近年來國內植物寄生性線蟲之發生與防治

蔡東纂
國立中興大學植物病理系
聯絡作者，電子郵件信箱：Tttsay@nchu.edu.tw

摘　　要

統計自 1913 年澤田兼吉先生針對台灣植物寄生性線蟲首報至今 86 年間，以目前的分類系統，台灣共有 28 屬 62 種被披露。其中小麥腫瘿線蟲（*Anguina* spp.）及莖線蟲（*Ditylenchus* spp.）描述不明。大豆包囊線蟲（*Heterodora glycines*）經二十多年的調查未曾發現，疑為報告有誤，但已列國際文獻中。台灣作物線蟲病害主要為根瘤線蟲，已知有 *Meloidogyne arenaria, M. graminicola, M. hapla, M. incognita, M. incognita acrita* 及 *M. javanica*，前三種為近 20 年來引入者。松材線蟲（*Bursaphelenchus xylophilus*）自 1985 年於台北縣發現迄今，又鑑定出 *B. mucronatus* 及 *B. thailandae* 兩種，罹病樹種更擴及原本判定為抗病品種之台灣二葉松及馬尾松。葉芽線蟲（*Aphelenchoides besseyi*）也由危害水稻、草莓，進而至山蘇及秋石斛兩者葉片；爾來水草、蘭科植物及松樹也有不明種類寄生。植物寄生性線蟲之防治於專業區，如大湖草莓實施玉米、水稻或芋頭輪作，皆有助於降低草莓根系主要病原線蟲 *Meloidogyne incognita, M. hapla, Pratylenchus coffeae* 及 *P. penetrans*。以鏈黴菌 *Streptomyces saraceticus* 之生物製劑 LTM 防治番石榴根瘤線蟲，和農藥 DCIP 之效果相近。

關鍵詞：植物寄生性線蟲、根瘤線蟲、松材線蟲

台灣記錄之植物寄生性線蟲種類

台灣植物寄生性線蟲攸關報導始於1913年澤田氏對寄生於柑桔根部線蟲之描述[10]，隨後於1924年列舉41科115種根瘤線蟲寄主[11]。1970到1971年間，黃氏等人[5]全面調查本省雜糧、特用作物、蔬菜、果樹、花卉、樹木及其他共140種植物，統計有27屬之植物寄生性線蟲存在於農地中。本省作物線蟲病害調查報告多集中於60年代，蔡氏[9]以作物別整理出19屬47種線蟲，然以目前的分類系統，台灣共有28屬62種線蟲(表一)。

表一、台灣植物寄生性線蟲種類統計

年代	屬	種	作者
1971	27		黃炤雄等
1971	19	47	蔡雲鵬
1982	15	29	林奕耀
1997	30	38	蔡東纂
2010	28	62	蔡東纂

其中 *Radopholus* spp.為洪氏[3]得自香蕉根系，有三種之多，然非 *R. similis*。洪氏[25]尚於 1958 年報導屏東地區大豆田有大豆包囊線蟲(*Heterodera glycines*)存在，筆者數度前往調查，仍未有所獲。台灣作物線蟲病害主要為根瘤線蟲，已知有 *Meloidogyne arenaria, M. graminicola*(圖五、六)*, M. hapla, M. incognita, M. incognita acrita* 及 *M. javanica*，前三種為近20年來引入者。其中，過去未曾發現之北方根瘤線蟲(*Meloidogyne hapla*)出現在苗栗大湖草莓園，王氏[1]推測其引入可能於1975至1976年間隨草莓苗自美國或日本攜進。上述台灣歷年來植物寄生性線蟲收編於表二。台灣松樹萎凋病(pine wilt disease)於1985年首先在臺北縣石門、金山一帶發現，到1988的三年間，病害在台灣北部地區迅速蔓延，陸續在三峽、桃園等15個地區發現[14, 48]，且近期報導指出在金門[13]、惠蓀林場、德基水庫[47, 51]、東勢及雪霸國家公園發現萎凋病[50]，且罹病松樹上可分離出松材線蟲 *Bursaphelenchus*

xylophilus。此外，報告中亦指出，自苗栗南庄地區感染松樹萎凋病之琉球松分離出 *B. thailandae*，自新竹峨眉、勝興車站與武陵農場等地之台灣二葉松亦分離出 *B. mucronatus* [16]。爾來水草、天南星科、蘭科植物及松樹也有不明種類寄生(圖一~四、圖七、圖八)。

