



徐大兵,李托,彭成林,等. 土壤 pH 值影响生物有机肥消减连作障碍效果的研究进展[J]. 南京农业大学学报,2026,49(5):1008-1020.
Xu D B,Li T,Peng C L,et al. Research progress on the effect of soil pH on the reduction of continuous crop interference by bio-organic fertilizers[J].
Journal of Nanjing Agricultural University,2026,49(5):1008-1020.

特约综述

土壤 pH 值影响生物有机肥消减连作障碍效果的研究进展

徐大兵¹,李托²,彭成林¹,徐祥玉¹,佘国涵¹,刘威¹,童丽莎¹,宋洁¹,赵书军^{1*}

(1.湖北省农业科学院植保土肥研究所,湖北 武汉 430014;2.南京农业大学资源与环境科学学院,江苏 南京 211800)

摘要:连作障碍严重制约我国农业可持续发展,生物有机肥虽被视为最具前景的消减技术,但实践中“同肥不同效”问题突出,究其根本原因在于对土壤关键调控因子认知不足。本文系统梳理生物有机肥在酸性、中性及碱性土壤中的差异化效应,提出土壤 pH 值是决定其消减效果的“元调控因子”,并构建了“功能菌定殖—养分形态转化—微生物群落组装”三重网络化机制框架。生物有机肥效果随 pH 值呈“倒 U 型”变化特征:酸性土壤边际效益最高但强酸抑制定殖,中性土壤稳定性最佳但显效空间有限,碱性土壤则从“化学改良”转向“生态重构”的机制转变。本文将 pH 值从背景变量升格为核心调控变量,揭示 pH 值影响肥效的非线性、网络化本质。本文提出以 pH 值为“第一考量指标”的分区精准施用策略,为破解生物有机肥“因土施策”的理论空白和连作障碍绿色防控提供了系统框架与技术方向。

关键词:土壤 pH 值;生物有机肥;连作障碍;微生物群落;土壤改良

中图分类号:S154;S144

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2026)05-1008-13

Research progress on the effect of soil pH on the reduction of continuous crop interference by bio-organic fertilizers

XU Dabing¹,LI Tuo²,PENG Chenglin¹,XU Xiangyu¹,SI Guohan¹,
LIU Wei¹,TONG Lisha¹,SONG Jie¹,ZHAO Shujun^{1*}

(1.Institute of Plant Protection and Soil and Fertilizer,Hubei Academy of Agricultural Sciences,Wuhan 430014,China;
2.College of Resources and Environmental Sciences,Nanjing Agricultural University,Nanjing 211800,China)

Abstract: Continuous cropping obstacles seriously constrain the sustainable development of agriculture in China. Although bio-organic fertilizer (BOF) is considered the most promising alleviation technology, the widespread phenomenon of “same fertilizer, different efficacy” in practice highlights an insufficient understanding of key soil regulatory factors. This review systematically examines the differentiated effects of BOF in acidic, neutral, and alkaline soils, and for the first time explicitly proposes that soil pH value serves as the “master regulatory factor” determining the efficacy of BOF in alleviating continuous cropping obstacles. We construct a triple network-based mechanistic framework encompassing “functional microbial colonization—nutrient transformation—microbial community assembly”. The results reveal that BOF efficacy exhibits an “inverted U-shaped” distribution along the soil pH gradient; the marginal benefits are highest in acidic soils, but strong acidity suppresses colonization; neutral soils offer the best stability yet limited room for efficacy expression; and in alkaline soils, the mechanistic pathway shifts from “chemical amelioration” to “ecological reconstruction”. The innovation of this review lies in elevating pH from a background variable to a core regulatory variable, and in revealing the nonlinear and network-based nature of pH-mediated effects on BOF performance. Accordingly, we propose a pH-based zonal precision application strategy with pH as the “primary indicator”, providing a systematic theoretical framework and technical directions for addressing the knowledge gap in site-specific BOF application and for the green prevention and control of continuous cropping obstacles.

Keywords: soil pH value; bio-organic fertilizers; re-planting problem; microbial community; soil improvement

连作障碍每年造成我国数百亿元经济损失,已成为制约农业可持续发展的关键瓶颈。现有消减技术虽多,但轮作、熏蒸等单一措施均存在局限性,生物有机肥因兼具改良土壤与调控微生态的双重优势,被视为最具前景的绿色路径。然而,实践中“同肥不同效”现象频出,同一产品在不同土壤中效果迥异,其根本

收稿日期:2026-05-28

基金项目:湖北省技术创新计划项目(2025BBA003)

作者简介:徐大兵,副研究员,研究方向为农业废弃物资源化利用和土壤改良与修复,E-mail:xudb@hbaas.com。*通信作者:赵书军,研究员,研究方向为土壤肥料,E-mail:524754199@qq.com。

原因在于对土壤关键调控因子的系统性认知不足。近年研究表明,土壤 pH 值不仅直接决定功能菌的定殖与活性,还通过调控养分形态转化和微生物群落组装,间接影响生物有机肥的整体效果。本文首次将 pH 值从背景变量提升为“元调控因子”,系统比较酸性、中性和碱性土壤中生物有机肥的差异化效应,揭示三重调控机制,并提出以 pH 值为第一考量指标的生物有机肥精准施用策略,为连作障碍消减技术的理论完善与实践优化提供系统支撑。

1 连作障碍成因与机制

连作障碍是指在同一块土地上连续种植同种或近缘作物时,即使在正常栽培管理条件下,也会出现作物生育异常、产量下降、土传病害频发等现象^[1],且多见于经济作物种植,已成为我国农业可持续发展的重要制约因素^[2],每年造成数百亿元经济损失,严重影响我国农产品的安全供给。连作障碍的形成是土壤理化性质、微生物群落、作物自身代谢等多因子协同作用的结果,核心机制可归纳为 4 个方面:1) 土壤理化性质恶化。长期连作导致土壤最易发生酸化,主要源于过量施用酸性化肥导致酸根离子(NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^-)积累、根系分泌有机酸、微生物代谢产生酸性物质及盐基离子流失^[3]。在露地种植方面,长期连作导致土壤 pH 值从 1980 年的 7.06 降至 2020 年的 5.13,花生减产 20% 以上,严重地块近乎绝收^[4]。2) 土壤养分失衡。作物对养分的选择性吸收与长期缺乏平衡施肥,导致氮、磷、钾大量元素盈余,而钙、镁、锌、硼等中微量元素亏损^[5]。此外,还会出现元素拮抗现象,如钾离子过量抑制镁离子吸收,当 K/Mg 值大于 10:1 时作物出现缺镁黄叶,进一步加剧土壤肥力衰退与作物营养失衡^[6]。在酸性土壤连作条件下,养分失衡问题更为突出,氢离子与磷酸根结合形成难溶性磷酸盐,导致有效磷含量降低,同时抑制钙、镁等中微量元素的吸收利用,进一步加剧作物营养胁迫^[7]。3) 微生物群落失衡。连作促使土壤微生物区系由“细菌型”向“真菌型”劣变^[8],有益菌数量减少,而尖孢镰刀菌、青枯病菌等病原微生物大量富集^[8],土传病害频发,破坏土壤微生态平衡^[5]。4) 化感自毒作用。作物根系分泌的酚酸类、苯甲酸类等有害物质持续积累,抑制自身根尖细胞分裂与根系活力,同时诱导植物抗性酶活性下降,形成“自毒物质恶性循环”,进一步加剧连作障碍^[5]。化感自毒物质通过改变根系形态来影响烟草对土壤养分的吸收^[9]。相关研究表明,不同作物连作障碍的主导因素存在显著差异,但土壤质量退化是共性核心因素,且这些因素往往相互叠加,难以明确区分,同时也导致防控难度的进一步增加。

