

间套作防治作物土传枯萎病的研究进展^①

曹 云, 马 艳*

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014)

摘 要: 作物间套作是农业生态系统中常见的一种种植模式。在这种生产模式中, 两种或多种作物不仅可以充分利用光、热、水、气、肥等资源, 提高单位土地面积的生产力, 而且还会影响植物病虫害发生。连作引发的枯萎病是影响很多作物减产的重要原因。通过合理间套作, 可以有效地提高作物的抗病能力, 以达到自然控制枯萎病的目的。本文首先综述了国内外不同作物间作模式对土传枯萎病的防治效果; 其次, 从田间小气候改变、寄主形态及生理改变、诱导寄主抗性、养分高效利用、抑制病原菌及土壤微生物多样性方面对控害机制的最新进展进行了总结。在此基础上, 对当前间作防控土传病害的局限性进行了讨论, 并对未来利用不同作物间作防治植物土传病害的研究方向及间作防控土传病害研究需要关注的热点问题进行了展望。

关键词: 间作; 枯萎病; 化感效应; 机制

中图分类号: S154

间作或套种, 即两种或两种以上生育季节相近(或相同)的作物在同一块田地上同时或同季成行间隔种植^[1-2]。间作是人们在长期生产实践过程中逐步认识和掌握的一项增产措施, 它可以利用不同作物的株型、叶型、根系、营养特性的不同及生态方面的差异, 充分利用光、热、水、气和肥等条件, 以获得比单作更高的产量和经济收益^[3-5]。同时, 这些措施的合理应用还可以最大限度地提高作物群体对逆境生理的抗性, 控制或减轻某些病虫害的发生, 达到“不施农药, 胜施农药”的效果^[6-8]。近年来, 作为生物防治和农业防治的一种重要措施, 间套作日益引起人们的重视。同时, 利用间套作来控制作物病虫害的相关研究报告不断增多, 其中关于间套作抑制作物土传枯萎病方面也取得了一定的进展。

1 间套作防治作物土传枯萎病的效果

1.1 对黄瓜、西瓜枯萎病的防控效果

枯萎病是危害黄瓜、西瓜生产的重要土传病害。合理间、轮、套作是防治西瓜、黄瓜枯萎病的一种有效方法。Ren 等^[9]采用盆栽试验研究旱作水稻与西瓜间作对西瓜枯萎病的影响, 结果表明西瓜定植 25 天

后单作西瓜开始出现枯萎病发病症状; 40 天后, 单作西瓜有 66.7% 发病, 44.4% 西瓜苗死亡, 而间作西瓜生长正常, 无发病和死亡现象, 鲜重和株高均显著高于单作处理。筒篙与西瓜间作降低了西瓜根系活跃吸收面积, 增加须根数量, 使根系吸收养分的能力增强, 促进了西瓜生长发育、降低枯萎病的发生, 提高西瓜产量。在距西瓜根部四周 10 cm 左右低密度套作筒篙, 并控制筒篙株高 10 ~ 15 cm, 促进作用更大^[10]。东北农业大学采用小麦伴生控制西瓜枯萎病的发生, 方法为: 栽植西瓜 2 ~ 5 天后将伴生作物小麦播种于西瓜植株一侧, 待小麦长至 15 ~ 20 cm 时, 割除伴生作物地上部分; 重复种植伴生作物、割除地上部分 2 ~ 3 次后终止割除, 继续培育西瓜至成熟, 能有效控制西瓜枯萎病的发生^[11]。湖南东安地区采用大蒜-西瓜-晚稻耕作栽培模式, 该模式下西瓜在同一田块可连作 5 ~ 6 年, 在显著提高西瓜单产的同时, 可减轻西瓜枯萎病的危害, 经济效益十分可观^[12]。

Yoshihisa^[13]报道在日本栃本县, 自从使用洋葱与葫芦科作物间作的方法, 即使在瓜类连年种植的情况下, 枯萎病亦危害不重。黄瓜与大蒜套种减轻瓜类枯萎病的发生也早有报道^[14]。近年来, 东北农业大学

①基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201103004-9)资助。

* 通讯作者(myjaas@sina.com)

作者简介: 曹云(1981—), 女, 江苏丹阳人, 博士, 助理研究员, 主要从事农业废弃物资源化及保护土壤质量调控研究。E-mail: youngtsao@126.com

分别采用小麦、三叶草、毛茛子与黄瓜间作,研究不同作物间作对黄瓜病害和产量的影响,结果显示3种作物间作均降低了黄瓜角斑病、白粉病、霜霉病和枯萎病的病情指数和尖孢镰刀菌的数量。其中小麦/黄瓜间作和三叶草/黄瓜间作的黄瓜枯萎病的病情指数最低^[15]。杨阳^[16]采用不同品种的分蘖洋葱分别与黄瓜间作,发现在黄瓜两叶一心及三叶一心时,间作显著降低了黄瓜根际土壤尖孢镰刀菌的数量,显著降低了黄瓜发病率和病情指数。Pavlou等^[17]采用莴苣和黄瓜间作的方法成功降低了黄瓜枯萎病的发生。

