

# 蟲生病原真菌在蟲害防治上可運用之策略

蔡勇勝\* 高穗生 行政院農業委員會農業藥物毒物試驗所生物藥劑組 台中縣霧峰鄉舊正村光明路 11 號

## 摘要

蟲生病原真菌可由昆蟲體表直接侵入感染，是重要蟲生病原微生物之一。利用蟲生病原真菌的策略理論與其他天敵相同，包括引入(importation)、保育(conservation)、接種釋放(inoculative release)及淹沒釋放(inundative release)等方式，但實際應用的成功例子仍以淹沒式釋放居多。引入立足或自然引發流行而達抑制蟲害作用之案例不多，且大多發生在寄主特異性高的種類，如蟲霉目(Entomophthorales)和綠殭菌(*Nomuraea rileyi*)。能否量產決定蟲生真菌可否採行淹沒釋放之利用方式，為了提高蟲生病原真菌在田間之防治作用，包括製劑配方調整和其他配合應用策略不斷地被開發出來，諸如：油劑之開發、結合化學殺蟲劑之使用、費洛蒙之配合，甚至於利用蟲生病原真菌在作物內增殖，以減輕害蟲之危害。另，在建立將蟲生病原真菌導入害蟲棲群之有效方法，及減輕環境因子對蟲生病原真菌不利影響等研究工作上，亦有許多成果。本文僅就蟲生病原真菌在蟲害防治上可運用之策略相關文獻進行整理，希望有助於蟲生病原真菌在害蟲防治上的利用。

**關鍵詞：**蟲生病原真菌、淹沒釋放、油劑、費洛蒙

## 前言

蟲生病原真菌(entomopathogenic fungi)具水平及長距離傳播之特性，不但是害蟲重要天然防治劑，更是少數可由寄主體表直接侵入體內之蟲生病原微生物，對以刺吸式口器進行危害作物之同翅目害蟲防治工作而言，極為重要。就過去蟲生病原真菌被用來防治害蟲之經驗及研究，為了達到高防治效果，業依不同蟲生病原真菌特性及標的害蟲的種類、生物學和感受期之差異，發展出許多不同的策略，但各家說法不一；Ferron(1978)認為只有調整環境因子、農業操作習慣誘使發病，及人為引進，進而引發流行病兩種方式。Wraight 和 Carruthers(1999)認為蟲生真菌之利用策略應有 DeBach 所定義之(1)引入(importation)(2)放大(augmentation)(3)保育(conservation)三種方式。另也有所謂引入立足(introduction and establishment)、接種放大(inoculative augmentation)、環境調控(environmental manipulation)及淹沒放大(inundative augmentation)之不同說法(Fuxa, 1987)。Lacey 等(2001)則提到有放大、保育、接種釋放(inoculative release)及淹沒釋放(inundative release)之策略。

不管何種策略或利用方式，其目的最終在於使蟲生病原真菌發揮最大之防治作用。因此，任何有助於蟲生病原真菌在田間存活、發病、增殖或提高防治效果之操作，均有瞭解之必要。本文僅就常見之蟲生病原真菌進行生物防治利用重要策略和新進技術做一簡要概述。

## 引入

引入又稱之為古典生物防治(classical biological control)，其定義為：將一新的、外來的真菌種類或具有較高毒力的品系從一個地區或國家引進到另一地區或國家謂之古典生

物防治。因受法規之限制，引入蟲生病原微生物之研究及相關工作遠不及於捕食性及寄生性天敵(Lacey *et al.*, 2001)。自然界中除綠殭菌(*Nomuraea rileyi*)外，甚少有不完全菌引發流行病之記錄(Ferron, 1978)。Zimmermann(1994)在其文章中提到的幾個成功的例子，即均屬蟲霉目(Entomophthorales)，主要的原因則在其寄主特異性高，且易於在害蟲棲群中造成流行疫病之故。如，在澳洲引進根蟲瘟霉(*Zoophthora radicans*)以防治苜蓿斑蚜(*Therioaphis maculata*)。在1984年自美國將一種噬蟲霉(*Entomophaga praxibuli*)引進到澳洲，經五年的檢疫後，於1989年將此菌釋放於北達科他州之牧場以防治蝗蟲。另一有趣的例子是舞毒蛾噬蟲霉(*Entomophaga maimaiga*)自1989年後，在美國東北地區使吉普賽舞蛾(*Lymantria dispar*)造成廣泛的流行疫病，此病原真菌原產日本，在近80年前引進到北美洲，目前此菌在北美洲分佈很廣亦為吉普賽舞蛾重要病原。

### 淹沒釋放

蟲生病原真菌在昆蟲棲群中以風土病(enzootic)或流行病之型式存在(epizootic)。風土病的發生並不受注意，流行病之引發則具有效抑制害蟲棲群之作用。在美國阿肯色州沿密西西比河流域之棉花田，因弗雷生新接霉(*Neozygites fresenii*)之發生流行可減少防治棉蚜(*Aphis gossypii*)之用藥量(Steinkraus *et al.*, 1995)；綠殭菌和白殭菌(*Beauveria bassiana*)在印度有引發危害棉鈴之玉米穗蟲(*Helicoverpa armigera*)和斜紋夜蛾(*Spodoptera litura*)發生流行病，並使害蟲密度維持在經濟水平之下之情形(Devi *et al.*, 2003)。但上述例子之發生並不普遍，且流行病的發生屬密度應變(density-dependent)反應，病原的大發生總是在作物損害之後，況且害蟲與蟲生病原真菌間也有所謂之密度應變抗性(density-dependent resistance)(Wilson *et al.*, 2001)，期望留存田間之蟲生病原真菌能自然引發流行，而達抑制重要害蟲之作用，是很難預期和掌握的。評估未來蟲生病原真菌在蟲害防治上的利用方式，仍以將蟲生病原真菌開發成真菌殺蟲劑為主要發展方向，也唯有在此利用策略下才能適時、簡便且有效的應用。這種處理模式即接近所謂之淹沒式釋放。不管是接種式或淹沒式之釋放處理，從字面定義上可知，大量具活性之蟲生真菌繁殖體必需被釋放到田間，所施用之菌量以利用最普遍之黑殭菌(*Metarhizium anisopliae*)及白殭菌為例，每公頃施用量達 $10^{12}$ 個分生孢子以上(Lomer *et al.*, 1993；Wright 1993)。以淹沒式釋放蟲生真菌，除了量產技術之突破外，為維持施用到田間菌體之活性，提高殺蟲作用，及有效傳佈、散播蟲生真菌感染源，包括製劑改良、營養及保護劑之添加、其他殺蟲協力物質之配合亦有諸多實例。