2 连作障碍主要消减技术

针对连作障碍的形成机制,国内外已研发出多种消减技术,主要包括农艺调控、生物防治和化学物理调控等,各类技术各有优劣与适用场景,实际应用中应形成优化组合的综合模式。

农艺调控技术是最基础、最经济的消减和改良手段,主要包括轮作和间套作。不同科属作物轮作可改善土壤养分失衡,调控土壤微生物群落结构。首先,轮作可以切断化感自毒物质的“持续输入源”,减少其在土壤中的积累。其次,轮作有助于激活土壤微生物的“降解功能”,加速化感自毒物质转化^[10]。间套作作为典型的复合种植模式,其消减化感自毒物质的核心逻辑是借助伴生作物的生理特性、根际微环境调控及资源竞争替代效应来缓解自毒现象^[11]。间套作的间接消减作用并非“单一机制”,而是间接通过“根际微环境调控-根际微生物群落结构重组-温光水气热等资源优化”的多维度协同作用,从“减少产生、加速降解、削弱活性、稀释浓度”4 个层面,打破化感自毒物质“产生-积累-危害”的循环^[12]。绿肥作为主要的间套作、轮作作物,主要通过提升土壤肥力(增加有机质与速效养分)和重塑根际微生态来消减连作障碍,一方面通过绿肥翻压改善土壤理化性质,另一方面通过富集有益菌群并抑制病原菌来重建健康的微生物群落^[13]。生物炭缓解连作障碍的核心在于物理吸附、化学改良与生物调控的三重协同,一方面通过多孔结构吸附化感自毒物质并改善土壤理化性质,另一方面重塑根际微生态,从而修复连作的土壤环境^[14]。秸秆还田主要通过提升土壤肥力和重塑健康的微生物群落来缓解连作障碍,但该效应存在时间依赖性,长期持续还田才能发挥正面效应^[15]。

化学物理调控技术可快速缓解连作障碍,主要包括土壤消毒和调理剂施用等。土壤熏蒸(如棉隆、威百亩)和土壤消毒(如石灰氮消毒、高温高湿灭菌、化学药剂消毒)可快速杀灭土壤病原菌、线虫等有害生物,还能杀灭杂草种子等,短期内消减效果显著^[16]。但同时也杀灭土壤有益微生物,破坏土壤结构,且消毒后土壤微生态恢复缓慢。土壤调理剂可调节土壤 pH 值、吸附土壤化感自毒物质和改善土壤结构,其中

生石灰和白云石粉等碱性调理剂可有效缓解酸性土壤酸化问题。

生物防治技术是近年来发展最快、最具生态效益的消减技术,主要包括生物有机肥和微生物菌剂等应用。其中,微生物菌剂可直接靶向抑制病原菌,但受土壤环境和施用方式等影响较大,单独应用效果不稳定。生物有机肥凭借“培肥+抑病”双重功效,成为生物防治技术的核心,主要通过功能微生物的定殖与繁殖,实现病原微生物的拮抗和土壤微生态的调控,同时补充土壤有机质和调节土壤理化性质,最终消减连作障碍^[17]。

综合来看,各类消减技术均存在局限性,单一技术难以实现连作障碍的彻底消减(表 1)。相比之下,生物有机肥集有机质补充、养分供应与有益微生物于一体,兼具改良土壤结构与调控微生物群落双重功能,成为最具应用前景的绿色技术路径之一,在不同 pH 值土壤、不同作物连作系统中均有广泛应用前景。

表 1 不同消减技术核心机制和土壤适配性

Table 1 Core mechanisms and soil suitability of different reduction technologies

技术类别 Technical category	具体措施 Specific measures	土壤适配性 Soil suitability			主要局限性 Main limitations	核心机制 Core mechanisms
		酸性土壤 Acidic soil	中性土壤 Neutral soil	碱性土壤 Alkaline soil		
农艺 调控	轮作/间套作	极高	极高	高	周期长、见效慢	重在“防”,切断源头,改善环境
	间套作绿肥	高	极高	中等	碱性土壤中部分绿肥适应性差,翻压后矿化快	重在“防”,切断源头,改善环境
	生物炭	高	极高	中等	碱性土壤中可能进一步升高 pH 值,且效果依原料和热解温度	重在“养”,改良土壤结构
	秸秆还田	高	极高	中等	碱性土壤中秸秆腐解慢,短期化感物质释放风险	重在“养”,改良土壤结构
化学 物理 调控	石灰/白云石粉	极高	较低	低	碱性土壤中施用,加剧 pH 值升高	重在“调”,调节酸碱度
	硫磺/石膏	低	较低	高	碱性土壤应用效果较好	重在“调”,调节酸碱度
	土壤熏蒸消毒	中等	中等	中等	广谱杀伤,破坏所有微生物,消毒后微生态恢复缓慢	重在“杀”,杀灭病原
生物 防治	微生物菌剂	较低	高	较低	单一菌株受土壤 pH 值、水分等环境因子制约,定殖不稳定	重在“抗”,直接抑制病原菌
	生物有机肥	极高	极高	高	酸性/中性土壤效果优异,碱性土壤中功能菌活性受限	“养+抗”一体化,兼顾长效培肥与靶向抑病

生物有机肥消减连作障碍的核心机制在于:有机质输入改善土壤团聚体结构,为微生物提供碳源与栖息生境^[18];功能菌株通过营养竞争和拮抗代谢等机制抑制病原菌增殖^[19]。然而,“同肥不同效”的现象日益引起关注,同一配方的生物有机肥在不同土壤条件下效果迥异,甚至在同一区域不同田块间也存在显著差异。

影响生物有机肥效果的因素众多,原料来源决定影响功能菌株的定殖,功能菌株特性影响定殖竞争力,施用方式与用量关乎经济成本。生物有机肥的原料来源多样,其本身的性质受原料影响,进而对土壤 pH 值产生截然不同的效果。不同畜禽粪便堆肥的理化性质不同,猪粪和鸡粪堆肥的 pH 值低于羊粪和牛粪堆肥^[20]。全球尺度荟萃分析表明,秸秆还田导致土壤 pH 值显著下降^[21]。研究表明,原料来源是决定生物有机肥对土壤 pH 值影响方向和强度的首要因素,是造成产品异质性的根本原因之一^[22]。

除有机质载体外,所添加的功能微生物种类是决定生物有机肥功能差异的另一个核心因素。不同菌株的代谢特征及其对环境的适应性,导致其在土壤中发挥的作用截然不同。芽胞杆菌属与假单胞菌属这两类细菌在改善土壤性质方面表现突出。然而,即便是同属芽胞杆菌,不同菌株的活性也高度依赖环境 pH 值^[23]。木霉属作为益生真菌,木霉具有独特的产酸能力。研究表明,木霉属和芽胞杆菌属能产生有机酸,在降低土壤 pH 值方面具有重要作用^[24]。这一特性使其在改良苏打碱土方面具有很大的潜力。链霉菌属作为放线菌的代表,其功能也备受关注。在连作番茄的对比试验中,单独施用放线菌型链霉菌生物有机肥能够改良土壤和提高番茄产量^[25]。这些实例清晰地表明,不同功能菌株通过不同的代谢途径影响土壤环境,其对 pH 值的响应和调控作用存在本质区别。生物有机肥并非一类性质均一的产品,其在 pH 值调控方面的表现是原料与菌株共同作用的结果。