表二、台灣之植物寄生性線蟲

Nematode	Common name	Major hosts
Anguina spp.	Seed and leaf gall N.	Unknown
Aphelenchoides besseyi	Foliar or leaf N.	Rice, strawberry
A. spp.		Orchid
A. composticola		Mushroom
A. fragariae		Aquatic plants
Aphelenchus avenae		Mushroom
Bursaphelenchus xylophilus	Pine wood N.	Pine
B. mucronatus		Pine
B. thailandae		Pine
Criconemoides citri	Ring N.	Citrus
C. rusticum		Sugarcane
Ditylenchus myceliophagus		Mushroom
Ditylenchus spp.		Loquat, Longan
Dorylaimus spp.		many crops
Gracilacus spp.		Pear, Bamboo
G. aculenta		
G. bilimemta		
Helicotylenchus brevicaudatus		
H. crenacauda	Spiral N.	Rice
H. dihystera		Tea
H. erythrinae		Tea
Hemicriconemoides californianus		
H. kanayaensis	Shearh N.	Tea
H. parasinensis		
Hemicycliophora spp.	Sheath N.	Sugarcane
Heterodera glycines	Cyst N.	Soybean
Hirschmanniella oryzae	Rice root N.	Rice
H. mucronata		

表二、台灣之植物寄生性線蟲(續)

Nematode	Common name	Major hosts
Hoplolaimus spp.	Lance N.	many crops
H. columbus.		
Longidorella spp.		Longan
Longidorus spp.	Needle N.	many crops
Meloidogyne arenaria	Peanut root-knot N.	Peanut
M. graminicola		Rice, Garlic
M. hapla	Northern root-knot N.	Strawberry
M. incognita	Southern root-knot N.	many crops
M. incognita acrita		Tomato
M. javanica	Javanese root knot N.	many crops
Paraphelenchus myceliophthorus		Mushroom
Para. lepidus		
Para. minutus		
Paratylenchus spp.	Pin N.	Tea
Pratylenchus brachurus	Lesion or meadow N.	Banana
P. coffeae		Citrus
P. loosi		Tea
P. penetrans		Banana, Strawberry
P. pratensis		Citrus, Sugarcane
P. zeae		
Pratylenchoides spp.		Corn, Citrus, Bamboo
Rotylenchulus reniformis	Reniformis N.	Vegetables, Banana
R. brachyurus	Spiral N.	Peanut
R. buxophilus		Sugarcane
R. multicinctus		Citrus
R. robustus		Sugarcane
Scutellonema spp.	Spiral N.	Gladiolus
S. brachyurum		
Trichodorus christiei	Stubby root N.	Sugarcane
T. truncatum		
Trophurus spp.		Sweet potato, Corn
Tylenchorhynchus annulatus		
T. cylindricus		
T. leviterminalis		

表二、台灣之植物寄生性線蟲(續)

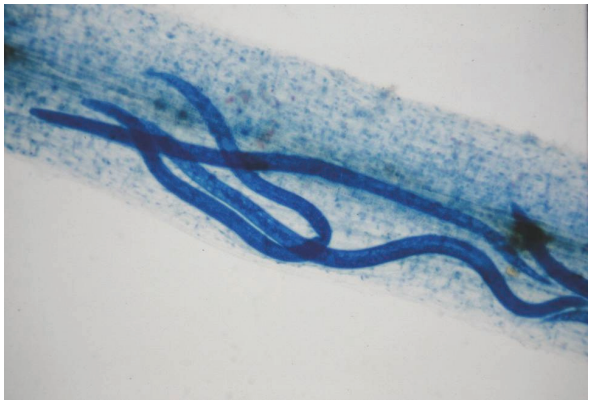
Nematode	Common name	Major hosts
T. martini	Stunt or Stylet N.	Rice, Seedlings
T. nudus		Sugarcane
T. zeae		
Tylenchulus semipenetrans	Citrus N.	Citrus, Grape
Tylenchulus spp.		many crops
Xiphinema americanum	Dagger N.	
X. brevicollum		
X. diffusum		
X. elongatum		
X. hunaniense		
X. lncognitum		
X. lnsigne		
X. oxycaudatum		
X. radicola		



