

行政院農業委員會林務局委託研究計畫系列 01-00-5-01

菌根菌應用於崩塌地復舊造林之研究

**Study on the Application of Mycorrhizal Fungus
in Landslide Reforestation**



委託機關：行政院農業委員會林務局

執行機關：國立嘉義大學

中華民國 102 年 5 月 28 日

摘要

近年來由於氣候變遷瞬間雨量暴增，導致林地崩塌引發嚴重土石流災害，造成國家社會的重大損失。因此，崩塌地復舊造林為當前國土保安的重要課題。本研究於台南南化地區的山坡崩塌地設定試驗樣區，進行土壤特性分析，篩選菌根菌培育菌根苗，並進行崩塌地整治及復舊造林試驗，以提高造林成活率並增進苗木的生長，達到植生復育的目標。自各樹種生育地土壤分離及鑑定後之叢枝菌根菌有台灣欒 (*Zelkova formosana* Hay.) 之 *Glomus mosseae*、*Acaulospora morrowiae*、*G. occultum*；光蠟樹 (*Fraxinus formosana* Hay.) 之 *G. mosseae*、*A. morrowiae*、*A. tuberculata*、*G. etunicatum*、*G. occultum*；苦楝 (*Melia azedarach* L.) 之 *G. mosseae*、*A. morrowiae*、*A. scrobiculata*、*A. tuberculata*、*Entrophospora kentinensis*、*G. occultum*。3 處試驗樣區之不同接種處理對台灣欒、光蠟樹、苦楝、赤楊苗木造林 6 個月後之生長效應，在苗高及根頸直徑淨生長量上第 3 樣區之赤楊苗木接種較未接種者低，呈顯著差異；3 處崩塌地試驗樣區復舊造林苗木之成活率，分析結果顯示，第 1 試驗樣區除台灣欒接種組與對照組成活率均呈 100% 外，苦楝及光蠟樹對照組均高於接種組，赤楊則以接種組有較高之成活率；第 2 試驗樣區除苦楝對照組成活率高於接種組外，其餘樹種之成活率均以接種組高於或等於對照組；第 3 試驗樣區除台灣欒對照組之成活率高於接種組外，其餘樹種之成活率均以接種組較高。網室試驗結果顯示在葉片數與全株乾重上，光蠟樹接種組顯著高於對照組；而苦楝之總葉面積亦以接種組顯著高於對照組。網室試驗與崩塌地第 1 試驗樣區試驗結果顯示，苦楝接種組之葉綠素 a、葉綠素 b、葉綠素 a + b 含量上均顯著高於對照組。網室試驗與崩塌地第 1 試驗樣區苗木經不同接種處理之結果顯示，各接種組之葉部氣孔密度均顯著高於對照組。

【關鍵字】台灣欒、光蠟樹、苦楝、赤楊、菌根菌、崩塌地

目錄

摘要.....	I
目錄.....	II
圖目錄.....	IV
表目錄.....	VI
I、前言.....	1
II、材料與方法.....	1
(I) 試驗樣區.....	1
(II) 研究材料.....	3
(III) 研究方法.....	4
III、結果.....	10
(I) 嘉義林區管理處玉井工作站轄區之玉井事業區3處崩塌地土壤化學性質..	10
(II) 各樹種生育地叢枝菌根菌分離及鑑定.....	14
(III) 網室接種 <i>Glomus mosseae</i> 對台灣櫟、光蠟樹、苦楝、赤楊苗木生長之效應..	18
(IV) 嘉義林區管理處玉井工作站3處試驗樣區之不同接種處理對台灣櫟、光蠟 樹、苦楝、赤楊苗木造林6個月後之生長效應.....	20
(V) 葉面積及乾重.....	26
(VI) 葉片形質.....	27
(VII) 生理特性測定.....	29
(VIII) 生長介質之化學性質分析.....	43
(IX) 根部解剖觀察分析.....	46
(X) 嘉義林區管理處玉井工作站之玉井事業區3處崩塌地造林前植被調查.....	52
(XI) 嘉義林區管理處玉井工作站之玉井事業區3處崩塌地造林後植被調查.....	54
IV、討論.....	55
(I) 苗高及根頸直徑之生長.....	55
(II) 苗木成活率及抗旱性.....	56
(III) 苗木生理特性觀察.....	57
(IV) 植物體各部位氮、磷、鉀、鈣及鎂含量.....	57
(V) 試驗苗木生長介質之化學性質分析.....	58
(VI) 叢枝菌根菌對苗木根部構造觀察.....	59

V、結論.....	59
VI、致謝.....	60
VII、參考文獻.....	60
期中報告委員意見回覆表.....	64

圖目錄

圖 1 玉井事業區 3 處崩塌地之衛星、現場影像.....	2
圖 2 赤楊之根瘤.....	5
圖 3 崩塌地造林前之植群整治情形.....	6
圖 4 <i>Glomus mosseae</i> 孢子形態.....	15
圖 5 <i>Acaulospora morrowiae</i> 孢子形態.....	16
圖 6 <i>Glomus occultum</i> 孢子形態.....	16
圖 7 <i>Acaulospora tuberculata</i> 孢子形態.....	16
圖 8 <i>Glomus etunicatum</i> 孢子形態.....	17
圖 9 <i>Acaulospora scrobiculata</i> 孢子形態.....	17
圖 10 <i>Entrophospora kentinensis</i> 孢子形態.....	17
圖 11 不同接種處理台灣檫苗木 7 個月後之生長情形.....	19
圖 12 不同接種處理光蠟樹苗木 7 個月後之生長情形.....	19
圖 13 不同接種處理苦楝苗木 7 個月後之生長情形.....	20
圖 14 第 1 試驗樣區造林苗木 6 個月後之生長情形.....	22
圖 15 第 2 試驗樣區造林苗木 6 個月後之生長情形.....	22
圖 16 第 3 試驗樣區造林苗木 6 個月後之生長情形.....	22
圖 17 台灣檫對照組苗木之光反應曲線.....	29
圖 18 台灣檫接種組苗木之光反應曲線.....	29
圖 19 光蠟樹對照組苗木之光反應曲線.....	30
圖 20 光蠟樹接種組苗木之光反應曲線.....	30
圖 21 苦楝對照組苗木之光反應曲線.....	31
圖 22 苦楝接種組苗木之光反應曲線.....	31
圖 23 網室苗木葉部氣孔密度之微細構造.....	33
圖 24 崩塌地第 1 試驗樣區苗木葉部氣孔密度之微細構造.....	34

圖 25 網室苗木葉部氣孔形態之微細構造.....	35
圖 26 崩塌地第 1 試驗樣區苗木葉部氣孔形態之微細構造.....	36
圖 27 對照組台灣檫苗木根部組織之染色情形.....	47
圖 28 接種 <i>Glomus mosseae</i> 7 個月後台灣檫苗木根部組織之染色情形.....	47
圖 29 對照組台灣檫苗木根部組織之微細構造.....	48
圖 30 接種 <i>Glomus mosseae</i> 7 個月後台灣檫苗木根部組織之微細構造.....	48
圖 31 對照組光臘樹苗木根部組織之染色情形.....	49
圖 32 接種 <i>Glomus mosseae</i> 7 個月後光臘樹苗木根部組織之染色情形.....	49
圖 33 對照組光臘樹苗木根部組織之微細構造.....	50
圖 34 接種 <i>Glomus mosseae</i> 7 個月後光臘樹苗木根部組織之微細構造.....	50
圖 35 對照組苦楝苗木根部組織之染色情形.....	51
圖 36 接種 <i>Glomus mosseae</i> 7 個月後苦楝苗木根部組織之染色情形.....	51
圖 37 對照組苦楝苗木根部組織之微細構造.....	52
圖 38 接種 <i>Glomus mosseae</i> 7 個月後苦楝苗木根部組織之微細構造.....	52

表目錄

表 1 第 1 試驗樣區腐植層 (OA 層) 與土壤層 (AB 層) 之各項養分元素 Tukey 檢 定.....	11
表 2 第 2 試驗樣區腐植層 (OA 層) 與土壤層 (AB 層) 之各項養分元素 Tukey 檢 定.....	12
表 3 第 3 試驗樣區腐植層 (OA 層) 與土壤層 (AB 層) 之各項養分元素 Tukey 檢 定.....	13
表 4 3 處崩塌地試驗樣區腐植層 (OA 層) 之各項養分元素 Tukey 檢定.....	13
表 5 3 處崩塌地試驗樣區土壤層 (AB 層) 之各項養分元素 Tukey 檢定.....	14
表 6 各樹種生育地分離之叢枝菌根菌種名稱.....	15
表 7 不同接種處理 3 種苗木 7 個月後苗高及根頸直徑生長之獨立樣本 t 檢定..	18
表 8 第 1 試驗樣區不同接種處理四種造林樹種苗木 6 個月後苗高及根頸直徑生 長之獨立樣本 t 檢定.....	23
表 9 第 2 試驗樣區不同接種處理四種造林樹種苗木 6 個月後苗高及根頸直徑生 長之獨立樣本 t 檢定.....	24
表 10 第 3 試驗樣區不同接種處理四種造林樹種苗木 6 個月後苗高及根頸直徑生 長之獨立樣本 t 檢定.....	25
表 11 不同試驗樣區復舊造林苗木之成活率.....	25
表 12 網室內不同接種處理苗木總葉面積、葉片數、全株乾重之獨立樣本 t 檢 定.....	26
表 13 崩塌地第 1 試驗樣區不同接種處理苗木總葉面積、葉片數、全株乾重之獨 立樣本 t 檢定.....	27
表 14 網室內不同接種處理苗木葉面積比、比葉面積、葉重量比之獨立樣本 t 檢 定.....	28
表 15 崩塌地第 1 試驗樣區不同接種處理苗木葉面積比、比葉面積、葉重量比之	

獨立樣本 t 檢定.....	28
表 16 網室內不同接種處理苗木葉綠素 a、葉綠素 b、葉綠素 a+b 含量之獨立樣本 t 檢定.....	32
表 17 崩塌地第 1 試驗樣區不同接種處理苗木葉綠素 a、葉綠素 b、葉綠素 a+b 含量之獨立樣本 t 檢定.....	32
表 18 網室及崩塌地第 1 試驗樣區不同接種處理苗木之葉部氣孔形態、密度之獨立樣本 t 檢定.....	37
表 19 網室內不同接種處理苗木各部位氮濃度之獨立樣本 t 檢定.....	38
表 20 網室內不同接種處理苗木各部位磷濃度之獨立樣本 t 檢定.....	38
表 21 網室內不同接種處理苗木各部位鉀濃度之獨立樣本 t 檢定.....	39
表 22 網室內不同接種處理苗木各部位鈣濃度之獨立樣本 t 檢定.....	39
表 23 網室內不同接種處理苗木各部位鎂濃度之獨立樣本 t 檢定.....	40
表 24 崩塌地第 1 試驗樣區不同接種處理苗木各部位氮濃度之獨立樣本 t 檢定.....	40
表 25 崩塌地第 1 試驗樣區不同接種處理苗木各部位磷濃度之獨立樣本 t 檢定.....	41
表 26 崩塌地第 1 試驗樣區不同接種處理苗木各部位鉀濃度之獨立樣本 t 檢定.....	41
表 27 崩塌地第 1 試驗樣區不同接種處理苗木各部位鈣濃度之獨立樣本 t 檢定.....	42
表 28 崩塌地第 1 試驗樣區不同接種處理苗木各部位鎂濃度之獨立樣本 t 檢定.....	42
表 29 網室苗木生長介質與崩塌地第 1 試驗樣區土壤酸鹼值之獨立樣本 t 檢定..	43
表 30 網室苗木生長介質與崩塌地第 1 試驗樣區土壤氮含量之獨立樣本 t 檢定..	44
表 31 網室苗木生長介質可置換性陽離子濃度之獨立樣本 t 檢定.....	45

表 32 崩塌地第 1 試驗樣區苗木土壤可置換性陽離子濃度之獨立樣本 t 檢 定.....	45
表 33 網室試驗苗木生長介質與崩塌地第 1 試驗樣區土壤有效磷含量之獨立樣本 t 檢定.....	46
表 34 第 1 試驗樣區之造林前植被名錄.....	53
表 35 第 2 試驗樣區之造林前植被名錄.....	53
表 36 第 3 試驗樣區之造林前植被名錄.....	54
表 37 第 1 試驗樣區之造林後植被名錄.....	54
表 38 第 2 試驗樣區之造林後植被名錄.....	55
表 39 第 3 試驗樣區之造林後植被名錄.....	55

I、前言

近年來由於氣候變遷瞬間雨量暴增，導致林地崩塌引發嚴重土石流災害，造成國家社會的重大損失。因此，崩塌地復舊造林為當前國土保安的重要課題。

本研究於台南南化地區的山坡崩塌地設定試驗樣區，進行土壤特性分析，篩選菌根菌培育菌根苗，並進行崩塌地整治及復舊造林試驗，以提高造林成活率並增進苗木的生長，達到植生復育的目標。

有鑑於崩塌地土壤質地多為砂礫土，保水力差且肥力貧瘠，導致造林苗木輒因乾旱而枯死，或因養分缺乏而生長遲緩無法與雜草競爭，終致造林失敗。因此本研究篩選優勢菌根菌種接種至本土造林樹種苗木，以培育優質菌根苗作為崩塌地復舊造林的材料，以期改進崩塌地造林技術，恢復崩塌地森林生態，增進國土保安的功效。

研究內容包括於林務局嘉義林區管理處轄區的崩塌地設定試驗樣區，採取土壤樣本分析土壤的物理和化學性質；挖取土壤以濕篩傾倒法 (wet sieving and decanting method) 及糖液梯度法 (sucrose density gradient centrifugation) (Daniels and Skipper, 1982) 分離鑑定內生菌根菌種類，並繁殖優勢菌根菌；接種菌根菌至苦楝 (*Melia azedarach* Linn)、光蠟樹 (*Fraxinus formosana* Hayata)、台灣檫 (*Zelkova formosana* Hayata) 及赤楊 (*Alnus formosana*) 苗木以培育菌根苗，並分析菌根菌對苗木生長的效應；規劃適宜的崩塌地整治方法；將菌根苗栽植至崩塌地進行復舊造林試驗；調查分析造林苗木的成活率、生長量、及生理特性；及評估菌根菌應用於崩塌地復舊造林的效益。

II、材料與方法

(I) 試驗樣區

1. 崩塌地之地點

選定林務局嘉義林區管理處玉井工作站轄區之玉井事業區 3 處崩塌地作為試驗地點，第 1 樣區經緯座標 120°35'16"E, 23°08'22"N，海拔高 313 m；第 2 樣區

經緯座標 120°34'50"E, 23°09'04"N, 海拔高 224 m; 第 3 樣區經緯座標 120°34'46"E, 23°09'09"N, 海拔高 235 m。本試驗採用長方形固定面積樣區 50 m × 40 m, 面積 0.2 ha, 共 3 處 (圖 1)。



圖 1 玉井事業區 3 處崩塌地之衛星、現場影像

2. 調查並分析崩塌地土壤性質

(1) 自崩塌地採取土壤樣本，共採取兩層，分別為土壤深度 0-10 cm 之腐植層 (OA 層) 及深度 10-20 cm 之土壤層 (AB 層)，並進行下列化學性質試驗。

a. 土壤酸鹼值測定

將土壤風乾、以 20 mesh 孔徑篩網過篩，取出 10 g 土壤樣本加入 20 ml 純水 (重

量比 1:2)，震盪 30 min，並靜置懸浮液 30 min，使懸浮之土壤樣本沉澱，並以酸鹼值測定儀 (Inolab pH Level 2) 測定樣本溶液之酸鹼值 (余旻儒，2010；Mclean, 1982)。

b. 土壤氮含量測定

將土壤過篩、烘乾，取出 1 g 樣本加入 15 ml 濃硫酸過夜 (24h)，再放入消化裝置 (Kjeltec 2020 digester) 加熱到 375 °C 維持 3 h，取出使其降溫 30 min 後加入 10 ml H₂O₂，再加熱到 375 °C，維持 1 h 至樣本呈透明澄清液後過濾之並以蒸餾水定積至 100 ml，取 40 ml 置凱氏氮蒸餾裝置 (2200 Kjeltec Auto Distillation) 內蒸餾，加入適量之 40 % NaOH 溶液，以 30 ml 4 % 硼酸為接收劑，再以 0.1 N H₂SO₄ 溶液滴定之，同時並進行空白試驗，計算出含氮量 (余旻儒，2010；MacDonald, 1977)。

c. 土壤可置換性陽離子濃度測定

以醋酸銨 (NH₄OAc) 法測定，取 5 g 過篩風乾土壤置於 250 ml 角錐瓶中，加入 40 ml 1 N NH₄OAc (pH=7)，震盪 10 min 靜置過夜。抽氣過濾之，以 NH₄OAc 定積至 100 ml，取澄清濾液利用感應耦合電漿原子發射光譜儀 (Inductively coupled plasma atomic emission spectrometer, ICP) 測定可溶解性及可置換性陽離子鉀、鈣、鎂和鈉濃度 (余旻儒，2010；Rhoades, 1982)。

d. 土壤有效磷含量測定

以鉬藍法測定，取 1 g 樣本置於 50 ml 錐形瓶中，加入 7 ml 萃取液 (0.5 N HCl-0.03 N NH₄F) 搖盪 1 min，以 ADVANTEC 5B 濾紙過濾。取 2 ml 樣液加入 5 ml H₂O 及 2 ml (NH₄)₆Mo₇O₂₄ 溶液，混合均勻後加入 1 ml SnCl₂ 稀釋液呈色後，以分光光度計 (Hitachi U-2000 spectrophotometer) 於波長 660 nm 下測定吸光值，比對磷標準曲線得出樣液之磷濃度 (余旻儒，2010；Olsen and Sommer, 1982)。

(II) 研究材料

1. 苗木來源

採集台灣欒、光臘樹、棟樹、及赤楊之種子，以 1 % 次氯酸鈉溶液消毒後，播

種於滅菌之蛭石泥炭土 (1:1, v/v) 中發芽。種子發芽且小苗長至約 5 cm 後，再移植至試驗介質作為苗木來源。

2. 試驗介質及容器

試驗容器為上徑 14 cm，下徑 10.6 cm，高 13.7 cm 之 5 吋盆，育苗介質採用崩塌地土壤，崩塌地土壤經高溫高壓滅菌後，放置在室溫通氣下至少一個星期，以減少因高溫高壓滅菌所產生之毒素 (熊禮明、史瑞和，1994)。

3. 試驗地點

苗木於種植後置放於嘉義大學森林系網室內，以避免試驗期間降雨之干擾。試驗期間溫度範圍 26 ± 4 °C，晴天正午之光合作用光子流密度約為 1000 ± 200 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (許崑衍、李明仁，2005)。

(III) 研究方法

1. 試驗設計

本研究計畫採完全逢機試驗，乃在探討叢枝菌根菌及崩塌地土壤對四種苗木 (台灣檫、光臘樹、棟樹、赤楊) 生長、形態及生理特性之影響。試驗分為：未接種菌根菌-崩塌地土壤 (MOP1)，接種菌根菌-崩塌地土壤 (MIP1) 等 2 種處理。