然而,在诸多因素中土壤 pH 值正逐渐被认识到是一个“元调控因子”。它不仅直接决定功能微生物的存活与代谢活性,还通过影响养分形态转化和病原菌生态位宽度等途径,间接反映整个土壤微生态对生物有机肥的响应^[26]。然而,现有研究多在单一土壤类型上开展效果验证,缺乏将 pH 作为核心变量系统解析其调控机制的工作。

基于此,本文尝试讨论 3 个层次的问题:不同 pH 值土壤中生物有机肥消减连作障碍的效果呈现怎样的分异规律? pH 值通过何种机制调控这些效果差异?如何基于 pH 值调控原理优化施肥策略?通过系统梳理已有研究,揭示 pH 值调控的内在逻辑,为生物有机肥的精准化应用提供理论依据。

3 不同 pH 值土壤中生物有机肥应用效果的研究现状

我国土壤类型丰富,pH 值分布差异显著,从南至北呈现“酸性—中性—碱性”的分布规律,南方多酸性土壤(如红壤、黄壤),北方多碱性土壤(如盐碱土、褐土),中部地区多中性土壤(如潮土)。不同 pH 值土壤的理化性质、微生物群落结构、养分形态差异显著,导致生物有机肥消减连作障碍的效果、作用路径及存在问题存在明显差异(图 1)。

3.1 酸性土壤:“调酸+抑病+培肥”协同效应

我国南方红壤、黄壤及设施蔬菜土壤普遍呈酸性,其中设施连作土壤酸化尤为严重,部分大棚土壤 pH 值甚至降至 3.6~5.5^[27]。Fan 等^[28]基于全球 124 篇文献的 Meta 分析表明,在酸性土壤(pH<6.0)条件下,生物有机肥(bio-organic fertilizer,BOF)可提高酸性土壤 pH 值 6.32%,普通有机肥(organic fertilizer,OF)提高 8.52%,二者差异不显著。当 pH 值为 6~8 时,施用有机肥料仍能提高土壤 pH 值,但与 pH<6 时相比,提高幅度较小。

酸性土壤连作障碍呈现复合特征:低 pH 值对作物根系产生直接伤害,铝、锰毒害加剧。在红壤番茄连作田,施用生物有机肥可显著降低土壤交换性氢离子与铝离子含量,减少土壤酸化对作物根系的损伤,提升根系活力^[29]。茶树连作茶园施用生物有机肥后,土壤 pH 值由 4.2~4.5 提高至 4.8~5.2,虽然仍处于酸性范围,但铝毒和锰毒危害明显减轻^[30]。

酸化环境选择性富集镰刀菌等嗜酸病原菌,同时导致抑病功能有益菌群丰度下降。在酸性红壤黄瓜连作田中,施用芽胞杆菌型生物有机肥可显著降低尖孢镰刀菌数量,进而有效降低黄瓜枯萎病发病率。此外,酸化土壤中磷素养分的固持能力减弱,其有效性因被铁、铝氧化物固定而进一步降低。叶面喷施和根系浇灌含解磷菌的生物有机肥可显著提高柑橘园土壤 pH 值 0.3~0.5 个单位,有效磷含量 15%~25%,柑橘果实产量和品质显著改善^[31]。此外,生物有机肥还能缓解化感自毒作用,从而增强作物抗逆性。当季盆栽试验可以看出,施用液体生物有机肥(225~675 kg·hm⁻²)主要通过改善土壤生化环境,增强作物对酚酸胁迫的抵抗能力^[32]。

生物有机肥在酸性土壤中的应用效果最为显著且机制多元。3 年定位试验结果表明施用生物有机肥使土壤 pH 值从 5.4 提升至 6.0,有机质含量从 10.4 g·kg⁻¹增至 22.5 g·kg⁻¹,青枯病相对防效达 67.9%,黑胫病防效达 66.7%^[33]。这一效果主要是基于“调酸—增碳—优菌”的综合路径,生物有机肥中碱性物质中和部分酸度,有机质矿化消耗质子,活性有机碳输入刺激有益微生物增殖。

值得注意的是,在酸性土壤中,应用生物有机肥对 pH 值的提升幅度通常仅 0.5~1.0 个单位,难以达到多数作物的最适范围,酸化严重时(pH<5.0),功能菌株定殖失败率高^[34]。更为关键的是,目前长期定位观测数据仍十分匮乏,若停止有机物料投入,土壤存在“再酸化”反弹的风险,这一长期稳定性问题亟待系统评估。基于以上的分析可以看出,影响生物有机肥在酸性土壤应用效果的关键问题包括:1)酸性土壤中单一施用生物有机肥难以突破 pH 阈值限制;2)功能菌在强酸性环境中的存活与定殖机制尚需深入解析;3)酸化改良的长期稳定性缺乏系统评估。

3.2 中性土壤:稳健增效与边际效应递减

中性土壤是我国农业生产的主要土壤类型,主要分布在东北、华北、华中中部地区,土壤类型以潮土、黑土、褐土为主,pH 值介于 6.5~7.5,此类土壤理化性质适宜,微生物群落相对平衡,是生物有机肥应用的适宜土壤环境。在此条件下,生物有机肥的作用更多体现为维持性增效,通过持续有机质输入优化土壤团聚体结构,补充有益或者优势功能菌群维持抑病优势,缓解因连作导致的微生态退化趋势。众多研究表明,生物有机肥可显著优化土壤微生物群落,抑制土传病害。基于 128 篇文献数据的 Meta 分析表明,有机物料输入可使作物土传病害发病率平均降低 49.7%,其中对中性土壤 pH 值的影响较小^[35]。长达 5 季的番茄种植试验表明,施用生物有机肥显著提高了土壤 pH 值和电导率^[36]。这一结果表明,即便在中性土壤中,生物有机肥的持续施用仍可通过有机质缓冲作用,在一定程度上抵抗因化肥过量施用或连作酸化导致的 pH 值下降趋势,维持土壤 pH 值的稳定。生物有机肥在改善土壤理化性质,提升土壤肥力方面具有较好的应用效果。连续 3 季施用生物有机肥后,土壤有机质含量增幅达 39.3%~83.9%,微生物量碳、氮含量显著高于对照,脲酶和蔗糖酶等活性维持在较高水平,产量提高 4%~20%。相关性分析可以看出,土壤 pH 值和电导率与过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性、微生物量氮含量及黄瓜产量呈显著相关关系,说明即使在

中性范围内,pH 值微小波动仍影响生物有机肥的效果^[37]。值得注意的是,中性土壤中生物有机肥的边际效应随施用量递减,从 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,产量增幅从 4% 升至 13% (首季),但增幅比例并未同比放大^[38]。

基于以上的分析可以看出,影响生物有机肥在中性土壤应用效果的关键问题包括:1) 中性土壤中生物有机肥的“显效空间”相对有限,缺乏敏感性指示指标;2) 功能菌株与土著微生物的竞争定殖规律不清;3) 高量施用是否存在微生物群落“过度扰动”风险尚不明确;4) 缺乏基于土壤肥力、作物类型、连作年限的精准施用标准,不同作物连作系统的配施技术差异较大,未形成针对性的配施方案,适配性有待提升。