圖一、植物寄生性線蟲於天南星科寄主根系產生之紅褐色病徵。



圖二、植物寄生性線蟲線蟲於天南星科寄主根系產生之紅褐色病徵。



圖三、天南星科之罹病根系經染色後可見植物寄生性線蟲。



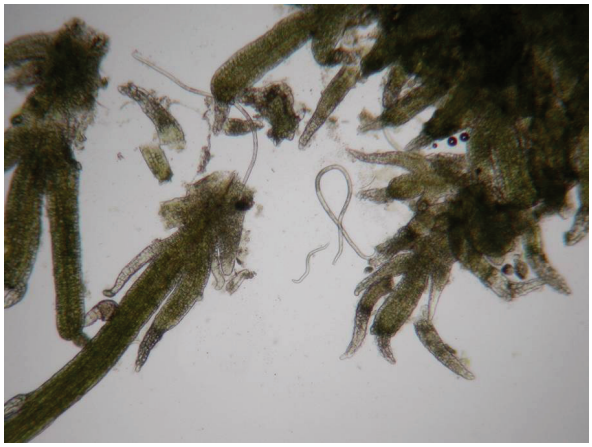
圖四、根瘤線蟲於天南星科植物造成根系之腫大。



圖五、根瘤線蟲造成水稻幼苗發育不良。



圖六、水稻根系感染根瘤線蟲後結瘤纍纍。



圖七、葉芽線蟲寄生於南極杉頂芽分生組織。



圖八、南極杉頂芽分生組織染色後可見葉芽線蟲纏聚成球狀。

台灣作物線蟲病害防治對策

就作物病蟲害的防治觀點而言，可分為除滅(kill)及管理(management)兩種方式[22]。「除滅」意味著以化學藥劑於短期內達到降低病蟲族群密度至顯著程度。相反的，「管理」之作為係以特定之策略於一段時期後降低病蟲族群密度至為害作物水平之下。病原線蟲之引進，除了灌溉水、土壤(培土)及農機具等引進方式外，最主要的因素是種苗攜帶；而在土壤條件適宜、寄主感受性高之情形下得以發展其族群，在耕地中維持足以為害作物之程度。因此，在克服線蟲病害之因果對策上，須在斷絕外因(栽培健康種苗)、

種剋果之因(選植抗線蟲作物品種或砧木)及消除惡果(以除滅或管理方式降低土壤中線蟲密度)等方面著手，茲分述如下：

一、栽培健康種苗

農友習慣於耕地上自行育苗，近年來花卉及蔬菜種苗雖多購自種苗商；然植前之馴化期則照常在耕地上進行，以致在給水後穴盤底部之苗株根系感染來自耕地中之病原線蟲。解決之道即以塑膠布鋪地，隔絕線蟲感染源，或採高架馴化方法。果樹苗木來源不定，農友亦多以零星原地補植方法淘汰罹線蟲病衰弱株，除非施用殺線蟲藥劑加以保護，否則新株遭線蟲感染是必然的。球根作物或以側芽繁殖之作物，如球根花卉、山葵、薑、馬鈴薯及山藥等，植前病原線蟲檢疫是降低病害風險之重要事項[8]。球根植前浸泡殺線蟲劑之處理以罹南方根瘤線蟲之大岩桐種球為例，浸泡歐殺滅、滅線蟲及芬滅松一小時後，可降低線蟲感染率 73.6%、61.1%及 68.6%[7]，仍未臻完善。

二、選植抗線蟲作物品種或砧木

栽植抗線蟲作物品種(nematode resistant cultivars)是降低線蟲密度，減少施藥成本，縮短輪作期間及避免殺線蟲劑殘毒之慮的最佳方法[18]。問題是，抗性品種之產物常不合市場需求；或者其抗性對象侷限於屬內少數種線蟲，而無法在田間應用[43]。對寄主廣泛的根瘤線蟲而言，抗性品種亦不多，如蔬菜專業區常見的豆、瓜及茄子之抗性品種分別為 11、5 及 4 種，且其抗性範圍僅二、三種根瘤線蟲而已[21]。但如與經濟品種親和性良好者，可考慮作為砧木材料；茄科作物 *Solanum torvum* 即成功的作為茄子砧木對抗 *M. incognita*、*M. javanica* 及 *M. arenaria*[20]。多年生果樹之線蟲病連作障害以嫁接抗性砧木之新株全面更新或補植即可克服。如本省罹柑桔線蟲(*Tylenchulus semipenetrans*)及根腐線蟲(*Pratylenchus coffeae*)引致衰弱病之柑桔園，可用枳殼(*Poncirus trifoliata*)及其雜交種取代感病性高但普遍被使用之酸桔及廣東檸檬為新株砧木以避免線蟲危害[4]。本省種植之巨峰、黑

后、金香、義大利及奈加拉等葡萄品系皆為南方根瘤線蟲之感受性品系；經篩選全世界常用的 42 個葡萄品系後，其中 Harmony、SO4、5BB Selection Kober、Muscat Bailey A 及 5C Teleki 等為高抗性等級，可作為改善長期罹線蟲病葡萄園之砧木材料(6)。

三、以除滅或管理方式降低土壤中線蟲密度

在許多農作栽培業者心中，「線蟲防治」意味著施用劇毒殺線蟲劑，因而有講究施用方法、時機及安全設備之必要，以保護自身安全及避免農產品農藥殘留。除了使用燻蒸劑、觸殺性及系統性殺線蟲劑外，尚有非農藥線蟲病害管理方法，如植前種苗之物理方法及嚴格檢疫(quarantine)、淹水(flooding)、加熱(heat)、覆土(subsoiling)、使用抗病砧木(rootstock)、農地休閒(fallowing)、實施栽作系統(cropping system)、田間衛生(field sanitory)、阻絕傳播途徑(isolation)、生物防治(biological control)及有機質添加物(organic amendments application)等。上述方法中頗有共通處或異曲同工之妙，如生物防治和有機質添加物之使用即是。此外，綠肥的栽植、土壤混拌及淹水，配合輪作，更是傳統性優良的土地保護性耕作法(conservation tillage)，對短期作物專業區線蟲病管理助益匪淺。