### 一、製劑

製劑是開發真菌殺蟲劑商品化過程中最重要之工作，因製劑的改變和調整，可達下列作用(1)分佈面積之擴大(2)操作簡單(3)貯藏安定性(4)田間安定性(5)效果之促進(Wraight & Carruthers, 1999)。一些生活於隱蔽空間之害蟲，包括潛食、蛀食和土棲性害蟲，直接施用蟲生真菌難以接觸蟲體，只能寄望所施用之蟲生病原真菌能在田間存活，或以製劑技術克服此問題(如餌劑之開發，可使害蟲前來取食接觸)。此外，施用到防治標的害蟲週圍之蟲生真菌，其在環境中之存活、生長、再傳播能力，會受生物因子與非生物因子影響；另，面對棲身於特殊環境條件之害蟲防治，也有賴製劑專家之協助。

1.不同蟲生病原真菌繁殖體及不同劑型製劑：不完全菌類之蟲生真菌大多以分生孢

子型態施用於田間來防治害蟲，但菌絲和芽孢兩種繁殖體亦有人利用，在特殊環境下菌絲和芽孢之表現較分生孢子佳。實驗發現土壤中施用黑殭菌菌絲對金龜子之作用比分生孢子快(Krueger *et al.*, 1992)。在蟲霉目這類蟲生真菌，抗耐環境之休眠孢子(resting spore)也是被考慮的利用對象(Filotas & Hajek, 2004)。至於製劑型態則包括粉劑、粒劑、餌劑、油劑 (Pereira & Roberts, 1990; Feng *et al.*, 1994; Inglis *et al.*, 1996; Lomer *et al.*, 2001; Bextine & Thorvilson, 2002; Bruck & Lewis, 2002)，各種劑型皆有其利用特色及功能。

2. 土棲害蟲之防治：為了防治在土壤中棲息的害蟲，真菌必需要混入土中，因此要採用特別的施用技術才能奏效。有兩種不同的策略曾經被應用過：(1)將分生孢子、芽生孢子、長滿真菌的穀物或菌絲段施於土中以防治幼蟲。(2)以空中噴灑分生孢子或芽生孢子的方式防治成蟲，並借產卵之雌蟲將真菌傳到土中。有許多國家以該地區之穀物量產黑殭菌和球孢白殭菌(*B. brongniartii*)，用鑽孔機械將之施於土中防治蟻蟻。最近已開發出不同的菌絲製劑例如乾的菌絲球或菌絲顆粒(直徑 0.5-1.0mm)，可將之用於西方五月鯉角金龜(*Melolontha melolontha*)的防治(Pereira & Roberts, 1990、1991; Krueger *et al.*, 1992)。此產品為 Bio 1020 可用於溫室之盆栽和苗圃，將此顆粒與商品化之土壤基質混合，而有預防(prophylactic)之效果。Kessler等(2003)認為利用接種在大麥且佈滿菌絲之球孢白殭菌再施用到土壤中來防治西方五月鯉角金龜，球孢白殭菌在施用後之生長需正常、且產孢量要到引起寄主害蟲引發流行病之量。依較早之文獻資料，此起始濃度約為每g土壤  $10^3$ - $10^4$  CFU (Keller *et al.*, 2002)。罹病蟲隻之釋放可考慮為增加田間接種濃度之策略。另，以海藻膠包埋外層白殭菌再覆上花生油之餌劑也能有效減低入侵紅火蟻(*Solenopsis invicta*)之發生(Bextine & Thorvilson, 2002)。

土壤之組成、理化特性及所含微生物種類、水潛勢(water potential)、溫度、濕度、pH 值直接、間接影響施用之蟲生病原真菌活性及傳播能力(Studdert & Kaya, 1990; Studdert *et al.*, 1990; Kessler *et al.*, 2003; Fuxa & Richter, 2004)。Kessler 等(2003)就其實驗結果下了推論，在 20~25°C 土壤中，生物因子的影響較土壤成分為大。生物因子之影響包括靜菌(Fungistasis)作用，不同土壤之間靜菌作用不一(Sharapov & Kalvish, 1984)，溫度、有機質含量及 pH 值也與靜菌作用有關，高溫條件、富含有機質肥及較鹼性之土壤，會有較強之靜菌作用。推測 pH 值的影響與左右和細菌、放線菌之競爭有關，因細菌、放線菌較真菌不耐酸性環境(Studdert & Kaya, 1990; Groden & Lockwood, 1991)。菌株對土壤環境有敏感度之差異(Studdert *et al.*, 1990)，面對土壤之抑制作用，篩選抗耐菌株是根本解決之道，另，調整製劑配方也有改善的作用。利用粘土(clay)包埋之白殭菌孢子在-0.3 ~ -15 bars 土壤之存活能力明顯提升(Studdert *et al.*, 1990)，即為實例，而 Fargues 等(1983)發現此處理有助於白殭菌芽孢抗細菌之解離(在含 80%濕度之土壤)。

