

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2026.02.002

土壤调理剂在十字花科根肿病防控中的应用与展望

杨蕊¹, 杜霞², 马乐², 李石力²,
王丹³, 罗雪峰⁴, 况觅⁴, 彭翎凌⁴

1. 四川省南江县植保植检站, 四川 南江 636600;
2. 西南大学 植物保护学院, 重庆 400715;
3. 重庆西农植物保护科技开发有限公司, 重庆 400715;
4. 重庆市农业技术推广总站, 重庆 401121

摘要: 十字花科根肿病是由芸薹根肿菌引起的世界性土传病害, 严重威胁十字花科作物的产量与品质。土壤调理剂作为一种环境友好、可持续的防控手段, 在根肿病治理中展现出重要作用。通过对根肿病发生与土壤物理、化学及微生物环境的关系的综述, 系统阐述了pH调节类、有机物料类、微生物制剂类和海洋生物类等四类土壤调理剂的特点与作用机制, 并梳理了土壤调理剂在根肿病防控中的施用技术及其田间防效。此外, 还探讨了当前研究中存在的问题及未来的发展方向, 以期土壤调理剂在根肿病综合防治中的科学选型与精准应用提供借鉴。

关键词: 十字花科; 根肿病; 土壤调理剂;

绿色防控

中图分类号: S436.3; S156.2 文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2097-1354(2026)02-0012-10

Application and Prospect of Soil Conditioner in Clubroot Management of Cruciferous Crop

YANG Rui¹, DU Xia², MA Le², LI Shili², WANG Dan³,
LUO Xuefeng⁴, KUANG Mi⁴, PENG Lingling⁴

收稿日期: 2025-12-18

基金项目: 重庆市农业产业技术体系“蔬菜创新团队”项目(CQMAITS202506)。

作者简介: 杨蕊, 硕士, 助理农艺师, 主要从事农业病虫害监测与防治工作。

通信作者: 况觅, 研究员。

1. Nanjiang County Plant Protection and Plant Quarantine Station, Nanjiang Sichuan 636600, China;
2. College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400715, China;
3. Chongqing Xinong Plant Protection Technology Development Co. Ltd., Chongqing 400715, China;
4. Chongqing Agricultural Technology Extension Station, Chongqing 401121, China

Abstract: Clubroot disease, caused by the soil-borne pathogen *Plasmodiophora brassicae*, is a worldwide threat to the yield and quality of cruciferous crop. Soil conditioner, as an environmentally friendly and sustainable management approach, plays a significant role in the control of this disease. This review summarizes the relationship between clubroot occurrence and soil physical, chemical, and microbial factors. Additionally, We systematically elucidates the characteristics and underlying mechanisms of four distinct categories of soil conditioners: pH regulators, organic amendments, microbial inoculants, and marine-derived products, while also summarizing their application techniques and field effectiveness in clubroot management. Furthermore, this review addresses the existing challenges in current research endeavors and outlines potential avenues for future exploration, aiming to provide a reference for the scientific selection and precise application of soil conditioners in the integrated control of clubroot disease.

Key words: Cruciferous; clubroot disease; soil conditioner; green control strategy

十字花科蔬菜种类繁多且营养丰富,作为我国重要的种植与消费品类,其种植面积约占全国蔬菜总面积的 1/3^[1]。由芸薹根肿菌(*Plasmodiophora brassicae*)引起的根肿病,是一种危害严重的土传真菌病害,在全球范围内发生^[2]。该病于 1936 年在我国台湾省首次发现,并于 1953 年被确定为植物检疫对象^[3]。迄今为止,根肿病已蔓延至我国 29 个省(自治区、直辖市),年发生面积约占十字花科种植总面积的 1/3,通常导致作物减产 20%~30%,对我国蔬菜生产构成持续重大威胁^[2]。

十字花科根肿病的传统防治以农业与化学方法为主,轮作利用休眠孢子随时间自然衰亡来降低土壤中的菌源量。但研究显示,该菌休眠孢子在土壤中的半衰期长达 3.6 年^[4],所需轮作周期过长。抗病品种选育通过定位基因位点定向改良作物抗性,但根肿菌易发生生理小种变异,这限制了抗病品种的推广与应用^[5]。化学防治见效快,常用药剂有氟啶胺、氰霜唑、多菌灵和百菌清等,长期使用易导致病原菌产生抗药性,引发农药残留和土壤污染,难以持续依赖。根肿病作为典型土传病害,具隐蔽性强、扩散快、危害广和治理难等特点^[6]。常年连作与过度用药导致土壤酸化、自毒物质积累、微生物群落失衡及有机质下降^[2],恶化的土壤环境不仅影响植株健康,也加剧根肿病发生。因此,构建以土壤健康和微生物多样性为基础的长效抑病机制是防病的根本,开发安全、生态且高效的防控技术,对实现土壤可持续利用与绿色蔬菜生产具有重要意义。