茲以化學防治(chemical control)及非農藥管理(nonchemical management)兩種克服作物線蟲病害方法分述如下：

一、化學防治

台灣農友在作物病蟲害防治上，對化學藥劑存有很強的依賴性，處理線蟲病害自不例外。目前，本省除了禁止使用的 ethylene dibromide(EDB)、1,2-dibromo-3-chloropropane(DBCP)及 aldicarb 之外，尚有 7 種燻蒸劑、12 種非燻蒸劑和 1 種有機物質作為農用線蟲病害防治資材。劑型則有粒劑、乳劑、粉劑、懸浮劑、可濕性粉劑及液劑等。燻蒸劑中之 D-D、1,3-D、EDB 及 DBCP 為純殺線蟲劑(true nematicide)；methyl bromide(MBR)、

chloropicrin(CPI)及 methyl isothiocyanate(MIT)為廣用燻蒸劑(multipurpose fumigant)。非燻蒸劑主要分有機磷劑(organophosphate)、氨基甲酸鹽(carbamate)、醚類(ethyl)及有機質(organic material)等。作用功能為觸殺性(contact action)的僅有普伏松(ethoprop)及滅線蟲(nemamort)兩種，適合短期作和全年採收性作物使用；其餘化學藥劑為系統性(systemic action)。而以有機質登記之蝦蟹殼粉(chitin-protein)，為美國 IGIN 公司出品之 Clandosan 618，具生物防治功能。由於燻蒸劑花費高(dazomet 及 MBR 每甲地八萬元新台幣藥劑費)，且須支付塑膠布及覆蓋費用，使用率甚低。農友較偏愛植後施用之系統性殺線蟲劑；一者施用方便，二者兼具殺蟲、殺蟎作用，唯如施藥時機不當則有殘毒之慮。其實，植物保護手冊推薦之殺線蟲劑施用方式，一年生作物如西瓜、番茄、薑、菸草、鳳梨等於植前穴施或條施；多年生果樹如柑桔及葡萄則於萌芽期環施或條施處理，為兼顧實際安全考量之作法。

二、非化學防治

1. 輪作(crop rotation)

輪作方式長久以來一直是農業上防治線蟲病良好的經營模式[36]。其主要作用不外抑制線蟲族群密度至不為害程度或防止該族群之增加。於針對特定線蟲種類之輪作系統中，感受性作物(susceptible crop)須和弱寄主作物(poor host crop)、非寄主或抗性作物(nonhost or resistant crop)交互種植，使該線蟲於一段時期中無法寄生繁殖，甚至飢餓死亡。如與花生、棉花及大豆輪作，以降低 *Pratylenchus brachyurus* 和 *P. zeae* 族群密度與其對玉米之為害[25]。儘管大豆包囊線蟲(*Heterodera glycines*) 有 16 個生理小種[39]，以抗病品種 Bedford 和玉米來和其他感病品種輪作有助於降低土壤中雌蟲數目[31]。再就熱帶棉花輪作系統而言，土壤中 *Meloidogyne incognita* 數目以和高粱輪作較與大豆輪作田為低，其效果於第三次種植棉花時更為明顯[34]。引用一些熱帶作物如弗州黎豆(velvet bean)、蓖麻(castor)、美國節苔(american jointvetch)及芝麻(seasame)用來輪作以防治根

瘤線蟲病害在美國東南部農地得到良好成果[40]；Mc Sorley 等人[33]更加以應用在北佛羅里達州之蔬菜生產上，有效控制根瘤線蟲(*M. incognita* race 1, *M. arenaria* race 1)族群密度在最低水平，使茄子等作物產量增加。Be`lair[12] 針對北方根瘤線蟲(*M. hapla*)之輪作防治系統之建立，提供完整之模式及程序：他先將 *M. hapla* 的弱寄主或非寄主(菠菜、蘿蔔、大麥、燕麥和小麥)及感受性寄主(高麗菜、芹菜、萵苣、青蒜、孔雀草和馬鈴薯)區分；再就當地主要作物之紅蘿蔔及洋蔥種植時期去搭配種植。將小區試驗結果最好之輪作系統於大規模田間印證，顯示以紅蘿蔔－洋蔥－燕麥－紅蘿蔔之栽種系統可降低 *M. hapla* 之田間族群密度，並增加紅蘿蔔產量 282%。如以傳統的洋蔥－紅蘿蔔輪作系統，則產量損失 50%。

2. 有機質添加(organic amendments application)