### 3. 在乾燥環境條件下以特殊配方來防治害蟲的策略

在田間，低相對濕度是有效地防治食葉和刺吸植物的害蟲最嚴苛的限制條件。然而最近研究指出有效地使用油基(oil-based)劑型或油水乳劑(oil-water emulsion) 似乎是在乾燥環境條件下防治害蟲，一有趣的新策略。觀察指出油能夠(1)改善大多數蟲生真菌之忌水性分生孢子和同具忌水性昆蟲表皮的接觸性(2)阻止真菌的脫水。尚其他的數據顯示有些油類對某些昆蟲種類有稍許的毒性，可能因而加速了感染的過程。但礦物油、植

物油能造成對植物的藥害也為人所熟知。故必須先測試對寄主植物的藥害，才進行防治，才不會有副作用。使用油劑之黃綠黑殭菌(*Metarhizium flavoviride*)可提高對非洲蝗蟲(*Schistocera gregaria*)之感染率(Bateman *et al.*, 1993)。在美國一種白殭菌製劑稱之為Naturalis-L，其乳化油劑可利用來防治棉鈴象鼻蟲(*Anthonomus grandis*) (Wright 1993)。Prior 等(1988)即曾利用 ULV 施用白殭菌油劑來防治可可象鼻蟲(*Pantorhytes plutus*)，並發現分生孢子在油劑中可維持較久之活性。另外油基之黑殭菌製劑同樣也以 ULV 施用，來防治非洲柚木雜色蝗(*Zonocerus variegates*)(Lomer *et al.*, 1993)。相同的技術也被利用來施用黑綠殭菌以防治溫室中之美洲蝗蟲(*Schistocera americana*)(Sieglaff *et al.*, 1998)。雖然油劑在上述例子中對蟲生真菌之利用均有正面的作用，但在對香蕉球莖象鼻蟲之防治試驗，白殭菌油劑之作用明顯不及與玉米混合和土壤拌玉米之製劑(Nankinga & Moore, 2000)。另，不同來源的油對害蟲(Hazzard *et al.*, 2003)、蟲生病原微生物及作物影響可能有所差異，油劑之開發過程需將此問題一併考慮。

## 二、添加保護劑或營養物質

Hall(1981)發現單獨施用蠟蚧輪枝菌(*Verticillium lecanii*)對棉蚜(*Aphis gossypii*)作用不佳，以添加營養之製劑處理會有明顯防治成效。另有實驗證實，添加特定碳素源對蠟蚧輪枝菌之孢子發芽有促進作用(Tsai, 2004)。添加幾丁質可減緩土壤對蟲生真菌之靜菌作用(Sharapov & Kalvish., 1984; Pereira *et al.*, 1993)。

## 三、結合化學殺蟲劑和其他蟲生病原以增加蟲生真菌效果的策略

一般而言，蟲生病原真菌實驗室內的實驗效果均佳，但以蟲生病原真菌在田間進行蟲害防治時，其結果有所變異，防治亦不一致，主要是受到環境條件的影響。因而要開發出策略來達成(1)增加效果(2)加速害蟲之死亡率，以獲得高且恆定的田間防治結果。有兩種策略曾經被使用過：(1)將蟲生病原真菌與亞致死劑量的化學殺蟲劑結合，(2)將蟲生病原真菌與其他蟲生病原結合。Benz(1971)即認為化學性殺蟲劑有助於使害蟲罹病，將蟲生病原真菌與低劑量的化學殺蟲劑結合原因是標的害蟲因化學殺蟲的使用而衰弱，因而更易受到真菌的感染，主要的策略是結合已降低濃度的化學殺蟲劑以期獲得相加(additive)或協力(synergistic)效果。先決條件在於化學殺蟲劑對真菌不會有副作用。納乃得(methomyl)與白殭菌和黑殭菌混合施用時即具協力效應(Saito, 1984; 蔡等, 1992)。黑殭菌與白殭菌混合低劑量之益達胺(imidacloprid)對根象鼻蟲(*Diaprepes abbreviatus*)亦有協力效應(Quintela & McCoy, 1997)。但部分化學殺蟲劑對蟲生病原真菌有直接抑制作用或拮抗作用(Anderson & Roberts, 1983; Tsai *et al.*, 1992; Lin *et al.*, 1998; James & Elzen, 2001)，進行實驗室之影響測試是配合使用前之必要工作。除了化學殺蟲劑外，蟲生病原真菌與植物抽出物如苦楝之混合，在未來值得進一步的探討。

雖然在田間採集到的昆蟲發現有不同病原的混合感染，但蟲生病原真菌與其他病原如細菌、病毒或線蟲混合以防治害蟲的研究報告則不多。在法國，將球孢白殭菌同時或連續與日本金龜子芽孢桿菌五月鰓角金龜子變種(*Bacillus popilliae melolontha*)，或五月鰓角金龜子豆病毒(*Entomopoxvirus melolonthae*)感染西方五月鰓角金龜，其結果差異大。蟲生病原線蟲嗜菌異小桿線蟲(*Heterorhabditis bacteriophora*)混合白殭菌對甜菜夜蛾(*S. exigua*)之幼蟲有較佳之防治效果，但與小卷蛾線蟲(*Steinernema carpocapsae*)混合則有競

