

無所不在的真菌——真菌多樣性、生態角色、以及面臨的挑戰

張瓊之、陳可萱

真菌是什麼？他們在哪裡？

真菌是真核生物中，以有機物作為碳源的異營生物，傳統的植物學研究中也曾納入真菌學。實際上，雖然真菌與植物皆有細胞壁，但是兩者完全不同——真菌的細胞壁由幾丁質組成，而植物的細胞壁成分是纖維素。說到真菌，浮現在你腦中的是什麼樣貌呢？大部分人首先想到的是大型真菌，如：餐桌上的各式菇類珍饈、保健用的藥用真菌（靈芝、牛樟芝）、或者雨後在公園草地上冒出的白色菇體（蘑菇、馬勃）。事實上，環境中充滿著各式各樣的真菌，除了肉眼可見的大型真菌的子實體（fruiting body）之外，還有許多不易用肉眼觀察的微小真菌（microfungi）、菌絲體（hyphae）、及真菌孢子。它們充斥在環境之中，從赤道至極地區域都能發現真菌的蹤跡，包含空氣中、水體裡、土壤中、以及生物體內，可以說它們是無所不在（圖一、圖二）。



圖一、生長在枯葉上的真菌子實體，枯葉上亦可看見如放射狀生長的白色真菌菌絲。



圖二、真菌可生長在各種以有機質建造的人造建物（紅圈處），例如：涼亭。右圖為生長在涼亭屋頂內側的糖圓齒菌（*Gyrodontium sacchari*）。（陳哲志攝）

真菌與人類

人類利用真菌的方式相當多元，網羅食、衣、住、行各個面向，例如：藉由酵母菌製作麵包或啤酒、栽培食用菌類作為直接的食物來源、以藥用真菌為材料開發保健食品、利用青霉菌的代謝物生產抗生素藥品、或者近年興起的植物肉亦使用真菌作為材料，這些都是耳熟能詳的真菌利用方式。除此之外，隨著環保意識抬頭，人們對真菌的利用也朝著食用與醫藥以外的領域推展，比如：利用真菌菌絲體開發生物材料，生產環保皮革，製作包包與鞋子、生產真菌包材（mushroom packaging）作為商品防撞保護、甚至是建築材料以及環保棺材（mushroom coffin）。雖然這些製品目前尚未被廣泛使用，或者仍有些技術限制有待突破，但真菌菌絲可自然分解的特性，使得這些新興的生物材料獲得不少的關注。另外，人們也藉由真菌的生物特性來發展生物防治（biocontrol）或者生物修復（bioremediation）的工具，如：使用綠殭菌、白殭菌製作真菌殺蟲製劑，減少農業害蟲；利用真菌降解或吸收環境中的污染物，如：重金屬，以達到淨化的目的。由此可見，人類與真菌的關係是密不可分的，小至入口的食物、大至環境保護，真菌都扮演著重要的角色。因此，了解真菌各個面向的知識，未來能幫助我們開發更多有助於環境保護或者人類所需的真菌生物資源，而這些應用皆立基於基礎科學研究，例如：地球上有多少真菌？真菌的生態角

色為何？

真菌多樣性研究與面臨的挑戰

科學家結合各種方法，例如：分類學研究結果、環境樣本定序技術以及真菌－植物的物種比例（植物：真菌＝1:8）來估算全球真菌的物種多樣性，結果顯示：截至2020年，真菌的物種多樣性大約介於220萬至380萬種之間。然而，目前全球已被發表並接受的真菌物種約為14萬種，僅占估計值的4%至6%。估計值與已知物種的數量懸殊，除了顯示全球仍有許多未知的真菌有待發掘之外，也凸顯了真菌多樣性研究所面臨的挑戰，例如：(1)部分地理區域或生態棲地因為不容易觸及，使得其真菌多樣性研究仍十分缺乏，例如沙漠與極地；(2)在真菌的生活史中，大部分是以菌絲體的形式存在於基質內，除了不容易以肉眼直接觀察之外，與子實體相比，菌絲體可作為物種辨識的構造較少；況且，即使是在適合的濕度與環境，也不一定每次採集都能剛好碰到子實體的出現，需要天時、地利、人和才有機會一探真菌的蹤影；(3)隱藏種（cryptic species）的問題：因為現有技術或知識的限制，人們無法辨別未知的物種以及相近的已知種，而將兩者歸類於同一個物種名稱之下。這些都是使真菌多樣性調查不易進行的原因。