2. 接種源分離培養

自崩塌地挖取土壤，攜回實驗室，以不同網目 (mesh) (分別為 60-270-400 μm) 組成之篩網組，進行濕篩傾倒法及糖液梯度法分離內生菌根菌孢子。由於水與蔗糖密度之差異可以將孢子和土壤及雜質分離，分離之懸浮液經稀釋後，放置於解剖顯微鏡下將孢子逐一挑出。並以玉米為宿主將此菌根菌孢子以盆鉢培養法 (pot culture) 進行孢子大量繁殖 (許崑衍等，2007)。經二個月後自玉米根部回收孢子，供接種之用。若無法自崩塌地土壤篩選出菌根菌時，則以研究室原來自各樹種生育地篩選出之菌根菌作為接種原。*Frankia* 菌株之分離係取赤楊新鮮根瘤 (圖 2)，先以清水將根瘤沖洗，再以蒸餾水洗淨後，分開根瘤瓣，隨之以超音波震盪清洗後，經 10% 次氯酸鈉殺菌 5 min、75% 酒精 5 min 再以 30% H_2O_2 消毒 5 min 後，再以

無菌水清洗數次，將已消毒之根瘤辦接種於 QMOD 培養基上培養 1 星期 (Lalonde and Calvert, 1979)，若根瘤辦無菌體污染，則取出置入於固態 QMOD 平板培養基培養，待菌落產生後，再以 0.5 cm 採菌器採取菌塊置於液態 QMOD 培養基培養，置於 28 ± 1 °C 之暗相培養箱中培養。

3. 菌根苗培育

苗木於 101 年 8 月進行接種，每盆種植一株苗木，且同時進行接種處理。叢枝菌根菌接種時於苗根部下方放置一折成漏斗狀之濾紙袋，並加入 5 g 叢枝菌根菌孢子沙 (75 ± 12 粒/g) 作為接種原 (彭靖媛、李明仁，2007)；*Frankia* 接種時，苗木接種經活化培養 48 hr 之放線菌菌株懸浮液，每株苗木之接種量為 5 mL。菌根苗培育試驗共有 4 種樹種，2 種處理，每處理 40 株苗木，共 320 株，3 崩塌地樣區總計 960 株苗木。

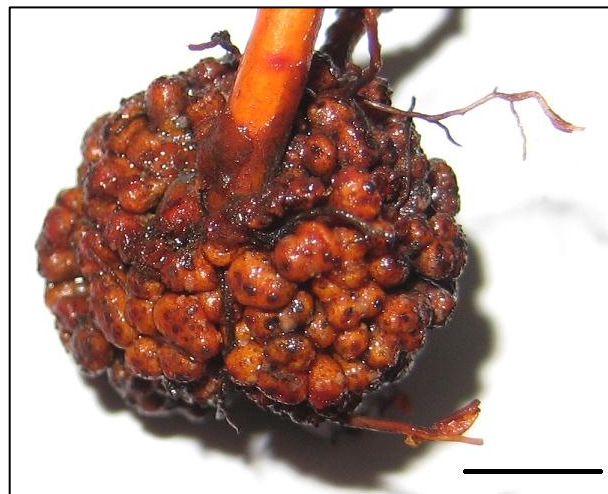


圖 2 赤楊之根瘤 (橫線 = 0.5 cm)

4. 崩塌地復舊造林試驗

- (1) 崩塌地樣區之規劃設置：自崩塌地選定 50×40 m 樣區 3 個，並規劃適宜之整治方法及水土保持措施。
- (2) 崩塌地進行復舊造林試驗：將苗高 30 cm 之菌根苗與非菌根苗栽植至崩塌地試

驗區，進行栽植造林試驗，試驗樹種為 4 種樹種，分菌根苗與非菌根苗栽植距離 $2 \times 2 \text{ m}$ ，並進行除草除蔓等撫育工作 (圖 3)。苗木出栽至崩塌地前，先檢驗苗木根部，確定 (MOP1、M1P1) 菌根菌接種情形。



圖 3 崩塌地造林前之植群整治情形

5. 苗木成活率、生長量調查及生理特性調查

- (1) 造林苗木之成活率：調查崩塌地復舊造林苗木之成活率，分析比較菌根苗與非菌根苗之成活率。
- (2) 生長量 (苗高、根頸直徑)：調查菌根試驗苗木及崩塌地復舊造林苗木之生長量 (苗高、根頸直徑)，供試驗苗木配置後，開始調查苗高、根頸直徑以作為起始值，以後每月量測一次，將測得數值再扣除起始值，以求得每個月之累積淨增長量。調查時注意不傷及葉片，以避免後續苗木生長受到干擾，且為避免每次量測根頸直徑時之誤差，應於根頸直徑量測點作標記。
- (3) 葉面積及乾重：調查菌根試驗苗木及崩塌地復舊造林苗木之葉面積及乾重，每處理測定苗木 4 株。苗木先以葉面積儀 (LI-COR LI-3100) 搭配葉面積儀讀出紀錄主體 (LI-3000A) 量測苗木之葉面積及葉片數量後，再測定苗木乾重。乾重之測定係將苗木以清水沖洗乾淨，將其分為根、莖及葉三部分，稱其鮮重，然後分別放入烘箱內，以 $70 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘乾至恆重，稱取各部位之乾重。
- (4) 葉片形質：調查菌根試驗苗木及崩塌地復舊造林苗木之葉片形質，以 (3) 項破壞取樣之樣苗乾重及葉面積換算葉面積比 (leaf area ratio)、比葉面積

(specific leaf area) 及葉重量比 (leaf weight ratio) 等參數，並予以比較各處理之效應。

葉面積比 (LAR) = 葉面積/苗木乾重 ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$)

比葉面積 (SLA) = 葉面積/葉乾重 ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$)

葉重量比 (LWR) = 葉乾重/苗木乾重 (g g^{-1})

6. 生理特性測定：調查菌根試驗苗木及崩塌地復舊造林苗木之生理特性
- (1) 淨光合速率：試驗結束後，於每處理測定 3 株苗木，樣本選取其主梢頂端向下第三或四片已完全展開之成熟葉片進行淨光合速率測定。除測定光合速率之葉片外，其餘葉片均處於光照環境，未施予額外之光量。本測定係採用 LI-COR LI-6400 手提式光合作用測定儀。系統參數設定： CO_2 濃度 360 ppm，葉溫 28 $^{\circ}\text{C}$ ，光量設定 0、5、10、15、20、25、50、100、300、600、900、1200、1500、1600、1650、1700 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 等 16 級，相對濕度 50~60%，系統設定自動儲存，每存取 1 筆資料，採其平均測值。苗木進行測定前一天先充分澆水，第二天進行測定，測定時必須俟 CO_2 及水分變化穩定後再進行。各單株之測定時間約耗用 1.5 h。
- (2) 葉綠素濃度：試驗結束時，於每處理測定苗木 4 株測葉綠素濃度。選取之苗木取梢頂下第 3 或第 4 片以完全展開成熟之葉片，稱取鮮重 (約 0.05 g) 後置於研鉢中，加入液態氮磨碎，再以 80% 丙酮萃取，用 1 號濾紙過濾後，定積至 15 ml，取上層澄清液，以日立 U-2000 型雙光束分光光譜儀 (Spectrophotometer) 測定其在波長 645 nm、652 nm、663 nm 時之吸光度，依下列計算式換算葉綠素含量。

葉綠素 a 含量 (mg/g) = $\{ 12.7 \times (D_{663}) - 2.69 \times (D_{645}) \} \times V/W$

葉綠素 b 含量 (mg/g) = $\{ 22.9 \times (D_{645}) - 4.68 \times (D_{663}) \} \times V/W$

葉綠素 a + b 總量 (mg/g) = $\{ 20.2 \times (D_{645}) + 8.02 \times (D_{663}) \} \times V/W$

V：萃取總體積 (L)

W：葉片鮮重 (g)

$D\lambda$ ：萃取液在 λ 波長 (nm) 之吸光度

- (3) 葉部氣孔形態、密度及葉組織構造之觀察：各處理苗木葉部樣本之製備過程如下：選取各處理苗木成熟且完全展開之葉片，剪取中央部位 2×2 mm 的葉圓片，放置於 2.5% 戊二醛 (glutaraldehyde, GA) 固定液中三小時，以 0.1M 磷酸緩衝液 (pH7) 清洗，再經 50%、70%、80%、90%、95%、100% 酒精及 100% 丙酮脫水後，進行臨界點乾燥 (Hitachi HCP-2, Critical point dryer, CPD) 和真空鍍金機 (Pelco SC-6 Sputter coater, SC) 鍍金後，以掃描式電子顯微鏡 (Hitachi S-3500N Scanning electron microscope, SEM) 觀察。
 - (4) 苗木體內氮、磷、鉀、鈣和鎂養分濃度之測定：將苗木分為根部、莖部及葉部等 3 個部位，分別烘乾、磨粉，取 0.4 g 樣本加入 15 ml 濃硫酸，再放入消化裝置 (2020 Digestor) 緩慢加熱到 380°C ，維持 3 h，加入 15 ml H_2O_2 ，至樣本呈透明澄清液後過濾之並以蒸餾水定積至 100 ml，取 40 ml 至自動凱氏氮蒸餾裝置 (2200 Kjeltac auto distillation) 內蒸餾，加入適量的 40% NaOH 溶液，以 30 ml 4% 硼酸為接收劑，再以 0.1N H_2SO_4 溶液滴定之，同時並進行空白試驗，計算出含氮量。並使用感應耦合電漿原子發射光譜儀 (HITACHI P-4010 Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy, ICP-AES)，進行分析苗木組織之含磷、鉀、鈣和鎂量。
7. 生長介質之化學性質分析：測定菌根苗接種前後根域土壤及崩塌地造林前後苗木根域土壤之化學性質
- (1) 土壤酸鹼值測定：將土壤風乾、以 20 mesh 孔徑篩網過濾，取出 10 g 土壤樣本加入 20 ml 純水 (重量比 1:2)，震 30 min，並靜置懸浮液 30 min，使懸浮之土壤樣本沉澱，並以酸鹼值測定儀 (Inolab pH Level 2) 測定樣本溶液之酸鹼值 (余旻儒，2010；Mclean, 1982)。
 - (2) 土壤氮含量測定：將土壤過濾、烘乾，取出 1 g 樣本加入 15 ml 濃硫酸過夜

(24h) ，再放入消化裝置 (2020 digestor) 緩慢加熱到 375 °C 維持 3 h ，取出使其降溫 30 min 加入 10 ml H₂O₂ ，再加熱到 375 °C ，維持 1 h 至樣本呈透明澄清液後過濾之並以蒸餾水定積至 100 ml ，取 40 ml 置凱氏氮蒸餾裝置內蒸餾 ，加入適量之 40 % NaOH 溶液 ，以 30 ml 4 % 硼酸為接收劑 ，再以 0.1 N H₂SO₄ 溶液滴定之 ，同時並進行空白試驗 ，計算出含氮量(余旻儒，2010；MacDonald, 1977)。

(3) 土壤可置換性陽離子濃度測定：以醋酸銨 (NH₄OAc) 法測定，取 5 g 過篩風乾土壤置於 250 ml 角錐瓶中，加入 40 ml 1 N NH₄OAc (pH=7)，震盪 10 min 靜置過夜。抽氣過濾之，以 NH₄OAc 定積至 100 ml，取澄清濾液利用感應耦合電漿原子發射光譜儀 (ICP-AES) 測定可溶解性及可置換性陽離子鉀、鈣、鎂和鈉濃度(余旻儒，2010；Rhoades, 1982)。

(4) 土壤有效磷含量測定：以鉬藍法測定，取 1 g 樣本置於 50 ml 角錐瓶中，加入 7 ml 萃取液 (0.5 N HCl-0.03 N NH₄F) 搖盪 1 min，以 Advantec 5B 濾紙過濾。取 2 ml 樣液加入 5 ml H₂O 及 2 ml (NH₄)₆Mo₇O₂₄ 溶液，混合均勻後加入 1 ml SnCl₂ 稀釋液呈色後，以分光光度計 (Hitachi U-2000 spectrophotometer) 於波長 660 nm 下測定吸光值，比對磷標準曲線得出樣液之磷濃度(余旻儒，2010；Olsen and Sommer, 1982)。

8. 根部解剖觀察分析

(1) 光學顯微鏡下觀察

叢枝菌根利用根部透明染色法，將處理後之根段置光學顯微鏡或解剖顯微鏡下，觀察感染部位之共生形態 (吳繼光、林素禎，1998)。步驟如下：將植物根部先以清水洗淨置於試管內，並固定在 FAA 固定液中，1 h。然後將根浸於 10 % KOH 溶液中，放置 48 h 後，以蒸餾水清洗根部數次以去除 KOH。再加入 3 % 之 H₂O₂ 於試管內 48 h，漂白根部至透明後，水洗之。再以 1 % HCl 酸化 48 h，倒掉 HCl，加入錐蟲藍-乳酸酚 (trypan blue-lactophenol) 1 h，將染色之根置於顯微鏡下觀察拍照

(許崑衍、李明仁，2005；陳紀伶、李明仁，2006)。

(2) 掃描式電子顯微鏡下觀察

選取長度約 1 mm 之根段，放置於 2.5 % 戊二醛 (glutaraldehyde, GA) 固定液中 3 h 以上，0.1 M 磷酸緩衝溶液 (pH=7) 清洗三次。經 10 %、20 %、30 %、50 %、70 %、80 %、90 %、95 %、100 % 酒精及 100 % 丙酮脫水後，進行臨界點乾燥 (HITACHI HCP-2 critical point dryer) 和真空鍍金機 (PELCO SC-6 sputter coater) 鍍金後，以掃描式電子顯微鏡 (HITACHI S-3500N scanning electron microscope) 觀察其細微構造，並照相紀錄 (黃秀緞等，2007)。

9. 統計分析

試驗數據以 SPSS 軟體之單因子變異數分析，並以特奇公正顯著差異法 (Tukey's honest significant difference, HSD) 分析各平均值間的差異。

III、結果

(I) 嘉義林區管理處玉井工作站轄區之玉井事業區 3 處崩塌地土壤化學性質

1. 崩塌地第 1 試驗樣區之土壤化學分析

嘉義林區管理處玉井工作站第 1 試驗樣區之土壤深度 0-10 cm 之腐植層 (OA 層) 化學性質由表 1 分析結果可知 pH 值為 7.69 ± 0.04 ；全氮量為 0.12 ± 0.05 %；可置換性陽離子鈣濃度為 0.84 ± 0.00 cmol (+) kg^{-1} ；可置換性陽離子鉀濃度為 0.36 ± 0.08 cmol (+) kg^{-1} ；可置換性陽離子鎂濃度為 0.29 ± 0.03 cmol (+) kg^{-1} ；有效磷濃度為 86.02 ± 9.61 $\mu\text{g/g}$ ；土壤深度 10-20 cm 之土壤層 (AB 層) 化學性質由表 1 分析結果可知 pH 值為 7.69 ± 0.07 ；全氮量為 0.09 ± 0.04 %；可置換性陽離子鈣濃度為 0.84 ± 0.00 cmol (+) kg^{-1} ；可置換性陽離子鉀濃度為 0.29 ± 0.11 cmol (+) kg^{-1} ；可置換性陽離子鎂濃度為 0.31 ± 0.02 cmol (+) kg^{-1} ；有效磷濃度為 65.86 ± 17.84 $\mu\text{g/g}$ 。各項養分元素在不同土壤層次中沒有顯著差異。

表 1 第 1 試驗樣區腐植層 (OA 層) 與土壤層 (AB 層) 之各項養分元素 Tukey 檢定

養分元素	腐植層 (OA 層)	土壤層 (AB 層)
pH 值	7.69 ± 0.04 ^{a1}	7.69 ± 0.07 ^a
N (%)	0.12 ± 0.05 ^a	0.09 ± 0.04 ^a
Ca ²⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	0.84 ± 0.00 ^a	0.84 ± 0.00 ^a
K ⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	0.36 ± 0.08 ^a	0.29 ± 0.11 ^a
Mg ²⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	0.29 ± 0.03 ^a	0.31 ± 0.02 ^a
Avail. P (μg/g)	86.02 ± 9.61 ^a	65.86 ± 17.84 ^a

所有數值為 4 重複之平均值±標準差

¹: 同列數值後之字母不同, 表示顯著差異 ($P < 0.05$)

2. 崩塌地第 2 試驗樣區之土壤化學分析

嘉義林區管理處玉井工作站第 2 試驗樣區之土壤深度 0-10 cm 之腐植層 (OA 層) 化學性質由表 2 分析結果可知 pH 值為 5.46 ± 0.28 ; 全氮量為 $0.17 \pm 0.03\%$; 可置換性陽離子鈣濃度為 $0.84 \pm 0.01 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$; 可置換性陽離子鉀濃度為 $0.42 \pm 0.16 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$; 可置換性陽離子鎂濃度為 $0.15 \pm 0.04 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$; 有效磷濃度為 $69.24 \pm 2.46 \mu\text{g/g}$; 土壤深度 10-20 cm 之土壤層 (AB 層) 化學性質由表 2 分析結果可知 pH 值為 5.39 ± 0.30 ; 全氮量為 $0.18 \pm 0.05\%$; 可置換性陽離子鈣濃度為 $0.80 \pm 0.09 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$; 可置換性陽離子鉀濃度為 $0.45 \pm 0.21 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$; 可置換性陽離子鎂濃度為 $0.14 \pm 0.04 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$; 有效磷濃度為 $72.13 \pm 4.69 \mu\text{g/g}$ 。各項養分元素在不同土壤層次中沒有顯著差異。

表 2 第 2 試驗樣區腐植層 (OA 層) 與土壤層 (AB 層) 之各項養分元素 Tukey 檢定

養分元素	腐植層 (OA 層)	土壤層 (AB 層)
pH 值	5.46 ± 0.28 ^{a1}	5.39 ± 0.30 ^a
N (%)	0.17 ± 0.03 ^a	0.18 ± 0.05 ^a
Ca ²⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	0.84 ± 0.01 ^a	0.80 ± 0.09 ^a
K ⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	0.42 ± 0.16 ^a	0.45 ± 0.21 ^a
Mg ²⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	0.15 ± 0.04 ^a	0.14 ± 0.04 ^a
Avail. P (μg/g)	69.24 ± 2.46 ^a	72.13 ± 4.69 ^a

所有數值為 4 重複之平均值±標準差

數字及字母標記如表 1 所示

3. 崩塌地第 3 試驗樣區之土壤化學分析

嘉義林區管理處玉井工作站第 3 試驗樣區之土壤深度 0-10 cm 之腐植層 (OA 層) 化學性質由表 3 分析結果可知 pH 值為 5.53 ± 0.32；全氮量為 0.23 ± 0.02 %；可置換性陽離子鈣濃度為 0.79 ± 0.10 cmol (+) kg⁻¹；可置換性陽離子鉀濃度為 0.47 ± 0.39 cmol (+) kg⁻¹；可置換性陽離子鎂濃度為 0.14 ± 0.06 cmol (+) kg⁻¹；有效磷濃度為 73.10 ± 14.57 μg/g；土壤深度 10-20 cm 之土壤層 (AB 層) 化學性質由表 3 分析結果可知 pH 值為 5.50 ± 0.29；全氮量為 0.21 ± 0.05 %；可置換性陽離子鈣濃度為 0.83 ± 0.01 cmol (+) kg⁻¹；可置換性陽離子鉀濃度為 0.54 ± 0.30 cmol (+) kg⁻¹；可置換性陽離子鎂濃度為 0.14 ± 0.04 cmol (+) kg⁻¹；有效磷濃度為 57.57 ± 19.22 μg/g。各項養分元素在不同土壤層次中沒有顯著差異。