爭關係(Barbercheck & Kaya, 1991)。又，不同種類的蟲生病原真菌的混合或同一種蟲生病原真菌不同品系的混合的防治效果則值得更一步的探討。

### 利用罹病蟲隻將蟲生病原真菌引入害蟲棲群的策略

針對遷移性害蟲在特定區域施用蟲生病原真菌，因健康或得病蟲體之移進移出，均有助於病原之散佈，利用釋放得病蟲體已經開發出不少的策略，可將蟲生病原真菌引入不同棲所的不同害蟲棲群中。有些害蟲生長在作物上難以處理的部位，致使病原淹沒式的應用遭致困難。引入蟲生病原真菌最簡便的方法是釋放經真菌感染後的標的害蟲。Wilding 等(1990)在英國冬季小麥上，以受到新蚜蟲疫霉(*Erynia neoaphidis*)感染後的乾燥蚜蟲施用來防治蚜蟲，但未成功。藉由釋放接種且攜帶球孢白殭菌之西方五月鰓角金龜雌蟲，可污染產卵及幼蟲生長處，提高西方五月鰓角金龜之罹病死亡率(Keller *et al.*, 1997)。另外一個例子是釋放在實驗室內經蠅霉(*Entomophthora muscae*)感染之家蠅，用於乳牛場來誘發家蠅(*Musca domestica*)的流行疫病，雖然有高的感染率但家蠅的棲群並沒有明顯的減少，而且釋放蟲隻之發病及後續產孢會受環境因子影響(Geden *et al.*, 1993)。

### 蟲生真菌在寄主植物具定殖存活能力

利用白殭菌來防治歐洲玉米螟(*Ostrinia nubilalis*)有種特別的策略，就是在玉米輪生葉期以粒劑之劑型，將真菌做葉面施用。由於能感染鑽孔的幼蟲，使真菌能在玉米植物內定殖，在植株內移動和持續，得以在生長季節內壓制本害蟲(Bing & Lewis, 1991; Cherry *et al.*, 2004)。

### 費洛蒙之配合

將蟲生病原真菌與費洛蒙陷阱或其他種類的陷阱或誘餌結合，可將真菌引入一害蟲之棲群中去，或可直接作為防治，皆為有效的策略。利用根蟲瘟霉和性費洛蒙陷阱結合來誘引雄性小菜蛾(*Plutella xylostella*)成蟲的試驗結果，顯示受到污染的成蟲能夠將真菌攜帶至具有感受性的幼蟲去，如此可引發或強化流行疫病(Pell *et al.*, 1993)。利用忽布疣額蚜(*Phorodon humuli*)之性費洛蒙與蠟蚧輪枝菌配合，發現有助於蠟蚧輪枝菌在田間之散佈(Hartfield *et al.*, 2001)。Yasuda(1999)也利用甘藷蟻象(*Cylas formicarius*)性費洛蒙和誘蟲器開發出白殭菌之自動感染系統。雄性家蠅仍被蠅霉感染死亡之雌蟲所誘引(Zurek *et al.*, 2002)，這對蠅霉的傳播將更有利。此外，將黑殭菌置於透明之塑膠瓶，亦有助於誘引舌蠅(*Glossina fuscipes fuscipes*)並使之得病死亡(Maniania 2001)。在 Azores 地區將黑殭菌和性費洛蒙陷阱結合來防治日本金龜子(*Popillia japonica*)。EcoScience 開發另一種陷阱與黑殭菌結合，稱之 Bio-Path 蟑螂防治屋。在美國利用麥麩作為攜帶劑和誘引劑，結合白殭菌用來防治蝗蟲之棲群，在田間已證實成功(Zimmermann, 1994)。另有利用亞洲天牛(*Anoplophora glabripennis*)產卵特性，發展出球孢白殭菌配合網罩以提高感染率之方式(Dubois *et al.*, 2004)。

### 天敵及有益昆蟲之配合施用

重要蟲生病原微生物大多以被動式的散佈方式來傳播接種源，主動式的散佈中僅發生在線蟲及少數蟲生真菌上，如，團孢霉屬(*Massospora*)之蟲生真菌可藉由分生孢子柄產生之力量釋放分生孢子飛越樹層(Steinkraus *et al.*, 1996)。蟲生真菌除了依靠自然力量來傳播外，動物之攜帶也有幫助傳播之功能，特別是寄主害蟲之天敵。Roy 等人(1997)

發現將捕食性之七星瓢蟲(*Coccinella septempunctata*)成蟲餵食在葉面上有被新蚜蟲癘霉感染死亡且產孢之蟲屍時，瓢蟲可將新蚜蟲癘霉之孢子攜帶到他處(無蚜蟲被感染之地方)，即使只有一隻蟲屍，瓢蟲仍舊會攜帶孢子。從這個結果看來，當田間產生之新蚜蟲癘霉接種源密度不足以利用空氣或水來有效傳播時，瓢蟲之傳播可能是對該菌之散佈貢獻最大。雖然未查到寄生性天敵直接攜帶蟲生真菌孢子的例子，但Akalach等人(1992)認為昆蟲能因產卵而幫忙傳播植物病原，沒有道理不會傳播蟲生真菌，他們並指出產卵器在產卵過程中會有機械傳播的情形。Roy等人(1998)在另一實驗中發現一有趣的情形，即當有捕食性瓢蟲存在時，豌豆蚜(*Acyrtosiphon pisum*)之移動速度會加快，如葉面上有新蚜蟲癘霉感染死亡之蟲屍，蚜蟲之移動加快將會提高接觸及感染機會，所以天敵的存在將有助於新蚜蟲癘霉之散佈。這種因天敵的存在而使寄主昆蟲移動速度加快，進而提高與蟲生真菌接觸感染的情形，不單發生在捕食性天敵，寄生性天敵也有相似的例子，前述蟲生真菌新蚜蟲癘霉之散佈能力也會因寄生天敵縊管蚜繭蜂(*Aphidius rhopalosiphii*)存在而提升。在實驗室中發現另一個例子，即當寄生性天敵彎尾姬蜂(*Diadegma semiclausum*)存在時，可明顯促進小菜蛾幼蟲的移動，進而有助於根蟲瘟霉之散佈。但另一種寄生性天敵小菜蛾小繭蜂(*Cotesia plutellae*)存在時所能發揮的作用就明顯不如彎尾姬蜂(Furlong & Pell, 1996)，顯示這種因天敵存在而提高蟲生真菌傳播能力的情形，會因天敵種類不同而有所差異，間接指出這種效應在田間是難以預期的。