3.3 碱性土壤:盐碱胁迫下的效果抑制与机制转向

我国北方石灰性土壤、滨海盐渍土及部分设施次生盐渍化土壤 pH 值为 7.5~8.5。与中性和酸性土壤相比,碱性及盐碱土壤中生物有机肥的应用面临严峻的挑战:高 pH 值、高盐分以及较高的渗透胁迫。耐碱菌株的定殖并非克服了高 pH 值,而是绕过了其负面影响。耐碱菌株通过维持胞内 pH 值稳态(如 K^+ 逆向转运系统)、合成相容性溶质、分泌胞外聚合物等机制,在高 pH 值下维持代谢活性^[39]。然而,近年来的研究逐步揭示,碱性土壤中生物有机肥的应用正在从“化学调控”向“微生物群落重构”的深层机制路径转换^[40]。生物有机肥的施用显著影响了盐碱土壤中微生物群落的组装方式。秦学等^[41]基于南皮生态农业试验站宏基因组的研究也揭示了有机肥处理下微生物丰富度和 β 多样性的显著变化,酸杆菌属和金黄丝菌属的相对丰度显著增加,强化微生物互作及优化代谢功能网络,协同提升盐碱土的生态功能。在碱性土壤中,耐盐碱功能菌株被证实能在作物根际高效定殖,并通过直接抑制病原菌数量、产生铁载体和 IAA 等促生物质,同时增强水杨酸和茉莉酸途径中防御相关基因的表达水平来诱导植物系统抗性^[17]。盐碱地生物有机肥改良的另一关键转向在于功能微生物群落的生态位构建过程。首先是盐分胁迫的物理屏蔽:有机物料中的腐殖质通过与游离 Na^+ 络合,降低根区周围的有效盐分浓度,形成局部“低盐微域”保护区^[42]。其次是微生物种群的逐步筛选:初始阶段,耐盐碱细菌(如芽胞杆菌、假单胞菌等)成为先锋群落,通过胞内 pH 稳态维持、相容性溶质积累、离子转运与外排以及细胞表面屏障保护等途径,占据生态位并持续分泌胞外聚合物以进一步改善“低盐微域”保护区环境^[43]。再次是机会菌种群逐步定殖,微生物网络复杂性指数提升^[44]。最后是功能群的定向富集:随着土著有益菌群被激活并在根际占据优势地位,群落整体进入稳定的抑病促生功能状态^[41],最终形成一个更加稳固的“低盐微域”的局部环境。

在碱性盐碱地上,生物有机肥的改良效应不依赖于单一功能菌株的直接拮抗或 pH 值的线性质变,而更多地依靠“植物-微生物-土壤”三元互作的系统修复,这标志着生物有机肥对碱性土壤的改良策略从“化学导向”转向“生态导向”的根本性机制转变。在黄河三角洲区域研究中,当土壤盐度超过 $11.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Shannon 多样性指数)和 $14.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Chao1 指数)时,多样性开始急剧下降,敏感菌株被淘汰,耐盐菌株被选择富集^[45]。当电导率超过 1.9 和 $4.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,群落结构发生显著的转变。在钠吸附比达到 3.5 和 6.4,以及 pH 值约为 5.5 时,土壤微生物群落组成会发生剧变。当电导率大于 $8 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ (强盐渍土)时,约 30% 的微生物类群被耐盐类群所取代^[46]。Li 等^[47]研究表明作物产量并非由 pH 值的降低或某单一盐分指标的线性质变决定,而是由土壤含水量、总盐量、微生物群落稳健性和电导率的综合平衡所驱动,4 种因子合计解释率达 74.75%。最优处理的特征并非 pH 值降至某特定数值,而是在水分供应、盐分控制和微生物功能支撑三者间实现了最佳协调。这也进一步证实了将改良策略从“改造特定化学指标”推向“优化整体系统健康”。然而,这种导向的具体阈值还需要进一步的研究和系统的分析。

基于以上分析可以看出,影响生物有机肥在碱性土壤应用效果的关键问题包括:1) 盐碱复合胁迫下生物有机肥的作用尚未探明;2) 耐碱功能菌株资源挖掘不足;3) 有机酸代谢产物对石灰性土壤养分活化的持续期过短;4) 缺乏针对不同碱化程度的差异化施用标准。

3.4 跨 pH 值比较的核心启示

纵观不同 pH 值土壤方面的研究,可以发现生物有机肥的应用效果与土壤 pH 值呈“倒 U 型”关系:酸性土壤中边际效益最高,中性土壤次之但稳定性最佳,碱性土壤中效果受限且机制转向(图 1)。这一规律揭示了 pH 值不仅是基本的土壤属性,更是决定生物有机肥“命运”的关键,在调控功能菌的存活、养分的形态和微生物群落的组装方面具有决定性的作用。精准施用生物有机肥,必须以 pH 值为“第一考量指标”。

研究表明,盐分与 pH 值的交互作用普遍表现为协同胁迫,尤其在碱性条件下危害加剧,盐度是主导胁迫因子,pH 值和缓冲能力为次要因子,但三者的联合作用应被综合考虑^[48]。pH 值与有机质关系复杂,

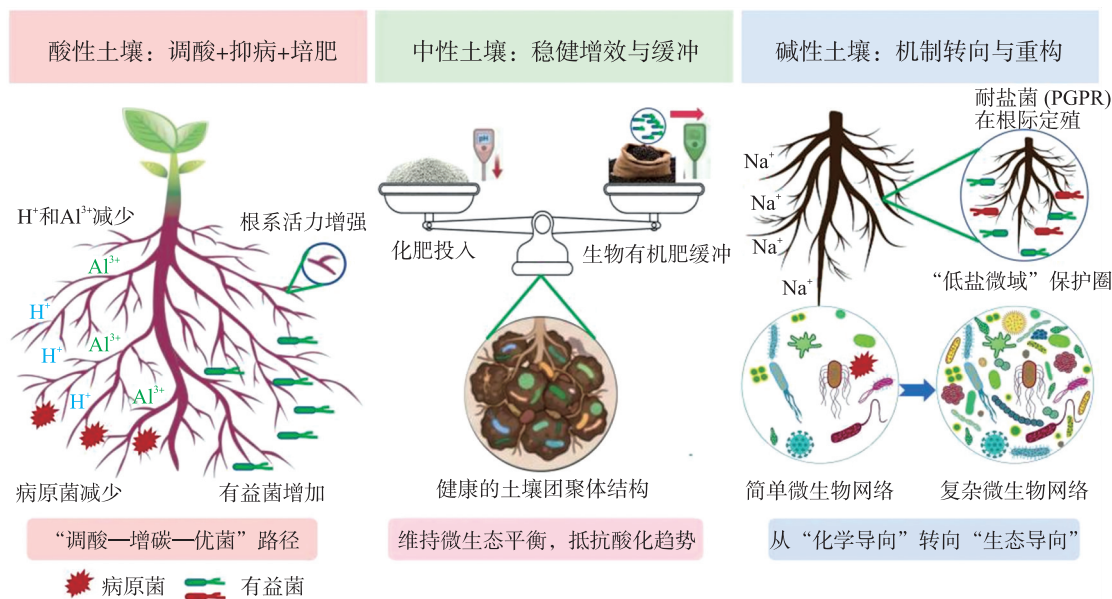


图1 生物有机肥在不同 pH 值土壤上的作用机制

Fig. 1 The mechanism of action of bio-organic fertilizer in soils with different pH values

受多重因素影响,并非简单的线性关系。在碱性土壤中,高 pH 值会抑制微生物活性,加速可溶性有机碳淋失,不利于有机碳积累。在酸碱性土壤中,有机质通过其巨大的比表面积和官能团缓冲 pH 值变化,减轻极端 pH 值对土壤的影响。pH 值与温、湿度交互效应受水分条件调节。在水分充足时,升温会显著促进有机碳矿化;但在缺水条件下,这一效应会减弱,表明土壤水分对温度效应具有调节作用^[49]。pH 值的作用并非孤立,而是与盐分、有机质和温、湿度构成复杂的耦合网络。这种交互作用具有强烈的 pH 依赖性,其方向与强度在酸性、中性和碱性土壤中存在显著差异。从目前的研究来看,虽然在跨 pH 值梯度的系统比较方面做了一些工作^[50],但是以上工作均未涉及连作障碍条件。因此,在连作障碍条件下,pH 值与其他因子(温度、水分、有机质本底值)的交互效应还有待深入研究^[51]。