早於 1937 年，Linford 氏即發現土壤有機添加物(soil organic amendments)，在分解期間有顯著降低土壤中根瘤線蟲密度之效果[32]。土壤有機添加物之施用，有助於土壤中氮、磷、鉀三要素含量的提昇、土壤中金屬離子交換、鐵、銅、鎂及鋅嵌合態形成、土壤顆粒的結合、土壤透氣性及保水、排水力改良。由於栽作土壤環境較理想，較健康植株相對的比弱勢植株對線蟲的危害更有耐病性(tolerance)[46]。Sayre 認為[44]，施用有機添加物之所以能防治植物寄生性線蟲，其機制不外下列五點：(1)有機添加物之分解物對線蟲有直接毒性；(2)可增加線蟲天敵的種類和數量；(3)改變植物和線蟲的關係；(4)有機添加物在分解過程中產生有燻殺作用的氣體；(5)有機添加物在分解時產生熱度，傷害線蟲。

有機添加物中有些具有線蟲毒化物，並於土壤中釋放出殺線蟲物質(nematicidal principle)，可直接降低線蟲密度。Neem 種子所含 limonoids 已被定為天然殺線蟲劑 azadirachtin。經測試 limonoids 可致根瘤線蟲(*Meloidogyne incognita*)二齡幼蟲死亡，並抑制其卵之孵化[19]。且已明瞭其殺線蟲物質存在於脫脂部分。眾所皆知，孔雀草(marigold)含有毒質 polythienyls，可殺死線蟲[49]。*Hannoa undulate* 及 *H. klaineana* 兩種非洲香料植物中所含三種 polycyclic lactones (chaparrione，klaineanone 及

glaucarubolone)亦有毒殺線蟲作用。我國農友常用作為有機添加物的蓖麻粕(castor pomace)中亦含有蓖麻毒素(ricin)，可降低南方根瘤線蟲行動能力[38]。

此外，在有機添加物於土壤中的分解物對線蟲有害，如 ammonia，nitrites，hydrogen sulphide，多種揮發物質及有機酸，能直接殺死線蟲或間接的妨礙線蟲卵孵化及降低線蟲二齡幼蟲之移動性[35]。其中 ammonia 濃度如於每公斤土壤中超過 30 毫克，將有效防治線蟲[41]。因此，如於土壤中加入尿素 30mg/Kg，經 urease 轉化為 ammonia，也可變成經濟有效的殺線蟲劑。筆者用此方法，以塑膠布覆蓋，對連作田中之根瘤線蟲和外寄生性線蟲之除滅甚有效果[7]；如再以苦土石灰及長效性有機質拌入土中，則對植物發育收效更佳。

作物線蟲病害之管理，除了殺蟲劑之施用外，伴隨使用有機添加物及綠肥，在防治番茄根瘤線蟲病害頗具成效。而以色列的 Spiegel[45]等人更成功的以蝦蟹殼作為有機添加質材防治番茄根瘤線蟲(*Meloidogyne incognita*)、甘藍包囊線蟲(*Heterodera schachtii*)、小麥包囊線蟲(*Heterodera avenae*)及柑桔線蟲(*Tylenchulus semipenetrans*)；其機制乃幾丁質分解性放射線菌(Chitinolytic *Actiomycetes*)數目大增，降低線蟲卵之孵化，從而減輕線蟲之危害。爾來，Westerdahl 等[42]以幾丁質加入尿素作為土壤有機添加材料，有效防治胡桃根腐線蟲(*Pratlenchus vulnus*)及馬鈴薯根瘤線蟲(*M. chitwoodi*)等。

3. 生物防治(biological control)

有許多生物學者熱衷於生物防治植物病蟲害，對研究特定病蟲害天敵之生態及繁殖不餘遺力，但是在田間應用時常忽略了提供天敵良好生存環境，效果大打折扣。有機添加物之混合物即在供給天敵微生物養料，作為生物防治之基礎條件。線蟲天敵於自然界中廣泛存在，如 Virus、Bacteria、Rickettsia、Furbellarians、Nematodes、Enchytraeids、Mites、Collembola、Insects 等。在全世界五百多篇線蟲生物防治報告中，以真菌為材料者佔 76%、其次為獵食性線蟲 7%，細菌和放射線菌佔 5%左右，

餘者在3%以下；上述生物對線蟲取食或寄生的對象不外卵、幼蟲、雌雄成蟲及胞囊[30]。其在線蟲生物防治上之應用型態又分為人海戰術(inundation)、引進(introduction)及天然(nature)防治三者。「人海戰術」及「引進」兩種方式皆須大量生物材料，並得時常添加，且須顧及所使用生物材料之生存能力，因此以使用溫室或移植作物時，作為保護性質為目的者居多。「天然」防治所施用材料多為本土固有種類，較易建立其族群及發揮能力，若能配合適當添加物之使用，當可有利於多年生及連作性作物線蟲病害之克服。作物線蟲病生物防治劑較成功而被商品化的如卵寄生菌 *Paceilomyces lilacinus*，以椰子碎片作為商品配方基質曾在 60 多個國家試驗過，然效果好壞不一[27]。以 *Arthrobotrys irregularis* 製成的 Royal 350 線蟲防治劑，對根瘤線蟲有田間防治效果[26]；Royal 300 則使用於洋菇栽培上防治 *Ditylenchus myceliophagus*[40]。

