



## 微生物殺蟲劑的現況與未來： 永續農業的關鍵推手

撰文 | 農業試驗所 張淑貞、李中潔、江明耀

### 前言

害蟲問題是農業栽培中無法避免的問題，農田中的害蟲常常悄悄造成損失，小菜蛾、蚜蟲或粉蝨等害蟲啃食葉片或吸食汁液，甚至傳播病害，造成每年全球20–40%的農作物損失，對日益增長的糧食需求更是一大挑戰。長期以來，化學農藥是農民快速防治的利器，但過度使用帶來環境污染、益蟲減少，甚至導致害蟲抗藥性，使防治變得更困難。在這樣的背景下，微生物殺蟲劑應運而生。這些土壤、植物或昆蟲體內的微生物，能精準抑制害蟲，對環境影響小，逐漸成為永續農業的重要夥伴。微生物殺蟲劑就是利用「會使昆蟲生病的微生物」來防治害蟲，包括細菌、真菌及病毒。這些微生物本來就存在於自然界，是昆蟲的天然天敵，科學家將它們分離、培養並製成農業可用的製劑，成為農田裡「看不見的軍隊」。

### 細菌殺蟲劑

在農業害蟲防治中，細菌性微生物製劑已被廣泛應用。它們在製造與田間使用時都會面臨乾燥、加熱、溫度、濕度和紫外線等環境挑戰，而能否存活，很大程度取決於是否能形成孢子。根據孢子形成方式，病原性細菌可分為內生孢子型，如芽孢桿菌屬（*Bacillus*）、梭菌屬

(*Clostridium*)、類芽孢桿菌屬 (*Paenibacillus*)。外生孢子型如鏈黴菌屬 (*Streptomyces*) 及無孢子型細菌如假單胞菌屬 (*Pseudomonas*)、光桿菌屬 (*Photobacterium*)、色桿菌屬 (*Chromobacterium*) 等。

其中最著名的蘇力菌 (*Bacillus thuringiensis*, 簡稱 Bt) 廣泛存在於土壤中, 能產生內生孢子, 穩定性高。Bt 會產生 Cry 蛋白結晶毒素。Bt 可分成約 30 個亞種, 不同亞種的 Bt 會產生不同的 Cry 蛋白, 不同的 Cry 蛋白對不同種類的昆蟲毒效不同。當害蟲如小菜蛾吃下帶有 Cry 1 蛋白的葉片時, 毒素在其鹼性腸道活化, 像小鑿子一樣破壞腸道細胞, 最終死亡。Cry 蛋白對人類及多數動物無害, 因此 Bt 農藥已成為全球重要的生物防治工具, 科學家也將 Bt 基因引入玉米、棉花等作物, 形成「抗蟲基因作物」。

## 真菌殺蟲劑

截至 2023 年, 全球已有 27 種蟲生真菌登記為殺蟲劑。在農業害蟲防治中, 最常用的昆蟲病原真菌包括白殭菌屬 (*Beauveria*)、黑殭菌屬 (*Metarhizium*) 及蟲草屬 (*Cordyceps*)。這些真菌不僅能直接防治害蟲, 有些種類還能寄生在植物組織內, 成為內生昆蟲病原真菌 (endophytic insect pathogenic fungi, EIPF), 促進植物生長並誘發免疫反應。白殭菌屬真菌應用最廣, 能產生多種殺蟲活性代謝物; 黑殭菌屬廣泛存在於土壤、植物根部及昆蟲體內, 寄主範圍廣; 蟲草屬則寄生在昆蟲或其他節肢動物上。