表 3 第 3 試驗樣區腐植層 (OA 層) 與土壤層 (AB 層) 之各項養分元素 Tukey 檢定

養分元素	腐植層 (OA 層)	土壤層 (AB 層)
pH 值	5.53 ± 0.32 ^{a1}	5.50 ± 0.29 ^a
N (%)	0.23 ± 0.02 ^a	0.21 ± 0.05 ^a
Ca ²⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	0.79 ± 0.10 ^a	0.83 ± 0.01 ^a
K ⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	0.47 ± 0.39 ^a	0.54 ± 0.30 ^a
Mg ²⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	0.14 ± 0.06 ^a	0.14 ± 0.04 ^a
Avail. P (μg/g)	73.10 ± 14.57 ^a	57.57 ± 19.22 ^a

所有數值為 4 重複之平均值±標準差

數字及字母標記如表 1 所示

4. 3 處崩塌地試驗樣區腐植層 (OA 層) 之各項養分元素 Tukey 檢定

經分析結果如表 4 所示，腐植層 (OA 層) 在第 1 試驗樣區之 pH 值、鎂離子濃度與第 2、3 試驗樣區有顯著差異。

表 4 3 處崩塌地試驗樣區腐植層 (OA 層) 之各項養分元素 Tukey 檢定

養分元素	腐植層 (OA 層)		
	第 1 試驗樣區	第 2 試驗樣區	第 3 試驗樣區
pH 值	7.69 ± 0.04 ^{a1}	5.46 ± 0.28 ^b	5.53 ± 0.32 ^b
N (%)	0.12 ± 0.05 ^{ab}	0.17 ± 0.03 ^{ab}	0.23 ± 0.02 ^b
Ca ²⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	0.84 ± 0.00 ^a	0.84 ± 0.01 ^a	0.79 ± 0.10 ^a
K ⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	0.36 ± 0.08 ^a	0.42 ± 0.16 ^a	0.47 ± 0.39 ^a
Mg ²⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	0.29 ± 0.03 ^b	0.15 ± 0.04 ^a	0.14 ± 0.06 ^a
Avail. P (μg/g)	86.02 ± 9.61 ^a	69.24 ± 2.46 ^a	73.10 ± 14.57 ^a

所有數值為 4 重複之平均值±標準差

數字及字母標記如表 1 所示

5. 3 處崩塌地試驗樣區土壤層 (AB 層) 之各項養分元素 Tukey 檢定

經分析結果如表 5 所示，土壤層 (AB 層) 在第 1 試驗樣區之 pH 值、鎂離子濃度與第 2、3 試驗樣區有顯著差異，第 1 試驗樣區與第 3 試驗樣區的氮元素濃度有顯著差異。

表 5 3 處崩塌地試驗樣區土壤層 (AB 層) 之各項養分元素 Tukey 檢定

養分元素	土壤層 (AB 層)		
	第 1 試驗樣區	第 2 試驗樣區	第 3 試驗樣區
pH 值	7.69 ± 0.07 ^{a1}	5.39 ± 0.30 ^b	5.50 ± 0.29 ^b
N (%)	0.09 ± 0.04 ^b	0.18 ± 0.05 ^{ab}	0.21 ± 0.05 ^a
Ca ²⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	0.84 ± 0.00 ^a	0.80 ± 0.09 ^a	0.83 ± 0.01 ^a
K ⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	0.29 ± 0.11 ^a	0.45 ± 0.21 ^a	0.54 ± 0.30 ^a
Mg ²⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	0.31 ± 0.02 ^a	0.14 ± 0.04 ^b	0.14 ± 0.04 ^b
Avail. P (μg/g)	65.86 ± 17.84 ^a	72.13 ± 4.69 ^a	57.57 ± 19.22 ^a

所有數值為 4 重複之平均值±標準差

數字及字母標記如表 1 所示

(II) 各樹種生育地叢枝菌根菌分離及鑑定

掘取自各樹種生育地的土壤，經分離及鑑定後之叢枝菌根菌種名稱如表 6 所示。台灣檫之叢枝菌根菌有 *Glomus mosseae* (圖 4)、*Acaulospora morrowiae* (圖 5)、*G. occultum* (圖 6)；光蠟樹之叢枝菌根菌有 *A. morrowiae*、*A. tuberculata* (圖 7)、*G. etunicatum* (圖 8)、*G. occultum*；苦楝之叢枝菌根菌有 *A. morrowiae*、*A. scrobiculata* (圖 9)、*A. tuberculata*、*Entrophospora kentinensis* (圖 10)、*G. occultum*。

表 6 各樹種生育地分離之叢枝菌根菌菌種名稱

樹種	菌種名稱
台灣檫	<i>Glomus mosseae</i>
	<i>Acaulospora morrowiae</i>
	<i>Glomus occultum</i>
光蠟樹	<i>Glomus mosseae</i>
	<i>Acaulospora morrowiae</i>
	<i>Acaulospora tuberculata</i>
	<i>Glomus etunicatum</i>
	<i>Glomus occultum</i>
苦楝	<i>Glomus mosseae</i>
	<i>Acaulospora morrowiae</i>
	<i>Acaulospora scrobiculata</i>
	<i>Acaulospora tuberculata</i>
	<i>Entrophospora kentinensis</i>
	<i>Glomus occultum</i>



圖 4 *Glomus mosseae* 孢子形態 (橫線= 50 μm)

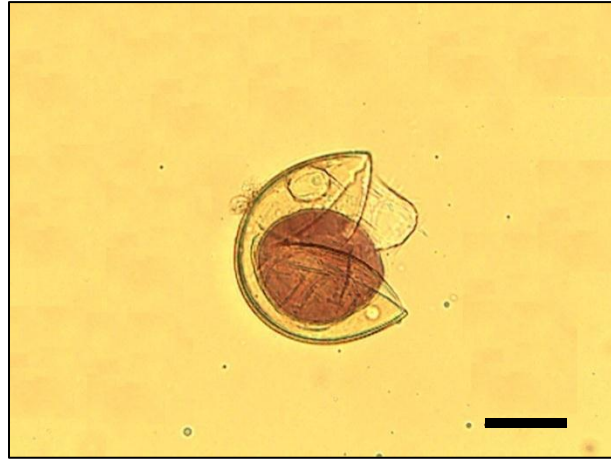


圖 5 *Acaulospora morrowiae* 孢子形態 (橫線= 50 μm)

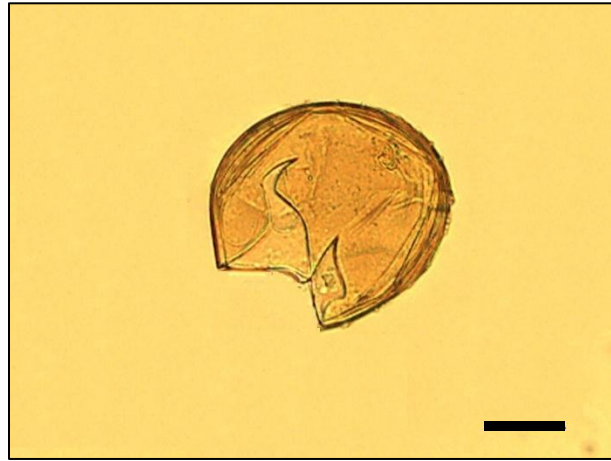


圖 6 *Glomus occultum* 孢子形態 (橫線= 50 μm)

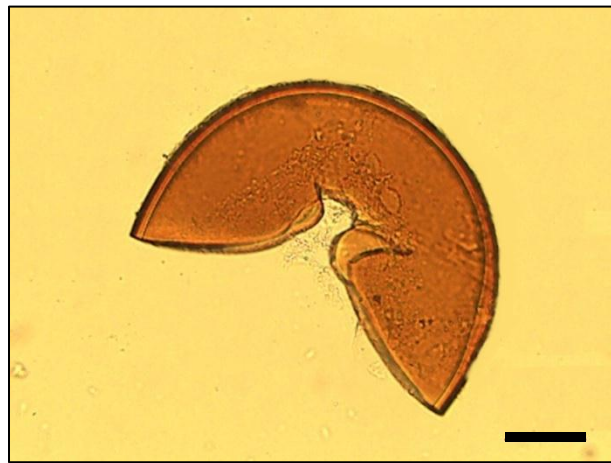


圖 7 *Acaulospora tuberculata* 孢子形態 (橫線= 50 μm)



圖 8 *Glomus etunicatum* 孢子形態 (橫線= 50 μm)

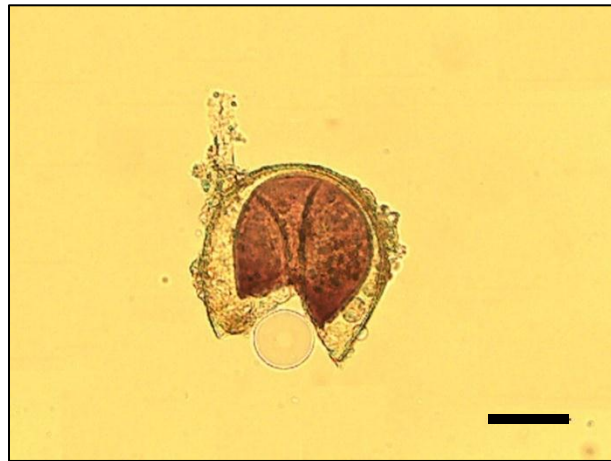


圖 9 *Acaulospora scrobiculata* 孢子形態 (橫線= 50 μm)



圖 10 *Entrophospora kentinensis* 孢子形態 (橫線= 50 μm)

(III) 網室接種 *Glomus mosseae* 對台灣欒、光蠟樹、苦楝、赤楊苗木生長之效應

種子發芽且小苗長至約 5 cm 後，移植至試驗介質，同時接種叢枝菌根菌 *G. mosseae* 7 個月後，在苗高淨生長量上，接種組均高於對照組且呈顯著差異，而於根頸直徑上也以接種組較大並呈顯著差異，如表 7 所示，但因赤楊小苗苗高尚未長至 5 cm，待其長至 5 cm 後再進行接種試驗。接種叢枝菌根菌會影響苗高生長量，分析結果顯示，在台灣欒不同接種處理部分，結果顯示接種 *G. mosseae* 者之苗高淨生長量為 5.66 ± 1.71 cm 較未接種者之 0.93 ± 0.43 cm 為高 (圖 11)，而接種者之根頸直徑淨生長量為 1.79 ± 0.18 mm 較未接種者之 0.63 ± 0.22 mm 為大；在光蠟樹不同接種處理部分，結果顯示接種 *G. mosseae* 者之苗高淨生長量為 5.98 ± 2.40 cm 較未接種者之 1.40 ± 0.54 cm 為高 (圖 12)，而接種者之根頸直徑淨生長量為 1.63 ± 0.16 mm 較未接種者之 0.48 ± 0.11 mm 為大；在苦楝不同接種處理部分結果顯示，接種 *G. mosseae* 者之苗高淨生長量為 17.93 ± 1.43 cm 較未接種者之 3.21 ± 1.21 cm 為高 (圖 13)，而接種者之根頸直徑淨生長量為 3.84 ± 0.16 mm 較未接種者之 1.50 ± 0.19 mm 為大。

表 7 不同接種處理 3 種苗木 7 個月後苗高及根頸直徑生長之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	淨生長量	
		苗高 (cm)	根頸直徑 (mm)
台灣欒	Ck	0.93 ± 0.43^{b1}	0.63 ± 0.22^b
	<i>G. mosseae</i>	5.66 ± 1.71^a	1.79 ± 0.18^a
光蠟樹	Ck	1.40 ± 0.54^b	0.48 ± 0.11^b
	<i>G. mosseae</i>	5.98 ± 2.40^a	1.63 ± 0.16^a
苦楝	Ck	3.21 ± 1.21^b	1.50 ± 0.19^b
	<i>G. mosseae</i>	17.93 ± 1.43^a	3.84 ± 0.16^a

¹：同行數值後之字母不同，表示顯著差異 ($P < 0.05$)

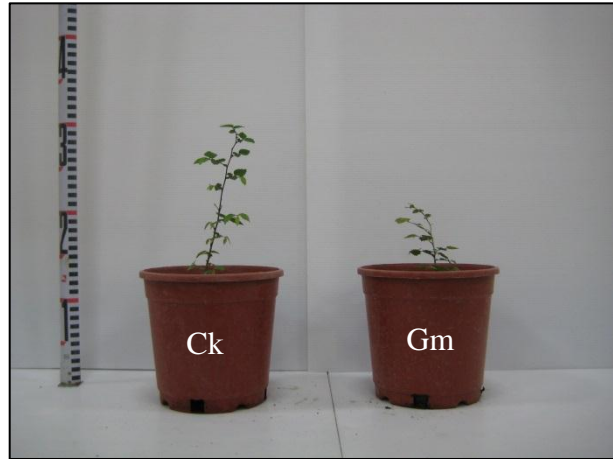


圖 11 不同接種處理台灣欖苗木 7 個月後之生長情形

Ck：對照組；Gm：接種 *G. mosseae* 者

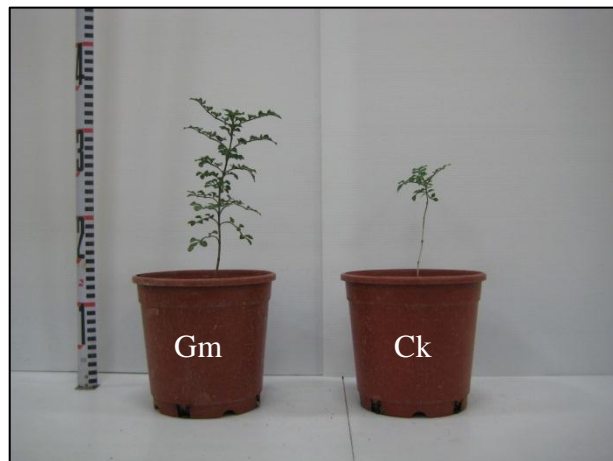


圖 12 不同接種處理光蠟樹苗木在 7 個月後之生長情形

Ck：對照組；Gm：接種 *G. mosseae* 者

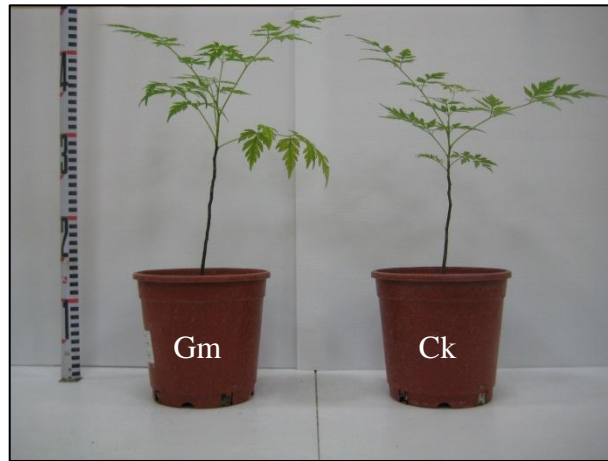


圖 13 不同接種處理苦楝苗木 7 個月後之生長情形

Ck：對照組；Gm：接種 *G. mosseae* 者

(IV) 嘉義林區管理處玉井工作站 3 處試驗樣區之不同接種處理台灣欒、光蠟樹、苦楝、赤楊苗木造林 6 個月後之生長效應

三處試驗樣區之不同接種處理台灣欒、光蠟樹、苦楝、赤楊苗木造林 6 個月後之生長效應 (圖 14、15、16)，在苗高及根頸直徑淨生長量上，第 1 試驗樣區除了赤楊之根頸直徑無顯著差異外，其餘樹種在苗高生長與根頸直徑生長均呈顯著差異；第 2 試驗樣區之台灣欒、光蠟樹在苗高部分呈現顯著差異；第 3 試驗樣區台灣欒、苦楝之苗高生長亦呈顯著差異，如表 8、9、10 所示。三處崩塌地試驗樣區復舊造林苗木之成活率分析結果如表 11 所示，第 1 試驗樣區除台灣欒接種組與對照組成活率均呈 100% 外，苦楝及光蠟樹對照組均高於接種組，赤楊則以接種組有較高之成活率；第 2 試驗樣區除苦楝對照組成活率高於接種組外，其餘樹種之成活率均以接種組高於或等於對照組；第 3 試驗樣區除台灣欒對照組之成活率高於接種組外，其餘樹種之成活率均以接種組較高。

接種叢枝菌根菌 *G. mosseae* 會影響苗木之生長量，分析結果顯示在第一樣區不同接種處理台灣欒苗木之生長量，以接種 *G. mosseae* 者之苗高淨生長量為 18.18 ± 13.65 cm 較未接種者之 6.35 ± 3.10 cm 為高，而接種者之根頸直徑淨生長量為 1.64 ± 0.76 mm 也較未接種者之 0.64 ± 0.16 mm 為大；不同接種處理光蠟樹苗木之生長量，

以接種 *G. mosseae* 者之苗高淨生長量為 30.23 ± 14.85 cm 較未接種者之 14.37 ± 8.39 cm 為高，而接種者之根頸直徑淨生長量為 3.10 ± 1.01 mm 也較未接種者之 1.64 ± 0.41 mm 為大；不同接種處理苦楝苗木之生長量，以接種 *G. mosseae* 者之苗高淨生長量為 41.99 ± 19.95 cm 較未接種者之 22.33 ± 10.06 cm 為高，而接種者之根頸直徑淨生長量為 7.51 ± 3.22 mm 也較未接種者之 3.47 ± 1.30 mm 為大；不同接種處理赤楊苗木之生長量，以接種 *Frankia* 者之苗高淨生長量為 22.40 ± 6.74 cm 較未接種 *Frankia* 者之 12.18 ± 6.33 cm 為高，而接種 *Frankia* 者之根頸直徑淨生長量為 8.60 ± 3.65 mm 也較未接種 *Frankia* 者之 7.21 ± 3.30 mm 為大。在第二樣區不同接種處理台灣欖苗木之生長量，以接種 *G. mosseae* 者之苗高淨生長量為 26.95 ± 9.35 cm 較未接種者之 14.81 ± 9.80 cm 為高，而接種者之根頸直徑淨生長量為 1.73 ± 0.59 mm 也較未接種者之 1.23 ± 0.48 mm 為大；不同接種處理光蠟樹苗木之生長量，以接種 *G. mosseae* 者之苗高淨生長量為 51.76 ± 10.30 cm 較未接種者之 10.84 ± 5.49 cm 為高，而接種者之根頸直徑淨生長量為 2.92 ± 1.01 mm 也較未接種者之 2.31 ± 0.90 mm 為大；不同接種處理苦楝苗木之生長量，以接種 *G. mosseae* 者之苗高淨生長量為 39.88 ± 25.58 cm 較未接種者之 15.56 ± 10.65 cm 為高，而接種者之根頸直徑淨生長量為 3.38 ± 3.65 mm 較未接種者之 3.83 ± 1.52 mm 為小；而赤楊因苗木成活率過低，無法比較。在第三樣區不同接種處理台灣欖苗木之生長量，以接種 *G. mosseae* 者之苗高淨生長量為 28.23 ± 6.77 cm 較未接種者之 17.25 ± 4.77 cm 為高，而接種者之根頸直徑淨生長量為 1.55 ± 0.57 mm 也較未接種者之 1.09 ± 0.45 mm 為大；不同接種處理光蠟樹苗木之生長量，以接種 *G. mosseae* 者之苗高淨生長量為 21.10 ± 7.95 cm 較未接種者之 13.43 ± 4.48 cm 為高，而接種者之根頸直徑淨生長量為 2.68 ± 0.68 mm 也較未接種者之 2.46 ± 1.42 mm 為大；不同接種處理苦楝苗木之生長量，以接種 *G. mosseae* 者之苗高淨生長量為 40.98 ± 8.89 cm 較未接種者之 23.75 ± 6.49 cm 為高，而接種者之根頸直徑淨生長量為 4.71 ± 2.02 mm 也較未接種者之 4.63 ± 1.91 mm 為大；而赤楊因苗木成活率過低，無法比較。