4. 太陽能土壤消毒(solarization)

就防治策略之土壤植前處理方式而言，淹水或休耕等長時間之作法較不適當；輪作方式則因經濟效益考量，輪作作物選擇不易；殺線蟲劑或燻蒸劑之施用雖收益良好，但有違環保原則之慮。自從 1869 年 CS2 應用於土壤燻蒸以來，chloropicrin (PIC)、methyl bromide (MBR)、1,3-dichloropropene (1,3-D)、ethylene dibromide (EDB)、1,2-dibromo-3-chloropropane (DBCP)及 methyl isothiocyanate(MIT)相繼被廣泛使用於農地之殺蟲滅菌用途。幾年來、DBCP 基於環保理念下被禁，EDB 亦恐有致癌後遺症而停止使用；而使用量最多的 MBR 也將因影響空氣品質將於公元 2000 年全世界禁產禁用[52]。事實上，在劇毒性殺線蟲劑及燻蒸劑逐一被檢討限制使用之際，開發土壤處理技術是刻不容緩之事。Huebner 等人[24]曾報導尿素衍生物而來的氨氣有殺蟲的效用，如配合添加造紙纖維廢料，不但可降低殘留之植物致毒性，並可激發土壤微生物族群及酵素活性。結果顯示，尿素混拌於含水量 30 至 35%土壤中後，在以 0.25mm 透明塑膠布覆蓋，遠比不覆蓋處理者效果為佳。透明塑膠布覆蓋方式(solarization)自 1930 年於夏威夷防治鳳梨 *Heterodera radicola*

(Greef) Muller 以來[23]，已廣泛應用於土壤加熱消毒用途。幾乎所有植物寄生性線蟲可於 44 至 48℃溫度下被殺死[17]，而即使在美國佛羅里達西北部(30.0N.,84.4W)，1992 年之 6 至 7 月間，透明塑膠布覆蓋下 5,15 及 25 公分深之土壤，亦分別達到 49.5、46 及 40.5℃之溫度；對番茄青枯病(bacterial wilt)及 *Meloidogyne* spp. *Paratrichodorus minor*、*Helicotylenchus* spp.、*Rotylenchulus reniformis* 及 *Criconemella* spp.等線蟲具有良好防治效果[15]。於 1993 年 7 至 9 月之田間試驗於同樣土壤深度下，分別測得最高地溫為 60.5℃、52 及 43.5℃。多年來，全世界有關此種太陽能消毒土壤之試驗結果指出，成功的關鍵主要是充裕之日照及高溫地域條件[29]；地處亞熱帶之台灣自當多加利用。筆者等研究結果顯示，以尿素作為土壤植前處理在盆缽試驗效果甚佳，可降低根瘤指數 32.5 及 50%；如以透明塑膠布覆蓋、在 1.0%及 0.1%施用下，分別於第 3 及 6 星期時，即無法檢出根瘤線蟲；即使在不覆蓋情形下，其殺線蟲效果亦比僅覆蓋塑膠布之太陽能處理方式為高。田間試驗結果亦證明施用尿素並覆蓋塑膠布後一星期，土壤中根瘤線蟲密度即明顯下降，於第五星期時已接近於零，和殺線蟲劑 phenamiphos 之處理效果相去不遠[7]。覆蓋透明塑膠布之所以有提高土壤溫度之作用，源自溫室效應(greenhouse effect) [29]；於土壤中拌加尿素，使產生之氨氣有更長時間充留於土壤空隙中，加強除滅線蟲之作用。杜氏等[2]以覆蓋透明塑膠布方式防治番茄白絹病，發現若於土壤中添加苜蓿、太陽麻或玉米莖等有機綠肥者，較未添加者為優；其作用可能和植物莖葉在土中分解時產生氨氣及 butyric acid 對真菌、細菌或線蟲之致毒性攸關[37]。以太陽能配合尿素施用一個月即可大幅降低土壤中植物病原線蟲密度；較其他土壤燻蒸劑使用費用低廉，甚至可取代燻蒸性農藥克服植物病原線蟲病害。

