

森林中無聲的對白—樹木間的訊息溝通

◎文、圖/林業試驗所森林保護組·劉則言 (tyliu@tfri.gov.tw)、汪澤宏、徐孟豪
◎林業試驗所福山研究中心·李俊佑

前言

森林中充滿各種不同的聲音，蟲鳴、鳥叫、流水潺潺，風聲颯颯。聲音已是構成森林的元素之一，生活在森林中的許多動物，也會透過聲音來傳遞訊息，或者經由對聲音的感受，來察覺外在環境潛伏的威脅。樹木是森林生態系中重要的生產者，雖然樹木的枝葉也會因隨風擺盪而發出窸窣地摩擦聲，但這終究並非其本身主動發出的聲音，亦有

別於動物經由聲音的傳遞來進行交流。相對於森林中其他生物有聲的訊息傳遞，樹木和植被是默默無聲的存在，那麼對植物而言，聲音是一個怎樣的的存在？這些不會主動發聲的植物，又是否能夠透過其他的方式，來進行一場無聲的對談。本文將由植物對聲音的感受性和樹木間訊息的傳遞兩個面向出發，藉由植物在遭受環境逆境，甚至病蟲害威脅時，是否有辦法將這些訊息傳達給周遭的植物，來探討專屬於林中樹木的互動方式(圖1)。

