

微生物對森林



與樹木健康的影響



文／劉則言^{1*}、李俊佑²、林冠穎²

圖／劉則言



圖 1 森林蘊含豐富的樹木與植被資源

¹ 林業試驗所森林保護組

² 林業試驗所育林組

* 通訊作者 (tyliu@tfri.gov.tw)



森林 林蘊含了豐富的樹木與植被資源，亦是多種生物間交互作用構成的複雜生態系統(圖 1)，其中與樹木健康密切相關卻又容易被忽略的，是棲息於環境中、植物表面與體內的微生物(圖 2)。這些微生物涵蓋真菌、細菌、病毒與線蟲等多種類型，從肉眼可辨識的大型菌菇，到需顯微鏡觀察的微小生命，皆是森林生物多樣性的重要組成。它們透過養分交換與訊息傳遞等方式，與樹木生長及森林健康維持緊密關係。微生物與樹木建立的關係，可概分為互利共生(mutualism)、片利共生(commensalism)和寄生(parasitism)。互利共生是指寄主樹木和共生微生物雙方都能從關係中獲得益處；片利共生是指微生物或寄主樹木其中一方能從對方獲得益處，另一方則不受影響；寄生是指該微生物棲息於樹木，從中獲取養分並對寄主樹木造成危害，也就是潛在的樹木病原菌。本文從樹木微生物族群平衡的角度切入，討論樹木微生物群落(microbial community)的多樣性，以及當微生物群落失去平衡的情況下，造成樹木病害發生的情形。





圖 2 許多易被忽略的微小生命也以森林為棲地

微生物族群對樹木的影響

隨著研究技術的進展，提供我們更寬廣的視角，探討以樹木為棲地的所有微生物（即微生物群落）與樹木的生長、健康及環境適應間的相互影響，進而與森林健康緊密相連。普遍認為樹木的根系，是微生物活動最為旺盛的區域，植物會經由分泌醣類、胺基酸等物質，於根圈形成一個動態平衡的微生物群落，群落中的微生物除了獲益於樹木提供的資源外，也會佔據有可能被病原菌利用的生態棲位，形成競爭障礙，為寄主樹木提供一定程度的保護。

有些微生物類群更是長時間與樹木共同演化，形成對寄主樹木彼此有益的互利共生關係。菌根真菌與固氮細菌，是目前已知植物與微生物形成的古老共生關係。在叢枝菌根

菌與樹木共生關係的研究中，Abbaspour 等人（2012）發現，接種叢枝菌根菌（*Entrophospora etunicata*）於開心果的幼苗，可提高苗木抵抗乾旱逆境的能力；國內陳與李（2006）的研究亦發現，將分離自墾丁高位珊瑚礁自然保留區內，臺灣赤楠根圈土壤之叢枝菌根菌，接種於臺灣赤楠苗木，可有效促進苗木的生長。固氮細菌可將大氣中的氮轉化為植物可用的養分，對生長於土壤貧瘠的樹木更為重要，典型的例子是 *Frankia* 屬放線菌會與木麻黃建立根瘤共生關係，透過細菌進入木麻黃的根部組織並誘導形成根瘤結構，使得木麻黃能夠在氮素極端貧瘠的土壤中（如海濱沙地或退化地）生長茁壯。Djighaly 等人（2022）的研究，也發現

木麻黃同時接種固氮細菌 *Frankia* 與菌根真菌 *Rhizophagus fasciculatus*，兩者與木麻黃的共生關係會有協力作用，提高樹木耐鹽的能力。

除了根圈與根部組織外，樹木的地上部如樹幹與葉片，亦是多種微生物的棲地。當微生物群落中的物種平衡時，有助於樹木正常生長。然而這些微生物群落，對於樹木生長與環境變化，也相當敏感，當樹木遭遇環境逆境或病蟲害威脅時，易導致微生物群落的失衡，如物種豐富度降低及群落結構發生顯著改變。不過巧妙的是，在遭遇這樣逆境時，樹木也會啟動屬於自己的呼救機制，經由調節根分泌物來吸引有益微生物聚集，組建一個有益於樹木生存的微生物群落，幫助其抵禦惡劣的環境或病原菌的侵染。

微生物群落失衡與樹木病害的發生

微生物群落在失去平衡的情況下，會引發一連串被稱之微生態失調 (dysbiosis) 的效應。如微生物族群中的寄生性微生物增加，或是外來的病原菌有機會進入原先被其他微生物族群占據的棲位時，常導致樹木病害的發生。

近年來，對櫟樹造成重大威脅的急性櫟樹衰弱症 (Acute Oak Decline)，在 Denman 等人 (2018) 進行的微生物群落分析研究中，發現在病徵出現位置的微生物組成中，有三種細菌 (*Brenneria goodwinii*、*Gibbsiella quercinecans* 和 *Rahnella victoriana*) 持續大量存在，這三種細菌具有致病基因且在感病部位的表現量

增加。該研究並進一步證實，*B. goodwinii* 和 *G. quercinecans* 可造成組織壞死，並與吉丁蟲 *Agrilus biguttatus* 共同造成典型的急性櫟樹衰弱症的徵狀，突顯微生物群落在樹木病害發生過程中的重要角色。

