

接種還是不接種？淺論接種菌根菌應用於造林作業的難題及可能性

◎林業試驗育林組·李俊佑(myco2324@tfri.gov.tw)、游漢明

◎特有生物研究保育中心·林子超

故事，從備受期待開始

無論作為生態學共生行為的經典範例，或作為生物肥料接種源(inoculum)，菌根菌(mycorrhizal fungi)早已不是新穎的名詞，然而它的應用潛力卻仍存在未解之謎。目前文獻推估約有92%的植物科可產上述某型菌根，可說是生態系中最普遍的共生行為(Wang & Qiu, 2006)。

菌根在育林之功用的論點，國內首見於1972年，王子定教授於《今日造林》期刊的〈菌根之種類及其在育林上之功用〉提及，然則，迄今國內研究仍不可謂多，國外亦如是。菌根菌作為生物肥料的論述，源於其能從不同層面幫助植物，如菌根菌能改善植物的水分吸收能力、提高植物抗重金屬能力、提供植物無機養分、甚至提高植物抗病能力等等(Smith & Read, 2008)；另一方面，持續增長的人口所導致的糧食壓力、逐漸枯竭的磷酸肥料資源、越趨嚴重的極端氣候、以及劣化地復育的艱鉅挑戰，都使得眾人目光轉向菌根菌，期望它的共生效益能解決難題。建構在這些理論基礎上，十數年來，菌根菌背負著眾人的期待，以提升植物生長、降低投資成本之名，在學術及實務的舞台載浮載沉，商品化的菌根菌接種源也隨之火速發展，然而，商業接種源的效果仍缺乏田間試驗證據(Hart *et al.*, 2018)，相關菌根菌接種試驗亦顯示，不同植物對於菌根菌接種的生長反應並不一致(Klironomos, 2003)，且這些接種試驗，多數仍是在變因嚴格控制的溫室進行(Hart *et al.*, 2018)。

對於林業而言，從業人員則期待菌根菌能促進苗木的生長及存活率，進而提高造林的成效。現今的育苗方式多使用塑膠袋苗，育苗介質可能來自於田土或人工介質，復經土壤殺菌劑滅菌後，往往使育苗介質缺乏足量的菌根菌的接種源，因而影響後續苗木生長(顏江河；李苑瑋，2007)。然而，考量造林成本甚鉅，在將苗木菌根化作業納入育林體系之前，實宜爬梳文獻、評估接種的可能效益，並試圖勾勒接種施作應考量的思考框架。為客觀地回顧相關的實證研究，藉系統性文獻(systematic review)篩選文獻，並以後設分析(meta-analysis)進行分析，不啻為探討接種菌根菌整體效應的良方。

接種有效還是沒有效？—以系統文獻回顧及後設分析方法初探

系統文獻回顧及後設分析的簡介

文獻回顧的閱讀和撰寫，是所有求學之人必經之路，然而，文獻回顧的歷程，可能因作者個人偏好、涉獵之領域、熟悉之學派以及慣於從文獻查找文獻等因素，導致回顧之文獻可能偏頗，難以勾勒出某主題研究整體情況。更甚者，偏頗的文獻回顧之結果，不利政府決策，此時，系統性文獻回顧便是應對上述問題的良方。

系統性文獻回顧，是指針對某一特定問題，以系統性且明確的方法識別、篩選、批判性地評價有關研究文獻，並從符合條件之

文獻中蒐集資料進行分析的文獻回顧方法，其過程兼具方法性、全面性、透明性、可重複性，故能以更可追蹤、無偏、全面的視野審視該主題迄今的研究狀況，得出更完整的論述。為能確保文獻回顧的品質，在2005年，各界學者們一同制定了PRISMA (Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses)標準，包含建議文獻回顧的流程及應注意的事項，協助研究者撰寫文獻回顧論文(Moher *et al.*, 2009)。然而，若要進一步對上述納入分析之文獻做出整體且有統計意義的綜論，則需應用後設分析方法方可達成。

後設分析，可以說是「研究研究」的研究，它把不同研究視為試驗單位，以各研究的效果值(effect size)為核心，藉由假設模型給予各研究權重，藉以計算出綜合效果值(summary effect size)，後設分析尚能進一步地去分析效應之間的異質性，並從中找尋造成效應不同的解釋因子(或稱調節子)，相較於後設分析，傳統敘述性綜論，並未提供綜合各研究之結果的統計方法，僅能由各研究的p值是否顯著分別討論，且較不注重處理效應的大小(Borenstein *et al.*, 2010)。

