

DOI:10.13718/j.cnki.zwyyx.2025.02.008

土壤调理剂在作物土传病害防治中的功能作用

陈孟乐¹, 周再阳², 卢军², 易蔓², 罗杰²,
王丹³, 张琳丽³, 李石力¹, 鄢敏²

- 西南大学 植物保护学院, 重庆 400715;
- 四川省烟草公司 宜宾市公司, 四川 宜宾 644600;
- 重庆西农植物保护科技开发有限公司, 重庆 400700

摘要: 土传病害是农业生产中的重要植保难题, 对作物的健康生长构成严重威胁。该类病害的发生机制复杂, 尤其与土壤微生态密切相关, 其中土壤微生态失衡是其主要诱因之一。土壤调理剂通过优化土壤生物、物理及化学特性, 改善土壤环境, 提升作物抗病能力, 从而缓解土传病害的发生并减轻连作障碍。通过系统分析土壤生态因子与土传病害之间的关系, 归纳不同类型土壤调理剂的特征, 并从土壤微生态调控角度探讨其作用机制。同时, 综述了土壤调理剂在土传病害防治中的应用现状及发展趋势, 以为土壤健康管理及病害综合防控提供科学依据和技术支撑。

关键词: 土传病害; 土壤调理剂;

土壤微生态; 连作障碍

中图分类号: S432

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2097-1354(2025)02-0067-07

Functional Role of Soil Conditioners in the Prevention and Control of Crop Soil-borne Diseases

CHEN Mengle¹, ZHOU Zaiyang², LU Jun²,
YI Man², LUO Jie², WANG Dan³,
ZHANG Linli³, LI Shili¹, YAN Min²

- College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400715, China;
- Sichuan Tobacco Company Yibin Company, Yibin Sichuan 644600, China;
- Chongqing Xinong Plant Protection Technology Development Co. Ltd., Chongqing 400700, China

收稿日期: 2024-05-31

基金项目: 中国烟草总公司四川省公司科技项目(SCYC202315); 中国烟草总公司重大科技项目(110202101047(LS-07))。

作者简介: 陈孟乐, 硕士研究生, 主要从事土传病害绿色防控技术研究。

通信作者: 鄢敏, 硕士, 农艺师。

Abstract: Soil-borne diseases are a major challenge of plant protection in agricultural production, posing a significant threat to crop health. The occurrence mechanisms of these diseases is complex and closely related to soil microecology, with soil microecological imbalance being one of the primary causes. Soil conditioners can optimize soil biological, physical, and chemical properties, improve soil conditions, and enhance crop disease resistance, thereby mitigating the occurrence of soil-borne diseases and alleviating continuous cropping obstacles. This study systematically analyzes the relationship between soil ecological factors and soil-borne diseases, summarizes the characteristics of different types of soil conditioners, and explores their mechanisms from the perspective of soil microecological regulation. Additionally, the application status and development trends of soil conditioners in soil-borne disease prevention and control are reviewed, providing scientific basis and technical support for soil health management and comprehensive disease prevention.

Key words: soil-borne diseases; soil conditioner; soil microecology; continuous cropping obstacle