引用文獻

1. 王國強、楊瓊儒、蔡安娜。1977。臺灣 *Meloidogyne hapla* 根瘤線蟲之初次發現。 植保會刊 19(4):311.
2. 杜金池、程永雄、黃杉芃。1991。應用太陽能及有機綠肥對番茄白絹病之防治效果。植保會刊 33:95-102.
3. 洪元平、洪文禮、陳珠惜。1966。台灣香蕉寄生性線蟲種類及其分佈。植保會刊 8:53-58.
4. 張喜寧。1980。抗根腐線蟲及柑桔線蟲柑桔根砧之選拔與測試。中國園藝 26:71-77.
5. 黃炤雄、蔡雲鵬、林奕耀、杜金池、黃修斌。1972。臺灣植物寄生性線蟲。中研院植研所專刊第一號。
6. 蔡東纂、林奕耀。1992。葡萄品系與砧木對南方根瘤線蟲之感受性。植保會刊 34:301-306.
7. 蔡東纂、程永雄、陳弘毅、林奕耀、吳文希。1995。球根花卉線蟲病害之發生及防治。植病會刊 4: 180-192.
8. 蔡東纂。1995。植物病原線蟲檢疫。植病會刊 4:43-59.
9. 蔡雲鵬。1971。台灣之植物寄生性線蟲。臺灣農業 7(3):139-151.
10. 澤田兼吉。1913。柑桔立枯病(預報)。臺灣農事報 7(10):903-914.
11. 澤田兼吉。1924 台灣に於ける根線蟲の寄主植物。臺灣博學學會會報 14 (72):16-24.
12. Be`lair G. 1992. Effects of cropping sequences on population densities of *Meloidogyne hapla* and carrot yield in organic soil. J. Nematol.24:450-456.
13. Chang, R. J., Cheng, T. C., Feng, Y. S., Hsu, K., and Ho, Y. M. 1994. The occurrence of pine wilt disease in Kimen. Taiwan For. Sci. 20 (11): 12-13. (in Chinese)
14. Chang, R. J. and Lu, S. S. 1996. Investigation of the occurrence of pine wilt disease and its naturally infected hosts in the Fushan Botanical Garden. Taiwan J. For. Sci. 11 (2): 201-207. (in Chinese)

15.Chellemi, D. O., Olson, S. M., Scott,J.W., Mitchell, D. J., and McSorley, R. 1993. Reduction of phytoparasitic nematodes on tomato by soil solarization and genotype. Suppl. J. Nematol. 25:800-805.

16. Chen, P., Huang, Y. Y., Tsay, T. T. and Yen, J. H. 2006. Distribution of Pine wilt diseases in Taiwan and the study of its causal nematodes. Plant Pathol. Bull. 15:263-274. (in Chinese)

17. Christie, J. R. 1959. Plant Nematodes, their Bionomics and Control. Jacksonville, FL .The H & WB Drew Co. 362pp.

18. Cook, R., and Evans, K. 1987. Resistance and tolerance. In Principle and Practice of Nematode Control in Crops, eds. R. H. Brown, B., R. Kerry, pp.179-231. Sydney. Academic, 447pp.

19. Devakumar, C., Goswami, D. K., and Mukerjee, S. K. 1985. Nematicidal principles from neem(*Azadirachta indica* A. Juss). Part I. Screening of neem kernel fractions against *Meloidogyne incognita*. Indian Journal. of Nematology 15:121-124.

20. Dunay, M. C., and Dalmasso, A. 1985. Multiplication de *Meloidogyne javanica, Meloidogyne incognita,* et *M. arenaria* surdivers Solanum Revue de Ne`matologic 8:312-334.

21. Fassuliotis, G. 1979 .Plant breeding for root-knot nematode resistance. In: Root-knot nematodes(*Meloidogyne* species), eds. Lamberti, F., and Taylor, C. E. Systematics, Biology and Control. London, Academic Press, pp.425-453.

22. Gove, P. B. (ed.), 1981. Webster Third New International Dictionary .Merriam Webster, Inc., Springfield, MA.

23. Hagan, H. R. 1993. Hawaii pineapple field soil temperatures in relation to the nematode *Heterodera radicola*(Greef) Muller. Soil Sci. 36:83-95.

24. Huebner, R. A., Rodriguez-Kabana, R., and Patterson, R. M. 1983. Hemicellulosic waste and urea for contol of plant parasitic nematodes: Effect on soil enzyme activities. Nematropica 13:37-54.

25. Hung, Y. 1958. A preliminary repery on the plant-parasitic nematodes of soybean crop of Pingtung District. Taiwan, China, Agric. Pest news 5:1-5.
26. Jatala, P. 1985. Biolgical control of nematodes, in: An Advanced Treatise on *Meloidogyne* Vol. I: Bioligy and Control(J. N. Sasser and C. C. Carter, eds), pp. 303-308. Dept. plant pathology, North Carolina state Univ. Raleigh.
27. Jatala, P. 1986. Biological control of plant parasitic nematodes. Ann. Rev. Phytopath. 24:453-489.
28. Johnson, A. W., Dowler, C. C., and Hauser, E. W. 1975 Crop rotation and herbicide effects on population densities of plant parasitic nematodes. J. Nematol. 7:158-168.
29. Katan, J. 1981. Solar heatingg(solarization) of soil for control of soilborne pests. Ann. Rev. Phytopathol. 19:211-236.
30. Kerry, B. R. 1987. Biological control. in: Principles and Practice of Nematode Control in Crops. Brown, R. H and Kerry, B.R. eds., pp. 233-263. Academic Press. London.
31. Lawrence, D. Y. 1994. Changes in the *Heteroderm glycines*. Female Index as Affected by Ten-year Cropping Sequences J. Nematol.26:505-510.
32. Linford, M. B. 1937. Stimulated activity of natural enemies of nematodes. Science 85:123-124.
33. Mc Sorley, R., D. W. Dickson, J. A. de Brito, and R. C. Hochmuth. 1994. Tropical Rotation Crops Influence Nematode Densities and Vegetable Yields. J. Nematol. 26:308-314.
34. Mc Sorley, R., and R. N. Gallaher. 1993. Effect of Crop Rotation and Tillage on Nematode Densities in Tropical Corn. Supl. J. Nematol.25:814-819.
35. Mian, I. H., and Rodriguez-Kabana, R. 1982b. Survey of the nematicidal properties of some organic materials available in Alabama as amendments to soil for control of *Meloidogne arenaria*. Nematropica 12:235-246.