除了天敵的協助外，花媒昆蟲存在也有利於蟲生真菌散佈的例子。Butt等人(1998)在油菜開花季節，改裝蜂箱出入口成孢子分注器，利用蜜蜂來散佈黑殭菌孢子，發現可使為害油菜心芽及花器之花粉甲蟲(*Meligethes aeneus*)死亡率增加。此外，害蟲本身移動能力與蟲生真菌在田間之傳播也有關聯，桃蚜及馬鈴薯長管蚜快速之移動特性，就被認為有利於蠟蚧輪枝菌蟲屍上長出之孢子的傳播作用(Fournier & Brodeur, 2000)。因此，移動性較差之菊小長管蚜及棉蚜被認為較難以此菌防治(Hall, 1981)。

### 農業操作之配合

農業操作習慣對田間既存蟲生病原真菌之發病有相當的影響，Sprenkel等(1979)發現大豆因種植時間之不同，產量會有差異，就其原因，與田間夜蛾科害蟲被綠殭菌寄生率有關，此現象推測與氣候條件之變化有關。單就夜蛾科害蟲被綠殭菌寄生率而言，密植之栽培方式也有促進作用。高濕度條件是蟲生病原真菌之孢子發芽是必要的，對後續蟲屍之產孢及病原傳播也有影響。相對濕度也被證實會影響產孢和自然傳播能力，在100%相對濕度又有游離水存在時，蠟蚧輪枝菌的傳播能力最強，無游離水存在時，即使維持100%相對濕度，其傳播能力明顯降低25%左右(Milner & Lutton, 1986)。除了直接加水提高濕度外，利用黑色塑膠布也可使田間維持較高濕度，Hall(1981)即曾有以此操作提高蠟蚧輪枝菌對害蟲感病率之經驗。栽培適合品種也有助於蟲生病原真菌之發生，白殭菌在萵苣之存活能力較芹菜為佳(Kouassi *et al.*, 2003)，*Heliothis* spp.在Delta Pine 216這種棉花品種上樹蔭遮蓋(closed canopy)被綠殭菌感染比率明顯高於Louisiana Okra Leaf品種無樹蔭遮蓋(opened canopy)(Burleigh, 1975)。在Delta Pine 216和Louisiana Okra Leaf的例子中，綠殭菌之發病率顯然是受作物之農藝特性所影響。除了農藝特性可以配合蟲生真菌防治蟲害之實例外，另有抗、耐蟲品種與蟲生真菌配合使用之嘗試也曾被提及。雖然白

殭菌在對鋸胸粉扁蟲(*Oryzaephilus surinamensis*)具不同抗、耐作用之兩燕麥品種Paul和Don(延遲鋸胸粉扁蟲之生長發育時間)上，對鋸胸粉扁蟲之致病率無顯著差異(Throne & Lord, 2004)，但較長的害蟲發育時間，理論上有助蟲生真菌之侵染，此方面的研究成果值得期待。

### 結語

大多數之蟲生病原真菌屬不完全菌，簡單的生活史和較廣的寄主範圍，具開發成真菌殺蟲劑協助防治重要蟲害之潛力。不過Prior等(1988)在1988年時有著悲觀的看法，認為市場不足以引起投資者之興趣，未來的發展端賴政府的政策。但從近年來環保意識高漲，加上安全、健康、優質之綠色農業政策推動下，顯然Prior等當時之評估有誤。蟲生病原真菌在田間的應用牽涉一系列與環境和其他生物因子複雜的交互作用，要確保其田間效果，必需採用正確的防治策略。在過去一百年間長期或短期的防治害蟲的策略，已經被開發出來了。有些成效斐然，有的頗有希望，但也有的失敗。然而不論如何，要開發成功的防治策略，其先決條件仍在於對標的害蟲、真菌病原、製劑、如何施用等等要有深刻的瞭解，始克有功。與化學殺蟲劑相比，蟲生病原真菌是一種安全、有效的防治劑，未來將在蟲害防治工作上扮演重要角色，任何有效的蟲害防治策略值得嘗試，或進一步去開發。

### 參考文獻

- Akalach, M., E. Fernandez-Garcia, and D. Moore. 1992. Interaction between *Rastrococcus invadens* (Hom.:Pseudococcodae) and two natural enemies. *Entomophaga*. 37, 99-106.
- Anderson, T. E., and D.W. Roberts. 1983. Compatibility of *Beauveria bassiana* isolates with insecticide formulations used in Colorado potato beetle (Coleoptera:Chrysomelidae) control [*Leptinotarsa decemlineata*]. *J. Econ. Entomol.* 76, 1437-1441.
- Barbercheck, M. E., and H. K. Kaya. 1991. Competitive interaction between entomopathogenic nematodes and *Beauveria bassiana* (Deuteromycotina: Hyphomycetes) in soilborne larvae of *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae). *Environ. Entomol.* 20, 707-712.
- Bateman, R. P., M. Carey, D. Moore, and C. Prior. 1993. The enhanced infectivity of *Metarhizium flavoviride* in oil formulations to desert locusts at low humidities. *Ann. Appl. Biol.* 122, 145-152.
- Benz, G. 1971. Synergism of microorganisms and chemical insecticides, pp. 327-355. In Burges, H. D., and N. W. Hussey. [ eds. ], *Microbial Control of Insects and Mites*, Academic press, New York and London.
- Bextine, B. R., and H. G. Thorvilson. 2002. Field application of bait-formulated alginate pellets for biological control of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae). *Environ. Entomol.* 31, 746-752.