土壤是陆生生物赖以生存的物质基础,也是陆地生态系统中植物生长进行能量交换与养分供给的主要场所^[1]。稳定的土壤微生态系统是植物健康生长的重要保障。研究表明,较高的土壤有机碳含量和酶活性有利于有益微生物的繁殖和土壤微生态环境的改善,同时抑制病原微生物,从而降低病害发生风险^[2]。然而,当土壤酸碱度、矿质元素和微生物菌群等土壤生态因子失衡时,易导致植物抗性下降,健康发育受阻,土传病害的发生风险增加。例如,当土壤酸化(pH值降至4.5~5.5)后,植物根系分泌物的组成发生变化,微生物群落结构受到破坏,病原菌大量增殖,而有益菌受到抑制,最终导致植物抗性降低,病害高发^[3]。大量的有益功能微生物在土壤生态系统的构建与功能实现过程中发挥关键作用,如假单胞菌属(*Pseudomonas* spp.)、芽孢杆菌属(*Bacillus* spp.)、木霉属(*Trichoderma* spp.)等,这些生防菌可通过生态位竞争、拮抗作用、诱导植物系统抗性、活化土壤以及降解自毒物质等方式有效保护植物^[4]。此外,土壤元素缺乏,尤其是交换性钙、镁、硼、钼等中量、微量元素的质量分数偏低,会显著削弱土壤的抑病能力,导致土传病害加剧^[5]。因此,优化土壤微生态环境是调控植物健康生长、降低土传病害发生风险的基础和关键技术途径。目前,土壤调理剂已成为改良土壤的重要研究热点,并在实践应用中逐步获得认可,其重要性日益凸显。基于此,本文从土壤生态因子与病害发生关系的角度出发,系统总结了不同类型土壤调理剂的特性及其在优化土壤环境、病害防控和作物健康管理中的应用现状,并对土壤调理剂未来的研究方向和应用前景进行了展望。

1 土壤微生态因子与土传病害的发生

土壤微生态是指植物、土壤微生物及其生境相互作用形成的生态系统,具有动态性。当土壤微生态失衡时,植物的生长和健康将受到影响。在这一体系中,土壤酸碱度、矿质元素、根系分泌物和微生物群落等,是重要的指示因子,共同影响植物的正常生长和健康发育,并与土传病害的发生密切相关。

1.1 土壤酸碱度

土壤酸化是土壤质量退化的重要表现之一。现代农业的大规模生产加速了土壤酸化进程,对农业生产和生态环境构成了严重威胁。例如,在酸性土壤中,铁、铝及某些重金属的活性增加,抑制植物根系的养分吸收,从而导致青枯病、黄萎病等土传病害高发^[6]。研究表明,pH值

是影响青枯雷尔氏菌(*Ralstonia solanacearum*)致病力的重要因素^[7]。当土壤 pH 值低于 5.5 时,烟草青枯病大规模暴发^[8]。土壤酸化导致青枯病暴发的原因较为复杂。一方面,土壤酸化会降低土壤微生物的数量和多样性,使病原菌得以快速繁殖,进而提高烟株的发病率^[9]。另一方面,土壤酸碱度过低会引起植物必需元素失衡,导致钙、镁等元素之间产生拮抗作用,从而增加青枯病的发生风险^[10]。

1.2 土壤矿质元素

矿质元素是土壤肥力的重要指标,与植物健康密切相关。其中,钙、镁、硼、氮、钾等元素直接或间接影响植物的生长和抗病性^[11]。同时,土壤矿质元素在植物病害的防控中也发挥一定作用。例如,土壤中的钙可维持并增强生物膜的稳定性,从而抑制青枯菌的侵染和繁殖^[12]。硼元素有助于降低土传病害的发生率。例如,大白菜叶片内硼元素的质量分数达到 10~30 mg/kg 时,根肿病菌的感染率显著降低^[13]。张淑婷^[14]的研究表明,当土壤铝离子质量浓度超过 600 mg/L 时,不仅会抑制青枯菌的生长,还可能对植物生长产生影响。