广义而言,所有对土壤性状具有改良和调节作用的物质,均可称为土壤调理剂。《肥料和土壤调理剂 术语》(GB/T 6274—2016)^[7]将其明确定义为:用于改善土壤物理和(或)化学性质,及(或)其生物活性的物料。而农业农村部肥料登记评审委员会通过《土壤调理剂 效果试验和评价技术要求》(NY/T 2271—2016)^[8]细化为:土壤调理剂是加入障碍土壤中,用于改善土壤物理、化学和(或)生物性状的物料,具体可应用于改良土壤结构、降低土壤盐碱危害、调节土壤酸碱度、改善土壤水分状况及修复污染土壤等场景。综上可知,土壤调理剂的核心功能在于调节土壤的物理、化学及生物性质,通过优化土壤环境,最终实现作物产量及质量的提升,为优质高效的农业生产活动提供支撑^[9]。

1 十字花科根肿病发生与土壤环境的关系

1.1 土壤环境因子与根肿病发生的关系

芸薹根肿菌是专性活体寄生真菌，寄主范围广泛，可侵染白菜、甘蓝和萝卜等多种十字花科作物^[10]。植株在苗期更易感病，受侵染后根部形成大小不等的肿瘤，影响水分与养分的吸收，导致地上部叶片萎蔫、黄化，严重时整株枯死^[11]。土壤温湿度影响根肿病的发生，温度20~25℃、湿度60%~70%最有利于休眠孢子萌发，病害传播流行速度快^[12]。不同土质中根肿病发生程度存在差异，有研究表明沙壤土与壤土的危害严重高于黏土^[13]，这可能与土壤物理结构有关。由于连作年限长造成土壤板结，团粒结构被破坏，保水透气性变差，直接影响作物的生长发育，降低抗病性，加重病害的发生^[14]。

1.2 土壤理化特性与根肿病发生的关系

pH是根肿病发病的关键因子，在pH值为5.0~6.7的弱酸性土壤中发病严重，pH值>7.2时休眠孢子萌发率显著降低^[15]。土壤中钾、钙、镁、氮等矿物质元素满足植物生长发育需要，同时影响病原菌的侵染^[16]。在长期缺钾的土壤环境中，根肿病发病率降低，钾可能是病原孢子萌发的必需元素^[17]；增施氮肥也会加重油菜根肿病的发生^[18]；钙离子可以诱导宿主发生防御反应，同时研究表明高Ca²⁺浓度可抑制根肿菌孢子萌发，在根毛侵染时期减弱病原菌根系活力^[19]；研究显示镁元素(氧化镁纳米颗粒)可以通过刺激植物防御反应，富集土壤有益细菌来控制根肿病^[20]；单独或按比例配合施用过磷酸钙和镁肥都能有效防治根肿病的发生^[21]。

1.3 土壤微生物与根肿病发生的关系

植物病原菌和土壤微生物群落间存在相互作用。根肿菌作为土传病原菌，其存活状况与根际土壤微生物的关系密切。土壤中一般含有有益菌和有害菌各15%，其余70%为中性菌，它们分解土壤有机质维系土壤碳循环，对于保持土壤肥力、维持健康土壤环境具有关键意义^[22]。有害微生物是引致土传病害的直接因素，病原菌可直接侵入破坏植物细胞或分泌毒素与效应蛋白而干扰植物免疫反应。常年连作、过量施肥等会导致土壤微生态失衡，有益微生物减少，有害微生物趁机大量增殖，病原真菌、病毒和线虫等协同入侵植物，病害随之爆发^[23]。

土壤有益微生物主要通过和病原菌发生竞争、拮抗、重寄生作用以及诱导植物抗性来限制病害发生^[24]。有益菌快速生长，与病原菌争夺空间、水分和铁、氮、钾等营养元素，限制病原菌的繁殖。拮抗菌可以分泌抗生素、细菌素、溶菌酶等次级代谢产物，溶解病原菌的细胞壁或抑制其蛋白质合成，导致病原菌死亡。例如，芽孢杆菌能产生脂肽类抗生素，破坏病原菌细胞膜^[25]。重寄生是指有益菌主动识别、侵入病原菌体内获取营养以维持自身生存，并常以吸附、侵入、消解等方式直接杀伤病原体，从而实现对病原菌的有效抑制，其中木霉是经典的重寄生微生物类群^[26]。同时，有益微生物分泌脂肽、鞭毛蛋白等信号分子，被植物细胞表面受体所识别后激活体内信号传导网络，诱导植物启动自身免疫防御系统。有研究表明，在种植大豆后茬种植油菜，根肿病发病率显著减低，大豆根系分泌物富集芽孢杆菌属、链霉菌属和木霉菌属等根际微生物，可以抑制根肿菌的繁殖^[27]。