圖 14 第 1 試驗樣區造林苗木 6 個月後之生長情形



圖 15 第 2 試驗樣區造林苗木 6 個月後之生長情形



圖 16 第 3 試驗樣區造林苗木 6 個月後之生長情形

表 8 第 1 試驗樣區不同接種處理四種造林樹種苗木 6 個月後苗高及根頸直徑生長之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	淨生長量	
		苗高 (cm)	根頸直徑 (mm)
台灣欒	Ck	6.35 ± 3.10 ^{b1}	0.64 ± 0.16 ^b
	<i>G. mosseae</i>	18.18 ± 13.65 ^a	1.64 ± 0.76 ^a
光蠟樹	Ck	14.37 ± 8.39 ^b	1.64 ± 0.41 ^b
	<i>G. mosseae</i>	30.23 ± 14.85 ^a	3.10 ± 1.01 ^a
苦楝	Ck	22.33 ± 10.06 ^b	3.47 ± 1.30 ^b
	<i>G. mosseae</i>	41.99 ± 19.95 ^a	7.51 ± 3.22 ^a
赤楊	Ck	12.18 ± 6.33 ^b	7.21 ± 3.30 ^a
	<i>Frankia</i>	22.40 ± 6.74 ^a	8.60 ± 3.65 ^a

字母標記如表 7 所示

表 9 第 2 試驗樣區不同接種處理四種造林樹種苗木 6 個月後苗高及根頸直徑生長之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	淨生長量	
		苗高 (cm)	根頸直徑 (mm)
台灣櫟	Ck	14.81 ± 9.80 ^{b1}	1.23 ± 0.48 ^a
	<i>G. mosseae</i>	26.95 ± 9.35 ^a	1.73 ± 0.59 ^a
光蠟樹	Ck	10.84 ± 5.49 ^b	2.31 ± 0.90 ^a
	<i>G. mosseae</i>	51.76 ± 10.30 ^a	2.92 ± 1.01 ^a
苦楝	Ck	15.56 ± 10.65 ^a	3.83 ± 1.52 ^a
	<i>G. mosseae</i>	39.88 ± 25.58 ^a	3.38 ± 3.65 ^a
赤楊	Ck	—	—
	<i>Frankia</i>	—	—

字母標記如表 7 所示

表 10 第 3 試驗樣區不同接種處理四種造林樹種苗木 6 個月後苗高及根頸直徑生長之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	淨生長量	
		苗高 (cm)	根頸直徑 (mm)
台灣櫟	Ck	17.25 ± 4.77 ^{b1}	1.09 ± 0.45 ^a
	<i>G. mosseae</i>	28.23 ± 6.77 ^a	1.55 ± 0.57 ^a
光蠟樹	Ck	13.43 ± 4.48 ^a	2.46 ± 1.42 ^a
	<i>G. mosseae</i>	21.10 ± 7.95 ^a	2.68 ± 0.68 ^a
苦楝	Ck	23.75 ± 6.49 ^b	4.63 ± 1.91 ^a
	<i>G. mosseae</i>	40.98 ± 8.89 ^a	4.71 ± 2.02 ^a
赤楊	Ck	—	—
	<i>Frankia</i>	—	—

字母標記如表 7 所示

表 11 不同試驗樣區復舊造林苗木之成活率

樣區	項目	苦楝 (%)	光蠟樹 (%)	台灣櫟 (%)	赤楊 (%)
第 1 樣區	對照組	85	95	100	45
	接種組	70	90	100	80
第 2 樣區	對照組	55	50	85	0
	接種組	45	75	85	0
第 3 樣區	對照組	50	25	85	5
	接種組	55	30	70	10

(V) 葉面積及乾重

網室試驗苗木與南化第 1 試驗樣區，不同接種處理苗木總葉面積、葉片數、全株乾重之影響如表 12、13 所示。網室試驗結果顯示，各樹種苗木之葉片數與全株乾重中，光蠟樹苗木接種組之總葉面積、葉片數及全株乾重均顯著高於對照組者；苦楝苗木之總葉面積亦以接種組顯著高對照組者。崩塌地第 1 試驗樣區試驗結果顯示，各樹種苗木之總葉面積、葉片數、及全株乾重均無顯著差異。

表 12 網室內不同接種處理苗木總葉面積、葉片數、全株乾重之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	總葉面積 (cm ²)	葉片數 (No.)	全株乾重 (g)
台灣檫	對照組	19.06 ± 8.77 ^{a1}	21.00 ± 12.12 ^a	0.53 ± 0.54 ^a
	接種組	32.30 ± 9.79 ^a	34.00 ± 19.52 ^a	0.84 ± 0.19 ^a
光蠟樹	對照組	23.33 ± 5.58 ^b	55.00 ± 12.12 ^b	0.32 ± 0.12 ^b
	接種組	84.89 ± 26.58 ^a	127.67 ± 25.93 ^a	1.53 ± 0.48 ^a
苦楝	對照組	166.54 ± 23.43 ^b	41.67 ± 5.86 ^a	3.58 ± 0.32 ^a
	接種組	222.43 ± 21.85 ^a	31.33 ± 7.09 ^a	4.49 ± 0.91 ^a

字母標記如表 7 所示

表 13 崩塌地第 1 試驗樣區苗木不同接種處理對苗木總葉面積、葉片數、全株乾重之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	總葉面積 (cm ²)	葉片數 (No.)	全株乾重 (g)
台灣檫	對照組	87.96 ± 49.21 ^{b1}	60.67 ± 19.66 ^a	7.19 ± 0.61 ^a
	接種組	175.76 ± 55.03 ^a	71.67 ± 9.81 ^a	11.19 ± 4.51 ^a
光蠟樹	對照組	106.76 ± 38.77 ^b	63.33 ± 33.20 ^a	3.13 ± 0.54 ^a
	接種組	184.62 ± 94.78 ^a	62.33 ± 30.29 ^a	8.75 ± 7.14 ^a
苦楝	對照組	470.14 ± 363.11 ^b	164.67 ± 161.38 ^b	16.41 ± 6.73 ^b
	接種組	1480.70 ± 997.78 ^a	493.00 ± 366.46 ^a	45.05 ± 27.70 ^a
赤楊	對照組	153.98 ± 145.40 ^a	34.00 ± 9.00 ^a	22.60 ± 5.42 ^a
	接種組	223.30 ± 95.46 ^b	36.67 ± 14.30 ^a	26.66 ± 9.80 ^a

字母標記如表 7 所示

(VI) 葉片形質

網室試驗與崩塌地第 1 試驗樣區，不同接種處理對苗木葉面積比、比葉面積、葉重量比之影響如表 14、15 所示。網室試驗結果與崩塌地第 1 試驗樣區試驗結果均顯示在葉面積比、比葉面積、葉重量比上均呈無顯著差異。

表 14 網室內不同接種處理苗木葉面積比、比葉面積、葉重量比之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	葉面積比 (cm ² /g)	比葉面積 (cm ² /g)	葉重量比 (g/g)
台灣檫	對照組	58.00 ± 41.39 ^{a1}	292.81 ± 32.03 ^a	0.19 ± 0.12 ^a
	接種組	38.15 ± 5.54 ^a	283.43 ± 45.44 ^a	0.14 ± 0.02 ^a
光蠟樹	對照組	76.01 ± 11.30 ^a	189.92 ± 47.41 ^a	0.41 ± 0.09 ^a
	接種組	56.04 ± 6.98 ^a	146.97 ± 31.93 ^a	0.39 ± 0.04 ^a
苦楝	對照組	46.39 ± 2.43 ^a	292.86 ± 17.11 ^a	0.16 ± 0.01 ^a
	接種組	51.49 ± 15.52 ^a	327.23 ± 14.75 ^a	0.16 ± 0.04 ^a

字母標記如表 7 所示

表 15 崩塌地第 1 試驗樣區不同接種處理苗木葉面積比、比葉面積、葉重量比之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	葉面積比 (cm ² /g)	比葉面積 (cm ² /g)	葉重量比 (g/g)
台灣檫	對照組	12.53 ± 7.82 ^{a1}	160.22 ± 32.22 ^a	0.08 ± 0.04 ^a
	接種組	16.40 ± 3.03 ^a	159.12 ± 61.89 ^a	0.11 ± 0.04 ^a
光蠟樹	對照組	33.63 ± 9.74 ^a	148.30 ± 34.49 ^a	0.23 ± 0.02 ^a
	接種組	30.75 ± 20.09 ^a	163.74 ± 65.68 ^a	0.18 ± 0.10 ^a
苦楝	對照組	25.59 ± 11.54 ^a	126.35 ± 10.26 ^a	0.20 ± 0.07 ^a
	接種組	32.45 ± 3.50 ^a	118.15 ± 4.38 ^a	0.27 ± 0.03 ^a
赤楊	對照組	8.15 ± 9.42 ^a	153.07 ± 42.21 ^a	0.05 ± 0.04 ^a
	接種組	9.78 ± 7.16 ^a	122.17 ± 8.79 ^a	0.09 ± 0.05 ^a

字母標記如表 7 所示

(VII) 生理特性測定

1. 淨光合速率

本研究以 LI-Cor 6400 型光合作用測定儀，以不同光度處理，測定結果如下列：

(1) 台灣櫟對照組

台灣櫟對照組苗木於光度 $1700 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 之淨光合作用速率平均為 $6.71 \pm 2.71 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (圖 17)。

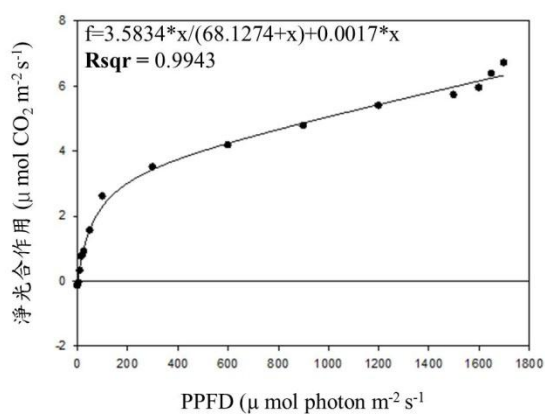


圖 17 台灣櫟對照組苗木之光反應曲線

(2) 台灣櫟接種組

台灣櫟接種組苗木於 $1700 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 之淨光合作用速率平均為 $7.20 \pm 3.47 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (圖 18)。

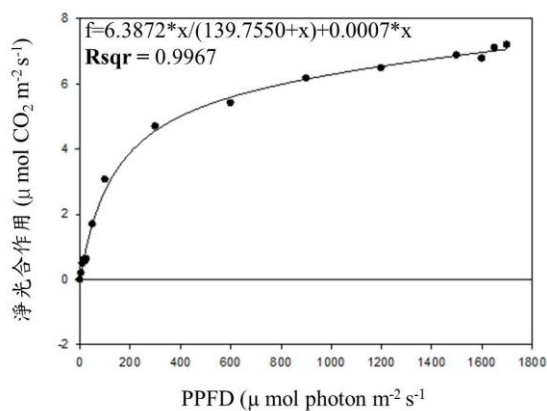


圖 18 台灣櫟接種組苗木之光反應曲線

(3) 光蠟樹對照組

光蠟樹對照組苗木於 $1700 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 之淨光合作用速率平均為 $6.45 \pm 1.46 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (圖 19)。

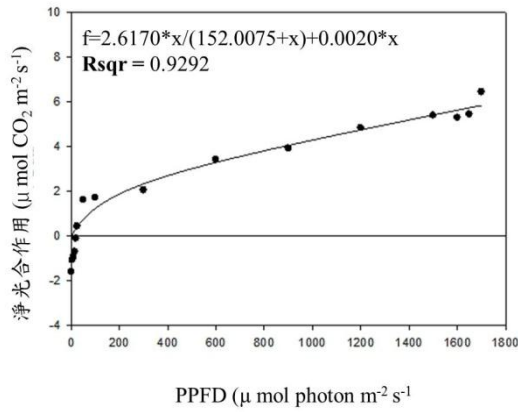


圖 19 光蠟樹對照組苗木之光反應曲線

(4) 光蠟樹接種組

光蠟樹接種組苗木於 $1700 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 之淨光合作用速率平均為 $8.10 \pm 2.81 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (圖 20)。

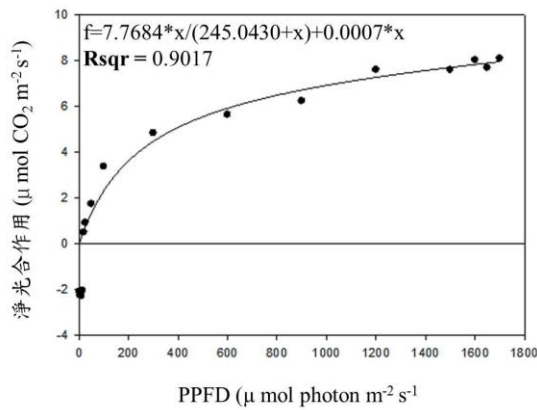


圖 20 光蠟樹接種組苗木之光反應曲線

(5) 苦楝對照組

苦楝對照組苗木於 $1700 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 之淨光合作用速率平均為 $3.06 \pm 0.83 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (圖 21)。

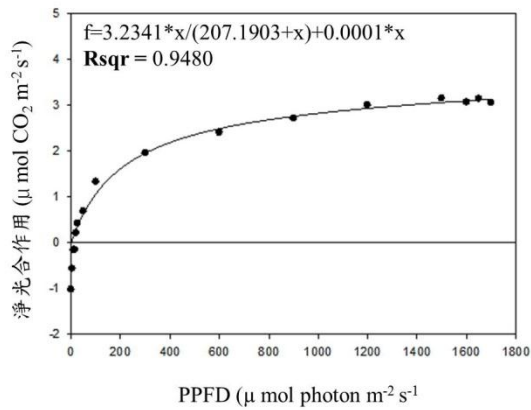


圖 21 苦楝對照組苗木之光反應曲線

(6) 苦楝接種組

苦楝接種組苗木於 $1700 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 之淨光合作用速率平均為 $4.39 \pm 0.76 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (圖 22)。

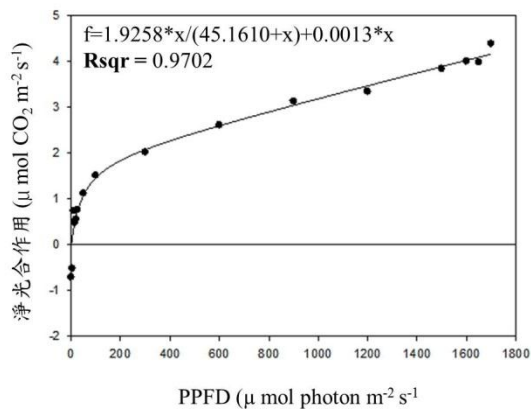


圖 22 苦楝接種組苗木之光反應曲線

2. 葉綠素濃度

網室試驗與崩塌地第 1 試驗樣區，不同接種處理對苗木葉綠素 a、葉綠素 b、葉綠素 a + b 之影響如表 16、17 所示。網室試驗與崩塌地第 1 試驗樣區之試驗

結果顯示，苦楝接種組苗木之葉綠素 a、葉綠素 b、葉綠素 a + b 含量均顯著高於對照組者。

表 16 網室內不同接種處理苗木葉綠素 a、葉綠素 b、葉綠素 a + b 含量之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	葉綠素 a (mg/g)	葉綠素 b (mg/g)	葉綠素 a + b (mg/g)
台灣檫	對照組	1.17 ± 0.22 ^{a1}	0.47 ± 0.09 ^a	1.64 ± 0.31 ^a
	接種組	1.62 ± 0.29 ^a	0.59 ± 0.10 ^a	2.22 ± 0.39 ^a
光蠟樹	對照組	1.49 ± 0.18 ^a	0.60 ± 0.10 ^a	2.09 ± 0.26 ^a
	接種組	1.49 ± 0.20 ^a	0.60 ± 0.10 ^a	2.09 ± 0.29 ^a
苦楝	對照組	0.99 ± 0.27 ^b	0.38 ± 0.11 ^b	1.37 ± 0.38 ^b
	接種組	1.67 ± 0.18 ^a	0.60 ± 0.08 ^a	2.27 ± 0.26 ^a

字母標記如表 7 所示

表 17 崩塌地第 1 試驗樣區不同接種處理苗木葉綠素 a、葉綠素 b、葉綠素 a + b 含量之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	葉綠素 a (mg/g)	葉綠素 b (mg/g)	葉綠素 a + b (mg/g)
台灣檫	對照組	0.82 ± 0.41 ^{a1}	0.33 ± 0.18 ^a	1.16 ± 0.59 ^a
	接種組	0.92 ± 0.16 ^a	0.36 ± 0.05 ^a	1.28 ± 0.21 ^a
光蠟樹	對照組	0.55 ± 0.16 ^a	0.20 ± 0.04 ^a	0.75 ± 0.20 ^a
	接種組	0.90 ± 0.30 ^a	0.36 ± 0.13 ^a	1.25 ± 0.43 ^a
苦楝	對照組	1.17 ± 0.23 ^b	0.46 ± 0.07 ^b	1.63 ± 0.29 ^b
	接種組	2.76 ± 0.26 ^a	1.28 ± 0.23 ^a	4.04 ± 0.48 ^a
赤楊	對照組	1.32 ± 0.34 ^a	0.56 ± 0.09 ^a	1.88 ± 0.43 ^a
	接種組	1.79 ± 0.91 ^a	0.90 ± 0.53 ^a	2.67 ± 1.43 ^a

字母標記如表 7 所示

3. 葉部氣孔形態、密度之觀察

網室試驗與崩塌地第 1 試驗樣區，不同接種處理苗木之葉部氣孔密度 (圖 23、24)、形態 (圖 25、26) 及分析結果 (表 18) 顯示，各接種組者均顯著高於對照組。而赤楊部分因葉部萎凋與落葉之因素，故無法觀察。