1.2 对蚕豆、豌豆枯萎病的防控效果

小麦/蚕豆间作在云南省应用较为普遍。范桂萍^[18]在云南玉溪市峨山开展田间小区试验进行了油菜/蚕豆间作控制蚕豆病虫害的研究,结果发现间作蚕豆枯萎病平均发病率9.02%,单作发病率15.36%;并提出了适合在云南峨山地区推广的油菜/蚕豆间作优化栽培方案。董艳等^[19]开展了小麦、蚕豆间作的盆栽试验,研究间作条件下不同施氮量对蚕豆枯萎病发生的影响,结果表明蚕豆分枝期、开花期和鼓荚期,间作处理均能显著降低蚕豆枯萎病的发病率和病情指数,分枝期间作蚕豆枯萎病发病率和病情指数分别比单作降低35.3%和54.1%;间作蚕豆开花期枯萎病发病率和病情指数平均比单作降低26.6%和66.0%;与单作相比,间作平均使蚕豆鼓荚期枯萎病病情指数显著降低29.2%;在枯萎病发病初期和盛期间作降低蚕豆枯萎病发病率的效果都极为显著,随蚕豆枯萎病发病程度加重,间作对发病率的控制作用急剧下降,而对病情指数的降低作用仍保持在较高水平,表明小麦蚕豆间作能有效减轻蚕豆枯萎病的病情。陆金元等^[20]对江苏省常熟市不同种植模式下的豌豆枯萎病发生情况进行了调查,结果显示豌豆连作后枯萎病发病严重,平均病株率60%~80%;而与禾谷类玉米、蔬菜特别是葱、蒜等作物间作2~3年后,病害明显减轻,病株率10%左右。Abdel-Monaim等^[21]盆栽试验结果也表明,与茴香、葱、蒜等作物间作能降低扁豆枯萎病的发病率,其中茴香抑制作用最佳,茴香扁豆间作发病率为12%,而单作发病率为29%~30%。

1.3 对香蕉、棉花等作物枯萎病的防控效果

在广东省香蕉生产实践中,香蕉/韭菜间作技术使香蕉枯萎病得到了有效抑制。黄永红等^[22]2007—2010年生产实践调查中发现,应用该技术,香蕉枯萎病发病率可下降至5%以下,甚至更低。韭菜处理的田间试验中,香蕉枯萎病平均发病率仅为1.73%

(对照为52%)。盆栽试验中,韭菜间作对香蕉枯萎病抑制率为85.9%,病情指数抑制率为82%。海南大学的汪军等^[23-24]研究了香蕉/红薯套作对香蕉枯萎病的防治效果,结果表明香蕉移栽后的120天内,套作条件下的枯萎病发病程度均低于单作,套作防效为47.7%~69.6%。

周丽华等^[25]研究了红壤旱地不同棉田种植模式下病虫害发生情况,发现棉花与辣椒、玉米、花生、豇豆等间套作种植模式相对棉花单作能有效地减缓棉花枯萎病和黄萎病的发病率和病情指数,两种病害发病率平均比单作分别低8.02%和9.28%,病情指数平均比单作分别低7.48%和11.06%,其中棉花间作豇豆优于其他种植模式,适于红壤旱地推广应用。

在云南蒙自石榴园发生的石榴枯萎病,对石榴生产破坏严重,该病2003年在云南蒙自县发病率已高达11.2%^[26]。云南农业大学的汤东生等^[27]采用盆栽试验,研究了6种不同作物与石榴套作对其枯萎病的防治效果,发现在不同作物套栽的136天内,番茄、大葱和大蒜与石榴间作,均能较好地控制石榴枯萎病的发生;番茄、大葱和大蒜间作处理对石榴枯萎病平均防效分别达78.14%、80.99%和78.91%;而大豆、茼蒿、青菜与石榴间作处理的病情指数较高,与对照非常接近。马建华等^[28]研究了宁夏10种不同作物种植模式对蔬菜枯萎病发生的影响,结果显示番茄/梅豆、番茄/月菊间作模式能有效控制番茄枯萎病发生。Riaz等^[29]采用盆栽和田间试验研究了洋葱、小白菜、甜椒、芸芥、向日葵、苜蓿、玉米、长春花、月季等9种作物与剑兰间套作对剑兰枯萎病的影响,发现除长春花和月季外,其他作物间作模式均能减轻田间剑兰枯萎病的发生。盆栽试验中,苜蓿/剑兰间作与小白菜/剑兰间作防病效果最好,病害抑制率分别达到53%、49%。番茄与韭菜^[30]或者万寿菊^[31]间作后,枯萎病发病率显著降低。与红花/高粱间作系统相比,红花/鹰嘴豆间作后,红花枯萎病的发病率降低了77%^[32]。Zewde等^[33]报道,大蒜与十字花科属植物间作后,减轻了枯萎病的发生。LaMondia等^[34]报道,与高粱或者燕麦间作后,草莓枯萎病菌数量较单作下降,发病率显著降低。玉米/大豆间作系统中枯萎病菌的数量较玉米单作及大豆单作均低^[35]。