當森林環境出現異常，尤其是面對氣候變遷的衝擊，容易造成微生物群落的失衡，連帶使得一些被歸類為伺機性病原菌的微生物，有機會入侵樹木造成危害。例如蜜環菌 (*Armillaria gallica*) 和木材腐朽菌被認為是森林中的分解者，是生態系統中物質循環的重要推手 (圖 3)。一般來說蜜環菌可在地下土壤中形成廣泛的菌絲網絡，但無法侵染生長旺盛的寄主植物，但在 Marçais 和 Bréda (2006) 的研究中發現，當櫟樹因遭遇乾旱或其他逆境而生長衰弱時，蜜環菌就有機會從原本的腐生轉變為寄生，進而對寄主樹木造成危害。

病原菌通常以寄生的形式，侵染寄主樹木並對其造成危害。以對高緯度的針葉林造成危害的病原菌 *Heterobasidion annosum* 為例，主要引起挪威雲杉的根腐病與幹腐病，造成林產業巨大的經濟損失。透過微生物群落的分析可以發現，健康的雲杉在上部樹幹的細菌與真菌豐富度均顯著高於有感病樹木，顯示病原菌的入侵打破了原有的微生物族群平衡。國內針對樹木褐根病的研究，也有觀察到類似的現象，發現在受褐根病菌感染的榕樹根部組織中，真菌的物種豐富度會低於健康的樹木。



圖 3 木材腐朽菌是森林生態系中重要的分解者

透過微生物群落的分析，可以發現感病的寄主樹木，其微生物網絡雖然規模擴大且複雜化，但穩定性卻顯著下降。從微生物網絡分析中，我們也可以篩選出與病原菌呈現正相關或負相關的微生物類群，其中的負相關的微生物類群，即有可能是對該病害具有生物防治潛力的微生物物種，具備開發為生物治劑的潛力。

有益微生物與樹木病害的防治

以樹木或其生長環境為棲地的微生物群落，除了可透過占據生態棲位與族群間的動態平衡達到抑制病原菌的效果外，部分種類的微

生物，更可以透過直接或間接的方式，抑制病原菌生長、促進樹木生長和提升樹木抗病能力。目前已知對病原菌具有拮抗能力的微生物類群，最常被提及的有 *Trichoderma* 屬真菌和 *Bacillus* 屬細菌。

Trichoderma 屬真菌作為生物防治菌株時，可透過超寄生的方式纏繞並入侵植物病原菌的細胞，並透過分泌酵素來破壞這些病原菌的細胞；此外，*Trichoderma* 也可經由產生次級代謝物，如膠黴毒素 (gliotoxin)，來抑制病原菌的生長，或是對病原菌的菌絲造成傷害。有研究指出，*Trichoderma* 除了可作為生物防治菌

株外，也可以促進植物的生長。有研究發現該屬真菌部分種類，於植物根部定植時，可與植物建立互利共生關係，提高土壤中養分的溶解與可利用性、增強植物對非生物逆境的耐受性、產生次級代謝物，以及合成植物生長荷爾蒙等。此外，在植物根圈接種特定種類的 *Trichoderma* 時，會改變根圈的微生物群落，形塑出利於植物生長的微生物組成。

Bacillus 屬細菌亦是常被用於農業與林業病蟲害防治的菌株（圖 4），其常見的抵抗病蟲害的機制，包含產生具抗菌活性的化合物、在生態棲位及養分上與病原競爭，以及誘導植物系統性抗病。Kim 等人（2024）的研究發現，*Bacillus velezensis* 對多種植物病原細菌與真菌具有強烈的抗微生物活性，將其施用於現地，可有效減少櫻花細菌性穿孔病害的發生率。Méndez-Bravo 等人（2018）的研究亦發現，分



圖 4 具生物防治潛力的菌株抑制樹木病原菌的生長

離自酪梨樹根圈的 *Bacillus* 屬細菌分離株，可用於防治卵菌類的土媒病原菌。*Bacillus* 除了可直接抑制病原菌的生長外，亦可經由分子訊息傳遞，啟動植物自身的防禦系統，抵抗病原菌的入侵。當植物面臨逆境時，會經由根系分泌的化學物質，吸引可強化自身抗性的有益微生物。透過微生物群落的分析，會發現 *Bacillus* 常是此機制下的核心菌種，聚集於植物根系協助抵抗病原菌的入侵。

結語

森林中存在著許多肉眼不可見的微小生命，這些微生物以環境或樹木各部位為棲地，透過共生和寄生等形式，與森林中的樹木形成緊密的連結。微生物族群的平衡，是影響樹木健康的關鍵，當樹木遭遇到逆境時，微生物族群會隨之發生變動，在失去原有平衡的情況下，容易造成病原菌族群的增加與病害的發生。然而有些病原菌的存在，亦是維繫森林生態系平衡不可缺少的角色，如部分木材腐朽菌雖對樹木具有病原性，但其可作為生態系中的分解者，有助於森林的更新與物質的循環。透過微生物多樣性的維持，了解樹木本身與微生物間的互動關係，將有助推動森林健康與生態永續。☸