36. Nusbaum, C. J., and H. Ferris. 1973. The role of cropping systems in nematode population management. Ann. Rew. Phytopathol. 11:423-440.
37. Patrick, Z. A., Syre, R. M., and Thorpe, H. J. 1965. Nematocidal substances selective for plant parasitic nematodes in extracts of decomposing rye. Phytopathology 55:702-704.
38. Rich, J. R., Rahi, G. S., Opperman, C. H., and Davis, E. L. 1989. Influence of the castor bean (*Ricinus communis*) letin (Ricin) on motility of *Meloidogyne incognita*. Nematropica 19:99-103.
39. Riggs, R. D., and D. P. Schmitt. 1988. Complete characterization of the race scheme for *Heteroderm glycines*. J. Nematol. 20:392-395.
40. Rodriguez-Kabana. R., D. G. Robertson. L. Wells., P. S. King., and C., F., Weaver. 1989. Crops uncommon to Alabama for the management of *Meloidogyne arenaria* in peanut. Supl. J. Nematol. 21:712-716.
41. Rodriguez-Kabana, R. & King, P. 1980 Use of mixtures of urea and blackstrap molasses for control of root-knot nematodes in soil. Nematropica 10:38-44.
42. Sasser, J. N., and Freckman, D. W. 1987. A world perspective on Nematology:The role of the Society. pp.7-14. In Vistas on Nematology. Veech, J. A. and D. W.Dickson,(eds.) Society of Nematologists INC., Hyattsville, Maryland, U.S.A.
43. Sasser, J. N., and Kirby, M. F. 1979. Crop cultivars resistant to root-knot nematodes *Meloidogyne* species. A cooperative publication of the Department of Plant Pathology, North Carolina State University and the United States
44. Sayre, R. M. 1971. Biologic influence in soil enviroment. In: B. M. Zuckerman et al., (eds.), Plant Parasitic Nematodes. I. Morphology, Anatomy, Taxonomy and Ecology. Acad. Press, New York and London, pp.235-256.

45. Spiegel, Y., Cohn, E., and Chet, I. 1989. Use of chitin for controlling *Heterodera avenae* and *Tylenchulus semipenetrans*. J. Nematol. 21:419-422.
46. Stirling, G. R. 1991. Biological Control of Plant Parasitic Nematodes. Progress, Problems and Prospects. C. A. B. Internation. 282pp.
47. Tzean, S. S. and Yen, J. H. 1989. The development and control of pine wilt nematode in Taiwan. In: Proceeding symposium on plant nematode disease control. Tu, C. C. and Cheng, Y.H. eds. Pp.15-32. Taiwan Agricultural Research Institute. (in Chinese)
48. Tzean, S. S., Yen, J. H. and Chang, R. J. 1997. Pine wood nematode page. 42 pp. Taiwan For. Res. Ins. (in Chinese)
49. Van Gungy, S. D., and J. W. Meagher. 1977. Citrus nematode(*Tylenchulus semipenetrans*)problems worldwide. Proc. Int. Soc. Citricult. 3:823-826.
50. Wu, M.-L., Chang, T.-T., Fu, C.-H., Feng, Y.-C., Wang, L.-C. 2004. PCR detection applied in astudy of the causal agent of pine wilt disease in Taiwanese red pine, *Pinus taiwanensis*. Taiwan J. For. Sci. 19: 89-96. (in Chinese)
51. Yen, J. H., Tzean, S.S. and Chang, R. J. 1997.Occurrence of pine wilt disease in Taiwan red pine, Pinus taiwanensis, in Taiwan. Plant Patho. Bull. 6: 49-57. (in Chinese)
52. Zuckerman, B. M., and Esnard, J. 1994. The Quest for Plant Nematode Biological Control: Facts and Hypotheses. Proceedings of International Symposium on Biological Control of Plant Disease. Korea, pp. 62-74.