1.3 根系分泌物

病原菌能否成功侵染植物,关键在于其在土壤中的存活能力及其在植物根际的定殖情况,这受到特定化合物和微生物群落的影响。根系分泌物可通过化感自毒作用、招募根际微生物及改变根际微生物环境等途径,影响土传病害的发生^[15]。在烟草连作障碍土壤中,存在一定的化感自毒物质。随着这些自毒物质的逐渐积累,土壤微生物群落的多样性显著降低,而病原微生物数量增加,破坏了土壤生态系统的平衡,从而降低根系代谢活性及营养元素的有效性,最终导致烟叶产量和品质下降^[16]。例如,有机酸类物质可改变连作土壤的理化特性,使根际土壤的 pH 值降低,并对根际微生物种群结构产生显著影响,从而导致土传病害的暴发^[17]。研究表明,肉桂酸、肉豆蔻酸和延胡索酸可显著增强青枯病菌的运动能力和趋化活性;且室内盆栽试验进一步证实,这些化合物能够促进青枯病菌在根部的定殖,加速其侵染过程,从而促使青枯病的进一步暴发^[18]。因此,根系分泌物的释放与积累对土壤微生物群落的组成及平衡具有重要影响,并在土传病害的发生过程中发挥关键作用。

1.4 土壤微生物

土壤微生物在维持农田生态系统稳定、加速作物根际生物屏障构建及阻碍土传病原菌入侵过程中发挥着重要作用。研究表明,荧光假单胞菌 SSW-11 灌根处理可提高土壤 pH 值,降低烟草青枯病的发病率和病情指数^[19]。噬菌体作为细菌的天然拮抗因子,在土传病害防控中具有重要应用价值。研究发现,裂解性噬菌体 RPZH6 可用于烟草青枯病防控,在接种 35 d 后防治效果显著高于对照药剂氢氧化铜,防效达 53.85%^[20]。江其朋等^[21]的研究也发现小单胞菌属(*Massilia*)、*Bryobacter* 属和气单胞菌属(*Aeromonas*)在烤烟根际细菌群落中发挥重要作用,并对烟草青枯病的发生具有显著影响。

2 土壤调理剂的种类和特征

土壤调理剂通过其独特的物理和化学特性调节土壤性质,优化土壤环境,提高土壤活力。由于其作用快速、使用简便且成本较低,被广泛应用于土壤保育和土传病害防治。目前,常见的土壤调理剂主要包括无机类、有机类、高分子材料类和微生物菌剂四大类^[22](表 1)。无机类土壤调理剂主要包括石灰类、磷酸盐类和黏土矿物等。该类调理剂见效快,但部分无机物含有重金属离子,长期施用可能对土壤造成污染。有机类土壤调理剂主要来源于畜禽粪便、植物残

渣及生物炭等,能够改善土壤理化性质,促进土壤微生物活性。然而,该类调理剂在应用过程中往往需要较大用量,若管理不当,可能导致土壤富营养化,甚至污染。高分子材料类土壤调理剂主要由人工合成材料制成,如水解聚丙烯腈(HPAN)、聚乙烯醇(PVA)、聚丙烯酰胺(PAM)、沥青乳剂(ASP)及多种共聚物的复合物。这类调理剂可改善土壤物理结构,提升保水保肥能力,但部分材料可能存在环境安全性问题。微生物菌剂主要由植物次生代谢物及微生物代谢产物制成,如水杨酸、甜菜碱、吡啶乙酸、枯草芽孢杆菌及阿维菌素等。研究表明,施用枯草芽孢杆菌 NCD-2 和 TB918 可提高草莓根际土壤真菌群落多样性,增加有益菌相对丰度,降低病原菌相对丰度,从而优化土壤微生物群落结构,有效防治草莓根腐病^[23]。微生物菌剂具有环保、污染小的优点,但若长期或高频次施用,可能会导致土壤菌群失衡^[24]。

表 1 不同土壤调理剂的种类和功能^[22]