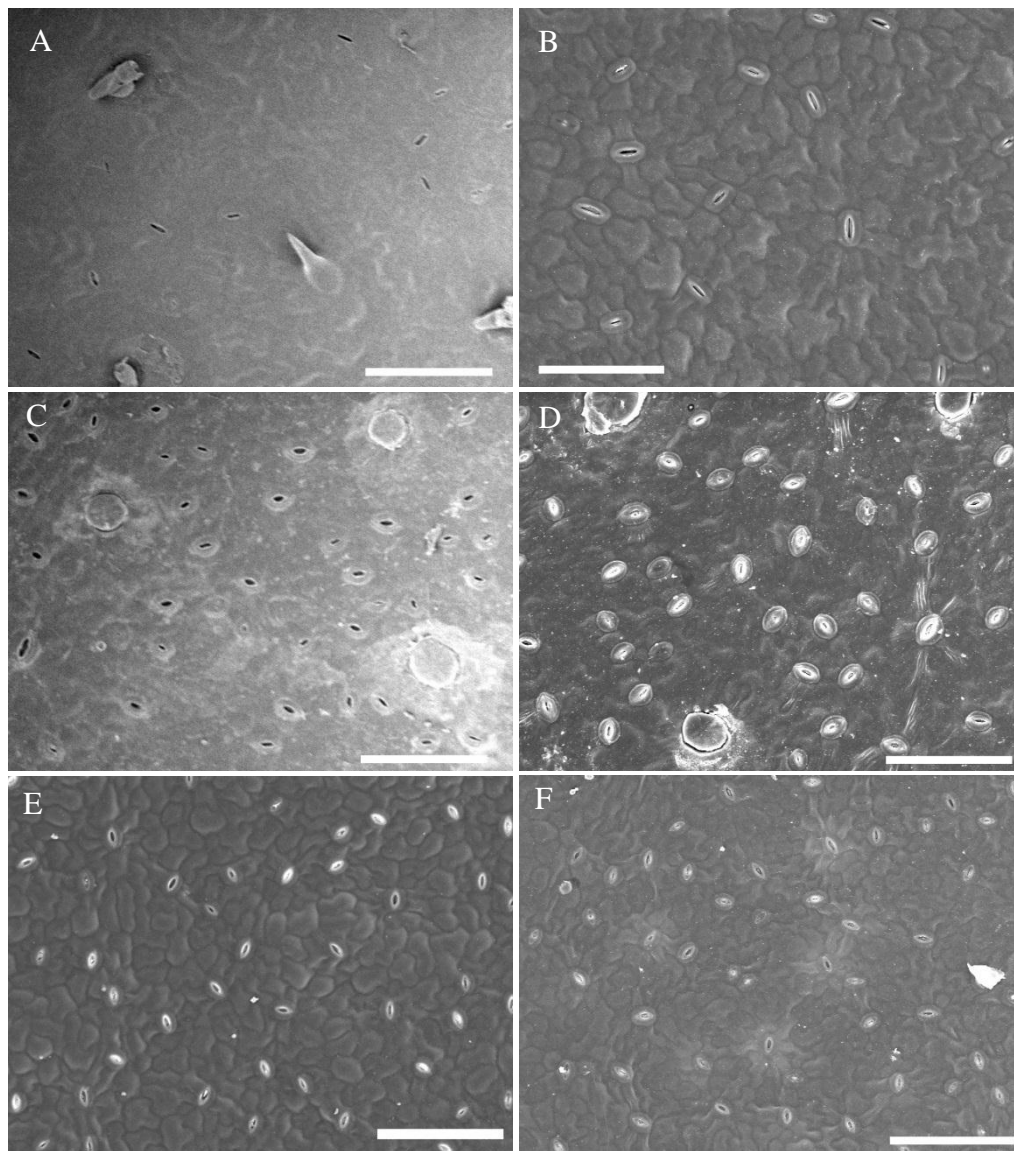


圖 23 網室葉部氣孔密度之微細構造

A：台灣欒對照組；B：台灣欒接種組；C：光蠟樹對照組；D：光蠟樹接種組；E：苦楝對照組；F：苦楝接種組 (橫線 = 100 μm)

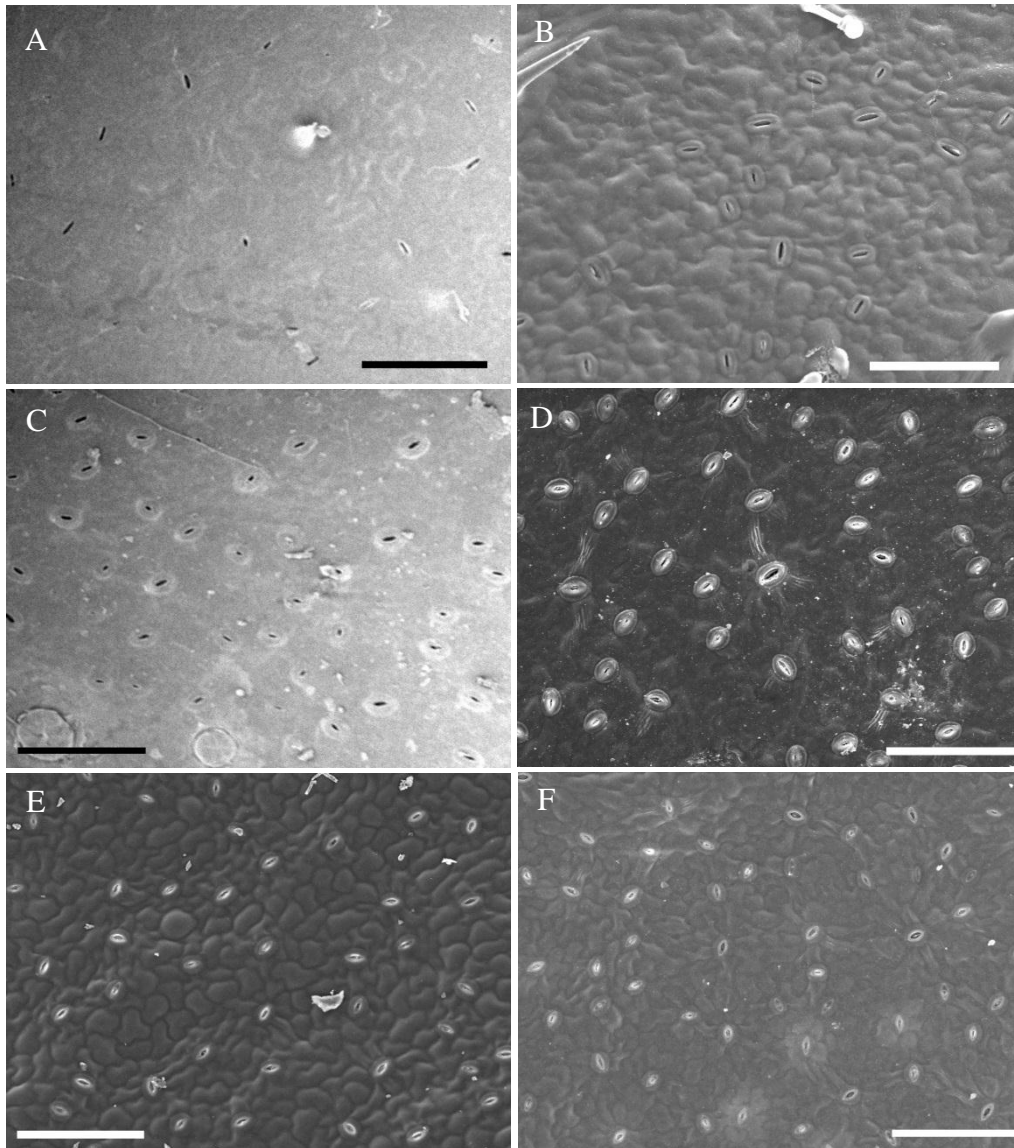


圖 24 崩塌地第 1 試驗樣區葉部氣孔密度之微細構造

A：台灣檸檬對照組；B：台灣檸檬接種組；C：光蠟樹對照組；D：光蠟樹接種組；E：
苦楝對照組；F：苦楝接種組（橫線 = 100 μm）

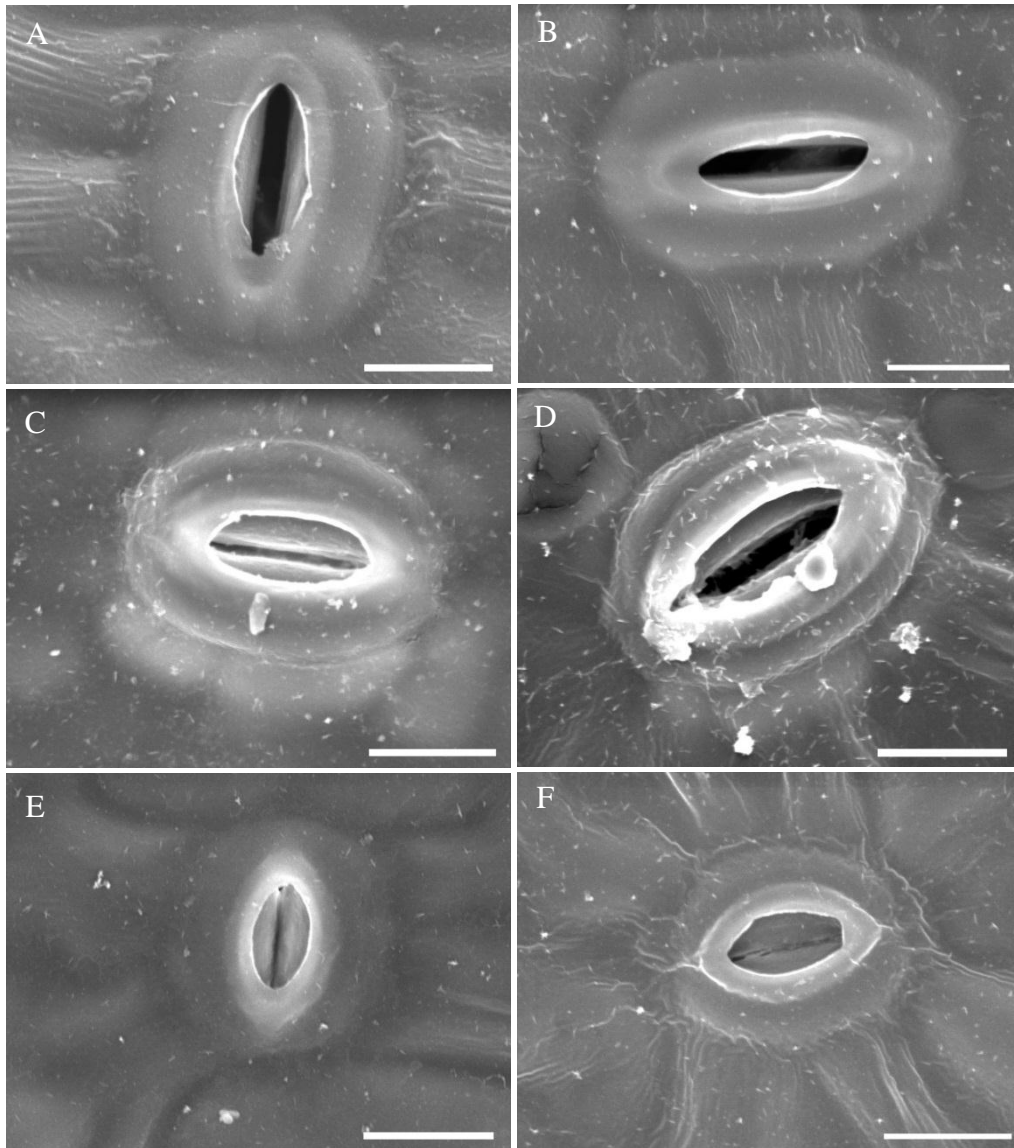


圖 25 網室葉部氣孔形態之微細構造

A：台灣檸檬對照組；B：台灣檸檬接種組；C：光蠟樹對照組；D：光蠟樹接種組；E：
苦楝對照組；F：苦楝接種組 (橫線 = 10 μm)

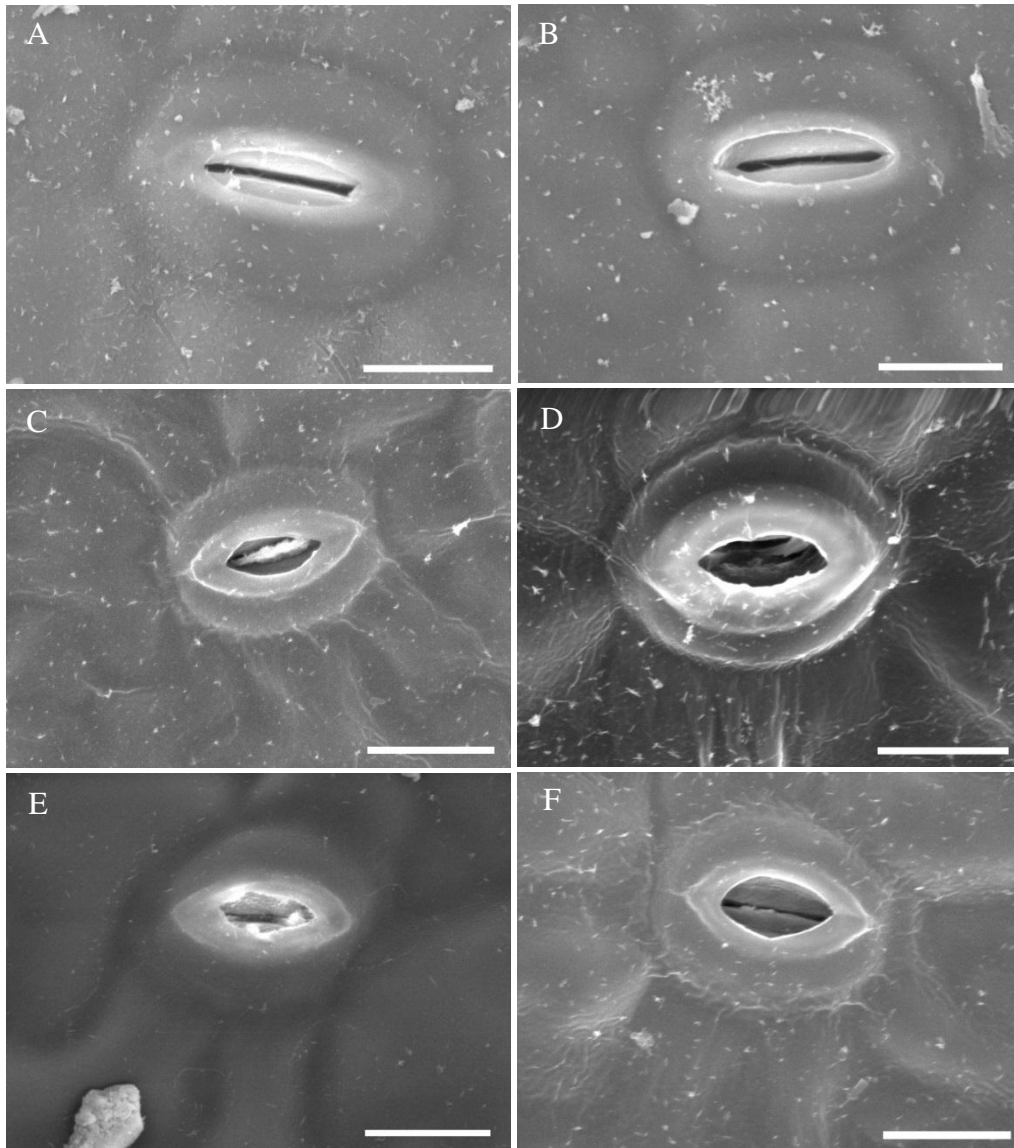


圖 26 崩塌地第 1 試驗樣區葉部氣孔形態之微細構造

A：台灣檸檬對照組；B：台灣檸檬接種組；C：光蠟樹對照組；D：光蠟樹接種組；E：苦楝對照組；F：苦楝接種組 (橫線 = 10 μm)

表 18 網室及崩塌地第 1 試驗樣區不同接種處理苗木之葉部氣孔形態、密度之獨立
樣本 t 檢定

樹種	項目	氣孔密度 (stomata/mm ²)	
		網室試驗	崩塌地試驗
台灣檫	對照組	80.67 ± 5.86 ^{b1}	109.33 ± 6.51 ^b
	接種組	125.00 ± 5.00 ^a	150.33 ± 7.77 ^a
光蠟樹	對照組	301.00 ± 8.54 ^b	271.67 ± 4.93 ^b
	接種組	334.00 ± 6.00 ^a	328.67 ± 3.21 ^a
苦楝	對照組	363.67 ± 10.69 ^b	366.67 ± 8.50 ^b
	接種組	424.67 ± 8.14 ^a	411.33 ± 10.60 ^a

字母標記如表 7 所示

4. 苗木體內氮、磷、鉀、鈣、鎂養分濃度之測定

網室試驗與崩塌地第 1 試驗樣區，不同接種處理苗木氮、磷、鉀、鈣、鎂養分濃度之分析結果顯示 (表 19 - 28)，在網室試驗部分，以光蠟樹接種組根部及葉部之氮含量顯著高於對照組者，而苦楝接種組根部之氮含量則顯著低於對照組者(表 19)；磷濃度在苗木各部位均以接種組顯著高於對照組者(表 20)；鉀濃度除了光蠟樹與苦楝莖的部分、台灣檫葉的部分外，其餘均以接種組者顯著高於對照組者(表 21)；鈣濃度部分只有台灣檫葉的部分以接種組者顯著高於對照組者(表 22)；鎂濃度除了光蠟樹與苦楝根的部分、苦楝莖的部分外，其餘均以接種組者顯著高於對照組者(表 23)。崩塌地試驗部分，氮含量只有苦楝根的部分以接種組者顯著高對照組者(表 24)；磷濃度在台灣檫根及葉部、苦楝葉部以接種組者顯著高對照組者(表 25)；鉀濃度在台灣檫之根、莖、葉部及光蠟樹之根部及苦楝之根、莖部及赤楊之莖部均以接種組者顯著高對照組者(表 26)；鈣濃度在台灣檫之根部及光蠟樹之根莖及苦楝之葉部均以接種組者顯著高對照組者(表 27)；鎂濃度在光蠟樹之莖、葉部及苦楝之

根、葉部及赤楊之莖部均以接種組者顯著高對照組者(表 28)。

表 19 網室內不同接種處理苗木各部位氮濃度之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	N (%)		
		根	莖	葉
台灣檫	對照組	0.26 ± 0.23 ^{a1}	0.19 ± 0.10 ^a	0.19 ± 0.07 ^a
	接種組	0.39 ± 0.05 ^a	0.26 ± 0.05 ^a	0.29 ± 0.07 ^a
光蠟樹	對照組	0.20 ± 0.00 ^b	0.14 ± 0.00 ^a	0.29 ± 0.12 ^b
	接種組	0.34 ± 0.06 ^a	0.24 ± 0.11 ^a	0.57 ± 0.03 ^a
苦楝	對照組	0.36 ± 0.04 ^a	0.28 ± 0.05 ^a	0.70 ± 0.08 ^a
	接種組	0.17 ± 0.07 ^b	0.19 ± 0.07 ^a	0.69 ± 0.05 ^a