接種菌根菌是否提高出栽苗木的生長表現？

—後設分析的初步結果

本文以筆者之研究為例(李俊佑等人, 2020)，簡介系統性文獻回顧及後設分析的操作方法。本例聚焦在接種苗木在野外的生長表現，故筆者訂主題為：接種菌根菌是否可以提高出栽苗木的生長表現？篩選的文獻必須符合下列所有條件：1.受試植物為林木(tree)或灌木(shrub)；2.需含野外試驗；3.需要

接種菌根菌；4.需要測量至少生物量或苗高。搜尋流程分為國外文獻及國內文獻兩部分，文獻查找條件及流程詳見圖1。

筆者依前人建議方式建置資料，擷取各研究之試驗資料分別建立苗高資料表(n=27)及生物量資料表(n=25)供後續分析(Neuenkamp *et al.*, 2019)。本範例以反應比(response ratio)為效果值，以 $\ln(R)$ 表示，計算公式為 $\ln(R)=\ln(\text{接種植物統計量}/\text{未接種統計量})$ ，並以R 4.0.2分析，流程詳見圖2。結果顯示接種菌根菌，分別增加約1.3倍的苗高及1.8倍的生物量(兩者之綜合效果值分別為0.27及0.58，經回推換算約為1.3及1.8，本文僅節錄生物量的資料，圖3)。然而，如此是否就能綜論結果呢？我們不難發現，各試驗間的異質性很高，故縱使綜合效果值為正，亦不宜直接武斷地認定菌根菌便可有效增加苗木生長表現，需再探究影響植物生長反應不同的潛在原因。前人的後設分析研究顯示，植物功能群及植物的可利用磷會影響接種菌根菌的生長反應，其中固氮木本植物的接種生長反應最大，闊葉雜草(forb)則沒有顯著的生長反應，然其他研究顯示不一致的結果，這不一致的現象，或許與後者將野外及盆鉢試驗、施肥試驗及非施肥試驗一同分析有關。

應用端與理論端的溝壑—我們需要體察的問題

就後設分析或傳統敘述分析而言，結果呈現了植物對菌根菌接種後不一致的生長反應，而這樣的不一致，也讓我們更進一步思考其應用端所面臨的問題。筆者綜論前人的觀點(Hart *et al.*, 2018; Rodriguez & Sanders,