类别	钝化材料	种类	功能
无机类	石灰类	石灰、碳酸钙、氧化钙、氢氧化钙等	提高土壤 pH 值
	含磷类	羟基磷灰石、钙镁磷肥、磷酸盐、磷矿粉等	调节金属离子,形成金属沉淀
	黏土矿物	海泡石、膨润土、沸石、蒙脱石、凹凸棒等	增加土壤有机碳,降低土壤重金属含量
	金属氧化物	铁氧化物、锰氧化物、炉渣、钢渣等	吸附土壤中金属离子,形成沉淀
有机类		农家秸秆、生物炭、腐殖酸类、家畜粪便等	调节土壤的 pH 值、阳离子交换量(CEC)及大量、中量及微量元素水平等理化性质
高分子材料类		丙烯晴、聚乙烯醇、聚丙烯酰胺、沥青乳剂等	提高碳氮比,促进植物生长发育
微生物菌剂		枯草芽孢杆菌 ^[24] 、甜菜碱、吡啶乙酸、甲壳素类等	优化根际微生物群落,增强有益菌活性

3 土壤调理剂调控土传病害的应用

土壤调理剂主要通过改善土壤理化特性、优化土壤微生物群落结构,提高土壤整体活力,从而降低土传病害的发生风险,促进作物健康生长。

3.1 无机土壤调理剂

在无机土壤调理剂中,石灰类调理剂的主要功能是调节土壤 pH 值,广泛应用于土壤酸化及茄科作物青枯病高发区域。研究表明,施用 80~120 kg/hm² 石灰可显著提高土壤 pH 值和钙的质量分数,有效缓解土壤酸化现象,烟草青枯病的防治效果达到 35.60%^[25]。碳酸钙作为土壤调理剂施用,可提升土壤 pH 值,提升耕作层中可交换钙水平和盐基饱和度,提高氮、磷、钾等营养元素的有效性,从而降低番茄枯萎病的发病率^[26]。膨润土可提高旱作燕麦土壤(0~40 cm 深度)中有机碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳及颗粒有机碳的质量分数,并优化其在土壤有机碳中的分布比例与碳库管理指数,进而提高土壤活性^[27],有效抑制土传病害的发生。

3.2 有机土壤调理剂

有机类土壤调理剂的主要功能是调节土壤 pH 值,平衡大量、中量和微量元素,广泛应用于土壤偏酸和缺素地块,能够显著改善土壤肥力,促进作物生长,降低土传病害的发生率,并提高果实品质^[28]。研究表明,菇渣生物有机肥对黄瓜枯萎病防治效果良好,能够有效降低土壤

中病原菌菌群丰度,提高有益菌菌群丰度,调节微生物群落结构和改善土壤理化性质,从而改善相关生理指标^[29]。肥料中的养分也能促进根际微生物发挥作用,如有机肥发酵原料中氨基酸等含氮化合物,能够促进功能菌(如解淀粉芽孢杆菌)的增殖,从而抵抗多种土传病原菌的入侵^[30]。”

以动物源、植物源及微生物为核心的土壤调理剂在土传病害的调控中也得到了广泛应用。例如,萎缩芽孢杆菌制成的生物有机肥能够促进菌株在马铃薯根际定殖,并显著降低马铃薯黑痣病的发病率^[31]。“根茎康”微生物菌剂通过移栽单独窝施处理,能够有效促进烟株生长,降低田间烟草青枯病的发病率,整体防效达49%以上^[32]。微生物菌肥与有机肥、生物炭的联合施用也应用广泛。例如,木霉菌配施有机肥,能够改善土壤酸碱度,优化土壤微生物的繁殖环境,促进黄瓜和烟株生长,抵御青枯病的发生^[33]。堆肥作为一种重要的土壤改良措施,已有大量研究证实其能够抑制多种作物的真菌性病害(如枯萎病、黄萎病、腐霉病、丝核病等)和细菌性病害(如青枯病、斑疹病、叶枯病等)^[34]。生物炭类土壤调理剂同样可显著优化土壤,减少土传病害的发生。例如,Rehman等^[35]的研究表明,污泥生物炭能够显著提高植物的生物量,提升植株中的磷、钾水平,从而增强植物抗病性。此外,添加污泥生物炭还可提高土壤微生物的活性和数量,进而减少土传病害的发生^[36]。牡蛎壳粉作为热门的土壤调理产品,也被广泛应用于土传病害防治。研究发现,经牡蛎壳粉处理的地块,烟草青枯病发病率显著降低,较对照组下降了43.33%^[37]。张圣炜等^[38]的研究表明,施用不同剂量的牡蛎钾粉可以优化土壤结构,降低土壤交换性铝离子水平,提高土壤中钙镁离子水平,并能改善烤烟农艺性状,在一定程度上促进烟叶生长^[39]。

