且造成部分苗木的死亡。

在植穴土壤實驗中，圖4A與圖5A顯示在出栽後3年的各季中，地徑與苗高均是泥漿土栽植略大於過篩土栽植，推論其原因為泥漿土較過篩土富含更多水分且根-土接觸更密合，有利於苗木之根系發展與養分吸收，並促使苗木有更好的生長。然比較圖3A與圖4A、圖5A可看出泥漿土栽植對地徑及苗高的促進仍比不上對存活率的促進，並在後續計算累積生長量與生長指數時，雖然泥漿土栽植之計算量皆較過篩土栽植高，但兩組別間沒有顯著的差異。由於地徑決定了樹木的支撐 (McMahon 1973; Niklas 1993) 和水分、養分的運送效率 (Bullock 2000)，也影響了地下部的發育，在物質吸收的能力上，影響光合作用的速率，進而成為新植苗木能否存活之關鍵 (Burdett 1990)。從圖4A可看到，在最後一次調查 (2021-04) 中，泥漿土栽植之苗木地徑 (46.6 mm) 較過篩土栽植者 (41.7 mm) 高，雖然在Two-way ANOVA分析中無顯著差異，但在大多季數所調查到的苗木地徑中，泥漿土栽植之苗木平均值皆大於過篩土栽植者，表示泥漿土種植在武陵廢耕地

對苗木的適應有良好的幫助，無論是提供出栽前期所需之水分，或是讓植穴更爲紮實以增進根系之吸收能力，皆能讓苗木在更優良的環境下生長。苗高直接影響光的捕獲，代表著與鄰近植物間對於光度的競爭能力 (Moles et al. 2009)，雖然因陵廢耕地開闢無遮蔭，較無爭奪陽光之需求，但從圖5A可看到，在最後一次調查 (2021-04) 時，泥漿土栽植之苗木苗高 (280.4 cm) 較過篩土栽植者 (266.8 cm) 高，雖然分析時亦無顯著差異，但如同地徑之趨勢，在大多季數中所調查到的苗高，泥漿土栽植之苗木苗高平均值皆較過篩土栽植者大，顯示出利用泥漿土栽植之臺灣赤楊苗木，種植後適應較爲良好，在攝取水分及養分、光合作用、抵抗逆境等能力表現較過篩土栽植者優良。接著本研究以極簡化材積算式將「地徑 × 苗高」後，減去前一季的「地徑 × 苗高」，用來代表爲該兩季間的苗木生長指數 (GI) (參考de Steven (1991)、Quintana-Ascencio et al. (2004)、Mangueira et al. (2019) 和邱清安 (2019) 等進行修訂)，而經過3年所累積之累積生長指數AGI (圖6A)，如同地徑與苗高之趨勢，泥漿土栽植之苗木AGI (12,992.9) 較過篩土栽植者 (11,134.2) 高，雖然分析亦沒有顯著差異，但所有季數的調查中泥漿土栽植之苗木AGI皆較過篩土栽植者高，表示在地徑與苗高的綜合表現中，泥漿土栽植之苗木地徑與苗高的生長表現較過篩土栽植者良好。

在敷蓋實驗中，地徑生長的部分 (圖4B) 在最後一次調查 (2021-04) 中，敷蓋泥炭土之苗木地徑 (45.4 mm) 相對敷蓋生物炭 (44.0 mm) 及無敷蓋物者 (43.8 mm) 高，顯示使用泥炭土進行敷蓋可約略提升苗木的地徑生長。然而在出栽後至2020-04之前，共2年時間，三者之地徑差異極小，可能表示由於敷蓋的介質量不