2 间套作防治作物土传枯萎病的机理

近年来,间作控制土传病害的机理研究取得了显著进展,主要包括田间小气候改变、寄主形态及生理改变、诱导寄主抗性、养分高效利用、土壤微生物等

方面。

2.1 改变了田间小气候

大量研究表明,间作系统田间温度较单作低 1~5℃,湿度与单作也不相同。由于玉米的遮荫作用,玉米/大豆间作可使大豆的角斑病明显减轻^[36]。间作白菜的田间气温比单种菜地降低 0.5℃,地面温度降低 2℃,使得白菜白斑病减少 20%,白菜软腐病和霜霉病的发生也明显减轻^[37]。Gómez-Rodríguez 等^[38]研究表明,空气湿度超过 92% 并至少维持 6~9 h,是单作番茄早疫病菌 *Alternaria solani* 产孢的必要条件。当番茄与万寿菊间作后,叶片保湿时间缩短了 2.9 h,间作番茄早疫病病情指数比单作下降 27%。田间小气候的改变除了受到种植模式的影响,与间作作物的生育期也有关系。Schoeny 等^[39]研究发现与小麦或者小麦间作时,豌豆叶片维持湿润的时间在小麦或小麦不同生育期变化很大;开花前,间作豌豆叶片保持湿润时间比单作长,开花之后则相反;与之对应的,开花期间作豌豆发病率高于单作,开花之后则相反。

间作田间小气候的变化还会间接对土壤理化性状产生影响,如香蕉/红薯套作对土壤形成有效覆盖,减少了阳光对土壤的照射,保持土壤温度、湿度和营养等理化因子的稳定,土壤有机质等营养物质的含量和溶解氧增加,土壤 C/N 合理,促进了土壤微生物对有机质、肥料和微量元素等营养物质循环利用和增殖,提高有益菌土壤定殖和抑制病原菌作用,有利于恢复土壤微生态平衡,达到控制病害的目的^[22]。

2.2 改变了寄主形态及生理特征

间作除了能通过改变田间小气候,进而改变病原菌的入侵和病害发生过程,还能引起寄主作物自身的形态学及生理上的变化。Gómez-Rodríguez 等^[31]研究表明,番茄/万寿菊间作系统中,间作番茄的节间更长,叶片更细长,叶面积更大,叶片维持湿润的时间缩短。除了形态学的变化,间作番茄光合作用和呼吸作用强度与单作番茄也不同,这些生理变化导致番茄抗性的改变。姜丽等^[10]研究发现茼蒿/西瓜间作能增加西瓜须根的数量和根系活跃吸收面积。

2.3 诱导寄主产生抗性

西瓜与旱作水稻间作时,水稻根系分泌物的香豆酸、西瓜根系分泌的阿魏酸及水杨酸对西瓜植株系统获得性抗性有不同的影响,从而影响西瓜自身抗枯萎病的能力。外源施加香豆酸提高了西瓜根系几丁质酶基因和叶片苯丙氨酸解氨酶基因的表达,提高了根系中的几丁质酶和 β -1,3-葡聚糖酶的活性,从而提高了

西瓜抗枯萎病的能力^[9]。浓度为 80 g/L 的茼蒿根、茎、叶水浸液,能缓解苯甲酸、肉桂酸对西瓜种子萌发及幼苗生长的抑制作用,随着浓度增加缓解效果明显,茼蒿水浸液能提高酚酸胁迫下的西瓜幼苗叶片保护酶过氧化物酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性,降低丙二醛含量和电解质渗透率,从而提高幼苗自身的防御能力,降低膜脂过氧化程度,降低西瓜枯萎病的发生^[10]。Xiong 等^[40]采用微距阵方法研究了玉米/花生间作系统中玉米根系抗逆蛋白的表达,结果显示与单作相比,间作玉米根系茉莉酸生物合成过程中的 2 个关键酶丙二烯氧化合酶和 12-羧-植物二烯酸还原酶表达显著增加,推测茉莉酸是调控间作作物根系互作,提高玉米系统抗性的信号分子。

2.4 改善土壤养分状况

植物病害的发生受到病原物、寄主和环境等因素的影响。矿质营养是植物正常生长发育所必须的,一方面可以作为植物组织的构成成分或直接参与新陈代谢而起作用,另一方面也可通过改变植物的生长方式、形态和解剖特征,如使表皮细胞加厚、高度木质化或硅质化,形成机械屏障增强其抗病能力。因此,矿质营养这个重要的环境因素可以影响寄主和病原微生物,进而影响植物病害的发生^[41]。Xiao 等^[42]连续 2 季盆栽试验研究不同大蒜种植密度对黄瓜产量和土壤养分含量的影响,结果表明黄瓜/大蒜间作后产量较单作黄瓜增加,黄瓜的氮、磷、钾、钙、锰及根系铁含量显著高于单作黄瓜的镁含量和地上部铁含量;间作土壤中有有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量随着大蒜球茎的种植密度增大而增加,其中有机质和碱解氮含量与大蒜球茎种植量线性相关;说明连作黄瓜产量和土壤养分的改善可以通过混作大蒜来达到。禾本科与豆科作物互作,能提高碳、氮在豆科作物中的周转速率,进而能提高作物产量。Chapagain 等^[43]研究发现,豌豆与小麦间作,豌豆根瘤数量比单作提高 27%~45%,生物固氮量较单作提高了 9%~17%,地上部碳积累量提高了 53%。在小麦/蚕豆间作系统中,由于蚕豆改善了小麦的氮钾营养状况,从而抑制了小麦锈病的发生,间作相对防效达 12%~100%^[44-45]。Guo 等^[46]研究表明花生/玉米间作改善了花生的铁营养,间作花生根际土壤有效铁含量增加了 0.2~2.64 mg/kg;花生根表皮细胞 Fe(III)-DMA 转运相关基因 *AhYSL1* 和铁还原酶基因 *AhFRO1* 表达量增加。

