

蟲生真菌如何成為害蟲剋星？ 以本場研發白殭菌為例

作物環境科 副研究員 陳巧燕 分機 315
計畫助理 楊雨慈 分機 313

前言

蟲生真菌，又稱為昆蟲病原真菌 (Entomopathogenic fungi, EPF)，是一類能感染並殺死昆蟲的真菌 (圖1)，廣泛分布於自然環境中，以孢子形式存在於土壤、水源、空氣或罹病蟲體上，在生態系中扮演抑制昆蟲族群功能。蟲生真菌對昆蟲宿主具專一性、對非目標生物與環境具友善性等優點，可作為生物防治及用於有機農業及友善栽培，為作物病蟲害整合性管理 (Integrated Pest Management, IPM) 的重要一環。目前已鑑定出超過700種以上之真菌對昆蟲具有致病能力，常見種類有球孢白殭菌 (*Beauveria bassiana*)、黑殭菌 (*Metarhizium anisopliae*) 及萊氏黑殭菌 (*M. rileyi*，又稱綠殭菌)、爪哇擬青黴菌 (*Isaria javanica*)、玫煙色擬青黴菌 (*Cordyceps fumosorosea*)、蠟蚧輪枝菌

(*Lecanicillium lecanii*) 及淡紫擬青黴菌 (*Purpureocillium lilacinum*) 等，其中以白殭菌屬 (*Beauveria* spp.) 及黑殭菌屬 (*Metarhizium* spp.) 最普遍應用。本文將介紹蟲生真菌對昆蟲的致病機制，並以本場研發白殭菌生物農藥為例，說明蟲生真菌菌株篩選及實驗室效果驗證方法、白殭菌量產製程及製劑研發現況，並探討蟲生真菌用於永續農業中之應用潛力及未來展望。

當孢子遇到蟲子：蟲生真菌對昆蟲的致病機制

蟲生真菌感染昆蟲途徑，可分成3個步驟，1.附著與侵入：蟲生真菌多以分生孢子 (Conidia)，藉由風力、流水或帶有孢子之昆蟲傳播，附著於昆蟲體表，在適當溫度及濕度條件下，孢子萌發形成發芽管，產生附著器及侵入釘，並分泌脂質酶、蛋白質酶及幾丁質



▲圖 1. 擬尺蠖被黑殭菌感染，蟲體死亡呈僵硬狀，體表佈滿綠色孢子。

▲圖 2. 白殭菌感染甘藷蟻象。成蟲健康蟲體 (左)，白殭菌從死亡蟲體之節間長出菌絲 (中)，蟲體表面佈滿分生孢子 (右)。

酶等分解酵素，以機械壓力及水解酵素等方式，協同穿透表皮層，侵染寄主昆蟲。2. 體內繁殖：持續侵入至昆蟲體內之血體腔，營養菌絲分化為芽生孢子 (Blastospore)，快速吸收昆蟲營養，並分泌毒素如白殭菌素 (Beauvericin)、黑殭菌素 (Destruxins) 及細胞鬆弛素 (Cytochalasins) 等有毒代謝物，抑制免疫系統，成功定殖導致宿主死亡。3. 產孢擴散：昆蟲死亡後，蟲生真菌從體內長出氣生菌絲，產生大量分生孢子，繼續感染其他宿主。以白殭菌感染甘藷蟻象成蟲之週期為例 (圖2)，約3日造成蟲體死亡，約5日出現菌絲，約8日布滿分生孢子，接著重新進入循環，感染新的昆蟲宿主。

尋找蟲生真菌：從野外採集到實驗室確效驗證

蟲生真菌可由採集具菌絲或孢子之死亡蟲體 (圖3) 或以土壤誘釣得之，本場於北部地區田區，以挖掘土層採集疑似蟲生真菌感染樣本，包括鞘翅目甘藷蟻象、甘藷猿葉蟲及鱗翅目幼蟲等，進行菌株純化分離 (圖4)，以菌落孢子型態及分子DNA完成菌種鑑定，目前已分離多種蟲生真菌，包含 *B. bassiana*、*M. anisopliae*、

M. flavoviride、*M. rileyi*、*P. lilacinum*、*P. takamizusanense* 及 *Cordyceps fumosorosea*；因現今國內白殭菌生物農藥選擇單一旦防治害蟲範圍較少，本場以白殭菌菌株進行篩選，包括測定孢子發芽率、菌落生長速度、胞外酵素活性、於溫度及紫外線環境耐受性及不同孢子濃度對多種目標害蟲的致死效果，來確認菌株之生物活性，並調整包裝型式，測定菌株儲存穩定性，經系統性測試評估菌株發展為生物農藥之潛力。