足，對苗木所造成的促進作用微小，僅能於第1季之存活率顯示效果 (圖3B)，對於生長並無顯著幫助；在2020-04後，泥炭土之效益才小幅度顯現，其作用可能是經過2年的分解後，泥炭土之養分滲入植穴之土壤，讓苗木根系獲取額外的養分。而生物炭不易分解，其促進的效益較不明顯，加上生物炭屬鹼性 (謝祖彬等 2011) 可能加劇苗木所受之pH逆境，不過在無法確切得知生物炭對苗木有何影響的情況下，其地徑的生長趨勢則與無敷蓋物者相近。在圖5B苗高生長與圖4B地徑變化具相同變化趨勢，於2020-04前3組差異極小，2020-04以後至最後一次監測2021-04時，敷蓋泥炭土之苗木苗高 (292.2 cm) 生長較敷蓋生物炭 (264.8 cm) 及無敷蓋物者 (264.1 cm) 高。由於敷蓋僅於植穴及周圍鋪撒介質，對苗木高度沒有直接影響，但地下部及地徑的發育代表水分及養分獲取、傳輸之能力 (Bullock 2000)，將進而影響苗木光合作用與苗高生長之能力 (Burdett 1990)，因此敷蓋泥炭土除了較敷蓋生物炭或無敷蓋物有較佳的地徑生長，對於苗高生長亦有部份的幫助。在計算累積生長指數AGI後 (圖6B)，於最後一次調查 (2021-04) 中敷蓋泥炭土之苗木AGI (13,253.3) 高於敷蓋泥炭土 (11,773.3)、無敷蓋物者 (11,341.6)，配合地徑 (圖4B) 與苗高 (圖5B) 比較，敷蓋泥炭土之苗木地徑與苗高在2020-04時相較其他兩組有較大幅度的生長，導致在計算AGI時有較良好的表現，表示敷蓋泥炭土對於苗木生長較敷蓋生物炭或無敷蓋物有較優良之表現。

(四) 植穴土壤與敷蓋對造林表現之影響

本研究利用地徑與苗高計算出生長指數 (GI) 與累積生長指數 (AGI) 後，發現雖然GI及AGI可以代表單株苗木於現地之生長狀況，但較無法表現於整體的造林表現，因此在計算各

季GI的同時，加入當季的苗木存活率SP以換算成各季的造林表現指數(PI)，並從出栽時開始計算累積表現指數(API)，因其綜合存活及生長測量之特性，藉此表達不同處理之苗木性能，以顯示出栽後的造林表現(圖7A~C)。

在植穴土壤實驗中，經3年監測於最後一次調查(2021-04)後，泥漿土栽植之苗木API(9,079.4)較過篩土栽植者(6,315.9)高(圖7A)，經Two-way ANOVA分析後顯示具有顯著性($p=0.019$) (表4)，接著進行主效果分析後，發現在無敷蓋物及敷蓋生物炭的條件下泥漿土栽植的API是顯著較過篩土栽植高($M+N=7,798.8 > S+N=5,282.2$, $M+B=10,409.1 > S+B=4,417.0$)，雖然在敷蓋泥炭土的情況無顯著差異，但泥漿土栽植($M+P=8,720.3$)亦高於過篩土栽植($S+P=8,446.7$) (圖7C、表4)。從圖3A~6A可看到，組別M無論在存活率、地徑或苗高的表現皆較組別S佳，但從表3顯示，植穴土壤實驗中苗木的SP、D、H、 $A\Delta D$ 、 $A\Delta H$ 、AGI等植物參數在兩實驗組別中均無顯著差異，然綜合SP及GI後，在API的數值上呈現顯著差異，表示使用泥漿土進行苗木出栽時，雖然在3年內分別對於存活及生長的效益並未達顯著，但在綜合後的造林表現中，泥漿土栽植較過篩土栽植更為優良。從單純主效果分析中，發現顯著差異發生在無敷蓋物及敷蓋生物炭的組別中，從圖7C中可見敷蓋泥炭土之S+P及M+P的API相差較近，同時在敷蓋實驗中敷蓋泥炭土之苗木存活、生長與綜合表現較無敷蓋物及敷蓋生物炭略佳(圖3B~7B)，表示敷蓋泥炭土對苗木的逆境有較大程度的改善，可能因此減小不同植穴土壤所帶來之效益，然而在無敷蓋物組及敷蓋生物炭組中，苗木逆境較強烈，因此使用泥漿土栽植的效益更加明顯，致使在API中才顯現統計之顯著性。