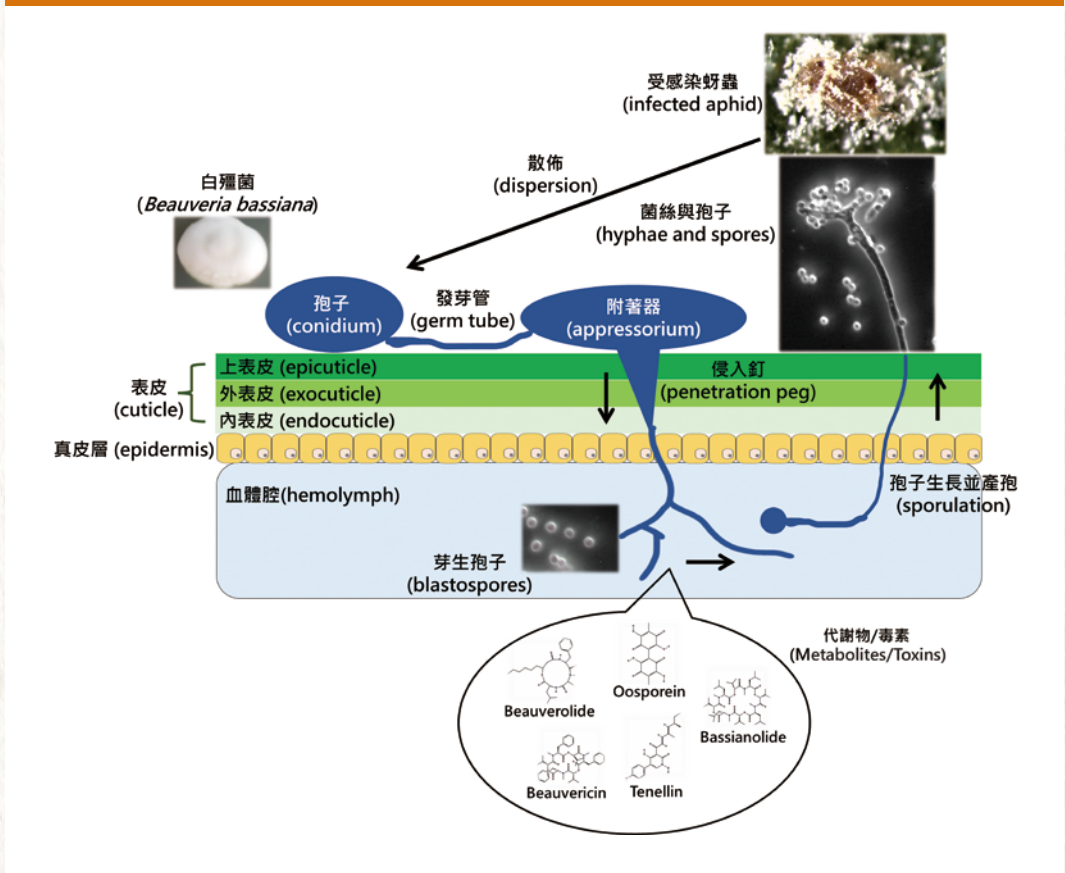
昆蟲病原真菌感染害蟲始於孢子附著於昆蟲表皮, 萌發後形成附著器 (appressorium), 利用化學和機械作用穿透外皮進入體腔。菌絲體 (mycelium) 在體內生長並產生孢子, 逐漸削弱害蟲活動能力, 最終致死。感染晚期, 菌絲會伸出體表並產生大量粉狀孢子, 附著在健康昆蟲上, 開始新一輪感染, 形成自然防治的循環, 有效抑制害蟲群體 (如右頁圖)。

上圖：小菜蛾是蔬菜主要害蟲，可應用蘇力菌防治。

下圖：小菜蛾受真菌感染死亡並長出菌絲。



## 白殭菌感染蚜蟲的過程



## 病毒殺蟲劑

常用於害蟲防治的桿狀病毒科 (Baculoviridae) 病毒可感染鱗翅目、膜翅目及雙翅目等昆蟲。這些病毒體型較大，含有環狀雙股 DNA，外層包膜，內含可保護病毒存活的包涵體 (occlusion bodies, OB)。根據包涵體形態，桿狀病毒分為核多角體病毒 (NPV) 和顆粒病毒 (GV)。NPV 在細胞核形成大型包涵體，內含多個桿狀病毒；GV 產生小型顆粒包涵體，每個通常只含單一病毒。

昆蟲攝入病毒後，中腸的鹼性環境會溶解包涵體，釋出包涵體衍生病毒 (ODV)，穿過腸道內壁進入中腸的上皮細胞，開始在昆蟲體內複製，破壞細胞並擴散到其他組織。同時產生芽生病毒 (BV)，透過血液和氣管擴散全

身。感染後期，病毒會在細胞核內形成新的包涵體，操控宿主行為，驅使幼蟲爬到植物高處死亡，組織液化，角質層分解，內部結構崩解後釋放大量包涵體，接觸新的健康幼蟲，開始下一輪感染。這個過程不僅能有效消滅害蟲，也使病毒在自然環境中持續傳播，形成循環。