4 不同作物类型适宜 pH 值区间与生物有机肥改良效果

土壤 pH 值是影响作物生长、养分有效性及土壤微生物活性的核心因子。不同作物对土壤酸碱度的适应区间差异显著,而生物有机肥通过有机质缓冲、腐殖酸螯合及微生物调控等机制,在改良土壤 pH 值方面呈现出明显的作物类型差异化特征。

4.1 蔬菜作物

多数蔬菜适宜中性至微酸性土壤,pH 值范围主要集中在 5.0~7.5。蔬菜连作障碍的核心诱因是高强度种植引发的土壤理化性质恶化和土传病害加剧。生物有机肥侧重于改良退化土壤和抑制病原菌。它通过降低土壤容重和电导率、增加孔隙度、提升有机质和养分含量来改善土壤环境;同时,其所含的拮抗菌(如枯草芽孢杆菌、木霉菌)能有效抑制病原菌,降低发病率^[37,52]。生物有机肥消减蔬菜连作障碍的效果受土壤酸碱性的影响。对于酸性土壤,生物有机肥的核心作用之一是缓解酸化,提高 pH 值。连作黄瓜土壤 pH 值增幅可达 6%~11%。对微生物群落结构的影响,主要通过提高土壤 pH 值来“修复”失衡的微生物群落,使群落结构从“真菌主导”向“细菌占比提升”的方向转变,富集芽孢杆菌等有益菌属^[52]。在中性土壤中,生物有机肥更多体现为维持 pH 值稳定和综合改良土壤质量。例如,在连作西瓜中长期施用生物有机肥,土壤 pH 值、生物多样性等指标表现出较高的稳定性。此时,生物有机肥的主要贡献在于提升有机质含量、改善土壤结构、优化微生物群落等方面^[53]。生物有机肥的作用更多体现为“优化”而非“重建”,即在原有健康群落基础上的进一步提升与优化。

4.2 果树

果树对 pH 值的适应区间较宽,但不同种类差异也较大,适宜的 pH 值范围主要集中在 5.0~8.5。果树连作障碍主要表现为幼苗生长受抑和根系病害,这与土壤中病原菌的积累及化感物质有关。生物有机肥侧重于改善重茬土壤的微生态环境,促进幼苗健壮生长,其通过增加根际有益微生物、抑制病原菌来重构

健康的根系环境^[54]。在重茬苹果园中,生物有机肥与化学药剂结合熏蒸处理能有效改善土壤环境^[55]。由于果树种植土壤 pH 值范围宽泛,因此其消减机制更多地取决于土壤酸碱性^[56]。

4.3 药用作物

药用植物对 pH 值的适应性因种类而异。大多数中药材可以在 pH5.0~8.5 的土壤中正常生长。药用植物的连作障碍最为突出,其核心问题是化感自毒物质积累和土传病害加剧,导致有效成分含量不足,影响药材品质。生物有机肥侧重于降解化感自毒物质和防控根部病害。功能微生物能有效降解根系分泌物中的酚酸等化感自毒物质^[57]。施用生物有机肥 DZF-363 对当归根腐病的防效达 52.0%^[58]。由于中药材种植土壤 pH 值范围宽泛,因此其消减机制更多的取决于土壤酸碱性,微生物群落结构的优化是共通的修复核心。

4.4 大田作物

大田作物整体偏好中性至弱碱性环境,其连作障碍主要表现为产量降低和品质下降。生物有机肥侧重于优化根际微生态和提升作物抗性。其通过持续改善根际细菌群落结构,增加有益菌丰度来保障产量^[59]。生物有机肥与土壤熏蒸联用,能显著降低马铃薯发病率并增加块茎产量^[60]。

综上,生物有机肥 pH 值改良效应强度呈现递减趋势:果树、蔬菜、大田作物、药用植物(以 pH 值提升幅度计)。果树^[61]和蔬菜的改良效应最为显著,这可能与其生育期较长、根系发达、对根际微环境调控能力强有关;大田作物的改良效应中等,但通过配施石灰、绿肥等可实现 pH 值提升 1.07 个单位;药用植物的改良研究相对薄弱,现有文献多集中于少数种类,且改良效应的量化数据较为有限^[62]。

5 土壤 pH 值影响生物有机肥效果的三重机制

5.1 质子环境调控功能微生物的定殖与存活

外源功能菌株在土壤中成功定殖,是生物有机肥发挥作用的首要前提。pH 值通过质子化效应和生态位竞争 2 个层面决定定殖命运。

质子化效应直接影响功能菌株的生理活性。多数生防菌株(如芽胞杆菌、假单胞菌)最适生长 pH 值为 6.0~7.5。当 pH<5.5 时,细胞膜质子通透性增加,胞内 pH 值失衡,ATP 合成受阻,菌体进入应激状态^[63];当 pH<5.0 时,大部分非嗜酸菌株进入休眠或死亡。酸性土壤(pH5.1)中功能菌的有效定殖率显著高于 pH4.5 以下的极度酸化土壤,证明了 pH 阈值的存在。碱性土壤中,高 pH 值与高碳酸盐协同胁迫,细胞膜脂肪酸组成改变,功能菌定殖窗口期显著缩短,耐碱菌株通过合成酸性胞外多糖、产生有机酸、调节膜脂组成等方式适应高 pH 值环境^[64]。

生态位竞争决定定殖的持续性。生物有机肥带入的功能菌需要与土著微生物争夺根际空间和养分。酸性环境抑制细菌群落多样性,同时为耐酸病原菌(如镰刀菌)提供更多的生态位;适度提升 pH 值可恢复细菌群落多样性,增强对病原菌的竞争排斥,说明 pH 值改变了最终的竞争格局^[65]。酸性土壤中有机肥处理使有益菌丰度从 10.0%升至 19.2%,青枯菌丰度从 10.5%降至 2.5%,这种变化的实质就是 pH 值驱动下的生态位重组^[66]。有的功能菌株通过抢占病原菌所需的碳氮源及附着位点,减少病原菌定殖^[67];也有一些菌株分泌几丁质酶、抗菌肽等物质直接抑制病原菌^[68]。

5.2 pH 值依赖性养分形态转化影响肥效表达

生物有机肥的养分释放与作物吸收均受 pH 值调控,形成“形态转化—有效性—吸收效率”的级联影响。氮素形态是 pH 值敏感性的具体体现。一般认为,有机氮矿化速率在 pH 值为 6.0~7.5 时最优,过酸过碱均受抑制^[69]。铵态氮在碱性条件下易挥发损失,硝态氮在酸性条件下易淋溶。pH 值调控有机肥氮的“供给节奏”,在适宜 pH 值条件下,释放曲线平缓持久,匹配作物需求。设施黄瓜试验中,生物有机肥处理硝态氮含量增加 10.0%~22.0%,这与 pH 值的提升改善了氮素转化微环境密切相关^[38]。

磷素活化是酸性土壤中有机肥增效的关键机制。低 pH 值条件下,土壤磷被铁铝固定。腐殖酸富含羧基、酚羟基等官能团,可通过络合作用螯合 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 与磷酸根竞争吸附位点,并部分溶解已形成的铁/铝磷酸盐沉淀,提高磷的活性^[70]。生物有机肥一方面通过酸溶作用溶解铁/铝氧化物,另一方面通过配体交换直接置换吸附态磷,从而释放有效磷^[71]。解磷菌通过分泌有机酸、磷酸酶等物质,经酸化溶解、螯合置换及酶解矿化作用,将土壤中难溶性无机磷与有机磷转化为作物可吸收利用的可溶性有效磷^[72]。碱性土壤中磷与钙结合形成难溶磷酸盐,腐殖酸通过络合土壤中的金属离子与磷在矿物表面产生位阻减少磷吸