2.5 对土传枯萎病菌的抑制作用

作物土传枯萎病的发生与发病程度很大程度上取决于土壤和根际土壤中病原菌数量^[47-48],间作作物

根分泌物中的化感物质对病原菌有抑制作用,因而能达到防治枯萎病的效果^[49]。在间作系统中一种作物可以通过分泌特定的化感物质来抑制病原菌的生长和繁殖,从而达到抑制病害的作用^[50-52]。Gao 等^[53]连续 2 年的玉米/大豆连作试验研究表明,间作抑制大豆枯萎病的效果随着 2 种作物种植距离的增加而减少,说明间作作物根系的互作是控制病害发生的重要原因;在间作系统作物根系检测到 5 种酚酸物质,其中肉桂酸分泌量显著高于玉米单作或大豆单作;肉桂酸对大豆枯萎病病原菌 *Cylindrocladium parasiticum* 有较强的抑制作用。Pavlou 等^[17]研究表明,莴苣根系分泌的化感物质对黄瓜枯萎病致病菌有抑制作用,可用来防控黄瓜枯萎病。水稻的根分泌物可以显著抑制尖孢镰刀菌孢子萌发和孢子生殖,从而抑制了西瓜枯萎病的发生^[54]。与单作西瓜根际相比,间作旱作水稻的西瓜根际尖孢镰刀菌数量下降了 91%,真菌的数量也降低,但细菌和放线菌的数量增加;进一步证实水稻根系分泌物中的香豆酸能抑制尖孢镰刀菌的生长,因而西瓜间作水稻能控制西瓜枯萎病的发生^[54]。大葱根系分泌物中的化感物质对黄瓜枯萎病菌有抑制作用^[55],采用 MALDI-TOF-TOF 方法对间作大葱根系蛋白谱进行研究,发现与黄瓜间作后,分内洋葱根部苯丙素和有机硫化物合成的响应蛋白均上调,此类化感物质可能是降低黄瓜枯萎病发生的主要原因^[56]。除了根系分泌水溶性物质,一些植物产生的挥发性物质对病原菌也有抑制作用。Zhang 等^[57]发现在韭菜叶片和根系产生的挥发性物质 2-甲基-2-戊烯醛和 4 种有机硫化物(二甲基三硫醚、二甲基二硫醚、二丙基二硫醚、二丙基三硫醚)对香蕉枯萎病致病菌 *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race 4 有抑制作用,其中 2-甲基-2-戊烯醛和二甲基三硫醚的抑制作用最强。Tong 等^[58]研究表明,芝麻和甘蓝间作提高了甘蓝吲哚类硫代葡萄糖苷的含量,硫代葡萄糖苷具有光谱杀菌性。Zewde 等^[33]报道,芸薹属植物产生的挥发性异硫氰酸酯类物质对大蒜白腐病原菌 *Sclerotium cepivorum* 的抑制作用,是降低大蒜/芥菜间作系统中大蒜白腐病发病率的主要原因。万寿菊根提取物中的主要成分——精油能有效抑制西瓜枯萎病,10 mg/ml 精油提取物的抑制率在 24、36 和 48 h 分别为 62.83%、58.31% 和 56.30%;在西瓜枯萎病的 3 主要发病期(苗期、伸蔓开花期和座果期)施用精油提取液,西瓜枯萎病发生率显著降低;大蒜浸提液能够明显抑制西瓜枯萎病病原菌菌丝的生长^[59]。

2.6 改变了土壤微生物数量和群落结构

除了病原菌数量,土传病害的发生与根际微生物

的数量、区系组成和群落结构关系密切。间作作物引起主栽作物根际土壤中的微生物多样性增加,这有利于抑制植物土传病害的发生。当微生物群落结构越丰富,物种越均匀,多样性越高时,对抗病原菌的综合能力就越强^[60]。间作体系中地上部植物多样性与地下部微生物多样性存在紧密联系,地表生物多样性增加,土壤中微生物多样性也更加丰富。因此,在间作系统中,根际土壤微生物多样性增加也是抑制植物病害的主要原因。