影响十字花科根肿病的主要土壤因素如图1所示。

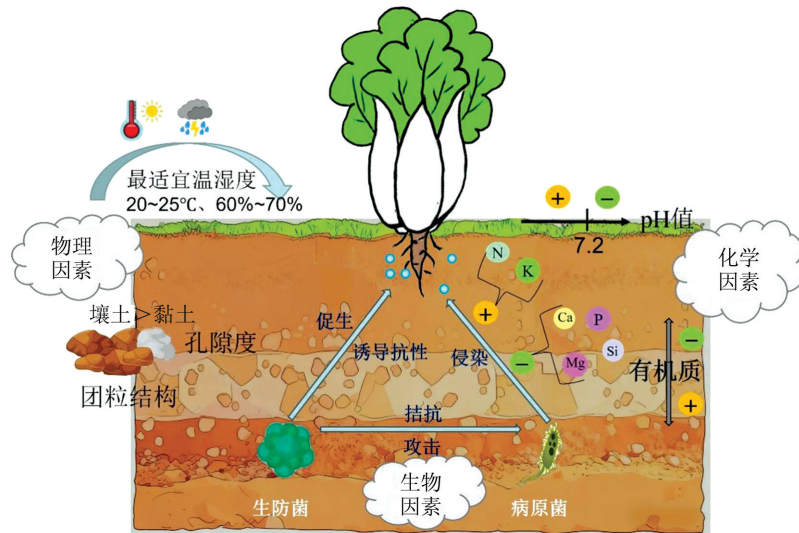


图1 影响十字花科根肿病的主要土壤因素

2 主要土壤调理剂类型及其防控机制

2.1 pH 调节类调理剂

在土壤调理剂中，pH 调节类占据重要地位，常见的有生石灰(CaO)、熟石灰[$\text{Ca}(\text{OH})_2$]、碳酸钙(CaCO_3)以及硅钙肥^[9]。此外，部分工业副产品如钢渣、粉煤灰也可作为此类调理剂使用，但必须对其安全性进行严格评估，以避免对土壤和作物造成不良影响^[28]。该类调理剂的核心机制在于调高土壤 pH 值至中性或微碱性(7.0~7.5)，从而抑制根肿菌休眠孢子的活性，实现病害防控^[2]。部分调理剂中的钙源还能为土壤和作物提供钙素，可增强作物细胞壁强度，提升作物的抗逆性。

2.2 有机物料类调理剂

有机物料类调理剂代表物质丰富，包含腐熟农家肥、商品有机肥、绿肥、植物残体(以秸秆还田为主)、腐植酸类物质以及生物炭^[29]。有机物料类调理剂的作用机制复杂且多元，能从多个维度改善土壤环境。在理化性质方面，它能显著提升土壤有机质含量，改善团粒结构，增强通气性、保水性及酸碱缓冲能力，为作物创造稳定的生长环境^[30]。在微生物调节方面，有机物料类调理剂为有益微生物(如细菌、放线菌等)提供丰富的碳源与能源，促进其繁殖与代谢。这些微生物通过竞争生态位、分泌抗生素与溶菌酶等多种途径抑制根肿菌，并能诱导作物的系统抗性。此外，有机物料在分解过程中可释放酚酸、醛类等天然抑菌物质，直接抑制病原菌活性。同时，其富含的养分元素能促进作物健壮生长，间接增强植株抗病能力，形成生理与生态协同的防控效果^[30]。

2.3 微生物制剂类调理剂

微生物制剂类调理剂主要为含有特定有益微生物的菌剂，常见的有益微生物种类包括木霉菌(*Trichoderma*)、芽孢杆菌(*Bacillus*)、假单胞菌(*Pseudomonas*)以及丛枝菌根真菌(AMF)^[31]。这类菌剂的核心作用机制：一是直接拮抗作用，有益微生物可通过寄生病原菌、产生抗生素或溶菌酶，以及竞争营养物质和生存空间等方式，直接抑制病原菌的生长与繁殖；二是诱导系统抗性，能激活植物自身的防御反应，如系统获得性抗性(SAR)和诱导系统抗性

(ISR)^[26]；三是促进植物生长，有益微生物可分泌吲哚乙酸(IAA)等植物激素，还能通过解磷、固氮等作用促进植物对养分的吸收，增强植株活力^[26]；四是改善根际微生态，调控根际区域的微生物群落结构，使其向对植物生长有益的方向转变^[32]。

2.4 海洋生物类调理剂

我国海洋资源非常丰富，海洋鱼类、甲贝类的产量占总量的 80% 以上，但加工过程中大量富含钙的鱼骨、虾蟹壳、贝壳等成为废弃物^[33]。随着对这些加工副产物的综合应用，以牡蛎壳为代表的海洋生物土壤调理剂得到开发推广。