附等机制,提高磷在碱性土壤中的有效性。生物有机肥通过有机酸溶解、有机-矿物复合及解磷微生物活化等作用提升磷的有效性^[73]。甘薯试验显示,在酸性连作土壤上,含腐殖酸和生物有机成分的肥料对磷养分的平衡具有显著的效果^[74]。

微量元素有效性对 pH 值高度敏感,铁、锰、锌在酸性条件下溶解度高,当 pH 值大于 7 时活性急剧下降。生物有机肥通过有机酸络合作用可部分缓解碱性土壤微量元素缺乏的问题,但效果取决于络合物稳定性。生物有机肥中腐殖酸可以促进团粒结构形成,增加阳离子交换量,从而间接改善微量元素供应^[75]。

5.3 pH 值介导微生物群落组装与抑病功能表达

如果说功能菌定殖是“点”的作用,微生物群落重塑则是“面”的效应。pH 值通过“选择—组装—功能”的路径,深刻影响生物有机肥的微生态效应(图 2)。

选择效应方面:pH 值是最重要的微生物群落影响因子。酸性土壤中嗜酸菌占优势,群落多样性降低,病原菌丰度上升。生物有机肥提升 pH 值后,中性菌群获得更多定殖空间,群落多样性得到恢复。这种“pH 值介导的群落转向”是有机肥发挥抑病功能的深层机制,即有益菌快速占领根际生态位,重构细菌与真菌的比例^[76]。

组装效应方面:pH 值影响微生物互作网络结构。酸性条件下微生物网络连接度稀疏,病原菌缺乏制衡;适宜 pH 值条件下微生物网络复杂性增加,功能冗余度提升,系统抗扰动能力增强^[77]。设施黄瓜连作试验中,土壤 pH 值与酶活性、微生物量氮和产量呈显著相关,正是 pH 值调控群落组装功能的宏观表现^[38]。

功能表达方面:抑病功能的实现依赖于特定功能基因的表达。pH 值调控抗生素合成基因、裂解酶基因等的转录活性^[78]。功能微生物分泌的多糖、有机酸等代谢产物可促进团粒结构形成,降低土壤容重,改善土壤通透性^[79]。微生物代谢产物(如生长素、细胞分裂素)可促进作物根系生长,增强作物对养分匮乏、盐胁迫等逆境的耐受性^[80]。

三重机制之间存在清晰的层级与交互关系,质子环境决定功能菌“能不能活”,这是先决条件;养分形态转化决定肥效“强不强”,这是增效路径;而群落组装方向决定效果“稳不稳”,这是持续保障。3 个层次通过“底物—微生物—养分”的耦合关系形成网络化调控^[81]。

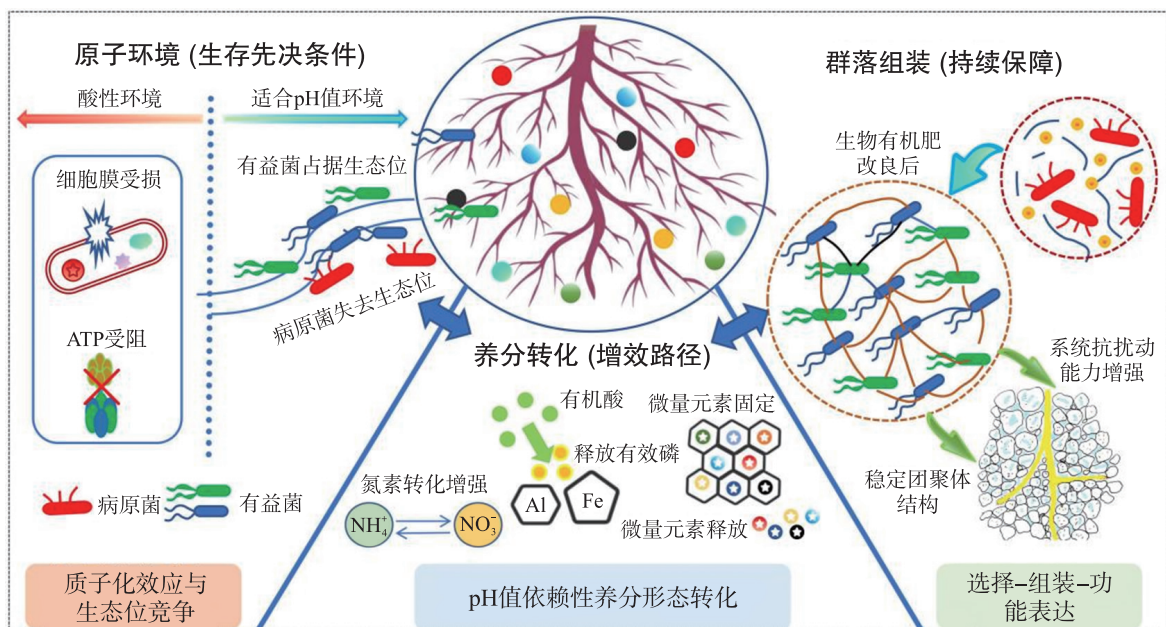


图 2 土壤 pH 值影响生物有机肥效果的三重机制

Fig. 2 The three mechanisms by which soil pH affects the efficacy of bio-organic fertilizers

6 研究展望

6.1 建立基于 pH 阈值的生物有机肥精准施用标准

当前生物有机肥施用多按统一用量推荐,未考虑土壤 pH 值差异。建议开展多 pH 值梯度、多作物的

多点定位试验,明确不同 pH 值区间的最适用量、施用频次和增效配伍。当前研究的重点探究方向:酸性土壤($\text{pH}<5.5$)中“调酸优先、生物有机肥配合”的综合消减策略;中性土壤($\text{pH}6.0\sim7.5$)中基于经济效益的持续性施用策略;碱性土壤($\text{pH}>8.0$)中耐碱菌株与有机酸的协同方案。探索建立“pH 值区间-有机肥用量-效果响应”量化模型,形成可操作的基于 pH 值分区的生物有机肥施用技术规范。在不同 pH 值土壤类型区建立生物有机肥长期定位试验站,系统监测土壤 pH 值动态变化、微生物群落演替、连作障碍消减效果等,评价生物有机肥的持久效应和潜在风险^[82]。

6.2 研发 pH 值响应型功能菌株与靶向载体材料

针对酸性和碱性土壤的不同胁迫特征,定向筛选以下适配菌株资源:酸性土壤筛选耐酸、嗜酸功能菌株(如酸耐受芽胞杆菌、木霉),碱性土壤筛选耐碱、产酸菌株(如碱耐受假单胞菌)。基于 pH 值适应性和功能互补性,设计人工合成菌群,提高生物有机肥在特定 pH 值环境中的稳定性和效果可预测性。开发 pH 值响应型载体材料,例如酸触发释放的包膜材料和碱响应分解的微胶囊,实现功能菌在目标 pH 值区间的精准释放与活性保持。超高效固氮菌在盐碱土壤中的成功应用表明,菌株定向选育是突破 pH 值限制的有效路径^[83]。

6.3 构建“调酸-供肥-强菌”协同的配套技术体系

单一施用生物有机肥难以突破 pH 阈值限制。宜将生物有机肥与土壤调理剂协同施用:酸性土壤配施石灰和白云石粉等快速调酸后复配有机肥,利用有机肥中腐殖酸缓冲酸碱度,增加有机质;碱性土壤配施硫磺、腐殖酸降低微域 pH 值后接种功能菌。构建“化学调酸(快)—有机培肥(稳)—生物增效(优)”的时序配套模式,形成“土壤调理剂+生物有机肥+功能菌剂”的套餐化产品^[84]。对比试验已证实,生物有机肥与土壤调理剂联用可有效改良土壤结构,调节土壤 pH 值,改善微生物环境。