字母標記如表 7 所示

表 20 網室內不同接種處理苗木各部位磷濃度之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	P (ppm)		
		根	莖	葉
台灣檫	對照組	1849.17 ± 91.73 ^{b1}	1904.17 ± 63.31 ^b	3886.17 ± 844.78 ^b
	接種組	3000.25 ± 223.35 ^a	2925.00 ± 100.00 ^a	6446.67 ± 630.00 ^a
光蠟樹	對照組	2141.67 ± 187.86 ^b	1899.17 ± 100.63 ^b	4371.17 ± 177.26 ^b
	接種組	3627.42 ± 43.64 ^a	3666.67 ± 274.24 ^a	6593.33 ± 541.18 ^a
苦楝	對照組	2767.08 ± 63.41 ^b	2950.00 ± 50.00 ^b	4366.67 ± 363.41 ^b
	接種組	3609.58 ± 98.24 ^a	3491.67 ± 160.73 ^a	5495.00 ± 158.76 ^a

字母標記如表 7 所示

表 21 網室內不同接種處理苗木各部位鉀濃度之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	K (ppm)		
		根	莖	葉
台灣檫	對照組	5103.08 ± 187.63 ^{b1}	4078.33 ± 72.36 ^b	3371.17 ± 635.73 ^a
	接種組	5571.92 ± 143.13 ^a	4388.08 ± 36.36 ^a	4655.33 ± 468.64 ^a
光蠟樹	對照組	6566.67 ± 147.88 ^b	3647.08 ± 61.82 ^a	6425.42 ± 56.77 ^b
	接種組	7084.75 ± 202.90 ^a	3378.33 ± 10.61 ^b	6880.92 ± 117.63 ^a
苦楝	對照組	4254.58 ± 148.20 ^b	3669.75 ± 100.69 ^a	5802.50 ± 66.74 ^b
	接種組	4690.42 ± 91.55 ^a	4031.08 ± 216.47 ^a	6255.17 ± 34.15 ^a

字母標記如表 7 所示

表 22 網室內不同接種處理苗木各部位鈣濃度之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	Ca (ppm)		
		根	莖	葉
台灣檫	對照組	2391.83 ± 31.16 ^{a1}	2385.42 ± 45.50 ^a	790.92 ± 368.142 ^b
	接種組	2404.25 ± 3.44 ^a	2401.17 ± 7.91 ^a	2182.75 ± 250.74 ^a
光蠟樹	對照組	2671.75 ± 128.40 ^a	2358.83 ± 91.06 ^a	2392.92 ± 17.61 ^a
	接種組	2873.42 ± 52.54 ^a	2376.92 ± 55.79 ^a	2409.25 ± 14.29 ^a
苦楝	對照組	2403.17 ± 7.57 ^a	2399.83 ± 2.52 ^a	2350.75 ± 17.91 ^a
	接種組	2412.17 ± 57.45 ^a	2405.50 ± 56.62 ^a	2363.83 ± 6.63 ^a

字母標記如表 7 所示

表 23 網室內不同接種處理苗木各部位鎂濃度之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	Mg (ppm)		
		根	莖	葉
台灣檫	對照組	1102.58 ± 66.72 ^{b1}	1553.75 ± 40.99 ^b	182.50 ± 9.22 ^b
	接種組	1335.33 ± 71.51 ^a	1921.08 ± 52.94 ^a	357.58 ± 55.06 ^a
光蠟樹	對照組	2397.42 ± 36.17 ^a	1607.42 ± 68.74 ^b	544.17 ± 82.55 ^b
	接種組	2589.08 ± 145.01 ^a	1882.08 ± 99.41 ^a	1951.25 ± 134.34 ^a
苦楝	對照組	1040.33 ± 164.04 ^a	1604.00 ± 112.80 ^a	2092.17 ± 60.20 ^b
	接種組	1168.92 ± 74.04 ^a	1809.33 ± 73.34 ^a	2390.67 ± 57.51 ^a

字母標記如表 7 所示

表 24 崩塌地第 1 試驗樣區不同接種處理苗木各部位氮濃度之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	N (%)		
		根	莖	葉
台灣檫	對照組	0.17 ± 0.03 ^{a1}	0.14 ± 0.03 ^a	0.68 ± 0.12 ^a
	接種組	0.23 ± 0.05 ^a	0.18 ± 0.05 ^a	0.82 ± 0.26 ^a
光蠟樹	對照組	0.27 ± 0.00 ^a	0.15 ± 0.04 ^a	0.63 ± 0.08 ^a
	接種組	0.32 ± 0.04 ^a	0.15 ± 0.02 ^a	0.90 ± 0.17 ^a
苦楝	對照組	0.15 ± 0.02 ^b	0.18 ± 0.04 ^a	1.23 ± 0.32 ^a
	接種組	0.21 ± 0.02 ^a	0.23 ± 0.02 ^a	1.63 ± 0.08 ^a
赤楊	對照組	0.18 ± 0.02 ^a	0.21 ± 0.05 ^a	1.40 ± 0.14 ^a
	接種組	0.28 ± 0.11 ^a	0.18 ± 0.02 ^a	1.19 ± 0.07 ^a

字母標記如表 7 所示

表 25 崩塌地第 1 試驗樣區不同接種處理苗木各部位磷濃度之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	P (ppm)		
		根	莖	葉
台灣檫	對照組	3901.42 ± 82.91 ^{b1}	4435.17 ± 64.62 ^a	2675.08 ± 100.07 ^b
	接種組	4120.00 ± 56.35 ^a	4601.67 ± 90.05 ^a	2989.58 ± 45.27 ^a
光蠟樹	對照組	2402.75 ± 151.59 ^a	3833.08 ± 19.75 ^a	2746.58 ± 54.07 ^a
	接種組	2666.67 ± 102.60 ^a	4077.08 ± 90.38 ^a	3018.58 ± 199.59 ^a
苦楝	對照組	2452.25 ± 99.19 ^a	3379.25 ± 43.47 ^a	2829.50 ± 120.49 ^b
	接種組	2368.75 ± 117.53 ^a	3311.00 ± 18.33 ^a	3143.67 ± 112.94 ^a
赤楊	對照組	2381.92 ± 114.43 ^a	1645.25 ± 12.34 ^a	3774.67 ± 174.22 ^a
	接種組	2426.08 ± 115.39 ^a	1642.08 ± 54.90 ^a	4143.00 ± 224.77 ^a

字母標記如表 7 所示

表 26 崩塌地第 1 試驗樣區不同接種處理苗木各部位鉀濃度之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	K (ppm)		
		根	莖	葉
台灣檫	對照組	4181.00 ± 37.23 ^{b1}	5297.00 ± 96.00 ^b	5096.33 ± 7.95 ^b
	接種組	4507.50 ± 131.82 ^a	5996.67 ± 229.64 ^a	5793.67 ± 156.54 ^a
光蠟樹	對照組	3999.83 ± 185.53 ^b	6026.75 ± 196.08 ^a	6046.75 ± 16.47 ^a
	接種組	4744.75 ± 235.50 ^a	6135.33 ± 70.49 ^a	6093.58 ± 137.29 ^a
苦楝	對照組	5079.25 ± 63.77 ^b	5391.08 ± 56.18 ^b	6064.92 ± 43.85 ^a
	接種組	5377.92 ± 96.13 ^a	5669.08 ± 64.83 ^a	6491.17 ± 240.06 ^a
赤楊	對照組	2213.08 ± 10.30 ^a	1893.25 ± 13.04 ^b	6414.33 ± 101.49 ^a
	接種組	2407.33 ± 124.92 ^a	2088.67 ± 79.97 ^a	6574.17 ± 156.53 ^a

字母標記如表 7 所示

表 27 崩塌地第 1 試驗樣區不同接種處理苗木各部位鈣濃度之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	Ca (ppm)		
		根	莖	葉
台灣檫	對照組	4477.83 ± 13.77 ^{b1}	2293.50 ± 202.87 ^a	6423.33 ± 39.93 ^a
	接種組	4994.25 ± 80.44 ^a	2383.58 ± 46.88 ^a	6507.75 ± 171.12 ^a
光蠟樹	對照組	4635.00 ± 28.99 ^b	1546.58 ± 64.07 ^b	4635.17 ± 28.10 ^a
	接種組	4900.75 ± 41.73 ^a	1852.08 ± 124.17 ^a	4990.92 ± 223.42 ^a
苦楝	對照組	3862.17 ± 45.81 ^a	2135.92 ± 65.05 ^a	7584.92 ± 70.40 ^b
	接種組	3855.33 ± 90.99 ^a	2195.75 ± 17.94 ^a	8472.58 ± 12.15 ^a
赤楊	對照組	3102.42 ± 60.73 ^a	1571.75 ± 36.75 ^a	5554.33 ± 214.85 ^a
	接種組	3135.17 ± 61.25 ^a	1603.83 ± 104.43 ^a	5999.08 ± 94.35 ^a

字母標記如表 7 所示

表 28 崩塌地第 1 試驗樣區苗木對於不同接種處理之苗木各部位鎂濃度之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	Mg (ppm)		
		根	莖	葉
台灣檫	對照組	928.17 ± 59.25 ^{a1}	1077.67 ± 34.13 ^a	2106.67 ± 23.96 ^a
	接種組	870.25 ± 96.23 ^a	1108.25 ± 4.26 ^a	1831.50 ± 47.28 ^b
光蠟樹	對照組	733.00 ± 129.85 ^a	815.50 ± 51.14 ^b	1387.50 ± 101.58 ^b
	接種組	846.83 ± 75.10 ^a	1184.58 ± 96.69 ^a	1680.25 ± 91.43 ^a
苦楝	對照組	663.58 ± 105.90 ^b	1257.50 ± 2.41 ^a	1475.08 ± 217.07 ^b
	接種組	936.92 ± 7.39 ^a	1272.42 ± 9.27 ^a	2138.92 ± 64.88 ^a
赤楊	對照組	752.00 ± 98.78 ^a	1037.83 ± 1.61 ^b	3868.67 ± 92.60 ^a
	接種組	881.58 ± 58.69 ^a	1055.17 ± 6.64 ^a	3817.17 ± 147.68 ^a

字母標記如表 7 所示

(VIII) 生長介質之化學性質分析

1. 土壤酸鹼值測定

網室試驗苗木生長介質與崩塌地第 1 試驗樣區土壤酸鹼值測定如表 29 所示，在網室介質 pH 值中，台灣檫對照組者顯著高於接種組者；崩塌地第 1 試驗樣區土壤介質 pH 值中，苦楝接種組者顯著高於對照組者。

表 29 網室苗木生長介質與崩塌地第 1 試驗樣區土壤酸鹼值之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	網室介質 pH 值	崩塌地第一樣區介質 pH 值
台灣檫	對照組	5.88 ± 0.22^{a1}	7.90 ± 0.08^a
	接種組	5.40 ± 0.17^b	8.07 ± 0.03^a
光蠟樹	對照組	7.68 ± 0.29^a	7.65 ± 0.10^a
	接種組	7.52 ± 0.40^a	7.86 ± 0.01^a
苦楝	對照組	7.91 ± 0.57^a	7.39 ± 0.12^b
	接種組	7.57 ± 0.27^a	7.85 ± 0.09^a
赤楊	對照組	—	7.81 ± 0.07^a
	接種組	—	7.63 ± 0.09^a

字母標記如表 7 所示

2. 土壤氮含量測定

介質及土壤之含氮量分析結果顯示，在網室試驗用之苗木生長介質與崩塌地第 1 試驗樣區土壤之氮含量均無顯著差異(表 30)。

表 30 網室苗木生長介質與崩塌地第 1 試驗樣區土壤氮含量之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	網室介質 N 濃度 (%)	崩塌地第一樣區介質 N 濃度 (%)
台灣檫	對照組	0.77 ± 0.17^{a1}	0.09 ± 0.02^a
	接種組	0.83 ± 0.05^a	0.11 ± 0.05^a
光蠟樹	對照組	0.08 ± 0.04^a	0.07 ± 0.00^a
	接種組	0.05 ± 0.05^a	0.08 ± 0.02^a
苦楝	對照組	0.06 ± 0.02^a	0.08 ± 0.02^a
	接種組	0.06 ± 0.02^a	0.09 ± 0.02^a
赤楊	對照組	—	0.10 ± 0.03^a
	接種組	—	0.12 ± 0.01^a

字母標記如表 7 所示

3. 土壤可置換性陽離子濃度測定

網室苗木生長介質與崩塌地第 1 試驗樣區土壤之苗木生長介質之可置換性陽離子濃度分析結果顯示，在網室試驗部分，僅有光蠟樹者之鈣濃度以接種組顯著高於對照組者(表 31)，。崩塌地試驗部分，無論在鈣、鉀、鎂濃度上均無顯著差異(表 32)。

表 31 網室苗木生長介質可置換性陽離子濃度之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	Ca ²⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	K ⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)
台灣檫	對照組	6.37 ± 0.25 ^{a1}	0.28 ± 0.03 ^a	3.27 ± 0.36 ^a
	接種組	6.58 ± 0.37 ^a	0.22 ± 0.08 ^a	3.52 ± 0.22 ^a
光蠟樹	對照組	5.37 ± 0.08 ^b	0.07 ± 0.04 ^a	0.30 ± 0.05 ^a
	接種組	5.79 ± 0.11 ^a	0.06 ± 0.02 ^a	0.36 ± 0.00 ^a
苦楝	對照組	5.65 ± 0.03 ^a	0.05 ± 0.04 ^a	0.36 ± 0.01 ^a
	接種組	5.54 ± 0.31 ^a	0.09 ± 0.02 ^a	0.31 ± 0.04 ^a

字母標記如表 7 所示

表 32 崩塌地第 1 試驗樣區土壤可置換性陽離子濃度之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	Ca ²⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	K ⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (cmol (+) kg ⁻¹)
台灣檫	對照組	8.97 ± 0.60 ^{a1}	0.28 ± 0.07 ^a	0.87 ± 0.23 ^a
	接種組	8.67 ± 0.33 ^a	0.28 ± 0.05 ^a	0.96 ± 0.16 ^a
光蠟樹	對照組	8.29 ± 0.36 ^a	0.32 ± 0.04 ^a	0.88 ± 0.05 ^a
	接種組	9.13 ± 0.86 ^a	0.38 ± 0.03 ^a	1.29 ± 0.19 ^a
苦楝	對照組	9.07 ± 1.02 ^a	0.33 ± 0.03 ^a	1.06 ± 0.06 ^a
	接種組	10.31 ± 0.41 ^a	0.32 ± 0.05 ^a	1.21 ± 0.14 ^a
赤楊	對照組	10.27 ± 0.37 ^a	0.29 ± 0.02 ^a	1.39 ± 0.16 ^a
	接種組	10.27 ± 0.48 ^a	0.28 ± 0.03 ^a	1.48 ± 0.16 ^a

字母標記如表 7 所示

4. 土壤有效磷含量測定

網室苗木生長介質與崩塌地第 1 試驗樣區土壤有效磷含量之分析結果顯示，在

網室試驗用生長介質及崩塌地第 1 試驗樣區土壤之有效磷含量均無顯著差異 (表 33)。

表 33 網室試驗苗木介質與崩塌地第 1 試驗樣區土壤有效磷含量之獨立樣本 t 檢定

樹種	項目	網室介質 P 濃度(ppm)	崩塌地第一樣區介質 P 濃度(ppm)
台灣櫟	對照組	32.28 ± 35.31 ^{a1}	82.34 ± 38.43 ^a
	接種組	23.10 ± 12.43 ^a	129.55 ± 39.95 ^a
光蠟樹	對照組	38.49 ± 3.36 ^a	66.82 ± 64.90 ^a
	接種組	35.26 ± 3.30 ^a	85.70 ± 48.94 ^a
苦楝	對照組	35.91 ± 2.52 ^a	69.02 ± 11.31 ^a
	接種組	36.16 ± 6.72 ^a	108.08 ± 54.00 ^a
赤楊	對照組	—	55.31 ± 23.54 ^a
	接種組	—	50.00 ± 19.33 ^a

字母標記如表 7 所示

(IX) 根部解剖觀察分析

1. 台灣櫟

(1) 光學顯微鏡觀察

應用染根技術將對照組及接種 *G. mosseae* 的台灣櫟苗木之根部組織進行染色處理後，以光學顯微鏡觀察苗木之菌根感染情形。結果顯示，對照組苗木根部組織內無被感染之現象(圖 27)，而接種組苗木之根部組織內則有菌絲與囊泡存在 (圖 28)。

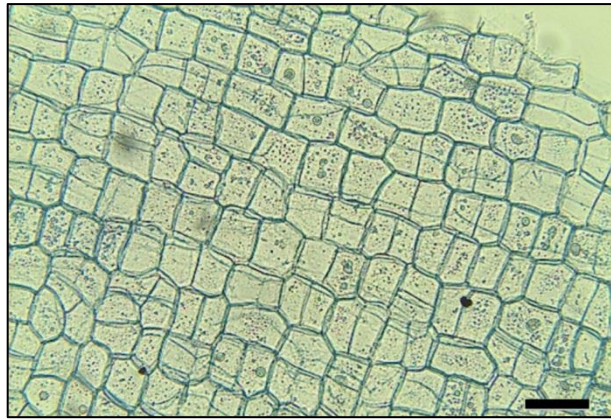


圖 27 對照組台灣榨苗木根部組織之染色情形
(橫線 = 50 μm)

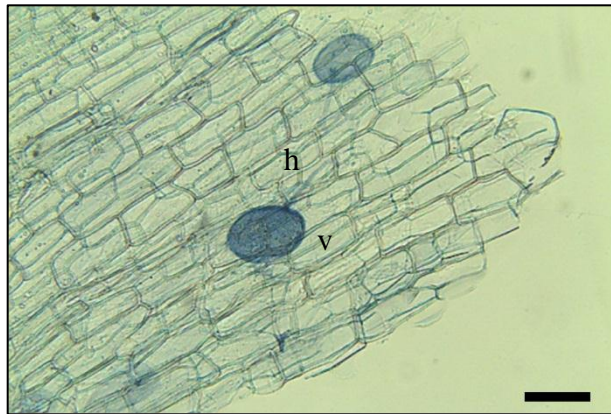


圖 28 接種 *Glomus mosseae* 7 個月後台灣榨苗木根部組織之染色情形

v：囊泡；h：菌絲。(橫線 = 50 μm)

(2) 掃描式電子顯微鏡觀察

以掃描式電子顯微鏡觀察對照組及接種組台灣榨苗木根部組織之微細構造發現，對照組的苗木根部組織並未被感染(圖 29)，而接種組苗木根部組織則有叢枝體與囊泡之構造(圖 30)。

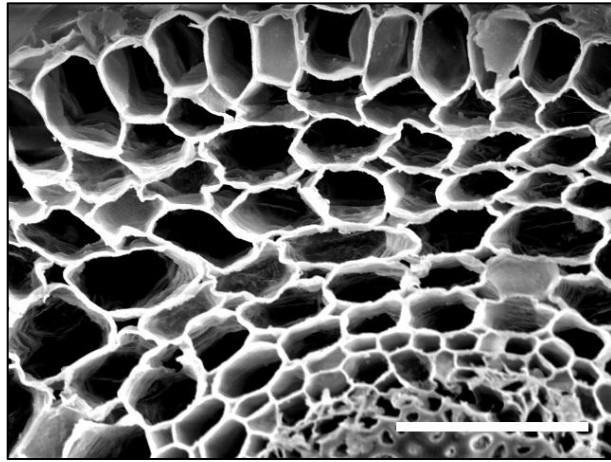


圖 29 對照組台灣欒苗木根部組織之微細構造
(橫線= 50 μm)

