

蟲生線蟲於蟲害防治上之潛力

曾慶慈 (國立嘉義大學植物醫學系)

前言

自二次世界大戰後，化學殺蟲劑被廣泛地應用於全球各地之作物保護中；然而頻繁且過量使用化學殺蟲劑，易導致害蟲產生抗藥性，且可能對農產品、人體健康甚至自然環境造成不可逆之危害。因此目前在整合性蟲害管理 (integrated pest management, IPM) 系統中，非農藥資材之微生物相關製劑如真菌 (如黑殭菌 *Metarhizium anisopliae*、白殭菌 *Beauveria bassiana*)、細菌 (如蘇力菌 *Bacillus thuringiensis*)、病毒 (如核多角體病毒 *Nucleopolyhedrovirus*) 等昆蟲病原，因其對自然環境安全無害且可大規模量產之特性，應用頻率與重要性逐年上升。而本文之主角「蟲生線蟲」(entomopathogenic nematode, EPN) 除上述優點外，其寄主範圍廣泛、所需致死時間相對較短且具主動搜尋寄主之能力，故而被認為是極具發展潛力之昆蟲病原微生物。

蟲生線蟲之生物特性

迄今已紀錄之蟲生線蟲多隸屬於斯氏線蟲 (*Steinernema*) 與異小桿線蟲 (*Heterorhabditis*) 兩屬；據 Bhat 等人於 2020 年之研究顯示，斯氏線蟲屬約有 100 餘種，而異小桿線蟲屬則有 20 餘種。

蟲生線蟲生活史中，應用於生物防治者為其「侵染期幼蟲」(infective juvenile, IJ) 階段，是為暫時停止發育之第三齡幼蟲；侵染期幼蟲能藉由昆蟲之自然開口 (如口、肛門或氣孔) 等處侵入其體內，而後釋出腸道內所攜帶之專一性共生細菌 (簡稱共生菌) (目

前已知斯氏線蟲之共生者多為 *Xenorhabdus* 屬，而異小桿線蟲則多與 *Photorhabdus* 屬共生)；此類共生菌能於昆蟲血腔內大量增殖，引發寄主產生敗血症 (septicemia)，並在 48-72 小時內導致其死亡，是為蟲生線蟲造成寄主死亡之重要因子。

同時，蟲生線蟲會藉由共生菌分解寄主組織獲取生長所需之養分，發育為成蟲後生殖產生下一代，並於寄主體內循環 2-3 個世代；直至資源耗盡，線蟲會再次發育為侵染期幼蟲而後移出至外界環境，以待再次搜尋合適之寄主 (圖一)。



圖一、大量蟲生線蟲 (*Steinernema carpocapsae*) 之侵染期幼蟲自受感染之蠟蛾 (*Galleria wax moth*) 幼蟲體內移出 (圖片來源：Miles 等人，2012；<https://pubs.extension.wsu.edu/product/using-entomopathogenic-nematodes-for-crop-insect-pest-control/>)。

而蟲生線蟲於蟲害防治中開始展露頭角的原因之一，乃因其寄主範圍囊括鱗翅目、鞘翅目、直翅目、雙翅目等，並不僅侷限於特定種類之昆蟲。目前已知蟲生線蟲對諸多經濟害蟲 (如斜紋夜蛾 (*Spodoptera litura*)、

秋行軍蟲 (*Spodoptera frugiperda*)、甜菜夜蛾 (*Spodoptera exigua*)、黃條葉蚤 (*Phyllotreta striolata*)、小菜蛾 (*Plutella xylostella*)、西方花薊馬 (*Frankliniella occidentalis*)、林業害蟲 (如舞毒蛾，又名吉普賽舞蛾 (*Lymantria dispar*)) 甚至衛生害蟲 (如貓蚤 (*Ctenocephalides felis*))、德國蜚蠊 (*Blattella germanica*)、埃及斑蚊 (*Aedes aegypti*) 等皆有抑制且造成其死亡之能力。

蟲生線蟲之大量培養

然若要將蟲生線蟲實際應用於田間，人工大量生產技術是至關重要且不可或缺的一環。蟲生線蟲之培養技術可分為體內、體外培養 (固體或液體培養基) 等方式：

- (一) 體內培養：係指直接以侵染期幼蟲感染昆蟲寄主，待其再次離開寄主時進行回收。此方法操作容易且成功率高，然而需要耗費大量勞力於飼養寄主昆蟲與整體流程操作，所得之最終線蟲產量亦較低；故此法目前多應用於實驗室試驗或開發中國家等人力成本較低廉且小規模生產之情形。
- (二) 體外培養：可應用固體培養基 (固體培養) 或液體培養基 (液體培養) 進行，目前多以酵母萃取物、豆粉、蛋黃粉、奶粉、動植物油等已規格化之商品進行