在敷蓋實驗中，最後一次調查(2021-04)時，敷蓋泥炭土之苗木API(8,583.46)較敷蓋生物炭(8,162.1)與無敷蓋物者(6,670.7)高(圖5B)，經Two-way ANOVA與主效果分析後發現，在過篩土栽植的條件下敷蓋泥炭土的苗木造林表現較無敷蓋物及敷蓋生物炭兩者佳($S+P=8,446.7 > S+N=5,282.2$, $S+P=8,446.7 > S+B=4,417.0$) (圖5C、表4)。從圖3A~7A可看出在植穴土壤實驗中泥漿土栽植之苗木存活、生長與綜合表現較過篩土栽植者佳，表示在泥漿土栽植減小植物逆境的情況下，導致泥漿土栽植中，三者敷蓋組別(M+N、M+B及M+P)之間並無顯著差異。然而在過篩土栽植之組別中，泥漿土栽植且敷蓋泥炭土(S+P)的API顯著高於另外兩組。表示雖然不同的敷蓋處理在SP、D、H、 $A\Delta D$ 、 $A\Delta H$ 、AGI等植物參數中並無顯著差異，但綜合存活及生長的指數API仍可表現其影響。接著利用單純主效果分析後發現，在敷蓋實驗中僅有利用過篩土栽植的三組具有顯著差異($S+P > S+N$ 、 $S+P > S+B$)，而泥漿土栽植之三組則無(表4)，雖然無法得知植穴土壤實驗與敷蓋實驗之間的交互作用為何，但從敷蓋之顯著性皆發生於過篩土栽植的情況下，加上敷蓋生物炭因不同的植穴土壤而在API的綜合分析中呈現兩極端的數值(過篩土栽植且敷蓋生物炭(S+B)之API為4,417.0是6組最低者，而泥漿土栽植且敷蓋生物炭(M+B)之API為10,409.1則為6組最高)，且在綜合分析時使用泥漿土栽植之組別(M+N、M+B及M+P)的存活率、地徑、苗高...等植物參數大多較過篩土栽植之組別(S+N、S+B、S+P)高(圖3~圖7)，由此推測植穴土壤實驗的影響較敷蓋實驗大，當使用泥漿土栽植時可改善部分逆境，導致敷蓋的效果相對不明顯或遭到抵銷。而目前雖然尚不了解敷蓋物對於苗木

之作用為何，然在使用過篩土栽植苗木時，敷蓋泥炭土可在嚴重惡劣的環境下減小逆境對於苗木的危害。

五、結論

本研究為改善臺灣中海拔廢耕地之造林成效，以重要復育樹種-臺灣赤楊為實驗對象進行栽植方法之改良。在武陵廢耕地上栽植赤楊苗木，以過篩土栽植赤楊即可比以原有石礫土栽植苗木大幅增加存活率，而將過篩土加水製成泥漿土可再提升存活及生長，使用敷蓋物亦有類似效果，且泥炭土略優於生物炭；雖然不同的植穴土壤與敷蓋對苗木存活及生長僅略有助益，而未達統計上之顯著差異水準，但由於造林表現係為苗木之存活率及其生長的整體共同成效，於統計上植穴土壤改良再加上敷蓋的造林表現即達顯著差異水準。最後，本文建議在土壤多石礫的武陵廢耕地上栽植臺灣赤楊，首要步驟為篩除植穴土壤中之石礫，即可大幅提升苗木存活率，此為一最小人力介入 (minimum intervention) (Prach & Hobbs 2008) 之方法，另可再依造林成本考量酌予增加打漿及敷蓋等措施，實施精準森林復育 (precision forest restoration) (Castro et al. 2021) 來確保栽植的苗木可順利成長為樹木。