此外，研究真菌分類學的人數日漸下滑，也使得多樣性研究面臨多一層的挑戰。在應用真菌資源之前，我們需



圖三、採集真菌需要細心翻找枯枝落葉，並且記錄生態照片。與同伴一起採集不只可多雙眼睛尋找樣本，還可以互相支援。

要釐清手邊的材料是什麼物種；而真菌分類學家除了需要有野外採集（圖三）、觀察真菌生長環境的能力之外，還需要具備顯微鏡操作的技能，進行樣本切片、仔細地觀察各種微觀構造並將之繪製成線條圖，收集古今中外的相關文獻，比對與相近物種的異同之處，再加上分子生物學資

料（如：DNA）的輔佐，才能小心的求證手邊的材料是否是一個新發現的物種。整個過程除了必須具備耐心與體力，也需要長期的累積野外採集以及檢視樣本的經驗，以提升對所研究類群的敏銳度。

在分子生物學技術尚未問世前，真菌學家只能倚靠真菌的形態、氣味、化學變化及生態環境等資訊來做真菌物種的判定。隨著分子生物學技術的普及，真菌學家開始利用聚合酶連鎖反應來增幅特定的真菌DNA片段，以幫助物種的判定。然而，若只倚靠DNA片段來決定物種是否為新種，其實是具有風險的，舉例來說，內轉錄間隔區（internal transcribed spacer, ITS）經常被作為鑑定真菌時使用的DNA條碼（barcode），然而，這個序列片段卻不是在每個真菌類群都具有足夠的解析力，可能導致結果誤判，使得不同的物種被誤判成同一種，需要合併使用不同的序列片段，並且結合嚴謹的顯微構造觀察，經過文獻比對後，才能做出更穩定的結果判斷。誤判所造成的影響並非只是「弄錯名字」而已。試想，若希望利用某種真菌物種發展藥、食用的用途，或其他應用，卻誤認手邊的材料是目標物種，非常有可能導致效果不彰，甚至是全然失敗；再者，以生態角度來看，許多研究利用環境DNA來探究土壤或目標物中微生物相的組成，並且進一步推測其生態功能。若有真菌物種「隱藏」在另一個相近物種之下，未被適當的描述、發表，那麼即使環境DNA的樣本中偵測到該真菌物種，也難以發覺，如此一來，真實的真菌相、真菌

所扮演的角色以及它們如何互相影響便不容易被釐清。由此可見真菌分類學的重要性，對人們的影響甚遠。

真菌的生態角色與功能

在自然界的養分循環與調節中，真菌扮演極重要的角色。真菌最廣為人知的生態角色為分解者，藉由分泌酵素來分解已死亡的有機物，並獲得所需的養分（腐生營養）。事實上，除了分解者之外，真菌與其他生物之間也存在著各種互動方式，例如：菌根真菌（圖四）可與特定的植物宿主形成共生關係（symbiosis），幫助植物宿主吸收水分、礦物質、分解土壤中的有機物並提供植物宿主額外的養分來源（例如氮源），或者提供非營養形式的好處，例如：抵禦逆境或病害。另一方面，植物宿主供給真菌菌絲保護的場所或養分（例如光合作用形成的碳源）。此外，有些真菌生長在植物宿主的體內，且當下沒有對宿主造成可觀察到的危害，宿主仍保持著健康的外觀，這類真菌稱為內生真菌（endophyte）。除了共生關係之外，真菌也可扮演寄生的角色（parasites），意指真菌單方面的從宿主身上得到好處，並且同時對宿主造成危害，例如：生病、萎凋或者死亡，名貴的藥材—冬蟲夏草便是真菌感染昆蟲，吸取完宿主養分後從只剩下空殼的宿主身體內產生子實體，是為人所周知的範例，又例如：造成昆蟲死亡的綠殭菌，以及當人體免疫力低下趁虛而入的伺機性病原真