3.3 复合土壤调理剂

在实际应用中,不同类型的土壤调理剂对土壤的修复效率存在较大差异,单一调理剂往往难以达到理想的改良效果,导致土传病害频繁发生。为更有效地减轻植物病害、维持土壤肥力,应用复合土壤调理剂成为重要策略。复合土壤调理剂可弥补单一调理剂的不足,提高土壤修复效果。例如,牡蛎壳类土壤调理剂与复合微生物菌剂联合施用,可显著提高土壤酶活性、pH值和有机质水平,同时降低根茎类病害的发病率和病情指数,提升烤烟产量及经济效益^[40]。此外,牡蛎壳调理剂还可提高土壤碱解氮、有效磷、速效钾及交换性钙的质量分数,从而营造一个不利于青枯菌生长的环境,有效抑制土传病害的发生^[41]。微生物复合菌剂联合有机调理剂在烟草青枯病防控中也得到广泛应用。例如,根茎康微生物菌剂与多粘类芽孢杆菌(*Paenibacillus* spp.)和哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*)的复合菌剂,可进一步改善烟株的农艺性状,并提高田间烟草青枯病的防控效果,整体防效可达55%以上^[32]。研究发现,以腐熟的农业废弃物为基质,联合不同配比的首蓿粉、聚丙烯酰胺、膨润土和蛭石制备土壤调理剂,可通过改善土壤的物理、化学和生物学性质及作物的光合特性,从而降低玉米全蚀病的发生率^[42]。

4 讨论与展望

土传病害是农业生产中的一大难题,发生危害重、分布范围广,严重影响农作物的产量和品质。传统的防治策略往往以单一手段为主,如通过植物抗病性提升、化学农药防治或土壤熏蒸等方式进行干预,但这些方法在应对病因复杂的土传病害时,往往难以取得理想效果。土壤调理剂的应用为土传病害的综合防控提供了新的思路。然而,目前土壤调理剂在实际应用中仍

面临诸多挑战,主要体现在以下两个方面:①施用效果不稳定。在使用初期,调理剂可显著改善土壤健康状况,但随着时间推移,土壤微生态环境可能再次恶化,导致病害防控效果减弱,限制了其广泛应用。②用量控制问题。过量使用土壤调理剂可能会降低土壤修复效率,并对土壤生态系统造成潜在的负面影响^[43]。

土壤调理剂在缓解土传病害方面发挥积极作用,其中,优化土壤调理剂的配比及施用方案至关重要。建议从植物、环境及病原菌等多角度综合考虑调理剂的配方设计,并以退化及多年连作的农田土壤为研究对象,系统评估不同类型土壤调理剂对土壤微生态、农作物产量及品质的影响,从而科学评价土壤改良效果及病害防控能力。在使用策略上,应通过多次试验验证土壤调理剂的有效性与稳定性,并结合联合施用技术,实现协同增效,建立适应不同土壤状况的精准施用体系。在产品研发方面,可从原材料加工的抗菌活性入手,优化生产工艺,以提升其病害防控效果。在实际应用中,还需精准确定最佳施用量及施用时期,以充分发挥土壤调理剂的作用,最大化提升防病增产效果。

参考文献:

- [1] 朱永官,段桂兰,陈保冬,等. 土壤—微生物—植物系统中矿物风化与元素循环 [J]. 中国科学:地球科学, 2014, 44(6): 1107-1116.
- [2] 罗文邃,姚政. 促进根系健康的土壤微生态研究 [J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(1): 44-46.
- [3] LI S L, LIU Y Q, WANG J, et al. Soil Acidification Aggravates the Occurrence of Bacterial Wilt in South China [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 703.
- [4] 朱洪江,王勇,刘东阳,等. 哈茨木霉对烟草青枯病田间控制效果及生物学性状的影响 [J]. 植物医生, 2019, 32(5): 26-31.
- [5] 郑世燕,陈弟军,丁伟,等. 烟草青枯病发病烟株根际土壤营养状况分析 [J]. 中国烟草学报, 2014, 20(4): 57-64.
- [6] 张玲玉,赵学强,李家美,等. 水稻和两种野生植物对酸性硫酸盐土耐性及矿质元素吸收 [J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 403-413.
- [7] 汪汉成,余婧,蔡刘体,等. 温度、湿度、接菌量及 pH 对烟草青枯病菌致病力的影响 [J]. 中国烟草科学, 2017, 38(5): 8-12.
- [8] 赵倩,任广伟,王杰,等. 施用韩国假单胞菌(*Pseudomonas koreensis*)CLP-7 对连作烟田土壤质量及微生物群落功能多样性的影响 [J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5357-5366.
- [9] 查宇璇,冉茂,周鑫斌. 烟田土壤酸化原因及调控技术研究进展 [J]. 土壤, 2022, 54(2): 211-218.
- [10] 朱经纬,李志宏,刘青丽,等. 石灰对酸化黄壤整治烟田土壤酸度的影响及其应用效果 [J]. 中国土壤与肥料, 2016(3): 43-48.
- [11] 薛欣欣,吴小平,王文斌,等. 植物—土壤系统中钾镁营养及其交互作用研究进展 [J]. 土壤, 2019, 51(1): 1-10.
- [12] 李吉秀,朱晓伟,王叶,等. 0.53%瑞香素乳油诱导烟草抗青枯病的效果 [J]. 植物医学, 2023, 2(5): 33-40.
- [13] 陈涛,段廷玉. 丛枝菌根真菌影响植物病害的研究进展 [J]. 草业科学, 2021, 38(6): 1097-1109.
- [14] 张淑婷. 铝离子影响烟草青枯病发生的机制研究 [D]. 重庆:西南大学, 2018.
- [15] 甘林,代玉立,杨秀娟,等. 香蕉抗(感)病品种根系分泌物对枯萎病菌和枯草芽孢杆菌的生物效应 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2279-2286.
- [16] 柯文辉. 烟草连作障碍的根际微生态研究 [D]. 福州:福建农林大学, 2009.
- [17] 李石力. 有机酸类根系分泌物影响烟草青枯病发生的机制研究 [D]. 重庆:西南大学, 2017.
- [18] 杨章明,王姣,李石力,等. 施用外源有机酸对早期烟草青枯病菌的影响 [J]. 植物医生, 2018, 31(10): 41-44.
- [19] 施河丽,谭军,谭绍安,等. 荧光假单胞菌缓解植烟土壤酸化效果及对烟草青枯病的防治作用 [J]. 烟草科技, 2023, 56(2): 19-25.