小麦/黄瓜间作显著提高了土壤真菌的数量,极显著提高细菌的数量,小麦/黄瓜间作、毛苕子/黄瓜间作和三叶草/黄瓜间作极显著地降低了尖孢镰刀菌的数量以及尖孢镰刀菌占真菌的比例。小麦、毛苕子与黄瓜间作均能提高黄瓜根际土壤微生物群落多样性,其中,小麦/黄瓜间作对黄瓜根际土壤微生物群落多样性的影响最为突出^[15]。与青蒜、罗勒间作后,番茄根际土壤的枯萎病菌数量显著降低,丛枝菌根真菌在番茄根系定殖量增加^[61]。西瓜/旱作水稻间作系统中,间作西瓜根际的尖孢镰刀菌数量显著低于单作;50 天后,间作西瓜根际土中的真菌数量显著低于单作,而细菌、放线菌及总微生物数量均显著高于单作;磷脂脂肪酸(PLFA)法分析土壤微生物多样性发现,单作处理的西瓜根际土壤中真菌数量较多,细菌数量较少,而且主要是革兰氏阳性菌,而间作西瓜根际则含有较多的革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌和放线菌^[62]。与单作相比,小麦/蚕豆间作显著增加了蚕豆根际的细菌、真菌、放线菌数量、微生物总数和微生物多样性,尤其以真菌和放线菌的增幅较大^[19]。除了小麦,洋葱/黄瓜、大蒜/黄瓜间作也能显著提高黄瓜根系土壤细菌多样性,其中大蒜/黄瓜间作比洋葱/黄瓜间作对土壤真菌群落结构影响更大^[63]。玉米/蚕豆和玉米/鹰咀豆间作后其根际微生物多样性指数显著高于单作^[64]。宋亚娜等^[65]研究表明,小麦/蚕豆、玉米/蚕豆和小麦/玉米间作改变了根际细菌群落结构组成,提高作物根际细菌群落多样性;小麦/蚕豆间作对作物花期根际细菌群落结构的影响最为突出;玉米/蚕豆间作主要表现出对苗期玉米根际细菌多样性的显著提高和群落结构组成的改变。除了微生物,间作还提高了土壤无脊椎动物的群落多样性,苍术/花生间作降低了弹尾目动物的数量,提高了螨目动物的数量^[66]。

3 展望

枯萎病是一种世界性的土传病害,科学家们提出了各种防治措施,但是这些措施各有利弊。利用植物

间的化感作用采用合理的间、轮、套作技术,是控制病害的有效手段,合理的间混作模式往往可以提高田间生态系统的稳定性,有效控制作物土传病害的发生^[67]。不同作物品种间作对一些病害具有控制作用,但不是对所有的病害都有控制作用,小麦与大麦间作、小麦与蚕豆间作对条锈病和大麦白粉病具有较好的控制效果,对小麦纹枯病没有控制效果,对白粉病的效果不明显^[68]。间作作物对土壤病原菌的抑制效果还受到作物品种和土壤温度、水分含量等的影响^[69]。不合理的模式不但会争夺主栽作物养分和水分,进而降低产量,还会增加病害发生率和发生程度^[70-73]。为提高间作防治作物土传病害的效果与稳定性,在现有的研究基础上,还应该在以下 3 方面进行深入研究:

1) 利用间作作物化感作用来防治植物土传病害的效果与土壤病原菌数量、土壤温度、湿度、间作作物种植密度及生育期密切相关,因此,应考虑到土壤中主要病原菌数量消长规律来确定间作作物的栽植时间。同时,应摸清间作作物不同生育期根系分泌物的化感效应差别,以筛选化感效应最强且生育期最长的作物品种。

2) 机理研究方面,一方面可运用基因组学、蛋白组学等方法,深入研究间作系统中化感作用对植物光合、养分吸收与代谢、植物病程相关基因表达与蛋白活性的影响,揭示间作提高作物抗病性的分子基础;另一方面,从土壤微生物出发,采用高通量测序技术,细致研究间作对土壤微生物群落结构的影响,明确土壤中改善作物养分吸收、抑制土传病原菌的关键微生物种群。

3) 在应用技术方面,目前主要采用一种方式,如将植物耕翻入土、间作或轮作来防控土传病害。也有人为了提高防控效果,会人为添加功能微生物、施入生物有机肥或者浇灌植物浸提液等,但外源菌种的加入是否会对土著微生物造成影响,其协同或竞争机制有待进一步研究。

4) 由于不同地区土壤类型不同,因此有必要加强适合不同类型生态区的间套作模式研究,对当地的作物品种资源进行遗传背景和当地的主要病虫害种类以及病菌的遗传结构进行研究分析,以获得最佳的防控效果。

参考文献:

[1] Lithourgidis AS, Dordas CA, Damalas CA, Vlachostergios DN. Annual intercrops: An alternative pathway for sustainable agriculture[J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5: 396-410

[2] Francis CA. Introduction: distribution and importance of multiple cropping[A]// Francis CA. Multiple Cropping Systems[C]. New York, USA: Macmillan Publishing Company, 1986

[3] Altieri MA. The ecological role of biodiversity in agroecosystems[J]. Agricultural Ecosystem Environment, 1999, 74: 19-31

[4] Rao VN, Sastry RK, Craufurd P, Meinkec H, Parsonsc D, Rego TJ, Rathorea A. Cropping systems strategy for effective management of Fusarium wilt in safflower[J]. Field Crops Research, 2014, 156: 191-198

[5] Li C, He X, Zhu S, Zhou H, Wang Y. Crop diversity for yield increase[J]. PLoS ONE, 2009, 4(11): e8049

[6] Mundt CC. Use of multiline cultivars and cultivar mixtures for disease management[J]. Annual Review of Phytopathology, 2002, 40: 381-410