圖四、乳菇屬 (*Lactarius* sp.) 真菌，為外生菌根菌，需要與植物宿主共生才能存活，例如：殼斗科植物。



圖五、被蟲生真菌寄生的蟲體。

菌，這些都是真菌作為寄生角色的案例（圖五）。

真菌學家發現，在與宿主的互動關係中，真菌的角色並非永遠都是固定的。當真菌與宿主之間的平衡受到干擾、或者環境條件的改變，皆可能導致真菌在不同角色之間轉換。例如：宿主健康時，真菌可用內生菌的形式存在於宿主体內，並與宿主和平共存。不過，當平衡受到干擾（如：宿主健康走下坡），真菌便可能伺機而動，由內生菌轉為寄生的角色，對宿主造成危害或死亡；又或者，待宿主死亡後，原本一開始就存在宿主体內的內生真菌便快速的增加生物量，以佔有這份珍貴的有機物質，作為腐生營養的養分來源。而植物宿主在不同生存壓力下也會改變對菌根菌的依賴性，例如在土壤中已經存有大量氮源的狀態下，植物不需要與菌根菌形成共生就可獲得足夠營養。因此，真菌－宿主的共生關係是動態的。

此外，目前我們對真菌-宿主及真菌-與其他非宿主生物互動的瞭解僅集中在少數類群，仍有許多互動關係尚待釐清。例如，植物與真菌的互動研究多集中於研究種子植物，非種子植物方面的（如蕨類、苔蘚類）相關研究甚少。又例如：真菌與無脊椎生物（如蚯蚓、線蟲）在土壤中共同生存，但彼此是否有交互作用？微生物與微生物之間，如真菌與細菌間，也漸漸有案例顯示兩者的緊密互動。

目前，真菌的生態角色大多以「屬」做為分群的依據。然則，單一個屬只具有一種生態角色嗎？其實不然。

越來越多的證據顯示，即使是在同一個真菌的屬之中，也有可能存在不同的生態角色，例如：過去普遍被歸類為分解者的小菇屬真菌（*Mycena*），事實上可能與活體植物形成共生關係，且部分小菇物種被觀察到從活的植物體上長出子實體（圖六）。換言之，部分小菇屬的物種可能同時具備分解者以及和植物共生的能力。可惜，我們對於這方面的知識尚少，且大部分相關研究集中在歐洲的溫帶地區，小菇屬真菌與植物的互動在其他地區是否也是如此？仍有許多未知需要更深入的探究，以便了解真菌多元的生態角色以及導致角色轉換的誘因。本實驗室正利用熱帶、亞熱帶的材料，探究小菇屬真菌與植物（如：苔蘚）之間的共生關係。這類的研究除了能幫助我們更細緻地探討自然界中養分循環的機制，以及真菌對其他生物造成的影響之外，也開了一扇窗，讓科學家探討不同環境條件中，真菌生存策略的演化軌跡。

真菌的保育

在全球氣候變遷以及各種威脅的影響之下，許多動、植物受到各種壓力而瀕危，並且已被列為保育的對象。真菌也難逃這些外部壓力的影響，但是真菌的保育與其他生物比起來，並沒有受到足夠的注意與重視。真菌在自然界中扮演著各種不同的角色，與其他生物均有著緊密的關聯，棲地的流失、宿主的滅絕、環境污染、氣候變遷等



圖六、從活的苔蘚植物體上長出的小菇屬 (*Mycena* sp.) 真菌，其與苔蘚之間是否存在共生關係？是本實驗室研究的題目之一。

等，都對真菌造成了相當的危害。例如，在台灣廣為人知的大型藥用真菌牛樟芝 (*Taiwanofungus camphoratus*) 具有寄主專一性，只生長在牛樟 (*Camphora kanahirae*) 樹幹上。牛樟是人們喜愛的高級木材之一，面臨不小的砍伐壓力。當牛樟被過度濫伐，牛樟芝因為會也宿主的消失，不易在自然棲地生存。保育名錄的建立，仰賴基礎研究的支持，截至2022年7月，國際自然保育聯盟 (International Union for Conservation of Nature, IUCN) 發表的瀕危物種