致謝

本文係雪霸國家公園「恢復武陵廢耕地之森林生態系：復育對策與實踐」計畫成果之一部分，感謝雪霸國家公園管理處提供經費及同仁之協助。在調查過程中感謝黃淨微、楊育如等諸多同學之協助，謹致以衷謝忱！

五、引用文獻

- Aide TM, Grau HR (2005) Globalization, migration, and Latin American ecosystems. *Science* 305: 1915-1916.
- Alvarez-Aquino C, Williams-Linera G, Newton AC (2004) Experimental native tree seedling establishment for the restoration of a Mexican cloud forest. *Restoration Ecology* 12(3): 412-418.
- Bakker JD, Colasurdo LB, Evans JR (2012) Enhancing garry oak seedling performance in a semiarid environment. *Northwest Science* 86(4): 300-309.
- Bautista S, Robichaud PR, Blade C (2009) Post-fire Mulching. In: Cerda A, Robichaud PR (eds) *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies*. Science Publishers, Inc., USA, pp 353-372.
- Benayas JR, Martins A, Nicolau JM, Schulz JJ (2007) Abandonment of agricultural land: an overview of drivers and consequences. *CAB reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 2(57): 1-14.
- Bullock SH (2000) Developmental patterns of tree dimensions in a Neotropical deciduous forest. *Biotropica* 32(1): 42-52.
- Burdett AN (1990) Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Canadian Journal of Forest Research* 20(4): 415-427.
- Castro J, Morales-Rueda F, Navarro FB, Lof M, Vacchiano G, Alcaraz-Segura D (2021) Precision restoration: a necessary approach to foster forest recovery in the 21st century. *Restoration Ecology* 29(7): e13421.
- Ceacero CJ, Diaz-Hernandez JL, Del Campo AD, Navarro-Cerrillo RM (2012)

- Interactions between soil gravel content and neighboring vegetation control management in oak seedling establishment success in Mediterranean environments. *Forest Ecology and Management* 271: 10-18.
- Chirino E, Vilagrosa A, Cortina J, Valdecantos A, Fuentes D, Trubat R, Luis VC, Puertolas J, Bautista S, Baeza MJ, Penuelas JL, Vallejo VR (2009) Ecological restoration in degraded drylands: the need to improve the seedling quality and site conditions in the field. In: Steven P (ed) *Forest Management*. Nova Science Publishers, New York, pp 85-158.
- de Steven D (1991) Experiments on mechanisms of tree establishment in old-field succession: Seedling survival and growth. *Ecology* 72(3): 1076-1088.
- Dostalek J, Weber M, Matula S, Frantik T (2007) Forest stand restoration in the agricultural landscape: the effect of different methods of planting establishment. *Ecological Engineering* 29: 77-86.
- Fagundes M, Weisser W, Ganade G (2018) The role of nurse successional stages on species-specific facilitation in drylands: nurse traits and facilitation skills. *Ecology and Evolution* 8(10): 5173-5184.
- Gomez-Aparicio L, Zamora R, Gomez JM, Hodar JA, Castro J, Baraza E (2004) Applying plant facilitation to forest restoration: a meta-analysis of the use of shrubs as nurse plants. *Ecological Applications* 14(4): 1128-1138.
- Gonzalez-Tokman DM, Barradas VL, Boege K, Dominguez CA, del-Val E, Saucedo E, Martinez-Garza C (2018) Performance of 11 tree species under different management treatments in restoration plantings in a tropical dry forest. *Restoration Ecology* 26(4): 642-649.
- Haywood JD (2000) Mulch and hexazinone herbicide shorten the time long-life pine seedlings are in the grass stage and increase height growth. *New Forests* 19(3): 279-290.
- Hueso-Gonzalez P, Martinez-Murillo JF, Ruiz-Sinoga JD (2017) Benefits of straw and pinus mulch as forest management practices in Mediterranean forests. *Geographical Research Letters* 43(1): 189-208.
- Jimenez MN, Fernandez-Ondono E, Ripoll MA, Castro-Rodriguez J, Huntsinger L, Navarro FB (2016) Stones and organic mulches improve the *Quercus ilex* L. afforestation success under Mediterranean climatic conditions. *Land Degradation & Development* 27(2): 357-365.
- Jimenez MN, Pinto JR, Ripoll MA, Sanchez-Miranda A, Navarro FB (2017) Impact of straw and rock-fragment mulches on soil moisture and early growth of holm oaks in a semiarid area. *Catena* 152: 198-206.
- Katra I, Lavee H, Sarah P (2008) The effect of rock fragment size and position on topsoil moisture on arid and semi-arid hillslopes. *Catena* 72(1): 49-55.
- Ma Q, Huang JG, Hanninen H, Berninger F (2019) Divergent trends in the risk of spring frost damage to trees in Europe with recent warming. *Global Change Biology* 25(1): 351-360.
- Mangueira JRS, Holl KD, Rodrigues RR (2019) Enrichment planting to restore degraded tropical forest fragments in Brazil.