牡蛎壳是由矿物质、蛋白质和多糖等有机质大分子构成的多重微层结构，主要化学成分为 CaCO_3 ，同时富含 Cu、Fe、Zn、Mn 等 20 多种微量元素^[34]。牡蛎壳煅烧后的牡蛎壳粉，含有丰富的碱性 CaO，可以调节土壤酸度；其特殊的孔隙结构能够提高土壤保水性，改善土壤物理结构；含有大量钙等作物生长所需的元素，能促进作物生长发育^[35]。目前，牡蛎壳粉调理剂用于花生、油菜、水稻等多种作物上，达到改善土壤环境、提高作物产量的功效^[34]。牡蛎壳粉制造工艺简单，产品附加值较低，牡蛎钾土壤调理剂是以牡蛎壳粉为原料研发的复合型物料，其对烟草的生长发育和抗病起到明显的促进作用^[36]。探索原料间的协同/拮抗作用，优化复配方案，是实现牡蛎壳资源高效利用、开发多元化高效土壤调理剂的关键研究方向。

不同种类土壤调理剂的功能和特点如表 1 所示。

表 1 不同种类土壤调理剂的功能和特点

种类	材料来源	功能	优点	缺点
pH 调节类	生石灰、熟石灰、碳酸钙、硅钙肥、钢渣、粉煤灰等	提高土壤 pH 值，增加部分营养元素含量	来源广泛，成本较低	长期使用可能导致土壤酸化、板结，重金属污染
有机物料类	农家肥、豆科绿肥、作物秸秆、生物炭	改善土壤结构，提高有机质含量，促进植物生长	取材方便，成分安全，作用多元	针对性较弱，效果较慢
微生物制剂类	木霉菌、芽孢杆菌、假单胞菌、放线菌等	抑制病原菌繁殖，诱导植物抗性，促进土壤酶活性	功能全面，使用安全	工艺复杂，成本较高
海洋生物类	牡蛎壳、贝壳粉、蟹壳粉等、海藻粉、海藻降解物等	改良土壤结构，补充微量元素，吸附重金属	天然材料，废物利用，节约资源	见效慢，产品参差不齐

3 土壤调理剂在防控十字花科根肿病上的应用效果

3.1 pH 调节类调理剂在十字花科根肿病上的应用

施用石灰后提高土壤 pH 值，显著降低田块中芸薹根肿菌休眠孢子密度，根肿病病情指数低于对照，同时提高植株的株高和产量^[37]。石灰氮的主要成分为氰氨化钙，是一种碱性肥料，有土壤消毒、调节土壤酸化、促进有机质分解、杀虫灭菌等功效^[38]。早在 30 年前，朱本岳等^[39]在大白菜播种前撒施石灰氮，发现对大白菜根肿病防效达 95% 以上。程雨贵等^[40]、杜旭光^[41]、沈文生^[42]分别在不同地区开展了石灰氮在油菜根肿病上的效果研究，结果表明，处理后提高了土壤 pH 值，油菜根肿病的发生率显著降低，油菜增产效果明显。在青菜地分别施用“土沃宝”和“田师傅”两种酸性土壤调理剂后，青菜根肿病的发生率均有显著降低^[43]。施用有机硅肥土壤改良剂后，土壤中根肿病原菌含量显著减少，有效缓解油菜根肿病的发病率^[44]。吴凌云

等^[45]研究了 3 种 pH 值呈碱性的土壤调理剂在花椰菜生产上的应用效果,试验结果显示,处理组的根肿病发病率明显低于对照组,说明酸性土壤调理剂明显提高了花椰菜植株的抗性。

3.2 有机物料类调理剂在十字花科根肿病上的应用

有分析表明,根肿病发生严重的田块中,土壤有机质含量显著低于轻度和中度发病田块^[46]。通过施用有机肥、绿肥等增强土壤肥力,可提高蔬菜的抗病抗逆性来减轻根肿病的发生^[47]。生物炭的碱性特性可以调节土壤 pH 值,其丰富的孔隙结构可以吸附土壤中的重金属,增加保水保肥能力^[48]。在基质中添加生物炭育苗,可降低大白菜根肿病发病率和病情指数^[49]。蚯蚓粪是蚯蚓消化有机废弃物后排泄出的细碎类物质,具有良好的孔性结构,含有多种微生物和丰富的有机质。在油菜地施用蚯蚓粪后土壤酸性显著降低,有机质含量增加,对油菜根肿病的防效显著,油菜产量提高^[50]。