白殭菌：讓害蟲致命的「白色瘟疫」

白殭菌感染昆蟲後，導致蟲體死亡僵硬，其體表佈滿白色菌絲及孢子，為蟲生真菌中應用最廣的種類之一。白殭菌屬真菌界 (Fungi)、子囊菌門 (Ascomycota)、囊殼菌綱 (Sordariomycetes)、肉座菌目 (Hypocreales)、蟲草菌科 (Cordycipitaceae)、白殭菌屬 (*Beauveria*)，寄主範圍極廣，可感染超過700種昆蟲，涵蓋鱗翅目、鞘翅目、半翅目及直翅目等重要農業害蟲，此外，部分白殭菌菌株可作為植物內生菌 (Endophytes)，透過根際定殖寄生於



▲圖3. 於野外土層採集疑似蟲生真菌感染樣本。



▲圖4. 敲落蟲體上之孢子至平盤培養皿進行蟲生真菌純化分離 (左) 及黑殭菌菌落照 (右)。

植物體內，具備對害蟲致病力之外，亦可增進植物的抗逆性及營養吸收，可發展為功能性生物防治資材。白殭菌不僅能寄生活體昆蟲，也具腐生性，可存活於死亡蟲體、土壤及植物殘體中，有利其作為生物農藥之田間持久性。

在生物農藥生產上，白殭菌主要採用固態發酵 (Solid-State Fermentation, SSF) 及液態發酵 (Submerged Fermentation, SMF) (圖5)。固態發酵以米或麥等穀物為基質，所生產之分生孢子具較強耐逆性及致病力，但生產週期長 (10—15日)，生產過程勞力密集、耗時，且易受基質、濕度與氧氣影響，自動化及標準化因難，難以支應大規模需求；液態發酵則在液體培養基中進行，透過碳氮源供應與溫度、pH及溶氧等條件控制，能快速、大量且標準化生產，以本場白殭菌液態搖瓶試驗結果，培養3日即可達到 10^9 blastospores/mL。液態發酵產物主要為薄壁的芽生孢子，雖生產效率高，但相較分生孢子其穩定性及儲存性較差。近年研究聚焦於優化液態發酵條件，以提高環境適應性。發酵產物以過濾及離心等方式收穫孢子，乾燥方式則依菌株特性選擇空氣乾燥、噴霧乾燥或流體床乾燥，後續依標的害物及施用方式開發製劑，目前已有油劑、水懸劑、可濕性粉劑及微膠囊等劑型，並添加抗紫外線、高溫與乾燥等保護成分，以提升田間穩定性。

「以菌制蟲」：蟲生真菌於永續農業之展望

蟲生真菌對非目標生物及環境友善，具內生菌特性，促進植物生長，並能與其

他害蟲管理技術整合，為永續農業重要的生物防治資材。為確保其穩定及高效，須從菌株篩選、量產製程、製劑開發到微生物農藥化之理化性質、產品安定性、毒理資料及田間驗證，完成生物農藥登記才能產業應用。目前國際上已有多項蟲生真菌生物農藥製劑，廣泛用於害蟲防治，如美國、巴西及印度已將白殭菌與黑殭菌製劑用於玉米螟、銀葉粉蝨及蝗蟲等作物病蟲害整合性管理。相較之下，國內蟲生真菌生物農藥數量仍少，顯示具發展空間。但商品化發展受限於固態發酵耗時、液態發酵技術尚未臻成熟、產物收穫繁瑣、缺乏適用製劑及儲架壽命短等因素；田間應用亦受紫外線傷害、土壤微生物競爭及極端氣候影響，降低防治效果。本場目標以篩選兼具高毒力與多重寄主潛力的白殭菌菌株，並開發其發酵技術及適當劑型，針對設施蔬菜害蟲如黃條葉蚤、十字花科小猿葉蟲、蚜蟲類與夜蛾類，依據目標害蟲生態與作物特性，調整施藥時機及方法，增加孢子覆蓋率與感染率，提升其在設施蔬菜田間應用的穩定性與防治效果。同時結合栽培管理及物理防治等策略，發揮加成作用，降低單一防治手段風險，促進蟲生真菌產業化及實際應用。



▲圖 5. 白殭菌固態培養發酵及液態培養。以白米基質進行固態培養 (左)；液態搖瓶培養 (右)。