[7] Burdon JJ, Thrall PH, Ericson L. The current and future dynamics of disease in plant communities[J]. Annual Review of Phytopathology, 2006, 44: 18-39

[8] 彭化贤, 刘波微, 罗林明, 席亚东. 间栽和混播对作物病害的防治效果[J]. 西南农业大学学报, 2006, 19(6): 1 058-1 062

[9] Ren L, Su S, Yang X, Xu Y, Huang Q, Shen Q. Intercropping with aerobic rice suppressed Fusarium wilt in watermelon[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40: 834-844

[10] 姜丽. 茼蒿对西瓜化感作用的初步研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2007

[11] 潘凯, 吴凤芝, 刘守伟, 王玉彦. 一种克服西瓜连作障碍的生态栽培方法[Z]. 中国, CN200910072411.0. 2010-12-08

[12] 刘善臣. 大蒜-西瓜-晚稻栽培模式[J]. 湖南农业, 1996(4): 6

[13] Yoshihisa H. 日本土传病害防治现状(下篇)[J]. 世界农业, 1993(6): 41-43

[14] 王孟文, 路平. 黄瓜与大蒜混植栽培技术[J]. 蔬菜, 1991(4): 15-15

[15] 吴凤芝, 周新刚. 不同作物间作对黄瓜病害及土壤微生物群落多样性的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 899-906

[16] 杨阳. 分蘖洋葱对黄瓜的化感作用及其应用[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010

[17] Pavlou GC, Pavloua D, Vakalounakis J. Biological control of root and stem rot of greenhouse cucumber, caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-cucumerinum*, by lettuce soil amendment[J]. Crop Protection, 2005, 24: 135-140

[18] 范桂萍. 油菜/蚕豆间作控制病虫害研究[J]. 云南农业科技, 2005(6): 11

[19] 董艳, 汤利, 郑毅, 魏兰芳. 施氮对间作蚕豆根际微生物区系和枯萎病发生的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1 797-1 805

[20] 陆金元, 徐永昌, 毛虎根. 常熟市豌豆枯萎病的发生情况和治理对策[A]//2003 年华东植物病理学术研讨会论文集[C]. 苏州: 江苏省植物病理学会, 2003: 458-459