不同有机物料类调理剂在十字花科根肿病上的应用如表 2 所示。

表 2 不同有机物料类调理剂在十字花科根肿病上的应用

种类	施用方法	防控效果
牛羊粪+腐叶土	配制基质育苗	根肿病病情指数较土壤直播降低 21.88%~63.75%
有机肥+农家肥(腐熟猪粪)	作底肥施用	油菜根肿病发病率较施用复合肥降低 19.3%~48.5%
生物炭	配制基质育苗	降低大白菜根肿病病株率和病情指数,最大幅度分别为 60%、91.29%
蚯蚓粪	作底肥施用	对油菜根肿病的防效达 56.3%~61.4%,土壤有机质增加率达 36.4%

3.3 微生物制剂类调理剂在十字花科根肿病上的应用

有益微生物防治十字花科根肿病的研究主要集中在各类单一生防菌。在带菌基质中添加解淀粉芽孢杆菌 Ba168 制剂后育苗,对预防根肿菌引起的倒苗和根部发病均有很好的防治效果^[51]。使用枯草芽孢杆菌可湿性粉剂,用移栽前蘸根、移栽后灌根的方法处理大白菜,对根肿病的防效达到 50%以上^[52]。用添加哈茨木霉的培养基培养白菜,有效提高植株中超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性,根肿病病情指数降低 68%^[53]。何朋杰等^[54]采用叶面喷施枯草芽孢杆菌的方法防治大白菜根肿病,随着喷施次数的增加,病害的发病率和病情指数显著下降,增产效果显著高于化学杀菌剂。

3.4 海洋生物类调理剂在十字花科根肿病上的应用

以牡蛎壳粉为原料的土壤调理剂在十字花科蔬菜的生产中逐渐推广应用。施用牡蛎壳粉土壤调理剂可促进小白菜叶绿素合成,提高小白菜维生素 C 和蛋白质含量,提高小白菜产量,优化农艺品质^[55]。把以牡蛎壳为原料的牡钙酸清土壤调理剂施用作油菜田基肥,能有效提高油菜的生长性状和产量^[56]。施用特贝钙牡蛎壳调理剂,可提高上海青的产量,降低蔬菜中重金属 Cd 和 Pb 的含量,提高蔬菜品质^[57]。将牡蛎壳土壤调理剂施用于卷心菜,可以提高产量,增强土壤微生物多样性,防控青枯病的发生^[58]。在榨菜根肿病发病重的田块条施牡蛎壳粉,能有效提高土壤 pH 值,对根肿病防效达到 35.08%^[59]。牡蛎粉调理剂通过改善土壤理化性状,能提高十字花科蔬菜的产量和品质,进而防控根肿病的发生。

3.5 复合施用效果

十字花科作物根肿病防治难度较大,采取单一的防控措施不一定能达到理想的防病效果。现研究人员逐渐探索新的思路,采用不同土壤调理剂复合使用或结合其他药剂,对根肿病的防

控效果更加显著。

李智强等^[60]在油菜田增施微生物功能菌剂,并结合“施地佳”土壤调理剂灌根,处理后油菜越冬期的根肿病发病率较对常规施肥组平均降低 15.26%。胡韬等^[61]探索了一种苕蓝根肿病绿色防控技术,用主要成分为 CaO 的酸性土壤调理剂撒施+枯草芽孢杆菌蘸根+枯草芽孢杆菌和 S-诱抗素混合液灌根的方法,防效达到 78.08%,显著高于常规化学药剂防效,苕蓝产量提高了 82.08%。高宇等^[62]在常年种植青菜、根肿病发生重的地块上使用不同浓度的枯草芽孢杆菌作为基肥,配合追施氮磷钾复合肥料,结果表明施用微生物菌剂的地块较单使用肥料的地块青菜根肿病发病率有所降低。袁杭杰等^[63]将 3 种不同微生物菌剂与土壤消毒剂配施,较单独处理可以进一步降低小白菜根肿病的发病率,采用最佳比例防效可达 100%。解国玲^[16]开展生物炭和微生物对根肿病的协同效应研究,设置了生物炭+哈茨木霉(HZ)、生物炭+枯草芽孢杆菌(BS)以及生物炭+哈茨木霉+枯草芽孢杆菌(BHS)等不同处理,研究表明微生物菌剂结合生物炭施用显著降低了土壤中芸薹根肿菌休眠孢子含量,处理效果显著优于微生物菌剂或生物炭单施处理,连续两茬 HBS 处理对白菜根肿病的平均防治效果达 73.84%,较其余处理高出至少 22.5%。

4 总结与展望

近年来,土壤调理剂在十字花科根肿病绿色防控中的应用研究取得显著进展。pH 调节型调理剂可改善土壤酸性,抑制根肿菌孢子萌发;有机物料类调理剂能提升土壤肥力,促进作物健康生长;微生物制剂调理剂则通过调节根际微生态,增强作物抗病能力。不同类型调理剂以各自作用方式在防控中展现出良好效果。