培養基之配製，以求所得線蟲之品質穩定並降低生產成本。固體培養所需之技術門檻較低 (一般多以海綿塊吸附培養基後置於合適容器中培養)，所得產量亦明顯較體內培養為高，然培養期間培養基內部不易觀察且容易發生汙染；而液體培養則多將培養基置於發酵槽內進行培養，操作技術較複雜且成本較高，但因勞力需求較 且大規模生產能降低商品價格，故為目前商業化生產時最常使用之方式 (表一)。

蟲生線蟲於害蟲防治上之施用策略

現今蟲生線蟲之施用多採淹沒式、無須回收之形式重複多次噴灑或於每季進行補噴，以維持其田間致病力。線蟲會受外界環境壓力如乾燥、高溫之影響，而有存活率下降之情形，進而導致防治成效不佳；故一般建議可選擇於清晨或傍晚進行施用，並應於施用前後灑水濕潤噴灑區域，以利線蟲之移動並提高其進入土壤之機會，避免線蟲因過度乾燥或紫外線之影響而死亡。

一般依施用位置可區分為土壤、葉部、誘引作物上、繁殖材料等處；目前最常應用者為土壤施用，此乃因土壤同時為蟲生線蟲及諸多經濟害蟲部分生活史之自然原始棲所，故防治成效較良好。而葉部施用則因線

表一、蟲生線蟲生產方式之比較

	生產方式			
	體內培養	體外培養	固體培養基	液體培養基
成本支出	較低	中等		較高
所需操作技術	較容易	中等		較複雜
人力需求	較高	中等		較低
規模經濟 (economy of scale)	較低	中等		較高

資料來源：Shapiro-Ilan 等人，2014 (網址：<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391453-8.00010-8>)

蟲易直接暴露於陽光下，故多建議可添加保濕劑、抗紫外線劑等有助於保護線蟲之協力劑。

施用器材則視作物種類與環境而定，一般而言，多數園藝工具或設備如園藝用澆水壺、靜電噴霧器、鼓風噴霧機，甚至灌溉系統（包含溝灌、滴灌等）等皆可應用於蟲生線蟲之施用上。Tofangsazi 等人在 2012 年曾提出施用相關建議，如 1. 施用線蟲懸浮液時應使用較大孔徑之噴頭，並移除設備中之濾網以避免阻塞；2. 應在施用過程中充分攪拌以避免線蟲之沉降；3. 避免過高之壓力 (> 300 psi)；Wright 等人亦曾於 2005 年提出，使用之水溫不宜太高 (4-30 °C)，且水中氧氣之溶解度會隨溫度升高而下降，進而導致線蟲喪失活性。

於前人試驗中已知，蟲生線蟲可與殺菌劑、殺草劑等化學藥劑或他種微生物病原共同施用，防治成效基本不受影響，甚至有部分加乘效果。如 Koppenhöfer 與 Grewal 在 2005 年發現，若將蟲生真菌與蟲生線蟲併用，雖因個別死亡率已極高而導致兩者併用後之致死率無顯著增長，但致死速率確有所提升。不過合併施用需注意施用時機、方式與接種量，以免防治成效不彰。

蟲生線蟲目前商品化之情形

據 Sikandar 等人於 2021 年之統整紀錄顯示，近年來已有多國（如奧地利、澳洲、美國、英國、德國、日本、印度等）已成功量產並販售蟲生線蟲相關商品，如斯氏線蟲之 *Steinernema carpocapsae*、*S. feltiae*、*S. riobrave* 與異小桿線蟲之 *Heterorhabditis bacteriophora*、*H. indica*、*H. megidis* 等（圖二）；且由於其已知之環境及生物之安全性，使蟲生線蟲於美國及歐盟等國所受之法規限制遠

低於對化學藥劑之規範。

而據農業部動植物防疫檢疫署農藥資訊服務網所示，目前已公告登記核准可作為殺蟲劑之微生物製劑，計有白殭菌、蘇力菌（鮎澤蘇力菌與庫斯蘇力菌）與甜菜夜蛾核多角體病毒等，囊括真菌、細菌與病毒三大類昆蟲病原，但尚無蟲生線蟲製品。



圖二、（左）Koppert 公司所販售之蟲生線蟲 (*Steinernema feltiae*) 商品（圖片來源：<https://www.koppert.com/entonem/>）；（右）Bionema 公司所販售之蟲生線蟲 (*Heterorhabditis bacteriophora*) 商品（圖片來源：<https://bionema.com/catalogue-product/nemagen-biological-control-of-chafer-grubs/>）。

結語

綜上所述，可知蟲生線蟲確為蟲害防治上極具潛力之生物防治因子，然不同種類之蟲生線蟲會因其體型與生物特性而導致於致病力與寄主範圍上有所差異。且臺灣地區目前已發表紀錄之蟲生線蟲種類尚少（如 *Steinernema abbasi*、*Heterorhabditis brevicaudis*、*Steinernema taiwanensis*），若能持續進行相關研究，發掘更多臺灣本土之分離株或種類，以期未來能應用於本土田間之害蟲防治，除可增加非農藥防治資材之多樣性，亦可作為化學殺蟲劑之替代選項並降低其使用量與可能之危害，並對農業之永續經營發展有所助益。