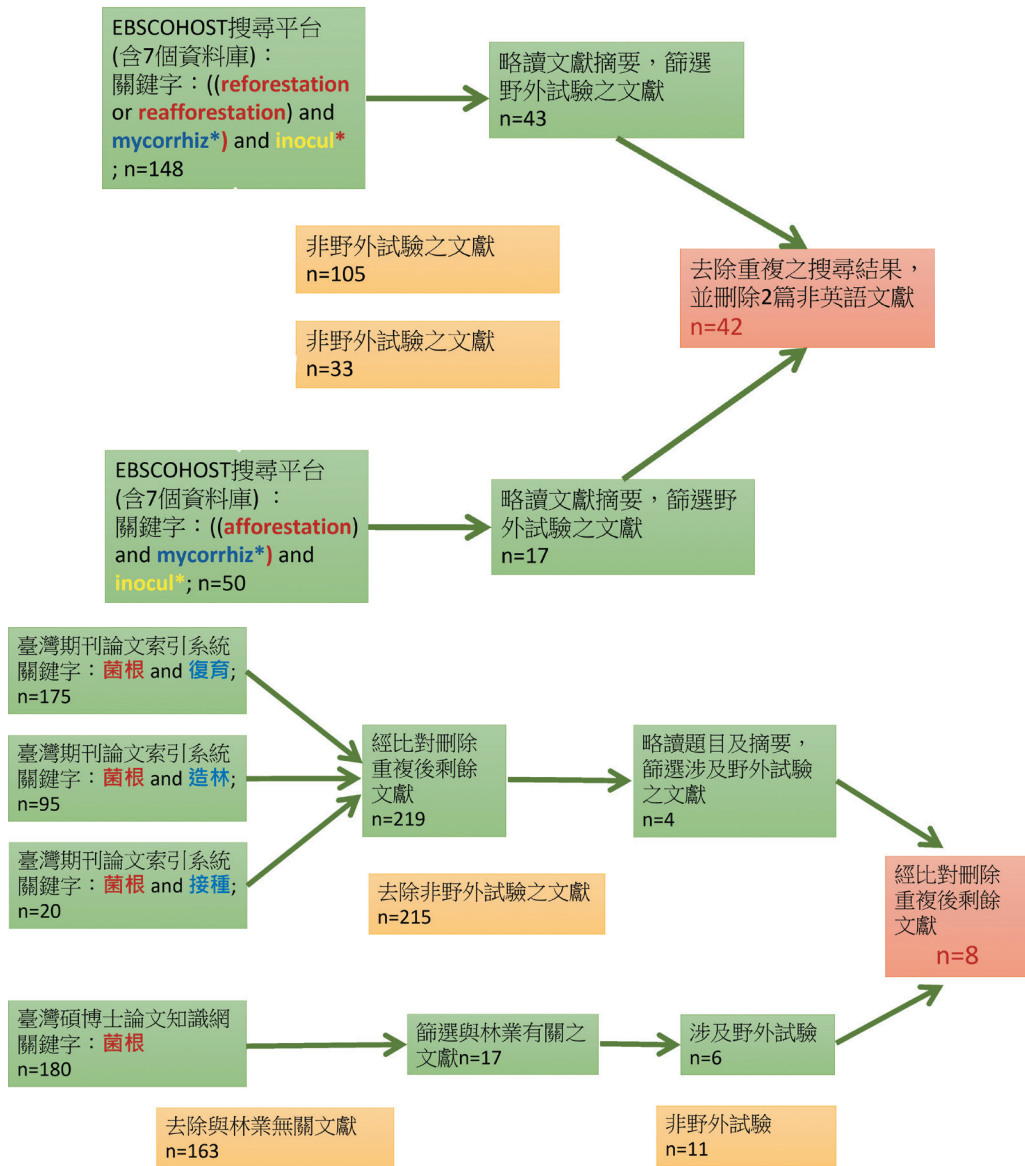


圖1 本文系統文獻搜尋流程，(a)為國外文獻，(b)為國內文獻。搜尋條件需清楚，文獻之剔除均需註明理由

2015)，試論菌根菌應用前須體察的問題：

1. 缺乏足夠的野外證據

大部分的菌根菌接種試驗研究，仍是在環境嚴格控制的溫室進行。在溫室的盆鉢試驗的低養分環境下，菌根菌的效應很有可

能被誇大。然而，接種的林木或其他農作物最終仍須面對野外環境。

2. 夥伴身份(partner identity)不同，結果大不同

叢枝菌根菌雖無寄主專一性，但兩者的

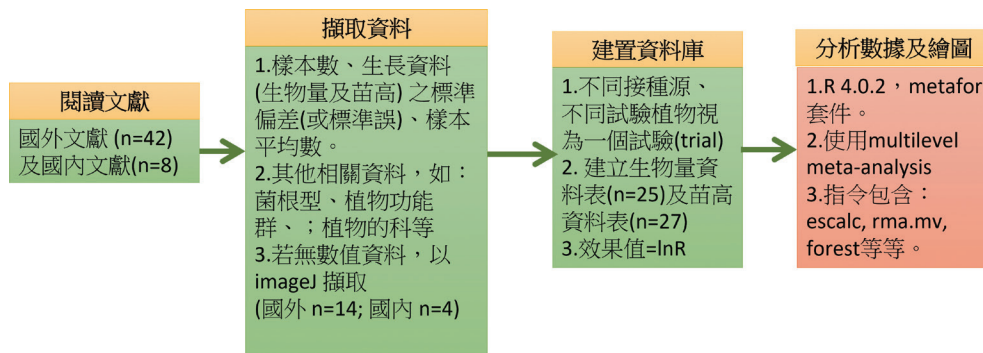


圖2 本文後設分析示範的流程

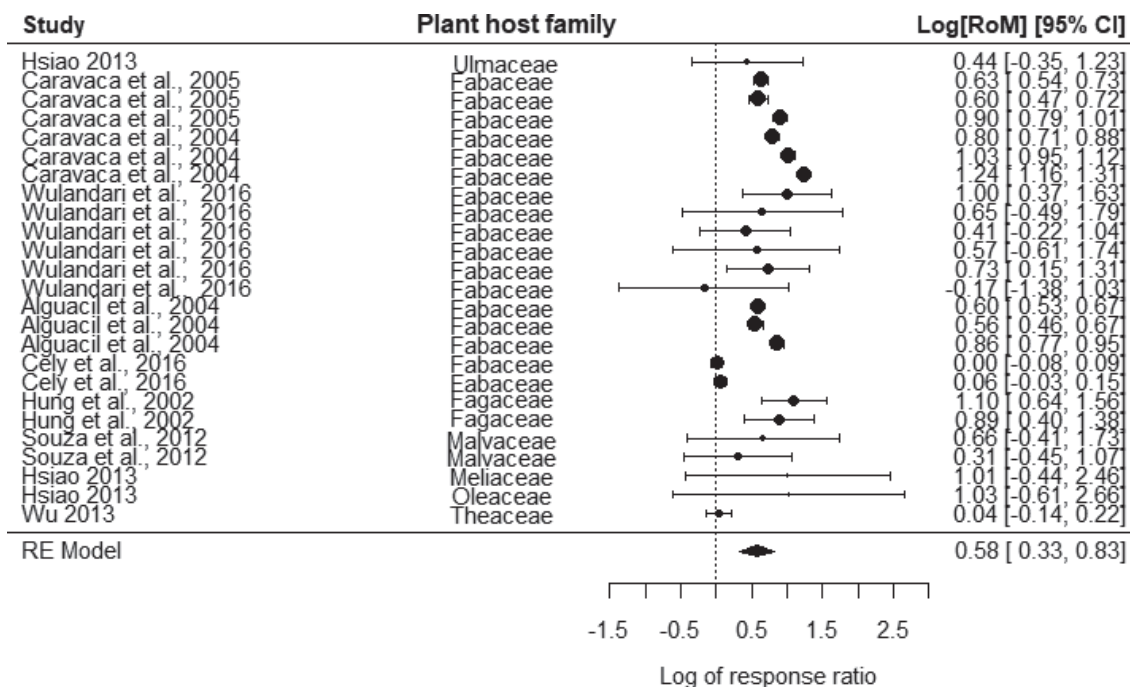


圖3 接種菌根菌對苗木生物量的影響，效應值以ln(response ratio)表示。每一個實心點代表該試驗的效應值，兩側線為95%信賴區間。實心點的大小表示該研究在綜合效應值的權重，菱形符號為綜合效應值

共生效益(以植物來看，便是對生長的影響)，確會受菌種分類群及植物分類群影響，即便是同一叢枝菌根菌物種的不同分離株(isolate)，其效益亦有很大的差異，如：*Rhizophagus irregularis*。

3. 環境的非生物因子的影響

研究已證實環境非生物因子會改變菌根菌接種的效益，依據交易平衡模型(trade balance model)預測，接種菌根菌的效益會在植物受磷限制但不受氮限制時最大，

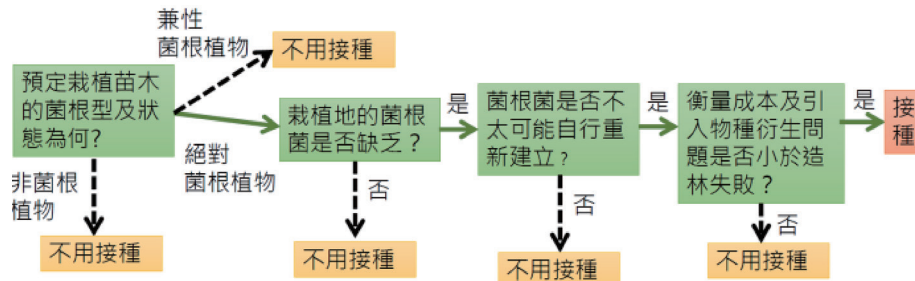