在土壤调理剂防控十字花科根肿病的研究领域,目前呈现出多维度、系统化的发展态势,主要体现为以下 4 个特点。一是单一调理剂的研究与应用已较为成熟。以石灰为代表,其作用机理与适用条件已较为明确,因效果显著而在生产中广泛应用。二是有机物料类与微生物制剂类调理剂成为当前研究热点。学者正深入揭示其在改善土壤理化性质、直接抑制病原菌等方面的具体作用途径。三是复合或协同应用研究日益增多。例如“石灰+有机肥”“有机肥+微生物菌剂”等组合模式,在实践中展现出协同增效的潜力,可实现更全面的病害防控。四是研究视角趋向长期与生态化。开始重点关注长期施用调理剂对土壤健康状况及微生物群落结构的综合影响,致力于统筹防控效果与土壤可持续利用。

当前,土壤调理剂在防控十字花科根肿病的研究与应用中仍面临多重挑战。首先,效果稳定性仍是突出问题。微生物制剂在田间的防效易受温湿度等环境因素干扰,表现不稳定;而有机物料的长期施用效果及其对根肿菌微进化产生的潜在影响,需系统评估。其次,成本与适用性制约推广。部分高效制剂(如特定微生物菌剂、高品质生物炭)价格较高,限制了其大面积使用;石灰等大宗物料则在偏远地区面临运输与施用成本高的难题。再次,精准调控技术尚未成熟。如何依据田块间的土壤 pH、有机质含量、病原菌基数等差异,结合作物种类,推荐匹配的调理剂组合、用量与施用方案,是实现高效防控的关键瓶颈。此外,作用机制复杂,尤其有机与微生物类调理剂涉及多因子、多过程的交互,全面解析其防控路径难度较大。最后,标准化与评价体系缺失,缺乏统一的防效评价标准与土壤健康的长期监测指标,阻碍了成果的有效推广与应用。

在土壤调理剂防控十字花科根肿病的研究领域,未来将朝着多维度、系统化的方向深入发

展。产品研发将聚焦于高效、多功能与低成本并重。一方面,积极筛选创制新型复合调理剂,开发高效稳定的微生物菌株,探索工程菌的应用潜力;另一方面,充分利用工农业废弃物资源,研制经济实用的调理材料。机制研究将借助多组学技术,深入解析抑病土壤形成机制,揭示有机物料类和微生物制剂类调理剂调控根际微生态与植物免疫的分子网络,为精准应用提供理论依据。协同效应研究将系统探讨物理、化学及生物类调理剂的最佳组合模式与施用技术,力求实现“1+1>2”的防控效果。精准施用技术将融合土壤快速检测、地理信息系统与模型预测,构建基于土壤健康与病害风险的精准推荐系统,实现调理剂的按需施用。生态安全评估将重点关注长期施用调理剂对土壤重金属、微生物多样性及生态功能的潜在影响,确保防控措施的可持续性。综合防控体系建设将整合土壤调理剂与抗病品种、合理轮作、生态调控及水分管理等要素,构建绿色高效的根肿病 IPM 体系。此外,还需加强技术推广与政策支持,研发配套的轻简化施用技术,加大示范推广力度;同时争取政策扶持,降低农民的采用成本,推动研究成果更好地转化为实际生产力。

参考文献:

- [1] 康华军. 十字花科蔬菜根肿病抑病土壤特征和生防菌微胶囊的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2024.
- [2] 韩哲, 潘凯, 毕洪文, 等. 十字花科根肿病的发生与防治概述[J]. 园艺与种苗, 2023, 43(8): 38-40, 55.
- [3] 王华夫. 从佳木斯地区发现十字花科蔬菜根肿病谈目前该病在我国的发生情况[J]. 东北农学院学报, 1962(2): 47-48.
- [4] 章艺, 马新焱, 余红瑞, 等. 十字花科作物根肿病综合防治研究进展[J]. 中国蔬菜, 2022(10): 27-37.
- [5] 余方伟, 张伟, 李建斌, 等. 十字花科作物根肿病研究进展[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(15): 1-8.
- [6] 曹焯程, 张大琪, 方文生, 等. 土传病害防治技术进展及面临的挑战[J]. 植物保护, 2023, 49(5): 260-269.
- [7] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 肥料和土壤调理剂 术语(GB/T 6274—2016)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [8] 中华人民共和国农业农村部. 土壤调理剂 效果试验和评价要求(NY/T 2271—2016)[S]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
- [9] 索琳娜, 马杰, 刘宝存, 等. 土壤调理剂应用现状及施用风险研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1141-1149.
- [10] NEUHAUSER S, KIRCHMAIR M, GLEASON F H. The Ecological Potentials of *Phytophthora* (“Plasmodiophorids”) in Aquatic Food Webs[J]. *Hydrobiologia*, 2011, 659(1): 23-35.
- [11] 王丹, 唐元满, 赖婷, 等. 甘蓝根肿病菌生理小种鉴定及生物学特性研究[J]. 植物医学, 2024, 3(3): 51-60.
- [12] 周俊. 十字花科作物根肿病发生规律及防治[J]. 植物医生, 2011, 24(6): 42-43.
- [13] ZAMANI-NOOR N. Variation in Pathotypes and Virulence of *Plasmodiophora brassicae* Populations in Germany[J]. *Plant Pathology*, 2017, 66(2): 316-324.
- [14] 郭文忠, 刘声锋, 李丁仁, 等. 设施蔬菜土壤次生盐渍化发生机理的研究现状与展望[J]. 土壤, 2004, 36(1): 25-29.
- [15] 肖崇刚, 郭向华. 甘蓝根肿病菌的生物学特性研究[J]. 菌物系统, 2002, 21(4): 597-603.
- [16] 解国玲. 微生物菌剂结合生物炭施用对白菜根肿病防控效果研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2022.
- [17] ZHANG C Y, DU C Y, LI Y W, et al. Advances in Biological Control and Resistance Genes of Brassicaceae Clubroot Disease—the Study Case of China[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(1): 785.
- [18] 胡琼, 郑东影, 汪春, 等. 油菜根肿病发病条件初探[J]. 江西农业大学学报, 2014, 36(4): 766-771.
- [19] 班洁静. 土壤含水量、pH、Ca²⁺浓度对芸苔根肿菌侵染及发病影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [20] LIAO J J, YUAN Z T, WANG X M, et al. Magnesium Oxide Nanoparticles Reduce Clubroot by Regulating

- Plant Defense Response and Rhizosphere Microbial Community of Tumorous Stem Mustard (*Brassica juncea* var. *tumida*) [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15: 1370427.
- [21] 张赛莉, 宋洪元, 任雪松, 等. 钙镁硫元素与甘蓝根肿病抗性关系的分析[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2016, 38(9): 41-45.
- [22] 陈娟妮, 李姗蓉, 况觅. 影响蔬菜连作病害发生的土壤因子[J]. *植物医学*, 2025, 4(4): 28-37.
- [23] 刘烈花. 利用土壤微生物多样性控制十字花科根肿病的研究进展[J]. *植物医生*, 2020, 33(5): 32-35.
- [24] 李金鞠, 廖甜甜, 潘虹, 等. 土壤有益微生物在植物病害防治中的应用[J]. *湖北农业科学*, 2011, 50(23): 4753-4757.
- [25] AYDI BEN ABDALLAH R, MOKNI-TLILI S, NEFZI A, et al. Biocontrol of Fusarium Wilt and Growth Promotion of Tomato Plants Using Endophytic Bacteria Isolated from *Nicotiana glauca* Organs [J]. *Biological Control*, 2016, 97: 80-88.
- [26] 郭俊, 刘芑, 张天焯, 等. 微生物在作物土传病害防控中的功能及应用[J]. *植物保护*, 2025, 51(5): 122-130.
- [27] YANG X X, HUANG X Q, WU W X, et al. Effects of Different Rotation Patterns on the Occurrence of Clubroot Disease and Diversity of Rhizosphere Microbes [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(9): 2265-2273.
- [28] 梁师英, 赵锦慧, 李海燕. 电厂粉煤灰作为碱化土壤改良剂的风险分析[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(34): 16945-16947.
- [29] 韩小霞. 土壤结构改良剂研究综述[J]. *安徽农学通报*, 2009, 15(19): 110-112.
- [30] 尹万伟, 黄本波, 汪凤玲, 等. 土壤调理剂的研究现状与进展[J]. *磷肥与复肥*, 2019, 34(2): 19-23.
- [31] 陈廷钦. 土壤调理剂及应用进展[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2011, 33(S1): 338-342.
- [32] 崔中利, 叶现丰, 张宇, 等. 根际微生物组组装与植物健康[J]. *微生物学杂志*, 2022, 42(6): 1-9.
- [33] 叶剑, 徐仰丽, 张井, 等. 海洋生物钙的开发利用研究进展[J]. *中国海洋药物*, 2021, 40(5): 71-78.
- [34] 曹敏杰, 丁希月, 许玲玲, 等. 牡蛎壳资源利用研究进展[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2021, 26(5): 390-397.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] HWANG S F, STRELKOV S E, GOSEN B D, et al. Soil Treatments and Amendments for Amelioration of Clubroot of Canola [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2011, 91(6): 999-1010.
- [38] 王秀娟, 董环, 韩瑛祚, 等. 石灰氮对设施酸化土壤的调控作用及番茄产量的影响[J]. *北方园艺*, 2023(16): 78-86.
- [39] 朱本岳, 叶志翔, 欧阳航, 等. 石灰氮药肥对大白菜根肿病防治效果的研究[J]. *浙江农业科学*, 1995(6): 300-301.
- [40] 程雨贵, 童玥, 方华明, 等. 氰氨化钙在油菜上的施用效果分析[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(17): 4444-4446.
- [41] 杜旭光. 油菜根肿病土壤调理防治试验初报[J]. *基层农技推广*, 2020, 8(9): 22-24.
- [42] 沈文生. 石灰氮在油菜根肿病上的应用效果研究[J]. *现代农业科技*, 2021(19): 118-119.
- [43] 白颂华, 倪进庄, 潘浩亮, 等. 2种酸性土壤调理剂在设施蔬菜上的应用效果比较[J]. *浙江农业科学*, 2025, 66(6): 1385-1388.
- [44] 白亭亭, 杨佩文, 李向东, 等. 不同措施对十字花科作物根肿病控制效果研究[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(4): 731-735.
- [45] 吴凌云, 张明来. 花椰菜施用不同土壤调理剂试验初报[J]. *福建农业科技*, 2020, 51(2): 63-65.
- [46] 闫玉芳, 蒋欢, 董代文, 等. 感染根肿病的茎瘤芥土壤氮磷钾及有机质含量分析[J]. *西南农业学报*, 2018,