- Ecosystems and People 15(1): 3-10.
- McMahon TA (1973) Size and shape in biology. *Science* 179: 1202-1204.
- Mellor GE, Keller RA, Tregunna EB (1971) Studies of moisture status and storage conditions of spring-lifted, mud-packed douglas-fir seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 1(4): 223-227.
- Metselaar K, de Jong van Lier Q (2011) Scales in single root water uptake models: a review, analysis and synthesis. *European Journal of Soil Science* 62(5): 657-665.
- Miyawaki A (1993) Restoration of native forest from Japan to Malaysia. In: Lieth H, Lohmann M (eds) *Restoration of Tropical Forest Ecosystems*. Kluwer Academic, Dordrecht, Netherlands, pp 5-24.
- Moles AT, Warton DI, Warman L, Swenson NG, Laffan SW, Zanne AE, Pitman A, Hemmings FA, Leishman M (2009) Global patterns in plant height. *Journal of Ecology* 97(5): 923-932.
- Niklas KJ (1993) The scaling of plant height: A comparison among major plant clades and anatomical grades. *Annals of Botany* 72(2): 165-172
- Padilla F, Pugnaire FI (2007) Rooting depth and soil moisture control Mediterranean woody seedling survival during drought. *Functional Ecology* 21(3): 489-495.
- Paruelo JM, Aguiar MR, Golluscio RA (1987) Soil water availability in the Patagonian arid steppe: gravel content effect. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 2(1): 67-74.
- Patil SS, Kelkar TS, Bhalerao SA (2013) Mulching: A soil and water conservation practice. *Research Journal of Agriculture and Forestry Sciences* 1(3): 26-29.
- Pinto JR, Marshall JD, Dumroese RK, Davis AS, Cobos DR (2016) Seedling establishment and physiological responses to temporal and spatial soil moisture changes. *New Forests* 47(2): 223-241.
- Prach K, Hobbs RJ (2008) Spontaneous succession versus technical reclamation in the restoration of disturbed sites. *Restoration Ecology* 16(3): 363-366.
- Quintana-Ascencio PF, Ramirez-Marcial N, Gonzalez-Espinosa M, Martinez-Ico M (2004) Sapling survival and growth of coniferous and broad-leaved trees in successional highland habitats in Mexico. *Applied Vegetation Science* 7(1): 81-88.
- Schmidt S, Bengough AG, Gregory PJ, Grinev DV, Otten W (2012) Estimating root-soil contact from 3D X-ray microtomographs. *European Journal of Soil Science* 63(6): 776-786.
- Siles G, Rey PJ, Alcantara JM, Bastida JM, Herreros JL (2010) Effects of soil enrichment, watering and seedling age on establishment of Mediterranean woody species. *Acta Oecologica* 36(4): 357-364.
- Silva RR, Vieira DL (2017) Direct seeding of 16 Brazilian savanna trees: Responses to seed burial, mulching and an invasive grass. *Applied Vegetation Science* 20(3): 410-421.
- Tailong G, Qianjiu W, Kingqiang L, Zhuang J (2010) Effect of surface stone cover on sediment and solute transport on the slope off alluvial land in the semi-arid loess region of northwestern China. *Journal of Soils and*