圖4 情境導向的菌根苗造林作業的審視流程，用以評估接種菌根菌的必要性(參考Hart *et al.*, 2018提出之流程再做修改)

而在氮受限制且磷不受限制的時最小。

4. 接種的菌根菌族群是否成功建立

接種菌根菌的苗木出栽時，會與現地的微生物交互作用，當然也包含了原生的菌根菌。引進的菌根菌如果不能成功建立族群，那便很難將接種的效益歸功於菌根菌。然而，叢枝菌根菌多核體的特性，又增加偵測族群動態的難度。目前為止，仍鮮少有實驗證明接種的菌根菌已在現地建立族群。

5. 缺乏標準施作方法

目前菌根菌尚無標準的施作方法，這些問題亟待實證資料釐清，如：應該施加的量為多少？什麼時候施加？在什麼狀況應該要接種那種菌種？接種源可以保存多久？

先以情境導向的角度，評估接種菌根菌的必要性，同時亦可累積更多實證研究資料。具體而言，情境導向的意義在於個案處理，確認造林地點及樹種，再調查該樹種與菌根菌的關係，如：該樹種的菌根型？其為絕對或兼性共生？其否相當依賴菌根菌？(以接種生物量的反應及野外感染率做評估)，復分析現地菌根菌群落及調查接種源是否缺乏？經此流程，再衡量接種所造成的可能風險，確認有接種必要時，則將接種菌根菌納入該次造林作業中(圖4)。

菌根的應用或許是個老議題，但歷久彌新，透過系統文獻回顧及後設分析，我們或能更客觀地評估菌根的整體效應，探索尚待解決的問題，再配合適當的評估流程，期能在日後更有效地將菌根菌技術應用於造林作業。⊗

應用的可能性？—情境導向的菌根苗造林作業

那麼，究竟該不該接種菌根菌呢？筆者認為，以菌根是自然且普遍的共生現象，以及劣化地造林的挑戰而言，菌根菌的應用仍是必要且有潛力的，惟在學者們仍廣續揭開其族群、群落動態及基本生理性質的神秘面紗時，筆者參考Hart *et al.*, 2018的觀點，認為可