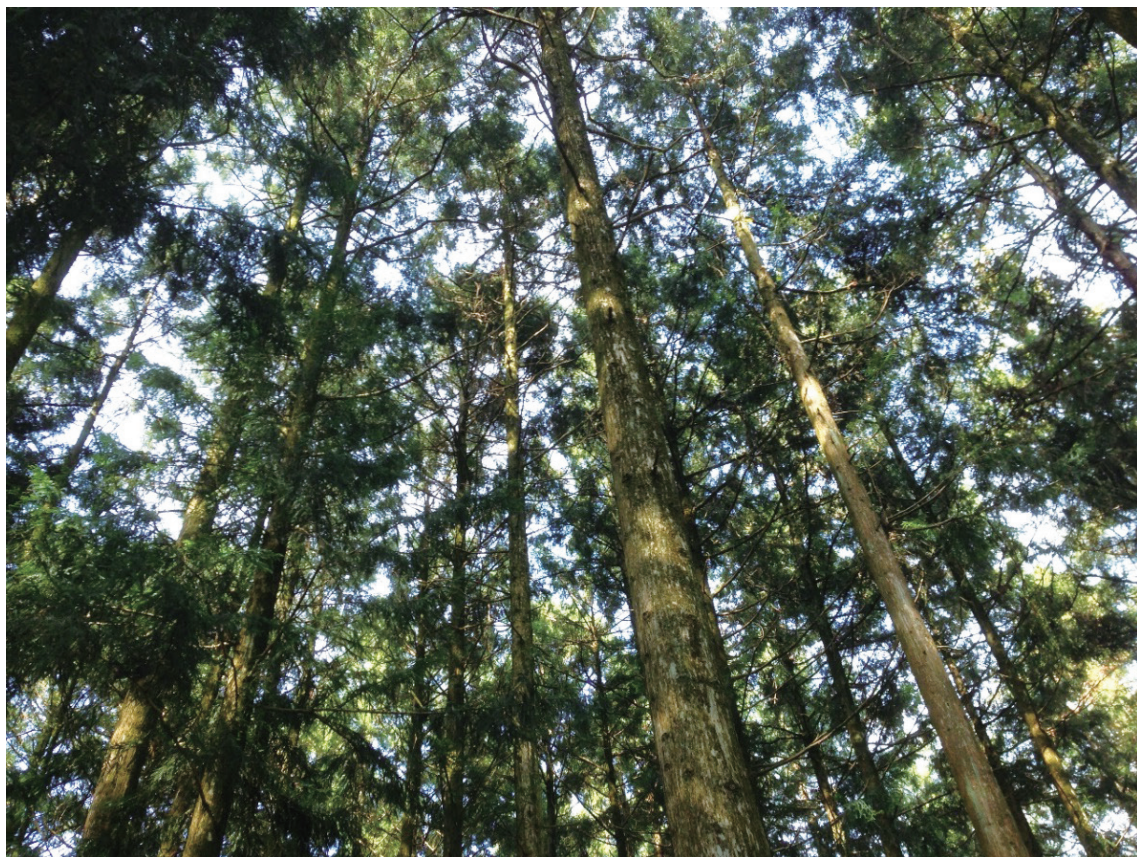


圖1 森林中的樹木彼此間可能正進行著一場無聲的訊息溝通。

植物對聲音的感受性

有趣的是，植物包含我們所關注的森林中的樹木，雖然不像動物會透過聲音來溝通，也不具備耳朵這樣的聲音接受器，但植物對於不同的音頻，似乎也能夠產生不同程度的反應。近年來有越來越多的研究發現，就如同趨光性和向觸性，聲音對植物來說，也可視為是一種物理上的刺激，進而引發植物的生理反應。De Luca和Vallejo-Marin在2013年的研究中發現，蜜蜂翅膀振動所產生的特定音頻，可以誘導花粉從植物花藥中釋放，進而促進花的授粉，這樣的授粉方式被稱之為振動授粉(buzz-pollination)，被視為是植物花器和蜜蜂取食行為之共同演化的結果。此外，Appel和Cocroft也在模式植物阿拉伯芥上，探討聲音對植物的影響；經由記錄昆蟲取食植物葉片所產生特定震動的頻率，並以該頻率處理未被昆蟲取食的植物，發現在這些實驗組的植物體內，也會如同被昆蟲取食的植物一般，產生植物防禦反應相關的化合物，包含硫化葡萄糖苷和花青素的累積，也就是聲音對植物來說，亦會是一個可以被察覺的警告或有益信號(圖2)。

植物雖不具有聲音的接收器官，但若是以細胞層次來進行分析，則會發現在植物的細胞膜上，具有許多可以感知外界機械刺激的離子通道。Ghosh等人在2017年的研究中，進一步從基因的表現，來探討聲音對植物的影響，並以80分貝500赫茲的聲音震動，對植物阿拉伯芥進行處理，在處理後觀察植物細胞內的基因表現情形，結果指出，植物的一群聲音震動調節相關基因，和部分的感



圖2 昆蟲啃食植物葉片產生的音頻對植物細胞亦是一種聲音上的刺激。

知外界刺激的離子通道基因，會因受到聲音處理而有明顯的表現量增加，且和植物在遭受到觸碰時的表現變化有所差異，顯示植物可透過細胞來感受聲音，而不需經由特化的器官。雖然這樣的研究目前仍在起步階段，對於植物細胞內，是透過怎樣的訊息傳遞，來對聲音的刺激產生反應，以及對不同的刺激，是否有不同的基因調控路徑被啟動，都有待更多的研究來解答，但至少提供我們一些思考的方向，那就是植物，乃至樹木，並非對外在環境的聲音毫無知覺，而是可以經由特定聲音或頻率，來觸發植物產生相對應的反應，甚至經由聲音來促進植物的生長，或是抵抗病蟲害的能力。

樹木間的訊息交流

雖然我們知道了植物可感受外界的聲音，但我們仍無法得知，在植物本身仍不會主動製造聲音的前提下，森林中的樹木又是以怎樣的方式，來進行彼此間的訊息交流，甚至是互相的幫助。

英屬哥倫比亞大學的森林生態學教授 Suzanne Simard，致力於解開樹木間如何溝通的謎團，並透過研究森林地下的真菌網絡，來解答這樣一個複雜的問題。在森林的土表之下，除了植物的根系外，亦存在著形形色色的微生物，其中真菌佔有極高的豐富度與多樣性。真菌在森林生態系可以是代謝腐植質和木材的分解者，也能夠和樹木的根系形成共生的關係，這樣的共生關係，有助於真菌從植物方面獲得本身無法行光合作用所合成的養分，相對的，植物亦可經由真菌，獲得水分和其他生長所需的元素，這些能夠和植物根系形成共生關係的真菌，就是我們所稱的菌根菌(mycorrhizal fungi)。菌根菌的菌絲除了在樹木根系形成共生結構外，廣袤的菌絲亦在森林土壤擴張、延伸，自樹木根系所無法企及的範圍及孔隙汲取養分，轉而回饋寄主樹木。而此複雜的菌根菌絲的地下網絡，也為樹木間搭起了訊息及養分傳遞的管道。

在Simard教授的研究中發現，地下的菌根菌網絡可作為樹木間訊息交換的管道，甚至以此建立樹木彼此互助的連結，來傳遞水分、碳、氮、磷、小分子養分和化學物質(如植物防禦相關化合物)等物質；此類物質傳遞現象，可以是同種植物間的，也可以是跨植物物種的，而物質在不同個體間存在著該物質質量多寡的差異，會形成物質傳遞的驅動力，舉例來說，其中帶有比較多養分的一方將會是提供者，而含有養分較少的植物，則會是養分的接受者。除了植物體間物質含量差異形成的梯度外，真菌在地表下菌絲的生長也會影響這些物質的傳遞，透過菌絲生長過程中，細胞間的擴散作用或主動運輸，則