- Sediments 10(6): 1200-1208.
- Truax JR, Gagnon D (1993) Effect of straw and black plastic mulching in the initial growth and nutrition of butternut, white ash and bur oak. *Forest Ecology and Management* 57(1-4): 17-27.
- Valliere JM, Zhang J, Sharifi MR, Rundel PW (2019) Can we condition native plants to increase drought tolerance and improve restoration success? *Ecological Applications* 29(3): e01863.
- Van Noordwijk M, Schoonderbeek D, Kooistra MJ (1993) Root-soil contact of field-grown winter wheat. *Geoderma* 56: 277-286.
- Zohner CM, Mo L, Renner SS, Svenning JC, Vitasse Y, Benito BM, Ordonez A, Baumgarten F, Bastin JF, Sebald V, Reich PB, Liang J, Nabuurs GJ, de-Miguel S, Alberti G, Anton-Fernandez C, Balazy R, Brandli UB, Chen HYH, Chisholm C, Cienciala E, Dayanandan S, Fayle TM, Frizzera L, Gianelle D, Jagodzinski AM, Jaroszewicz B, Jucker T, Kepfer-Rojas S, Khan ML, Kim HS, Korjus H, Johannsen VK, Laarmann D, Lang M, Zawila-Niedzwiecki T, Niklaus PA, Paquette A, Pretzsch H, Saikia P, Schall P, ?ebe? V, Svoboda M, Tikhonova E, Viana H, Zhang C, Zhao X, Crowther TW (2020) Late-spring frost risk between 1959 and 2017 decreased in North America but increased in Europe and Asia. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117(22): 12192-12200.
- 行政院農業委員會林務局 (2011) 育林手冊。行政院農業委員會。
- 吳長銓 (2012) 杉木苗根系打泥漿造林試驗研究。安徽農業通報 18(15): 126-127。
- 谷婉萍 (2016) 不同敷蓋資材對菜豆 (*Phaseolus vulgaris* L.) 生育與產量之影響。國立中興大學土壤環境科學系所碩士論文。
- 邱清安 (2019) 恢復武陵廢耕地之森林生態：復育對策與實踐。雪霸國家公園管理處委託辦理計畫成果報告。
- 邱清安、徐憲生 (2015) 面對退化地之抉擇：被動的自生演替恢復vs. 主動的人為生態復育。林業研究季刊 37(2): 85-98。
- 邱清安、郭嘉宜、柯志憲、賴宜鈴、徐憲生 (2019) 臺灣赤楊於武陵廢耕地造林之新途徑：苗坑凹植法與復育策略。林業研究季刊 41(1): 49-64。
- 邱清安、鄒裕民、吳正宗、顏江河、蔡尚惠 (2016) 武陵廢耕地之森林生態復育。雪霸國家公園管理處委託辦理計畫成果報告。
- 袁海龍、楊才剛 (2006) 棕櫚大樹栽植試驗研究。安徽農業科學 34(24): 6500-6502。
- 張德才、朱曉紅 (2006) 楊樹大苗栽植應用"大水泥漿法"新技術促成活。遼寧農業職業技術學院學報 8(3): 34。
- 郭耀綸、葉慶龍 (2015) 臺灣180種原生闊葉樹種光合潛力及耐陰性。臺灣林業科學 30(4): 229-243。
- 黃作舟 (2011) 木荷裸根苗根系打泥漿造林試驗。綠色科技 7: 52-53。
- 廖天賜 (1998) 臺灣赤楊生態生理基礎之研究。國立中興大學植物學系博士論文。
- 潘曉 (2005) 不同栽植模式對"渭北旱腰帶"楊坡造林成活率的影響。陝西林業科技 2: 15-17。
- 謝祖彬、劉琦、許燕萍、朱春悟 (2011) 生物炭研究進展及其研究方向。土壤 43(6): 857-861。