- [21] Abdel-Monaim MF, Kamal AM, Abo E. Effect of preceding and intercropping crops on suppression of lentil damping-off and root rot disease in New Valley Egypt[J]. Crop Protection, 2012, 32: 41–46
- [22] 黄永红, 李春雨, 左存武, 梅眉, 易干军. 韭菜对巴西香蕉枯萎病发生的抑制作用[J]. 中国生物防治学报, 2011, 27(3): 344–348
- [23] 汪军, 王国芬, 杨腊英, 郭立佳, 潘江禹, 毛超, 戴青冬, 黄俊生. 施用淡紫拟青霉与套作对香蕉枯萎病控病作用的影响[J]. 果树学报, 2013, 30(5): 857–864
- [24] 汪军, 潘江禹, 毛超, 戴青冬, 刘一贤, 张建华, 郭立佳, 黄俊. 土壤物理因素和栽培方式对淡紫拟青霉 E7 在香蕉根际定殖和促生作用的影响[J]. 果树学报, 2013, 30(2): 274–280
- [25] 周丽华, 黄国勤, 贺娟芬. 红壤旱地棉田间作种植模式对病、虫、草害的影响[J]. 生物灾害科学, 2013, 36(1): 13–17
- [26] Huang Q, Zhu YY, Chen HR. First report of pomegranate wilt caused by *Ceratocystis fimbriata* in Yunnan, China[J]. Plant Disease, 2003, 87(9): 1 150
- [27] 汤东生, 蒋其军, 毛忠顺, 潘俊, 陆进, 何霞. 不同作物套栽对枯草芽孢杆菌控制石榴枯萎病效果的影响[J]. 中国生物防治学报, 2012, 28(2): 243–249
- [28] 马建华, 张丽荣, 杜玉宁. 不同蔬菜种植模式对设施栽培土壤微生物和枯萎病发生的影响[J]. 北方园艺, 2012, 22: 38–39
- [29] Riaz T, Khan SN, Javaid A. Effect of co-cultivation and crop rotation on corm rot disease of *Gladiolus*[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 121: 218–222
- [30] Yu JQ. Allelopathic suppression of *Pseudomonas solanacearum* infection of tomato (*Lycopersicon esculentum*) in a tomato-chinese chive (*Allium tuberosum*) intercropping system[J]. Journal of Chemical Ecology, 1999, 25: 2 409–2 417
- [31] Gómez-Rodríguez O, Zavaleta-Mejía E, Gonzalez-Hernandez V A, Livera-Munoz M, Cardenas-Soriano E. Allelopathy and microclimatic modification of intercropping with marigold on tomato early blight disease development[J]. Field Crops Research, 2003, 83: 27–34
- [32] Rao R, Kalpana SP, Craufurd HMD, Parsons TJ, Rego AV, Nageswara R. Cropping systems strategy for effective management of Fusarium wilt in safflower[J]. Field Crops Research, 2014, 156(1): 191–198
- [33] Zewde T, Chemed F, Parshotum K. S, Seid A. Association of white rot (*Sclerotium cepivorum*) of garlic with environmental factors and cultural practices in the North Shewa highlands of Ethiopia[J]. Crop Protection, 2007, 26: 1 566–1 573
- [34] LaMondia JA, Wade HE, Todd LM, Richard SC. Integrated management of strawberry pests by rotation and intercropping[J]. Crop Protection, 2002, 21(9): 837–846
- [35] Keswani CL, Kibani THM, Chowdhury MS. Effect of intercropping on rhizosphere population in maize (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* Merrill) [J]. Agriculture and Environment, 1977, 3(4): 363–368
- [36] Boudreau MA. Effect of intercropping beans with maize on the severity of angular leaf spot of beans in Kenya[J]. Plant Pathology, 1993, 42: 16–25
- [37] 王玉堂. 蔬菜间作胜过施农药[J]. 蔬菜, 2004(12): 37
- [38] Gómez-Rodríguez O, Zavaleta-Mejía E, Gonzalez-Hernandez VA, Livera-Munoz M, Cardenas-Soriano E. Physiological and morphological adaptations in tomato intercropped with *Tagetes erecta* and *Amaranthus hypochondriacus*[J]. Revista fitotecnia Mexicana, 2007, 30: 421–28
- [39] Schoeny A, Lemarchand E, Tivoli B, Jumel S, Rouault F. Effect and underlying mechanisms of pea-cereal intercropping on the epidemic development of *Ascochyta* blight[J]. European Journal of Plant Pathology, 2010, 126: 317–331
- [40] Xiong H, Shen H, Zhang L, Zhang Y, Guo X, Wang P, Duan P, Ji C, Zhong L, Zhang F, Zuo Y. Comparative proteomic analysis for assessment of the ecological significance of maize and peanut intercropping[J]. Journal of Proteomics, 2013, 78: 447–460
- [41] 马斯纳 H. 高等植物的矿质营养[M]. 曹一平译. 北京: 北京农业大学出版社, 1991: 77–78
- [42] Xiao X, Cheng Z, Meng H, Liu L, Li H. Intercropping of green garlic (*Allium sativum* L.) induces nutrient concentration changes in the soil and plants in continuously cropped cucumber (*Cucumis sativus* L.) in a plastic tunnel[J]. PLoS ONE, 2013, 8(4): e62173
- [43] Chapagain T, Riseman A. Barley-pea intercropping: Effects on land productivity, carbon and nitrogen transformations[J]. Field Crops Research, 2014, 166: 18–25
- [44] 肖靖秀, 周桂凤, 汤利, 郑毅, 李永梅, 李隆. 小麦/蚕豆间作条件下小麦的氮、钾营养对小麦白粉病的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 517–522
- [45] 肖靖秀, 郑毅, 汤利, 李隆, 朱有勇, 杨进. 小麦蚕豆间作系统中的氮钾营养对小麦锈病发生的影响[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(5): 640–645
- [46] Guo X, Xiong H, Shen H, Qiu W, Ji C, Zhang Z, Zuo Y. Dynamics in the rhizosphere and iron-uptake gene expression in peanut induced by intercropping with maize: Role in improving iron nutrition in peanut[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2014, 76: 36–43
- [47] Perez C, Dil-I Macky R, Kinkel LL. Management of soil microbial communities to enhance populations of fusarium graminearum-antagonists in soil[J]. Plant Soil, 2008, 302: 53–69
- [48] Elsas J D, Garbeva P, Salles J. Effects of agronomical measures on the microbial diversity of soils as related to the suppression of soil borne plant pathogens[J]. Biodegradation, 2002, 13(1): 29–40
- [49] Farooq M, Khawar J, Zahid AC, Kadambot AW, Siddique HM. The role of allelopathy in agricultural pest Management[J]. Pest Management Science, 2011, 67: 493–506
- [50] Javed N, Gowen S R, InamulHaque M, Abdullah K, Shahina F. Systemic and persistent effect of neem (*Azadirachta indica*) formulations against root-knot nematodes, *Meloidogyne javanica*, and their storage life[J]. Crop Protection, 2007, 26: 911–916