- Bing, L. A., and L. C. Lewis. 1991. Suppression of *Ostrinia nubilalis* (Hubner) (Lepidoptera: Pyralidae) by endophytic *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin. *Environ. Entomol.* 20, 1207-1211.
- Bruck, D. J., and L. C. Lewis. 2002. Whorl and pollen-shed stage application of *Beauveria bassiana* for suppression of adult western corn rootworm. *Entomol. Exp. Appl.* 103, 161-169.
- Burleigh, J. G. 1975. Comparison of *Heliothis* spp. larvae parasitism and *Spicaria* infection in closed canopy and open canopy cotton varieties. *Environ. Entomol.* 4, 574-576.
- Butt, T. M., N. L. Carreck, L. Ibrahim, and I. H. Williams. 1998. Honey-bee mediated infection of pollen beetles (*Meligethes aeneus* Fab.) by the insect pathogenic fungus, *Metarhizium anisopliae*. *Biocontrol Sci. Technol.* 8, 533-538.
- Cherry, A. J., A. Banito, D. Djegu, and C. Lomer. 2004. Suppression of the stem-borer *Sesamia calamistis* (Lepidoptera; Noctuidae) in maize following seed dressing, topical application and stem injection with African isolates of *Beauveria bassiana*. *IJPM.* 50, 67-73.
- Devi, K. U., C. H. M. Mohan, J. Padmavathi, and K. Ramesh. 2003. Susceptibility to fungi of cotton boll worms before and after a natural epizootic of the entomopathogenic fungus *Nomuraea rileyi* (Hyphomycetes). *Biocontrol Sci. Technol.* 13, 376-371.
- Dubois, T., A. E. Hajek, H. Jiafu, and Z. Li. 2004. Evaluating the efficiency of entomopathogenic fungi against the Asian longhorned beetle, *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae), by using cages in the field. *Environ. Entomol.* 33, 62-74.
- Fargues, J., O. Reisinger, P. H. Robert, and C. Aubert. 1983. Biodegradation of entomopathogenic hyphomycetes: Influences of clay-coating on *Beauveria bassiana* blastospore survival in soil. *J. Invertebr. Pathol.* 41, 131-142.
- Feng, M G., T. J. Poprawski, and G. G. Khachtourians. 1994. Production, Formulation and application of the fungus for insect control: current status. *Biocontrol Sci. Technol.* 4, 3-34.
- Ferron, P. 1978. Biological control of insect pest by entomogenous fungi. *Ann. Rev. Entomol.* 23, 409-42.
- Filotas, M. J., and A. E. Hajek. 2004. Influence of temperature and moisture on infection of forest tent caterpillars (Lepidoptera: Lasiocampidae) exposed to resting spores of the entomopathogenic fungus *Furia gastropachae* (Zygomycetes: Entomophthorales). *Environ. Entomol.* 33, 1127-1136.
- Fournier, V., and J. Brodeur. 2000. Dose-response susceptibility of pest aphids (Homoptera: Aphididae) and their control on hydroponically grown lettuce with the Entomopathogenic fungus *Verticillium lecanii*, azadirachtin, and insecticidal soap. *Environ. Entomol.* 29, 568-578.
- Furlong, M. J., and J. K. Pell. 1996. Interaction between the fungal entomopathogen *Zoophthora radicans* Brefeld (Entomophthorales) and two hymenopteran parasitoids

- attacking diamondback moth, *Plutella xylostella* L. J. Invertebr. Pathol. 68, 15-21.
- Fuxa, J. R. 1987. Ecological considerations for the use of entomopathogens in IPM. Ann. Rev. Entomol. 32, 225-251.
- Fuxa, J. R., and A. R. Richter. 2004. Effects of soil moisture and composition and fungal isolate on prevalence of *Beauveria bassiana* in laboratory colonies of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae). Environ. Entomol. 33, 975-981.
- Geden, C. J., D. C. Steinkraus, and D. A. Rutz. 1993. Evaluation of two methods for release of *Entomophthora muscae* (Entomophthorales: Entomophthoraceae) to infect house flies (Diptera: Muscidae) on dairy farms. Environ. Entomol. 22, 1201-1208.
- Groden, E., and J. L. Lockwood. 1991. Effects of soil fungistasis on *Beauveria bassiana* and its relationship to disease incidence in the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*, in Michigan and Rhode Island soils. J. Invertebr. Pathol. 57, 7-16.
- Hall, R. A. 1981. The fungus *Verticillium lecanii* as a microbial insecticide against aphids and scales. In "Microbial Control of Pest and Plant Diseases" (H. D. Burges, Ed.), pp. 483-498. Academic press, London.
- Hartfield, C. M., C. A. M. Campbell, J. Hardie, J. A. Pickett, and L. J. Wadhams. 2001. Pheromone traps for the dissemination of an entomopathogen by damson-hop aphid *Phorodon humuli*. Biocontrol Sci. Technol. 11, 401-410.
- Hazzard, R. V., B. B. Schultz, E. Groden, E. D. Ngollo, and E. Seidlecki. 2003. Evaluation of oils and microbial pathogens for control of lepidopteran pests of sweet corn in New England. J. Econ. Entomol. 96, 1653-1661.
- Inglis, G. D., D. L. Johnson, and M. S. Goettel. 1996. Effects of bait substrate and formulation on infection of grasshopper nymphs by *Beauveria bassiana*. Biocontrol Sci. Technol. 6, 35-50.
- Keller, S., P. Kessler, D. B. Jensen, and C. Schweizer. 2002. How many *Beauveria brongniartii* spores of are needed to control *Melolontha melolontha*. IOBC/wprs Bull. 23, 59-64.
- Keller, S., C. Schweizer, E. Keller, and H. Brenner. 1997. Control of white grubs (*Melolontha melolontha* L.) by treating adults with the fungus *Beauveria brongniartii*. Biocontrol Sci. Technol. 7, 105-116.
- Kessler, P., H. Matzke, and S. Keller. 2003. The effect of application time and soil factors on the occurrence of *Beauveria brongniartii* applied as a biological control agent in soil. J. Invertebr. Pathol. 84, 15-23.
- Krueger, S. R., M. G. Villani, A. S. Martins, and D. W. Roberts. 1992. Efficacy of soil applications of (Metsch.) Sorokin conidia and standard and lyophilized mycelial particles against scarab gruba. J. Invertebr. Pathol. 59, 54-60.
- Kouassi, M., D. Coderre, and S. I. Todorova. 2003. Effect of plant type on the persistence of *Beauveria bassiana*. Biocontrol Sci. Technol. 13, 415-427.