紅色名錄（Red List of Threatened Species）中，羅列了近六百種的真菌，佔比小於全球真菌多樣性的1%。當我們還未掌握物種的多樣性、分布棲地以及其他生物的互動關係時，不容易釐清有哪些真菌需要盡快加入保育的名錄之中，這不僅反映了真菌多樣性研究需要加速進行，以避免在未知的真菌被發現之前便滅絕之外，也凸顯出人們疏忽了真菌的保育，確實需要加緊腳步。目前世界上有許多真菌多樣性研究的相關機構，例如：英國的邱園（Royal Botanic Gardens, Kew）便收藏了許多歷史悠久的真菌標本於真菌標本館（Fungarium），這些標本就像是時空膠囊一樣，保存著不同年代的真菌物種，提供分類學家檢視標本、比對形態與分子資料，幫助進行真菌多樣性的研究；荷蘭的Westerdijk真菌多樣性研究所（Westerdijk Fungal Biodiversity Institute）保存超過10萬種真菌的活菌株，如同真菌的方舟，除了保存真菌物種的活體之外，也提供真菌相關研究的菌株來源。在台灣，最具規模的真菌標本館位於台中的國立自然科學博物館，收藏了37,000多件的真菌標本，供真菌學家研究使用；菌種方面，新竹食品工業研究所的生物資源保存及研究中心也保存了許多種的真菌活菌株，是真菌相關研究的材料來源之一。

真菌不僅是人類利用的重要資源，對自然界的養分循環以及動植物的生長也提供了重要的貢獻。因此，保育真菌便是保護環境。其實，每個人都可以為真菌保育與真菌多樣性研究盡一份心力。在台灣，隨著山林活動的興盛以

及社群平台使用的普及，有不少的人開始對日常生活中觀察到的真菌產生好奇，甚至是成立同好社團，分享生活中觀察到的大型真菌；或者使用公民科學家平台，例如：愛自然（iNaturalist），上傳真菌照片以及樣點資訊，並討論、鑑定真菌種類，這些都是非常珍貴的自然紀錄，因為大部分的時間，真菌是以菌絲的形式生長在基質中，不容易觀察。這些紀錄可以幫助真菌學家於短時間內掌握最近出產的真菌種類、分佈地點、季節、以及基質的偏好，對於採集來說是寶貴的參考資料。真菌保育方面，可藉由國際自然保育聯盟真菌專家小組提供的倡議平台（The Global Fungal Red List Initiative），提出尚未被納入紅色名錄，卻需要被保育的真菌物種，並提交所需資料，由專家小組審核是否納入紅色名錄之中。

透過研究真菌多樣性，人們有機會深入了解各種真菌在不同環境中扮演的生態角色，並進一步探究自然中各類生物之間如何互相牽動及其運作方式。反之，若少了這些知識，不只無法全面了解我們身處的環境，也難以預測環境變遷帶來的影響與衝擊。人人都是自然的公民，應該共同努力，加速全球的真菌多樣性研究以及保育工作，別讓這些隱藏在自然中的瑰寶，消失在未來的地球。

參考文獻

1. Hawksworth DL, Lücking R. 2017. Microbiology Spectrum 5:1-17.
2. Lücking R, et al. 2020. IMA fungus, 11:1-32.
3. Mueller GM, et al. 2022. Diversity 14:736.

後記

「這是什麼真菌？可以吃嗎？」這是最常被問的問題。雖然真菌不容易以肉眼看見，但他們存在你我身邊以及各種生態棲地中，其所扮演的生態角色與對自然的影響不容忽視，仍有許多未知值得探究。期待人們投入更多關注給這群「幕後角色」，讓人們對真菌的認識，由餐桌推展至更多不同層次。

作者簡介



張瓊之

現就讀中央研究院生物多樣性國際研究生博士學位學程，研究興趣是真菌多樣性以及真菌與植物的互動關係。



陳可萱

中央研究院生物多樣性研究中心助研究員，杜克大學生物學博士。研究專長為真菌生態，尤其關注與植物互動的真菌，例如樹木及蕨類的菌根菌及生長於苔蘚上的真菌，期許能更了解這些真菌與植物的互動關係及在生態系中扮演的角色。