與其他昆蟲病原微生物如蘇力菌或白殭菌、黑殭菌相比，桿狀病毒具有非常高的宿主專一性，幾乎只感染特定害蟲，不會干擾其他昆蟲或生態系統，是環境友善的生物防治工具。然而，感染後的昆蟲通常仍會持續進食數天到數週，持續造成農作物損害。因此需在幼蟲早期施用高濃度包涵體或定期噴灑。另為加速害蟲死亡、抑制進食或提升致病力，以降低作物損害，基因改造桿狀病毒也在持續研究中。

臺灣於 2021 年在青蔥甜菜夜蛾幼蟲體內分離出核多角體病毒（NPV）株 BV001，但病毒大量生產需先在夜蛾幼蟲體內繁殖，研磨感染幼蟲提取病毒，或冷凍保存幼蟲，生產成本高，而且傳統病毒製劑需低溫保存，不利於商品化，限制了大規模應用。近期，科學家克服了製劑的挑戰，研發出水分散性顆粒製劑，在室溫下可穩定保存超過9個月，大幅提升使用便利性。此外，結合人工智慧的自動化生產系統也已經投入應用，利用影像辨識和機械手臂自動完成昆蟲飼養、病毒感染、疾病監測、病毒提取與保存，顯著降低人力成本，提高生產效率。

受病毒感染的幼蟲爬到高處死亡。



## 微生物殺蟲劑的優勢、挑戰與未來

微生物殺蟲劑正成為農業永續發展的重要力量。它們來自自然界，使用後會自然分解，不會在土壤或水源中留下有害殘留。而且許多微生物只針對特定害蟲具殺蟲效力，對蜜蜂、瓢蟲等益蟲影響小，也不會危害人類健康。有些微生物還能抑制植物病害或促進作物生長，展現出一物多用的特性。由於它們常具備多種毒素或複雜的感染機制，害蟲要同時突破防線的難度較高，抗藥性風險也相對低。

然而，微生物殺蟲劑在發展與應用上仍有挑戰。高溫、紫外線或乾燥環境會降低微生物存活率，田間效果可能不穩定；相比化學農藥，它們的作用速度較慢，需要幾天甚至1週才能殺死害蟲；製劑製作與貯存過程也會影響活性，微生物在量產後，必須轉化成適合田間使用的劑型，但製備過程中常會經歷高溫或乾燥等條件，容易影響其活性。而即便製成商品化的製劑，也仍須面對貯存環境和保存期限的問題，這些因素都可能影響產品的穩定性與實用性。而成本偏高則可能影響農民接受度，在實際應用上仍存在阻力。

隨著基因定序、分子生物學以及微生物量產技術的快速進展，微生物殺蟲劑的未來正展現出無限的可能性。基因分析和菌株篩選改良能提升防治效率與環境適應力。新型製劑如奈米包覆等可以延長微生物製劑在田間的有效時間，確保防治效果更加穩定。未來的微生物殺蟲劑甚至可能朝向「客製化」發展，依據不同地區的環境條件與特定害蟲種類，設計出專屬的防治產品，讓農民能夠以更精準的方式管理作物健康。同時，部分昆蟲病原微生物還具備產生抗生素或藥用分子的潛力，應用領域或將超越農業。

## 結語

微生物殺蟲劑正逐漸成為永續農業的重要力量。蘇力菌、白殭菌、黑殭菌及病毒等已廣泛應用於作物蟲害防治，降低化學農藥使用，並維護生態平衡。然而，實際推廣仍受限於抗藥性風險、環境敏感性及製劑保存等挑戰。隨著科技進展，研究者正透過菌株篩選與改良、新型劑型、奈米技術及自動化生產，提升產品的穩定性與成本效益。同時，微生物殺蟲劑在作物健康管理（integrated crop management, ICM）中的角色也日益凸顯，與天敵昆蟲及栽培管理措施相結合，能更有效維護生態平衡並保障糧食安全。未來，微生物殺蟲劑將不僅是化學農藥的替代品，更是推動農業向綠色轉型與永續發展的關鍵推手。🌱

未來的微生物殺蟲劑甚至可能朝向「客製化」發展，依據不同地區的環境條件與特定害蟲種類，設計出專屬的防治產品，讓農民能夠以更精準的方式管理作物健康。