- James, R. R., and Elzen, W. G. 2001. Antagonism between *Beauveria bassiana* and imidacloprid when combined for *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) control. *J. Econ. Entomol.* 94, 357-361.
- Lacey, L. A., R. Frutos, H. K. Kaya, and P. Vail. 2001. Insect pathogens as biological control agents: Do they have a future? *Biol. Control.* 21, 230-248.
- Lin, C. H., W. F. Hsiao, and R. F. Hou. 1998. Effects of fungicides and insecticides *in vitro* on the vegetative growth and sporulation of the entomopathogenic fungus, *Verticillium lecanii*. VII th International Colloquium on Invertebrate Pathology and Microbial Control. Sapporo, Aug. 23-28. 1998. P. 29.
- Lomer, C. J., R. P. Bateman, D. L. Johnson, J. Langewald, and M. Thomas. 2001. Biological control of locusts and grasshoppers. *Annu. Rev. Entomol.* 46, 667-702.
- Lomer, C. J., R. P. Bateman, I. Godonou, D. Kpindou, P. A. Shah, A. Paraiso, and C. Prior. 1993. Field infection of *Zonocerus variegates* following application of an oil-based formulation of *Metarhizium flavoviride* conidia. *Biocontrol Sci. Technol.* 3, 337-346.
- Maniania, N. K. 2001. A low-cost contamination device for infecting adult tsetse flies, *Glossina* spp., with the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* in the field. *Biocontrol Sci. Technol.* 12, 59-66.
- Milner, R. J., and G. G. Lutton. 1986. Dependence of *Verticillium lecanii* (Fungi: Hyphomycetes) on high humidity for infection and sporulation using *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae) as host. *Environ. entomol.* 15, 380-382.
- Nankinga, C. M., and D. Moore. 2000. Reduction of banana weevil populations using different formulation of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana*. *Biocontrol Sci. Technol.* 10, 645-657.
- Pell, J. K., E. D. M. Macaulay, and N. Wilding. 1993. A pheromone trap for dispersal of the pathogen *Zoophthora radicans* Brefeld. (Zygomycetes: Entomophthorales) amongst populations of the diamondback moth, *Plutella xylostella* L. (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Biocontrol Sci. Technol.* 3, 315-320.
- Pereira, R. M., S. B. Alves, and J. L. Stimac. 1993. Growth of *Beauveria bassiana* in fire ant nest soil with amendments. *J. Invertebr. Pathol.* 62, 9-14.
- Pereira, R. M., and D. W. Roberts. 1990. Dry mycelium preparations of entomopathogenic fungi, *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana*. *J. Invertebr. Pathol.* 56, 39-46.
- Pereira, R. M., and D. W. Roberts. 1991. Alginate and cornstarch mycelial formulations of entomopathogenic fungi, *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae*. *J. Econ. Entomol.* 84, 1657-1661.
- Prior, C., P. Jollands, and G. Le-Patourel. 1988. Infectivity of oil and water formulations of *Beauveria bassiana* (Deuteromycotina: Hyphomycetes) to the cocoa weevil pest *Pantorhytes plutus* (Coleoptera: Curculionidae). *J. Invertebr. Pathol.* 52, 66-72.
- Quintela, E. D., and C. W. McCoy. 1997. Pathogenicity enhancement of *Metarhizium*