6.4 探索合成生物学驱动的智能型肥料设计

借助合成生物学技术改造功能菌株的 pH 值适应性:导入酸胁迫响应启动子驱动生防基因表达,实现在酸化根际的靶向激活;构建产碱、产酸代谢模块,赋予菌株自主调节微域 pH 值的能力。创制“传感-响应-调节”一体化的智能型生物有机肥,实现从“被动适应”到“主动调控”的模式转变。这一方向需要整合微生物生态学、分子生物学与肥料工程学,建立“pH 值感应元件-功能基因回路-代谢输出模块”的设计框架,为下一代环境响应型生物肥料提供技术储备^[85]。

参考文献 References:

- [1] 李天来,杨丽娟. 作物连作障碍的克服:难解的问题[J]. 中国农业科学,2016,49(5):916-918.
Li T L, Yang L J. Overcoming continuous cropping obstacles: the difficult problem[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(5): 916-918 (in Chinese with English abstract).
- [2] Zeeshan U, Haq M, Yu J, et al. A systematic review on the continuous cropping obstacles and control strategies in medicinal plants[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(15): 12470.
- [3] Bai Y X, Wang G, Cheng Y D, et al. Soil acidification in continuously cropped tobacco alters bacterial community structure and diversity via the accumulation of phenolic acids[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 12499.
- [4] 索炎炎,张翔,吴士文,等. 豫南夏花生种植区土壤 pH 时空演变及其驱动力[J]. 生态学杂志, 2024, 43(1): 188-196.
Suo Y Y, Zhang X, Wu S W, et al. Spatiotemporal variations and driving forces of soil pH in peanut planting area in southern Henan Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(1): 188-196 (in Chinese with English abstract).
- [5] Chen Y D, Du J F, Li Y, et al. Evolutions and managements of soil microbial community structure drove by continuous cropping[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 839494.
- [6] 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.
Xue X X, Wu X P, Wang W B, et al. Progress of potassium, magnesium and their interaction in plant-soil system[J]. Soils, 2019, 51(1): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- [7] Liao J M, Xia P G, Zhang Y. Factors affecting and ameliorating continuous cropping obstacles in *P. notoginseng*[J]. Applied Soil Ecology, 2025, 214: 106351.
- [8] Liao J M, Xia P G. Continuous cropping obstacles of medicinal plants: focus on the plant-soil-microbe interaction system in the rhizosphere[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 328: 112927.
- [9] 王传吉,赵阳,杨银菊,等. 对羟基苯甲酸对烟草氮磷钾吸收及转运的化感作用[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(3): 70-73.
Wang C J, Zhao Y, Yang Y J, et al. Allelopathic effects of p-hydroxybenzoic acid on nitrogen, phosphorus and potassium absorption and transport in tobacco seedlings[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(3): 70-73 (in Chinese).
- [10] 谢星光,陈晏,卜元卿,等. 酚酸类物质的化感作用研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6417-6428.

- Xie X G, Chen Y, Bu Y Q, et al. A review of allelopathic researches on phenolic acids[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6417–6428 (in Chinese with English abstract).
- [11] 赵忆南, 李庆凯, 刘苹, 等. 玉米根系分泌物改变酚酸类物质对花生种子发芽及病原菌的化感作用[J]. *中国油料作物学报*, 2024, 46(3): 544–553.
- Zhao Y N, Li Q K, Liu P, et al. Maize root exudates change allelopathy effects of phenolic acids on peanut seed germination and pathogenic bacteria[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2024, 46(3): 544–553 (in Chinese with English abstract).
- [12] 游川, 杨天杰, 周新刚, 等. 连作根系分泌物加剧土传病害的机制和缓解措施研究进展[J]. *土壤学报*, 2024, 61(5): 1201–1211.
- You C, Yang T J, Zhou X G, et al. Research advances on mechanisms and preventions of soil-borne diseases exacerbated by root exudates in continuous cropping systems[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(5): 1201–1211 (in Chinese with English abstract).
- [13] 李金融. 不同耕作方式缓解花生连作障碍的作用机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019: 22–25.
- Li J R. Study on mechanisms of different tillage methods to alleviate continuous cropping obstacles of peanut[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019: 22–25 (in Chinese with English abstract).
- [14] 丁会书, 郭健涛, 普秀国, 等. 生物炭缓解作物连作障碍的研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2025, 53(17): 10–20.
- Ding H S, Guo J T, Pu X G, et al. Research progress on alleviation of crop continuous cropping obstacles by biochar[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2025, 53(17): 10–20 (in Chinese with English abstract).
- [15] 司舒成, 胡一帆, 朱强龙, 等. 基于 CiteSpace 的秸秆还田在蔬菜连作障碍中应用研究分析[J]. *现代园艺*, 2021, 44(15): 49–51.
- Si S C, Hu Y F, Zhu Q L, et al. A scientometric analysis of the application of straw returning to alleviate continuous-cropping obstacles of vegetables based on citeSpace[J]. *Xiandai Horticulture*, 2021, 44(15): 49–51 (in Chinese).
- [16] 蔡祖聪, 张金波, 黄新琦, 等. 强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 469–476.
- Cai Z C, Zhang J B, Huang X Q, et al. Application of reductive soil disinfection to suppress soil-borne pathogens[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 469–476 (in Chinese with English abstract).
- [17] Tao C Y, Li R, Xiong W, et al. Bio-organic fertilizers stimulate indigenous soil *Pseudomonas* populations to enhance plant disease suppression[J]. *Microbiome*, 2020, 8: 137.
- [18] 魏天齐, 杨顺琰, 洪华阳, 等. 补充土壤有机碳消减大蒜连作障碍的作用和机制[J]. *土壤*, 2025, 57(4): 835–844.
- Wei T Q, Yang S Y, Hong H Y, et al. Effect and mechanism of soil organic carbon supplementation in reduction of garlic continuous cropping obstacles[J]. *Soils*, 2025, 57(4): 835–844 (in Chinese with English abstract).
- [19] 游川, 张弛, 袁若钰, 等. 产酶溶杆菌生物有机肥对丹参根腐病的防控效果及微生态机制解析[J]. *土壤学报*, 2025, 62(5): 1511–1522.
- You C, Zhang C, Yuan R Y, et al. The biocontrol effect and microecological mechanism of *Lysobacter enzymogenes* bio-organic fertilizer on *Salvia miltiorrhiza* root rot[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(5): 1511–1522 (in Chinese with English abstract).
- [20] 李燕青, 车升国, 李壮, 等. 粪肥类型影响苹果苗定植成活率因素初探[J]. *北方园艺*, 2019(7): 101–106.
- Li Y Q, Che S G, Li Z, et al. Study on the factors influencing the survival rate of apple sapling by manure types[J]. *Northern Horticulture*, 2019(7): 101–106 (in Chinese with English abstract).
- [21] Guo Y L, Zhang Z X, Liang F, et al. Meta-analysis reveals that returning crop straw to arable land causes soil acidification at the global scale[J]. *European Journal of Agronomy*, 2025, 164: 127511.
- [22] 杨天杰, 王玉鑫, 王佳宁, 等. 不同基质生物有机肥防控番茄土传青枯病及促生效果研究[J]. *土壤*, 2021, 53(5): 961–968.
- Yang T J, Wang Y X, Wang J N, et al. Effects of different bioorganic fertilizers on tomato bacterial wilt and plant growth promotion[J]. *Soils*, 2021, 53(5): 961–968 (in Chinese with English abstract).
- [23] Shan X R, Chen J Y, Zhang J E, et al. Divergent responses of growth rate and antioxidative system of ten *Bacillus* strains to acid stresses[J]. *Soil Ecology Letters*, 2024, 6: 230192.
- [24] Negim O I A, Moharam M H A, Elsayed E F, et al. The combination between super absorbent polymers (SAPs) and biofertilizers could be an ecofriendly approach for soil chemical properties improving and sustainable wheat (*Triticum sativum*) production in sandy loam soil[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(3): 4349–4365.
- [25] 樊建霞, 吴琼, 游龙, 等. 不同微生物菌肥对连作番茄品质、土壤性质及微生物活性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(1): 197–204.
- Fan J X, Wu Q, You L, et al. Effects of different microbial inoculant fertilizers on quality, soil properties and microbial activity of tomato under continuous cropping[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(1): 197–204 (in Chinese with English abstract).
- [26] Wang J C, Qiu M, Shen Z Y, et al. Microbial modulation of soil pH: a self-benefiting mechanism exemplified by *Bacillus*[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2025, 210: 109949.
- [27] 卢维宏, 张乃明, 包立, 等. 我国设施栽培连作障碍特征与成因及防治措施的研究进展[J]. *土壤*, 2020, 52(4): 651–658.
- Lu W H, Zhang N M, Bao L, et al. Study advances on characteristics, causes and control measures of continuous cropping obstacles of facility cultivation in China[J]. *Soils*, 2020, 52(4): 651–658 (in Chinese with English abstract).
- [28] Fan H L, Zhang Y S, Li J C, et al. Effects of organic fertilizer supply on soil properties, tomato yield, and fruit quality: a global meta-analysis[J]. *Sustainability*, 2023, 15(3): 2556.
- [29] 吕焕哲, 王凯荣, 谢小立, 等. 有机物料对酸性红壤铝毒的缓解效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 637–641.
- Lü H Z, Wang K R, Xie X L, et al. Alleviation of organic manure on aluminum toxicity in acid red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007, 13(4): 637–641 (in Chinese with English abstract).
- [30] 江福英, 吴志丹, 张磊, 等. 不同施肥模式对茶园土壤酸度和茶叶产量的影响[J]. *茶叶学报*, 2023, 64(5): 36–42.