- 31(9): 1825-1828.
- [47] 陈翰秋. 不同基质对十字花科蔬菜根肿病防治效果的影响[J]. 现代农业科技, 2015(19): 140-141.
- [48] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324-3333.
- [49] 赵倩雯. 生物炭对大白菜幼苗生长及根肿病的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- [50] 王胜, 郑仕军, 沈丽, 等. 蚯蚓粪对油菜根肿病的控制效果评价[J]. 西南农业学报, 2010, 23(6): 1910-1913.
- [51] 王保通, 陈宏, 申雪雪, 等. 解淀粉芽孢杆菌 Ba168 防治十字花科根肿病效果研究[J]. 陕西农业科学, 2016, 62(2): 39-41.
- [52] 夏丽娟, 郑纪英, 赵霞, 等. 枯草芽孢杆菌可湿性粉剂对大白菜根肿病防效的研究[J]. 农药科学与管理, 2016, 37(6): 44-47.
- [53] GULZAR S, HAMEED M K, LIAQUAT F, et al. Differentiation of Clubroot Disease Suppression in Pak Choi under Different Concentrations of *Trichoderma harzianum* and Fluazinam[J]. Plant Growth Regulation, 2024, 103(3): 705-720.
- [54] 何朋杰, 崔文艳, 何鹏飞, 等. 叶面喷施枯草芽孢杆菌 XF-1 防治大白菜根肿病[J]. 植物保护, 2019, 45(1): 104-108.
- [55] 颜墩炜, 黄强, 陈海玲, 等. 牡蛎壳粉土壤调理剂对土壤理化性质及小白菜农艺性状和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(7): 88-94.
- [56] 朱爱玲. 不同用量的牡钙酸清在油菜施用效果分析与探讨[J]. 中国农业文摘(农业工程), 2023, 35(1): 26-30.
- [57] 陈勇红. 特贝钙土壤调理剂在南方红壤区蔬菜上的应用效果[J]. 东南园艺, 2019, 7(4): 1-5.
- [58] LEE C H, LEE D K, ALI M A, et al. Effects of Oyster Shell on Soil Chemical and Biological Properties and Cabbage Productivity as a Liming Materials[J]. Waste Management, 2008, 28(12): 2702-2708.
- [59] 刘烈花, 丁伟. 3 种土壤改良剂对榨菜根肿病的防治效果和根际微生物的影响[J]. 植物医生, 2021, 34(3): 19-25.
- [60] 李智强, 李慧文, 陆瑶, 等. 微生物菌剂及施地佳土壤调理剂防治油菜根肿病试验[J]. 农村科技, 2019(6): 35-37.
- [61] 胡韬, 徐翔, 贾刚, 等. 苜蓿根肿病全程绿控技术的田间应用效果[J]. 中国植保导刊, 2020, 40(10): 53-55.
- [62] 高宇, 陈勇, 张振媛, 等. 不同用量微生物菌剂与复合肥料配合施用在青菜上的应用效果[J]. 蔬菜, 2024(12): 65-69.
- [63] 袁杭杰, 粟贵俊, 杨文叶, 等. 不同微生物菌剂与土壤消毒剂配施对土壤微环境的影响[J]. 中国农学通报, 2025, 41(10): 109-114.

责任编辑 杨光明