- [20] 林志坚, 陈长江, 周挺, 等. 青枯菌噬菌体 RPZH6 株系对烟草青枯病的生防效果及全基因组测序分析 [J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(10): 133-142.
- [21] 江其朋, 余佳敏, 王金峰, 等. 土壤理化性质驱动烤烟根际细菌群落的组配及其共现性网络互作 [J]. 微生物学报, 2023, 63(3): 1168-1184.
- [22] 唐朝春, 朱蓓, 许荣明, 等. 金属基吸附剂除砷技术研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2020, 43(10): 221-228.
- [23] 李宝庆, 石亚冰, 凌凡舒, 等. 枯草芽孢杆菌对土壤真菌群落结构及草莓根腐病的调控作用 [J]. 山东农业科学, 2024, 56(6): 81-87.
- [24] 王小彬, 蔡典雄. 土壤调理剂 PAM 的农用研究和应用 [J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 457.
- [25] 胡敏, 向永生, 鲁剑巍. 石灰用量对酸性土壤 pH 值及有效养分含量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2017(4): 72-77.
- [26] 张龙辉, 粟戈璇, 邓小华, 等. 改良剂施用对酸性植烟土壤养分的影响效应 [J]. 中国烟草科学, 2020, 41(5): 20-27.
- [27] 张兰英, 米俊珍, 刘景辉, 等. 秸秆菌施膨润土对旱作农田土壤有机碳及其活性组分的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2023(7): 112-122.
- [28] 巩子毓, 高旭, 黄炎, 等. 连续施用生物有机肥提高设施黄瓜产量和品质的研究 [J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(5): 777-783.
- [29] 孙铭悦. 黄瓜枯萎病生物有机肥的制备及其防治效果研究 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2023.
- [30] 吴红艳, 于森, 冯健, 等. 解磷生物肥对温室土壤磷有效性及辣椒产量的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(10): 189-197.
- [31] 周洋子. 产脂肪类菌株 QHZ-3 对马铃薯黑痣病的生防效果及其机理研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
- [32] 拓阳阳, 江其朋, 江连强, 等. 不同微生物菌剂对烟草青枯病的协同防控效果研究 [J]. 植物医生, 2021, 34(2): 13-17.
- [33] 万小琪, 窦维卉, 杨雪, 等. 不同农艺型措施对温室黄瓜连作土壤的改良效果 [J]. 江苏农业科学, 2022, 50(23): 228-234.
- [34] MEHTA C M, PALNI U, FRANKE-WHITTLE I H, et al. Compost: Its Role, Mechanism and Impact on Reducing Soil-Borne Plant Diseases [J]. Waste Management, 2014, 34(3): 607-622.
- [35] REHMAN R A, RIZWAN M, QAYYUM M F, et al. Efficiency of Various Sewage Sludges and Their Biochars in Improving Selected Soil Properties and Growth of Wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 223: 607-613.
- [36] MÉNDEZ A, CÁRDENAS-AGUIAR E, PAZ-FERREIRO J, et al. The Effect of Sewage Sludge Biochar on Peat-Based Growing Media [J]. Biological Agriculture & Horticulture, 2017, 33(1): 40-51.
- [37] 沈桂花, 刘晓姣, 张淑婷, 等. 牡蛎壳粉对烟草根际土壤微生物代谢多样性及青枯病发生的影响 [J]. 烟草科技, 2017, 50(12): 22-28.
- [38] 张圣炜, 荆永锋, 卓小平, 等. 牡蛎钾粉对烟草生长发育和土壤理化性质的影响 [J]. 植物医生, 2021, 34(6): 19-23.
- [39] 王焱, 张宸, 漆夏燕, 等. 高海拔烟区移栽时间和育苗措施对烟草生长发育及经济性状的影响 [J]. 植物医生, 2021, 34(5): 30-36.
- [40] 李倩, 陈晨, 綦世飞, 等. 牡蛎类土壤调理剂配施复合微生物菌剂对烤烟产量及土壤改良效果的影响 [J]. 植物医学, 2022, 1(5): 71-78.
- [41] 严建辉. 牡蛎壳土壤调理剂对黄泥田花生产量及土壤酸化改良的影响 [J]. 农学学报, 2019, 9(11): 17-20.
- [42] 李长江, 丛海涛, 李青梅, 等. 不同土壤调节剂对新增耕地土壤质量以及玉米产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2023(9): 50-58.
- [43] 成志军, 肖庆驹, 代玉豪, 等. 土壤调理剂对农田镉污染的治理修复研究进展 [J]. 植物医学, 2022, 1(6): 12-19.