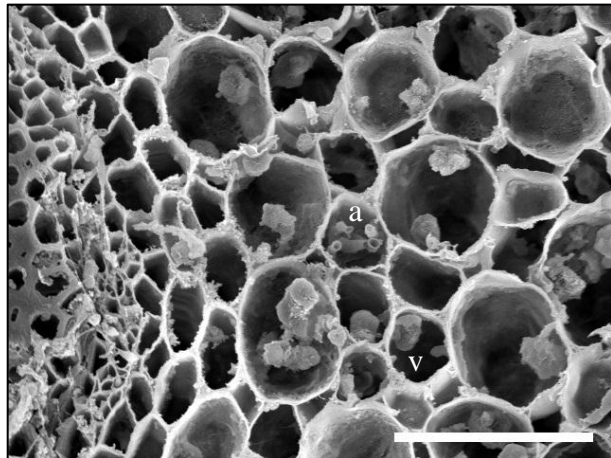


圖 30 接種 *Glomus mosseae* 7 個月後台灣欒苗木根部組織之微
細構造

v：囊泡；a：叢枝體。(橫線 = 50 μm)

2. 光臘樹

(1) 光學顯微鏡觀察

應用染根技術觀察對照組及接種組光臘樹苗木之根部組織發現，對照組苗木根部組織並未被感染(圖 31)，而接種組苗木根部組織則有菌絲與囊泡之存在(圖 32)。

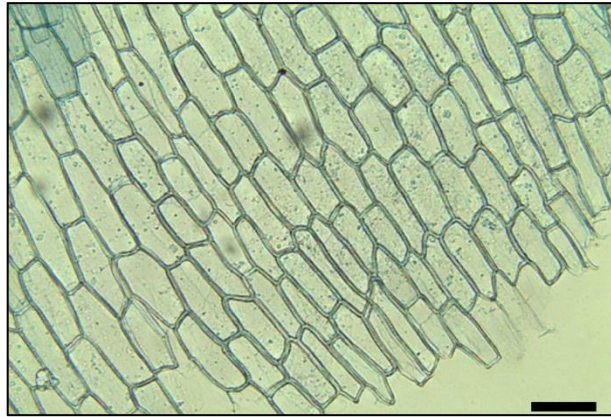


圖 31 對照組之光臘樹苗木根部組織之染色情形
(橫線= 50 μm)



圖 32 接種 *Glomus mosseae* 7 個月後光臘樹苗木根部組織之染色情形
v：囊泡；h：菌絲。(橫線 = 50 μm)

(2) 掃描式電子顯微鏡觀察

以掃描式電子顯微鏡觀察對照組及接種組光臘樹苗木根部組織之微細構造發現，對照組的苗木根部組織並未被感染(圖 33)，而接種組苗木根部組織則有叢枝體、囊泡及菌絲之存在(圖 34)。

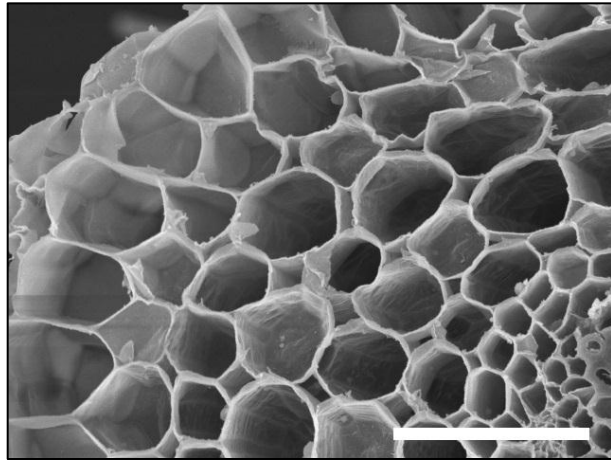


圖 33 對照組之光臘樹苗木根部組織之微細構造
(橫線= 50 μm)

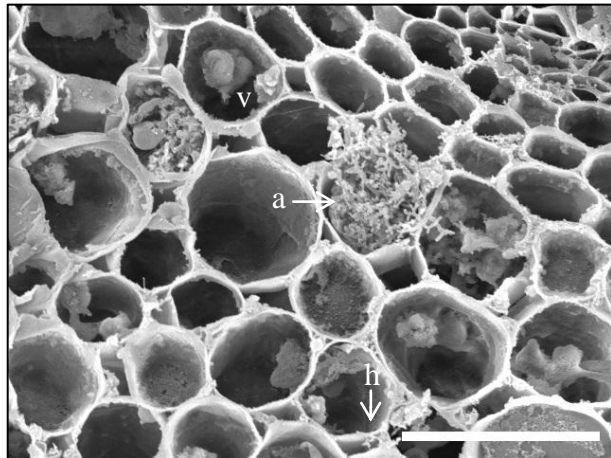


圖 34 接種 *Glomus mosseae* 7 個月後光臘樹苗木根部組織之微細構造

v：囊泡；h：菌絲；a：叢枝體。(橫線= 50 μm)

3. 苦楝

(1) 光學顯微鏡下觀察

以染根技術觀察對照組及接種組苦楝苗木之根部組織發現，對照組苗木之根部組織並未被感染(圖 35)，而接種組苗木之根部組織則有菌絲與囊泡之存在(圖 36)。

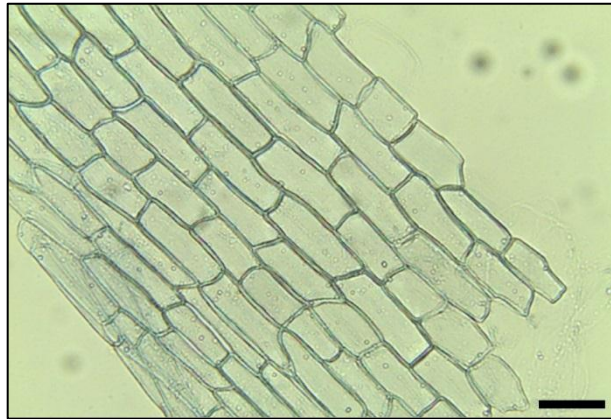


圖 35 對照組苦楝苗木根部組織之染色情形
(橫線= 50 μm)

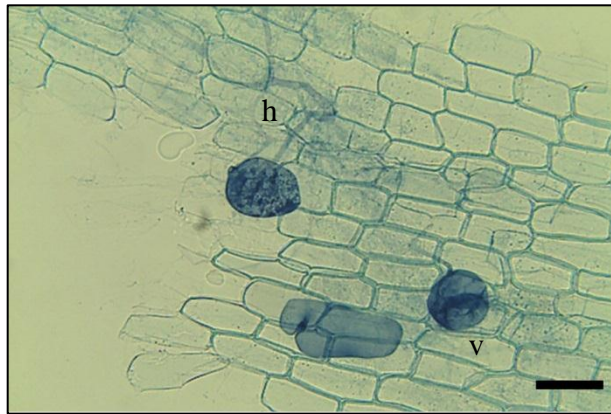


圖 36 接種 *Glomus mosseae* 7 個月後苦楝苗木根部組織之染色情形
v：囊泡；h：菌絲。(橫線= 50 μm)

(2) 掃描式電子顯微鏡下觀察

以掃描式電子顯微鏡觀察對照組及接種組光臘樹苗木根部組織之微細構造發現，對照組的苗木根部組織並未被感染(圖 37)，而接種組苗木根部組織則有囊泡與菌絲之存在(圖 38)。

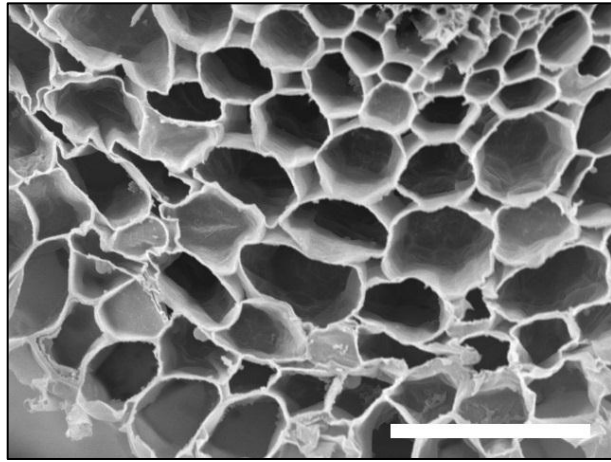


圖 37 對照組苦楝苗木根部組織之微細構造
(橫線= 50 μm)

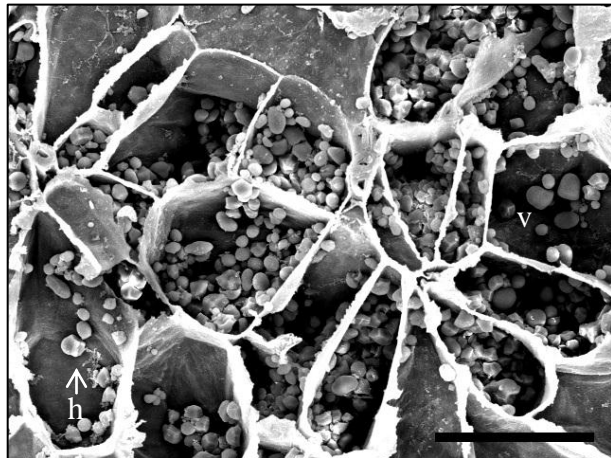


圖 38 接種 *Glomus mosseae* 7 個月後苦楝苗木根部組織之微細構造

v：囊泡；h：菌絲。(橫線= 50 μm)

(X) 嘉義林區管理處玉井工作站之玉井事業區 3 處崩塌地造林前植被調查

1. 第 1 試驗樣區之造林前植被名錄如表 34 所示。

表 34 第 1 試驗樣區之造林前植被名錄

植物中名	植物學名
美洲含羞草	<i>Mimosa diplotricha</i>
南美蟛蜞菊	<i>Wedelia triloba</i> (L.) Hitchc.
青葙	<i>Celosia argentea</i> L.
山黃麻	<i>Trema orientalis</i> (L.) Blume
大花咸豐草	<i>Bidens pilosa</i> L. var. <i>radiata</i> Sch.
血桐	<i>Macaranga tanarius</i>
淡竹葉	<i>Lophatherum gracile</i> Brongn.
戟葉菜欒藤	<i>Xenostegia tridentata</i> (L.) D. F. Austin & Staples

2. 第 2 試驗樣區之造林前植被名錄如表 35 所示。

表 35 第 2 試驗樣區之造林前植被名錄

植物中名	植物學名
淡竹葉	<i>Lophatherum gracile</i> Brongn.
野牽牛	<i>Ipomoea obscura</i> (L.) Ker. Gawl.
閉鞘薑	<i>Costus speciosus</i> .(Koenig) Smith
長穗木	<i>Stachytarpheta jamaicensis</i> (L.)Vahl
美洲含羞草	<i>Mimosa diplotricha</i>
毛西番蓮	<i>Passiflora foetida</i> L.
香澤蘭	<i>Eupatorium odoratum</i> L.
短果苦瓜	<i>Momordica charantia</i> L. var. <i>abbreviata</i> Ser.
洋落葵	<i>Anredera scandens</i> Moq.
成功白花菜	<i>Cleome rutidosperma</i> DC.

3. 第 3 試驗樣區之造林前植被名錄如表 36 所示。

表 36 第 3 試驗樣區之造林前植被名錄

植物中名	植物學名
淡竹葉	<i>Lophatherum gracile</i> Brongn.
野牽牛	<i>Ipomoea obscura</i> (L.) Ker. Gawl.
構樹	<i>Morus papyrifera</i> L.
長穗木	<i>Stachytarpheta jamaicensis</i> (L.) Vahl
美洲含羞草	<i>Mimosa diplotricha</i>
毛西番蓮	<i>Passiflora foetida</i> L.
香澤蘭	<i>Eupatorium odoratum</i> L.
短果苦瓜	<i>Momordica charantia</i> L. var. <i>abbreviata</i> Ser.
洋落葵	<i>Anredera scandens</i> Moq.

(XI) 嘉義林區管理處玉井工作站之玉井事業區 3 處崩塌地造林後植被調查

1. 第 1 試驗樣區之造林後植被名錄如表 37 所示。

表 37 第 1 試驗樣區之造林後植被名錄

植物中名	植物學名
美洲含羞草	<i>Mimosa diplotricha</i>
青葙	<i>Celosia argentea</i> L.
山黃麻	<i>Trema orientalis</i> (L.) Blume
大花咸豐草	<i>Bidens pilosa</i> L. var. <i>radiata</i> Sch.
淡竹葉	<i>Lophatherum gracile</i> Brongn.

2. 第 2 試驗樣區之造林後植被名錄如表 38 所示。

表 38 第 2 試驗樣區之造林後植被名錄

植物中名	植物學名
淡竹葉	<i>Lophatherum gracile</i> Brongn.
野牽牛	<i>Ipomoea obscura</i> (L.) Ker. Gawl.
長穗木	<i>Stachytarpheta jamaicensis</i> (L.) Vahl
美洲含羞草	<i>Mimosa diplotricha</i>
香澤蘭	<i>Eupatorium odoratum</i> L.
短果苦瓜	<i>Momordica charantia</i> L. var. <i>abbreviata</i> Ser.
洋落葵	<i>Anredera scandens</i> Moq.

3. 第 3 試驗樣區之造林後植被名錄如表 39 所示。

表 39 第 3 試驗樣區之造林後植被名錄

植物中名	植物學名
淡竹葉	<i>Lophatherum gracile</i> Brongn.
野牽牛	<i>Ipomoea obscura</i> (L.) Ker. Gawl.
長穗木	<i>Stachytarpheta jamaicensis</i> (L.) Vahl
美洲含羞草	<i>Mimosa diplotricha</i>
香澤蘭	<i>Eupatorium odoratum</i> L.
洋落葵	<i>Anredera scandens</i> Moq.

IV、討論

(I) 苗高及根頸直徑之生長

試驗結果顯示，在苗高及根頸直徑上，於網室試驗部分顯示，接種菌根菌苗木之苗高均高於未接種之苗高，而崩塌地試驗僅第 2 試驗樣區之苦楝、第 3 試驗樣區之光蠟樹無顯著差異外，其餘均以接種組之生長量表現較佳且呈顯著差異(表 7-10)。

在其他學者的研究結果也指出，接種菌根菌稻苗之生長顯著高於未接種者，且增加高度生長 34 %、及地上部生物量 122 % (Wang *et al.*, 2012)，但在試驗初期確實以未接種苗木之生長量較為良好，可能原因是在接種初期，由於菌根真菌與植物競爭有限的碳源營養，苗木之生長與發育會受到碳元素供應不足而暫時受到限制，但隨著雙方的繼續生長，這種暫時現象便會改變；植物生產的碳水化合物化合物的累積，提供了真菌有機體的組成；而真菌也增加提供植物所需的營養及水分，因此促進了雙方的生長 (郭秀珍、畢國昌，1989)，這與本研究後期之觀察結果相一致。

在所有主要的陸生植物群落中約有 80 % 的維管束植物可和叢枝菌根形成共生，因此了解它們的功能在可持續的農業或森林自然生態系統之研究上甚為重要。在非生物逆境當中，生育地養分貧瘠及乾旱對植物有特別重要的影響作用。前人研究指出叢枝菌根菌會影響土壤結構、碳在土壤中的沉積、土壤中微生物和動物之相互作用，以及植物間的競爭 (Smith *et al.*, 2010)。

(II) 苗木成活率及抗旱性

試驗結果(表 11)顯示，第 1 試驗樣區除台灣欒接種組與對照組成活率均呈 100% 外，苦楝及光蠟樹對照組均高於接種組，赤楊則以接種組有較高之成活率；第 2 試驗樣區除苦楝對照組成活率高於接種組外，其餘樹種之成活率均以接種組高於或等於對照組；第 3 試驗樣區除台灣欒對照組之成活率高於接種組外，其餘樹種之成活率均以接種組較高。在乾旱條件下的逆境反應，接種叢枝菌根菌可以有效的改變植物與水分之間的關係，進而提高自身在乾旱條件下的抗性 (Birhane *et al.*, 2012)，此外，接種後苗木提高了對水分的利用效率、保水能力和相對含水量 (Zhu *et al.*, 2011)。另外值得注意的是叢枝菌根菌的拓殖能改變宿主植物根部的能力，例如根部的結構、根長及一些較難攝取的養分吸收 (Wu and Xia, 2006; Wu *et al.*, 2008; Khalvati *et al.*, 2010; Ruiz-Sanchez *et al.*, 2010)。這些結果與本研究在崩塌地復舊造林上的成活率表現相一致，在造林初期尤其明顯，接種苗木對乾旱的耐受程度遠大

於未接種苗木，但造林後期也因長期處於一高度缺水的環境逆境下，使得造林後期成活率表現下降，此部分乃因長期乾早已超出植物生理特性及限度所致，但在野外實際觀察結果仍可發現，非接種苗木的萎凋情形較為嚴重。

(III) 苗木生理特性觀察

試驗結果(圖 17 - 22)顯示，接種組苗木在光度 $1700 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 下之淨光合作用速率平均值高於對照組者，並在曲線上推測其有更高的光合作用效率潛能。而在葉綠素濃度部分 (表 16、17)，網室試驗與崩塌地第 1 試驗樣區試驗結果均以苦楝接種組之葉綠素 a、葉綠素 b、葉綠素 a + b 含量均高於對照組者並呈顯著差異。另外，葉部氣孔形態、密度觀察結果(表 18)顯示，在各接種組苗木之氣孔密度均顯著高於對照組者。植物在接種叢枝菌根菌後，有效的增加了葉綠素 a、葉綠素 b、葉綠素 a + b 的濃度，並對於淨光合作用速率有顯著的提升作用 (Zhu *et al.*, 2010)。另外，在氣孔導度上亦有明顯的增加，特別是在高溫下，接種苗木比未接種苗木在細胞間有較低的 CO_2 濃度 (Zhu *et al.*, 2011)。這些研究結果指出，接種苗木對於碳元素的固定有較高的效率，並對於逆境有較佳的適應性。本研究苗木之淨光合作用速率的表現和其他學者之研究結果相符。

(IV) 植物體各部位氮、磷、鉀、鈣及鎂含量

網室試驗與崩塌地第 1 試驗樣區不同接種處理苗木組織之氮、磷、鉀、鈣、鎂養分濃度分析結果 (表 19 - 28)顯示，在網室試驗部分，特別以磷濃度在苗木各部位均以接種組者顯著高於對照組者，其餘元素則無一致性的表現；而在崩塌地試驗樣區部分，苗木磷濃度表現則較不一致，其餘元素亦然。

接種菌根菌可增加株高、莖部乾重、根莖磷濃度比和莖的磷含量。在小扁豆和叢枝菌根菌接種可以減少砷的吸收和提高磷的營養 (Ahmed *et al.*, 2011)。上述結果與本研究之網室試驗結果相一致，尤其在磷含量的增加上有著顯著差異；但在崩塌