圖3 樹木根系與菌根菌菌絲的接觸，除了建立彼此間的共生關係外，同時串聯起森林中樹木的地下聯繫網絡。(劉則言 繪)

可以將這些分子訊號、微量元素、甚至是營養傳遞給較遠的植物(圖3)。

經由追蹤樺樹、花旗松等不同樹種所組成的個體間物質傳遞的情形，可以發現，樹木間不只是存在著競爭的關係，更可以彼此互相幫助，較年長的樹木，會將光合作用所形成的養分，經由地下的真菌網絡，傳遞給較年輕、因遮蔭而碳水化合物合成較少的樹木，這樣的互助方式，也顯示森林中的樹木是經由一個廣大的真菌網絡串聯彼此，形成一個樹木的網絡，稱之為「木聯網」(wood wide web)；而提供物質給其他樹木者，通常會是植群中最高大生長最旺盛的樹木，可以視為網絡的中心，稱之為「樞紐樹」(hub tree)。若經由遺傳物質DNA來追蹤樹木根系的菌根菌分布範圍，則會得到一個驚人的發現，就是1棵樹木竟可以經由菌根菌形成的地下網絡來和其他47棵樹木產生連結。此外，當樹木受到昆蟲的攻擊，所產的防禦訊號，也可以經由這個網絡，傳遞給真菌網絡所連結的其他樹木，

讓這些樹木可以收到警訊，並預先合成防禦的化合物質(表1)。特別的是，這樣的真菌網絡，有時候也會被特定的植物所利用，像黑胡桃木會利用這樣的網路來運送毒素，殺死鄰近會和他生長產生競爭的植物；另外，森林中也有一些本身不會行光合作用的蘭科與水晶蘭，則會利用這樣的網路，來從樹木身上獲得所需要的養分。

結語

樹木不會說話，但經由植物對聲音感受性的研究，我們可以大膽推測，樹木的細胞，也與其他模式植物的細胞相同，能夠感受外來聲音的刺激，經由細胞內的訊號傳遞，啟動不同的基因表現，來產生反應。雖然植物能對聲音產生應對，但樹木與樹木間的聯繫，卻是經由地表下與樹木根部共生的菌根菌來

傳達，經由真菌與植物的共生，可以讓樹木根系和更多、更廣泛的其他樹木產生連結，並透過真菌的菌絲，將養分、水分、微量元素，甚至是受到病蟲害威脅時，植物體內所產生的警示用化合物，傳遞給其他樹木；當然，菌根菌在與植物形成共生關係時，也可以從植物體中，獲得所需的養分。由此可見，森林中一場無聲的對話，正在樹木與樹木之間，樹木與真菌之間，甚至環境與植物之間毫無間斷地悄悄上演，透過這個由真菌所形成的地下聯繫網絡，讓森林中無聲的生物得以彼此交流，也讓樹木在演化的過程中，能夠與彼此分享訊息和物質，也讓我們知道，森林中的樹木，存在著比我們所想像更為緊密的連結，而其背後仍隱含著許多生命的謎團，無論是演化上、生態上、或森林保護等方面，都有待我們去探索和發現。⊗

表1 經由菌根菌網絡來影響植物間的互動

經由菌根菌調控的植物行為	研究植物	菌根真菌類型
增加葉部的氮含量	豚草屬植物	叢枝菌根菌(<i>Glomus intraradices</i>)
增加菌根菌量、提高葉部防禦物質	蠶豆	叢枝菌根菌(<i>Glomus intraradices</i>)
對病原菌真的防禦反應	番茄	叢枝菌根菌(<i>Funneliformis mosseae</i>)
對毛蟲取食葉部的防禦反應	番茄	叢枝菌根菌(<i>Funneliformis mosseae</i>)
增加植物生存、生長和碳的轉移	花旗松	自然中環境中的外生菌根菌
促進植物在乾旱環境下的存活	花旗松	自然中環境中的外生菌根菌
經由菌根網絡建立增加植物存活率	花旗松	自然中環境中的外生菌根菌
增加光合作用和碳的轉移	花旗松、白樺木	自然中環境中的外生菌根菌

資料來源：Gorzelak M. A., et al. 2015.