- [51] Larkin RP, Griffin TS. Control of soilborne potato diseases using Brassica green manures[J]. Crop Protection, 2007, 26:1 067–1 077
- [52] Joseph B, Dar M, AandKumar V. Bioefficacy of plant extracts to control *Fusarium solani* f. sp. *melongenae* incitant of brinjal wilt[J]. Global Journal of Biotechnology and Biochemistry, 2008, 3: 56–59
- [53] Gao X, Wu M, Xu R, Wang X, Pan R. Root interactions in a maize/soybean intercropping system control soybean soil-Borne disease, red crown rot[J]. PLoS ONE, 2014, 9(5): e95031
- [54] Hao W, Ren L, Ran W, Shen Q. Allelopathic effects of root exudates from watermelon and rice plants on *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*[J]. Plant Soil, 2010, 336: 485–497
- [55] 杨阳, 刘守伟, 潘凯, 吴凤芝. 分蘖洋葱根系分泌物对黄瓜幼苗生长及根际土壤微生物的影响[J]. 应用生态学报, 24(4): 2 627–2 634
- [56] Yang Y, Wu F, Zhou X. Protein expression in accessions of Chinese onion with different allelopathic potentials under monocropping and intercropping systems[J]. Acta Physiology Plant, 2013, 35: 2 241–2 250
- [57] Zhang H, Mallik A, Zeng R S. Control of panama disease of banana by rotating and intercropping with Chinese chive (*Allium Tuberosum Rottler*): Role of plant volatiles[J]. Journal of Chemical Ecology, 2013, 39: 243–252
- [58] Tong Y, Gabriel-Neumann E, Krumbein A, Ngwene B, George E, Schreiner M. Interactive effects of arbuscular mycorrhizal fungi and intercropping with sesame (*Sesamum indicum*) on the glucosinolate profile in broccoli (*Brassica oleracea* var. *Italica*) [J]. Environmental and Experimental Botany, 2015, 109, 288–295
- [59] 金扬秀, 谢关林, 孙祥良, 蔡雪涛. 大蒜轮作与瓜类枯萎病发病的关系[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2003, 21(1): 9–12
- [60] Raaijmakers JM, Paulitz TC, Steinberg C, Alabouvette C, Moenne-Loccoz Y. The rhizosphere: A playground and battlefield for soilborne pathogens and beneficial microorganisms[J]. Plant Soil, 2009, 321: 341–361
- [61] Hage-Ahmed K, Krammer J, Steinkellner S. The intercropping partner affects arbuscular mycorrhizal fungi and *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* interactions in tomato[J]. Mycorrhiza, 2013, 23(7): 543–550
- [62] 郝文雅, 冉炜, 沈其荣, 任丽轩. 西瓜、水稻根分泌物及酚酸类物质对西瓜专化型尖孢镰刀菌的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(12): 2 443–2 452
- [63] Zhou X, Yu G, Wu F. Effects of intercropping cucumber with onion or garlic on soil enzyme activities, microbial communities and cucumber yield[J]. European Journal of Soil Biology, 2011, 47: 279–287
- [64] 柴强, 黄高宝, 黄鹏, 张恩和, 冯福学. 鹰咀豆根系分泌物的分离鉴定及典型分泌物苯甲醛的化感效应[J]. 草叶学报, 2005, 14(1): 106–111
- [65] 宋亚娜, Marschner P, 张福锁, 包兴国, 李隆. 小麦/蚕豆、玉米/蚕豆和小麦/玉米间作对根际细菌群落结构的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2 268–2 274
- [66] Li X, Wang X, Dai C, Zhang T, Xie X, Ding C, Wang H. Effects of intercropping with *Atractylodes lancea* and application of bio-organic fertiliser on soil invertebrates, disease control and peanut productivity in continuous peanut cropping field in subtropical China[J]. Agroforestry Systems, 2014, 88(1): 41–52
- [67] Zhu YY, Chen HR, Fan JH, Wang YY, LiY, Chen JB, Fan JH, Yang SS, Hu LP, Mew TW, Teng PS, Wang ZH, Mundt CC. Genetic diversity and disease control in rice[J]. Nature, 2000, 406: 718–722
- [68] Chen Y, Zhang F, Tang L, Zheng Y, Li Y. Wheat powdery mildew and foliar N concentrations as influenced by N fertilization and belowground interactions with intercropped faba bean[J]. Plant Soil, 2007, 291: 1–13
- [69] Ploeg AT, Maris PC. Effect of temperature on suppression of *Meloidogyne incognita* by tagetes cultivars[J]. Journal of Nematology, 1999, 31: 709–714
- [70] Powers LE, McSorley R, Dunn RA. Effects of mixed cropping on a soil nematode community in Honduras[J]. Journal of Nematology, 1993, 25: 666–673
- [71] 沈君辉, 聂勤, 黄得润, 刘光杰, 陶龙兴. 作物混植和间作控制病虫害研究的新进展[J]. 植物保护学报, 2007, 34(2): 209–216
- [72] 蔡承智. 如何合理进行作物间, 混, 套作[J]. 致富天地, 2001(1): 20–21
- [73] 陈旭. 作物巧套种, 防病又治虫[J]. 河北农业科技, 2002(5): 9

Advances in Fusarium Wilt Disease Suppression by Intercropping

CAO Yun, MA Yan*

(*Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China*)

Abstract: Intercropping is a common cropping system strategy in agricultural ecosystems. In intercropping system, two or more crops growing in close proximity could not only improve the crop yield per unit by fully utilizing the resources of light, heat, water, air and fertilizer, but also influence the incidence rate and severity of diseases and pests. Fusarium wilt disease caused by continuous cropping can decrease the yields of many crops. It is reported that fusarium wilt disease could be controlled naturally by improving crop resistance against diseases in intercropping systems. In this paper it reviewed phenomenological research comparing fusarium wilt disease incidence in monocrops and intercrops, and in most of the studies intercropping reduced disease. The mechanisms by which intercrops affect disease dynamics include modification of microclimate, especially temperature and moisture; changes in host morphology and physiology; induced resistance in hosts; effective use of plant nutrition; direct pathogen inhibition and improved microbial diversity in soil. The limitation in using intercropping to control soilborne diseases and the research prospects in the future and hotspots concerning disease control by intercropping were also discussed and highlighted.

Key words: Intercropping; Fusarium wilt; Allelopathic effects; Mechanism