地試驗上卻較不一致，乃因崩塌地生長介質內含有叢枝菌根菌，使得對照組也有機會被其它菌根菌感染，在野外試驗上確實會面臨到天然菌根菌的競爭與接種，然而本研究在崩塌地部分僅觀察了 6 個月，期間遭逢近 3 個月不降水的考驗，有些樣本已喪失，因此分析上較不如網室試樣般的全面，天然環境因子也是一大變因。

土壤中有機氮之分解是一種潛在的氮循環限速階段。叢枝菌根菌是根部的共生菌，可能會提高植物對有機氮產物競爭的能力。由於大多數植物是叢枝菌根菌的宿主，叢枝菌根能夠廣泛利用有機氮來影響植物的生產力，特別是在可用性氮元素比較低的地方 (Whiteside *et al.*, 2012)。在本研究目前成果中，植物體內氮含量的部分並無法看出很明顯的差異，推測可能與崩塌地土壤化育時間有關，若後續對試驗苗木進行較長時間的追蹤調查，應能反映出接種菌根菌之效益。

(V) 試驗苗木生長介質之化學性質分析

研究結果顯示 (表 29)，在網室苗木生長介質 pH 值中，台灣檫對照組者顯著高於接種組者；崩塌地第 1 試驗樣區土壤 pH 值中，苦楝接種組者顯著高於接種組者。而可置換性陽離子濃度之分析結果(表 31、32)顯示，在網室試驗部分，僅有光蠟樹接種組之鈣濃度顯著高於接種組者，餘無顯著差異。

在植物接種叢枝菌根菌後的許多有益影響中，減輕土壤中的逆境因子也有著特別的意義，例如能減輕土壤中重金屬的危害、土壤鹽害，甚至是物理性質的土壤緊密程度對於苗木生長上的不利影響 (Miransari, 2010)，而另一項重點則是叢枝菌根菌能夠改善土壤結構 (Ryan & Graham, 2002)，這些綜合性的效應能夠提高生態系統的整體效率。而本研究中，在崩塌地接種前後苦楝根圈土壤 pH 值的改變以及網室試驗之台灣檫根圈土壤 pH 值的改變均顯示，接種菌根菌對土壤環境的交互作用有其一定的影響能力。這提醒了我們，在接種菌根菌後不僅僅是對於苗木的正向發展有一定程度的優勢，更重要的是它能使自然環境更能被植物所利用，更符合永續共存的生態系統，並改善土壤團粒結構與養分循環關係。這在崩塌地復舊造林有著

重要的意義。因為崩塌地土壤大多為砂礫岩，對苗木的存活和生長是一大嚴苛的挑戰。因此，吾人可以藉由菌根菌的幫助來改善苗木的適應能力，提高崩塌地復舊造林的成效。

(VI) 叢枝菌根菌對苗木根部構造觀察

由觀察結果(圖 27 - 38)可知，苗木接種叢枝菌根菌 *G. mosseae* 後，苗木根部微細構造有所變化，接種組苗木根部組織出現的叢枝體、囊泡及菌絲均為苗木根部感染叢枝菌根菌的特徵，與 Harrison (2005)描述感染菌根菌後，於根部細胞內產生二歧分岔珊瑚狀之叢枝體構造，及菌絲與囊泡之結果相一致。

另外，植物根系的結構特徵是植物根系與土壤中營養元素的關係。許多環境因子可以影響根系結構的建立，例如叢枝菌根菌。叢枝菌根菌的感染可促進形成高度側根 (Yao *et al.*, 2009)。這樣的表現，除了可增加根部表面積的吸收範圍外，亦可有效的進行根系拓殖行為，在穩定土壤團粒結構、增加土壤孔隙、增進土壤微生物活動效率上均有良好的功效。

叢枝菌根菌的菌絲直徑在 2 - 20 μm ，它們比根更容易深入土壤隙縫中，並更接近營養元素，增加吸收養分的機會 (Smith & Read, 2008)。相對於未感染菌根菌者較具有更強的養分競爭能力，使苗木生長不因養分限制而受到抑制。

V、結論

(I)、在網室試驗上，接種叢枝菌根菌 *G. mosseae* 苗木之生長量顯著高於未接種者。

(II)、崩塌地試驗樣區調查結果顯示，在造林初期接種苗木對乾旱的耐受程度遠大於未接種苗木，顯示接種叢枝菌根菌 *G. mosseae* 苗木在抗旱性上有較佳的表現。

(III)、接種組苗木在光度 $1700 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 下之淨光合作用速率平均值顯著高於對照組者顯示，接種叢枝菌根菌 *G. mosseae* 後，苗木有較高的光飽和點並更有效率的轉換太陽能用以固定碳素。

(IV)、接種叢枝菌根菌 *G. mosseae* 苗木之葉部氣孔密度均顯著高於對照組者；接種組苦楝苗木之葉綠素 a、葉綠素 b、葉綠素 a+b 含量顯著高於對照組者顯示，接種叢枝菌根菌 *G. mosseae* 有利於苗木生理活性的提高。

(V)、在網室試驗上，接種叢枝菌根菌 *G. mosseae* 苗木組織之磷濃度在苗木各部位均以接種組顯著高於對照組者，與前人研究叢枝菌根菌效益之結果一致。

(VI)、以光學顯微鏡及掃描式電子顯微鏡觀察接種 *G. mosseae* 苗木之根部組織發現，其根部組織具有叢枝體、囊泡及菌絲等典型的叢枝菌根構造。

VI、致謝

本研究承林務局造林生產組補助經費，謹致誠摯謝忱。研究期間承林務局嘉義林區管理處玉井工作站同仁協助，謹此一併致謝。

VII、參考文獻

余旻儒 (2010) *Frankia* 對臺灣胡頹子苗木生長及生理特性之效應。國立嘉義大學森林暨自然資源研究所碩士論文，86 頁。

吳繼光、林素禎 (1998) 囊叢枝內生菌根菌應用技術手冊。台灣省農業試驗所，300 頁。

許崑衍、李明仁 (2005) 叢枝菌根菌 *Acaulospora scrobiculata* 對羅氏鹽膚木苗木生長之效應。中華林學季刊 38(4):425-436。

- 許崑衍、黃秀緞、李明仁 (2007) 叢枝菌根菌 *Glomus mosseae* 對白匏仔苗木生長及生理特性之效應。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 21(3):245-257。
- 郭秀珍、畢國昌 (1989) 林木菌根菌及應用技術。中國林業出版社，北京。305 頁。
- 陳紀伶、李明仁 (2006) 叢枝菌根菌 *Glomus etunicatum* 對台灣赤楠苗木生長之效應。中華林學季刊 39(1):1-15。
- 彭靖媛、李明仁 (2007) 叢枝菌根菌 *Glomus mosseae* 對鋅汙染土壤培育相思樹苗木生長之效應。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 21(1):1-13。
- 黃秀緞、林靜宜、李明仁 (2007) 叢枝菌根菌 *Entrophospora kentinensis* 對棟樹苗木生長之效應。中華林學季刊 40(1):1-12。
- 熊禮明、史瑞和 (1994) 蒸氣滅菌土壤對植物的毒害作用及 VA 菌根的減毒效應。土壤學報 31:234-239。
- Ahmed, F. R. S., I. J. Alexander, M. Mwinyihija and K. Killham (2011) Effect of superphosphate and arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* on phosphorus and arsenic uptake in Lentil (*Lens culinaris* L.). Water Air Soil Pollution 221:169-182.
- Birhane, E., F. J. Sterck, M. Fetene, F. Bongers and T. W. Kuyper (2012) Arbuscular mycorrhizal fungi enhance photosynthesis, water use efficiency, and growth of frankincense seedlings under pulsed water availability conditions. Oecologia 169:895-904.
- Daniels, B. A. and H. D. Skipper (1982) Methods for the recovery and quantitative estimation of propagules from soil. In N. C. Schenck, ed. Methods and Principle of Mycorrhizal Research. Amer. Phytopathol. Soc. pp. 29-35.
- Harrison, M. J. (2005) Signaling in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. Annual Review of Microbiology 59:19-42.
- Khalvati, M., B. Bartha, A. Dupigny and P. Schroder (2010) Arbuscular mycorrhizal

- association is beneficial for growth and detoxification of xenobiotics of barley under drought stress. *Journal of Soils and Sediments* 10:54-64.
- Lalonde, M. and H. E. Calvert (1979) Production of *Frankia* hyphae and spores as an infective inoculants for *Alnus* species. pp.95-110. In J. C. Grodon, C. T. Wheeler and D. A. Perry, eds. *Symbiotic Nitrogen Fixation in the Management of Temperate Forest*. Oregon State Univ. Press, Corvallis, OR.
- MacDonald, D. C. (1977) Methods of soil and tissue analysis used in the analytical laboratory. Canadian Forestry Service Information Report. MM-X-78.
- Mclean, E. O. (1982) Soil pH and lime requirement. In A. L. page *et al.* eds. *Methods of Soil Analysis. Part 2*. 2nd ed., *Agronomy* 9:199-223 Academic Press, N. Y.
- Miransari, M. (2010) Contribution of arbuscular mycorrhizal symbiosis to plant growth under different types of soil stress. *Plant Biology* 12:563-569.
- Olsen, S. R. and L. E. Sommers (1982) Phosphorus. In A. L. Page *et al.* eds. *Methods of Soil Analysis. Part 2*. 2nd ed. *Agronomy* 9:403-427. Academic Press, N. Y.
- Rhoades, J. D. (1982) Cation exchange capacity. In A. L. Page *et al.* eds. *Methods of Soil Analysis. Part 2*. 2nd ed. *Agronomy* 9:149-157. Academic Press, N. Y.
- Ruiz-Sánchez, M., R. Aroca, Y. Muñoz, R. Polón and J. M. Ruiz-Lozano (2010) The arbuscular mycorrhizal symbiosis enhances the photosynthetic efficiency and the antioxidative response of rice plants subjected to drought stress. *Journal of Plant Physiology* 167:862-869.
- Ryan, M. H. and J. H. Graham (2002) Is there a role for arbuscular mycorrhizal fungi in production agriculture? *Plant and Soil* 244:263-271.
- Smith, S. E. and D. J. Read (2008) *Mycorrhizal symbiosis*, 3rd ed. Elsevier and Academic, London, UK.
- Smith, S. E., E. Facelli, S. Pope and F. A. Smith (2010) Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of

arbuscular mycorrhizas. *Plant Soil* 326:3-20.

Wang, L., F. Ma, S. Zhang and X. Zhang (2012) Effect of *Glomus mosseae* inoculation on growth and reproduction of rice. *Information Technology and Agricultural Engineering* 134:935-942.

Whiteside, M. D., M. A. Digman, E. Gratton and K. K. Treseder (2012) Organic nitrogen uptake by arbuscular mycorrhizal fungi in a boreal forest. *Soil Biology and Biochemistry* 55:7-13.

Wu, Q. S. and R. X. Xia (2006) Arbuscular mycorrhizal fungi influence growth, osmotic adjustment and photosynthesis of citrus under well-watered and water stress conditions. *Journal of Plant Physiology* 163:417-425.

Wu, Q. S., R. X. Xia and Y. N. Zou (2008) Improved soil structure and citrus growth after inoculation with three arbuscular mycorrhizal fungi under drought stress. *European Journal of Soil Biology* 44:122-128.

Yao, Q., L. R. Wang, H. H. Zhu and J. Z. Chen (2009) Effect of arbuscular mycorrhizal fungal inoculation on root system architecture of trifoliolate orange (*Poncirus trifoliata* L. Raf.) seedlings. *Scientia Horticulturae* 121:458-461.

Zhu, X. C., F. B. Song and H. W. Xu (2010) Arbuscular mycorrhizae improves low temperature stress in maize via alterations in host water status and photosynthesis. *Plant Soil* 331:129-137.

Zhu, X. C., F. B. Song, S. Q. Liu and T. D. Liu (2011) Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on photosynthesis and water status of maize under high temperature stress. *Plant Soil* 346:189-199.

期中報告委員意見回覆表

審查委員	審查意見	意見回覆
孫岩章教授	1.本研究調查研究苗木加菌根菌是否促進存活率及生長速率，具重要性。	本研究探討菌根菌應用於崩塌地復舊造林之可行性，具實用性。
	2.建議加入溶磷能力之測試。	因為本研究係以繡球菌 <i>Glomus mosseae</i> 為主而非溶磷菌，所以不測試定溶磷能力。以後使用溶磷菌研究時，在測試溶磷能力。
	3.表格書寫格式，如表 8 之 t 值會與上列單位 cm 混淆。	已依審查委員意見修正。
胡弘道教授	1.菌根菌應用在不良生育地與崩塌地之復舊造林，有其理論與實際價值。	本研究係實際應用菌根菌於崩塌地復舊造林之試驗，具有應用價值。
	2.選用之菌根菌是否最適合崩塌地造林地，應先確立最有價值之 2 至 3 種，在選作接種源較佳。	預備試驗結果，篩選出較佳之繡球菌 <i>Glomus mosseae</i> 作為接種源。
	3.試驗崩塌地之全氮量幾乎不存在，此影響苗木生長至鉅，應配合施用氮肥，以利苗木生長。在此生長之植物，為何無缺氮病徵？	因本研究係菌根苗復舊造林試驗，也探討苗木之適應能力，所以不施肥。苗木為容器苗，可能介質中含有氮，所以初期生長無缺氮病徵。
	4.苗木成活率是否與接種有關？應分析形成之菌根頻度，作統計分析，生長量分析亦同。	本研究有針對菌根頻度及苗木生長量進行調查及統計分析。
	5.出栽前應先確定菌根頻度，俾區分栽後才感染。	出栽前已先調查確定苗木之菌根頻度。
邱志明組長	1.接種菌根菌促進崩塌	本研究旨在探討菌根菌

	地之惡劣地更新林木之成活與生長，對崩塌地之復育造林甚為重要。	促進崩塌地復舊造林之成活及生長，具應用價值。
	2.由研究結果發現，四種不同樹種苗木高度及苗徑之生長，在小苗接種3個月後，未接種接大於接種。評價其效果是以苗木生長或其他形質為依據。	苗木接種菌根菌之初期反應都比未接種者差，乃因菌根菌自苗木吸取所需之養分，待後期才會顯現共生互利之效應。本研究評價其效果是以苗木之成活率及生長量為依據。
	3.造林後1個月，4種樹種(台灣櫟、赤楊、苦楝、光蠟樹)苗高及地徑，接種菌根與不接種叢枝菌根菌，效果不同，是否不同樹種有不同之菌根菌，另和土壤之質地或pH值是否有關？另除理論之探討外，建議加強實際之應用。	造林後1個月，4種樹種之接種菌根與不接種叢枝菌根菌苗木顯現之效果不同，是因不同樹種與 <i>Glomus mosseae</i> 菌根菌之交互作用，同時也受土壤之質地、pH值、水分及養分等因子影響。本研究之重點在實際應用菌根菌於崩塌地之復舊造林工作。
主席：楊駿憲組長	1.接種菌根之苗木生長情形不良，接種後直接放置林地栽植是否會有大者恆大之生長天性現象，可加強說明。	許多研究顯示菌根苗栽植後之生長表現會漸漸超越未接種者，不會有大者恆大之生長現象。
	2.苗木是否為造林栽植季節所栽植的，如非在造林栽植季節栽植，是否有影響其生長之差異性，可加以探討。	本研究因核定較晚，苗木並非在造林栽植季節栽植，適逢3個月乾旱，會影響苗木之生長，然也可檢驗菌根苗在崩塌地之耐旱及耐貧瘠之能力。
	3.菌根菌之研究假設研究結果是對林木生長有明顯之助益，日後將如何以最簡單之方式	本研究將提供接種菌根菌大量培育苗木之技術，以應用於崩塌地造林作業。

	大量栽植應用於崩塌地造林，建議提供實際的初步應用方式。	
--	-----------------------------	--

委託研究計畫績效評估表

101 年度菌根菌應用於崩塌地復舊造林之研究委託研究計畫

一、委託單位：行政院農業委員會林務局
二、受委託單位：嘉義大學 負責人：邱義源
三、計畫主持人：李明仁
四：計畫執行期間：101 年 7 月 24 日起 102 年 6 月 30 日止
五：計畫經費：880,000 元
六、計畫目標： 1.調查崩塌地試驗樣區之土壤性質。 2.分離鑑定崩塌地內生菌根菌之種類，並繁殖優勢菌根菌。 3.接種菌根菌至本土造林樹種培育菌根苗，並分析菌根菌對苗木生長之效應。 4.規劃適宜之崩塌地整治方法；將菌根苗栽植至崩塌地進行復舊造林試驗；調查分析造林苗木之成活率、生長量及生理特性；及評估菌根菌應用於崩塌地復舊造林之效益。
七、研究成果：(需含執行成果摘要、檢討及建議) 執行成果摘要： 1. 三處崩塌地試驗樣區復舊造林苗木之成活率，分析結果顯示，第 1 試驗樣區除台灣欒接種組與對照組成活率均呈 100%外，苦楝及光蠟樹對照組均高於接種組，赤楊則以接種組有較高之成活率；第 2 試驗樣區除苦楝對照組成活率高於接種組外，其餘樹種之成活率均以接種組高於或等於對照組；第 3 試驗樣區除台灣欒對照組之成活率高於接種組外，其餘樹種之成活率均以接種組較高。本研究結果顯示，接種叢枝菌根菌 <i>Glomus mosseae</i> 可以有效提高崩塌地造林苗木之成活率。 2. 三處試驗樣區之不同接種處理對台灣欒、光蠟樹、苦楝、赤楊苗木造林 6 個月後之生長效應，在苗高及根頸直徑淨生長量上較造林 3 個月時之表現，顯現漸漸加速生長之現象，惟差異不顯著。 3. 網室試驗結果顯示在葉片數與全株乾重上，光蠟樹接種組高於對照組且具有顯著效應；而苦楝之總葉面積亦以接種組較高且呈顯著差異。在網室試驗結

果與崩塌地第 1 試驗樣區試驗結果均以苦楝之接種組在葉綠素 a、葉綠素 b、葉綠素 a + b 濃度上均高於對照組且呈顯著差異。

檢討：

1. 崩塌地常遭濫墾種植農作物，經林管處取締收回後，墾民常挾怨報復。本研究計畫栽植之苗木常遭墾民砍除，影響研究調查工作。
2. 本研究計畫係於 101 年 7 月 24 日核定執行，積極進行造林地整治及菌根苗培育工作後，於 101 年 10 月 10 日進行栽植造林，適逢南部數月乾旱，嚴重影響苗木存活與生長。
3. 美洲含羞草等雜草及蔓藤生長頗速，應加強除草除蔓工作，以保護苗木。

建議：

1. 崩塌地復舊造林使用之菌根苗培育應於造林前一年完成接種，以提高效果。
2. 南部崩塌地復舊造林應於 3-4 月完成菌根苗栽植造林作業。
3. 南部崩塌地之雜草及蔓藤植物生長旺盛，應加強 4 次除草除蔓工作，以促進苗木生長。

八、對業務革新、創新之效益：

1. 研發分離、培養、接種叢枝菌根菌，以培育大量菌根苗之技術。
2. 研發應用菌根苗進行崩塌地復舊造林之技術。
3. 本研究證實叢枝菌根菌 *Glomus mosseae* 可以有效提高崩塌地造林之成效。