- anisopliae* and *Beauveria bassiana* to first instars of *Diaprepes abbreviatus* (Coleoptera: Curculionidae) with sublethal dose of imidacloprid. *Environ. Entomol.* 26, 1173-1182.
- Roy, H. E. 1997. Interactions between aphid predators and the entomopathogenic fungus *Erynia neoaphidis*. PhD Thesis, Nottingham University, Uk.
- Roy, H. E., J. K. Pell, S. J. Clark, and P. G. Alderson. 1998. Implications of predator foraging on aphid pathogen dynamics. *J. Invertebr. Pathol.* 71, 236-247.
- Saito, T. 1984. Effect of pesticides on conidial germination and hyphal growth of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana*. *J. Appl. Zool.* 28:87-89.
- Sharapov, V. M., and T. K. Kalvish. 1984. Effect of soil fungistasis on zoopathogenic fungi. *Mycopathologia* 85, 121-128.
- Sieglauff, D. H., R. M. Pereira, and Capinera. 1998. Microbial control of *Schistocera americana* (Orthoptera: Acrididae) by *Metarhizium flavoviride* (Deuteromycotina): Instar dependent mortality and efficacy of ultra low volume application under greenhouse conditions. *J. Econ. Entomol.* 91, 76-85.
- Sprenkel, R. K., W. M. Brooks, J. W. Van Duyn, and L. L. Deitz. 1979. The effects of three cultural variables on the incidence of *Nomuraea rileyi*, phytophagous Lepidoptera, and their predators on soybeans. *Environ. Entomol.* 8, 334-339.
- Steinkraus, D. C., R. G. Hollingsworth, and G. O. Boys. 1996. Aerial spores of *Neozygites fresenii* (Entomophthorales: Neozygitaceae): density, periodicity and potential role in cotton aphid (Homoptera: Aphididae) epizootics. *Environ. Entomol.* 25, 48-57.
- Steinkraus, D. C., R. G. Hollingsworth, and P. H. Slaymaker. 1995. Prevalence of *Neozygites fresenii* (Entomophthorales: Neozygitaceae) on cotton aphids (Homoptera: Aphididae) in Arkansas cotton. *Environ. Entomol.* 24, 465-474.
- Studdert, J. P., and H. K. Kaya. 1990. Water potential, temperature, and clay-coating of *Beauveria bassiana* conidia: effect on *Spodoptera exigua* pupal mortality in two soil types. *SO: J. Invertebr. Pathol.* 56, 327-336.
- Studdert, J. P., H. K. Kaya, and J. M. Duniway. 1990. Effect of water potential, temperature, and clay-coating on survival of conidia in a loam and peat soil. *J. Invertebr. Pathol.* 55, 417-427.
- Throne, J. E., and J. C. Lord. 2004. Control of sawtoothed grain beetles (Coleoptera: Silvanidae) in stored oats by using an entomopathogenic fungus in conjunction with seed resistance. *J. Econ. Entomol.* 97, 1765-1771.
- Tsai, Y. S. 2004. Factors affecting application of *Verticillium lecanii* for insect control. Dissertation, National Taiwan University. 145pp.
- Tsai, S., Y. S. S. Kao, C. W. Kao, and R. F. Hou. 1992. Effect of insecticide on the virulence of the green muscardine fungus, *Metarhizium anisopliae* var. *anisopliae*, against the beet armyworm, *Spodoptera exigua*. *Plant Protection Bulletin* 34:216-226.
- Wilding, N., S. K. Mardell, P. J. Brobyn, S. D. Wratten, and J. Lomas. 1990. The effect of

- introducing the aphid-pathogenic fungus *Erynia neoaphidis* into populations of cereal aphids. *Ann. Appl. Biol.* 17, 683-691.
- Wilson, K., S. C. Cotter, A. F. Reeson, and J. K. Pell. 2001. Melanism and disease resistance in insects. *Ecology Letters* 4, 637-649.
- Wraight, J. E. 1993. Control of the boll weevil (Coleoptera:Curculionidae) with Naturalis-L: A mycoinsecticide. *J. Econ. Entomol.* 86, 1355-1358.
- Wraight, S. P., and R. I. Carruthers. 1999. Production, delivery, and use of mycoinsecticides for control of insect pests on field crops. pp.233-269. In: Hall, F. R. and J. J. Menn. [eds.], *Methods in Biotechnology*, vol. 5: Biopesticides: Use and Delivery. Humana Press Inc., Totowa, New Jersey.
- Yasuda, K. 1999. Auto-infection system for the sweet potato weevil, *Cylas formicarius* (Fabricius) (Coleoptera: Curculionidae) with entomopathogenic fungi, *Beauveria bassiana* using a modified a sex pheromone trap in the field. *Appl. Entomol. Zool.* 34, 501-505.
- Zimmermann, G. 1994. Strategies for the utilization of entomopathogenic fungi. VI th International Colloquium on Invertebrate Pathology and Microbial Control.Montpellier, France 28 August – 2 September, 1994. P. 67-73.
- Zurek, L., D. W. Watson, S. B. Krasnoff, and C. Schal. 2002. Effect of the entomopathogenic fungus, *Entomophthora muscae* (Zygomycetes: Entomophthoraceae), on sex pheromone and other cuticular hydrocarbons of the house fly, *Musca domestica*. *J. Invertebr. Pathol.* 80, 171-176.

# Strategies for the utilization of entomopathogenic fungi for insect pest control

Yung-Sheng Tsai and Suey-Sheng Kao

Biopesticide Department, Taiwan Agricultural Chemicals and Toxic Substances Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan, 11, Kuang-Ming Road, Wufeng, Taichung Hsien, Taiwan

## Abstract

Entomopathogenic fungi are one of the most important entomopathogens. Insects are infected by asexual or sexual propagules of Entomopathogenic fungi that attach to the host and penetrate the host cuticle. Like other natural enemies, many strategies for the use of entomopathogenic fungi including importation, conservation, inoculative release and inundative release can be considered. In general, the cases of natural epizootics caused by entomopathogenic fungi are rare. There are a few examples resulting from *Nomuraea rileyi*, most of natural epizootics belonging to *Entomophthora*. Many strategies and approaches have been developed for enhancing the control efficacy of entomopathogenic fungi. In this paper, many novel and useful strategies for the utilization of entomopathogenic fungi in microbial control are reviewed. We hope it will be helpful to use entomopathogenic fungi for insect pests control.

Key words: entomopathogenic fungi, inundative release, oil formulation, pheromone