- Jiang F Y, Wu Z D, Zhang L, et al. Effects of different fertilization modes on soil acidity and tea yield in tea plantations[J]. *Acta Tea Sinica*, 2023, 64(5): 36–42 (in Chinese with English abstract).
- [31] Ali N, Jiang Q, Luo R H, et al. Foliar application of bioorganic fertilizer enhances plant nutrients uptake and *Citrus* yield by regulating rhizosphere and phyllosphere microbiome[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2024, 36: 103902.
- [32] 周少猛, 马海艳, 郑顺林, 等. 有机碳肥对酚酸胁迫下马铃薯开花期叶片抗逆性的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2019, 37(6): 836–841. Zhou S M, Ma H Y, Zheng S L, et al. Effects of organic carbon fertilizer on the resistance of potato leaves to anthesis under phenolic acid stress [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2019, 37(6): 836–841 (in Chinese with English abstract).
- [33] 邓小华, 黄杰, 杨丽丽, 等. 石灰、绿肥和生物有机肥协同改良酸性土壤并提高烟草生产效益[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(9): 1577–1587. Deng X H, Huang J, Yang L L, et al. The synergistic effect of lime, green manure and bio-organic fertilizer on restoration of acid field and improvement of tobacco production efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(9): 1577–1587 (in Chinese with English abstract).
- [34] Zhang H H, Liu Y P, Wu G W, et al. *Bacillus velezensis* tolerance to the induced oxidative stress in root colonization contributed by the two-component regulatory system sensor ResE[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2021, 44(9): 3094–3102.
- [35] 申云鑫, 施竹凤, 唐加菜, 等. 有机物料输入对作物土传病害防控作用的 Meta 分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(8): 1495–1506. Shen Y X, Shi Z F, Tang J C, et al. Meta-analysis on soil-borne crop diseases suppression by organic material input [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(8): 1495–1506 (in Chinese with English abstract).
- [36] Liu L J, Sun C L, Liu S R, et al. Bioorganic fertilizer enhances soil suppressive capacity against bacterial wilt of tomato[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(4): e0121304.
- [37] 曲成闯, 陈效民, 张志龙, 等. 生物有机肥提高设施土壤生产力减缓黄瓜连作障碍的机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(5): 814–823. Qu C C, Chen X M, Zhang Z L, et al. Mechanism of bio-organic fertilizer on improving soil productivity for continuous cucumber in greenhouse [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(5): 814–823 (in Chinese with English abstract).
- [38] 李小萌, 陈效民, 曲成闯, 等. 生物有机肥与减量配施化肥对连作黄瓜养分利用率及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 309–317. Li X M, Chen X M, Qu C C, et al. Effects of bio-organic fertilizer combined with reduced fertilizer on nutrient utilization and yield of continuous-cropping cucumber[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 309–317 (in Chinese with English abstract).
- [39] 马欣, 马想蓉, 朱德锐, 等. 嗜盐耐盐微生物抗盐胁迫相关离子转运蛋白研究进展[J]. *微生物学报*, 2024, 64(3): 651–671. Ma X, Ma X R, Zhu D R, et al. Advances in ion transporters associated with tolerance of halophilic and halotolerant microorganisms to salt stress [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2024, 64(3): 651–671 (in Chinese with English abstract).
- [40] Bedwal S, Rai A K, Basak N, et al. Acidulated composts govern the soil solution nutrient composition through changes in key functional bacterial community of alkaline soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2025, 211: 106164.
- [41] 秦学, 李梦璐, 黄魁, 等. 有机肥调控种植小麦盐碱土微生物群落结构与功能的宏基因组解析[J]. *兰州交通大学学报*, 2025, 44(6): 100–109. Qin X, Li M L, Huang K, et al. Organic fertilizer-driven regulation of microbial community structure and function in saline-alkali soils for wheat cultivation revealed by metagenomic analysis[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2025, 44(6): 100–109 (in Chinese with English abstract).
- [42] Lakhdar A, Trigui M, Montemurro F. An overview of biostimulants' effects in saline soils[J]. *Agronomy*, 2023, 13(8): 2092.
- [43] Khan A A, Alabbosh K F, Kashif, et al. Ion homeostasis, osmotic adjustment, and ROS detoxification underlie pea salinity tolerance induced by *Pseudomonas putida* RT12[J]. *Microbiology Research*, 2025, 16(11): 227.
- [44] 司海丽, 纪立东, 李磊, 等. 生物有机肥对宁夏盐碱地土壤养分和生物学特性的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(6): 1124–1131. Si H L, Ji L D, Li L, et al. Effects of long-term application of bioorganic fertilizer on soil nutrients and biological characteristics of saline alkali land in Ningxia[J]. *Soils*, 2022, 54(6): 1124–1131 (in Chinese with English abstract).
- [45] Yang C, Zhang Q, Diao M M, et al. Global and regional soil salinization drives bacterial diversity loss and biogeochemical imbalance [J]. *Communications Earth & Environment*, 2026, 7: 486.
- [46] Obregon D, Haack E, Tosi M, et al. Brine-induced soil gradients drive microbial community assembly and ecological partitioning[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2025, 210: 109936.
- [47] Li J J, Qu Z Y, et al. Soil function reshaping and crop yield driving mechanisms in saline-alkali soil under freezing saline water irrigation[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2026, 17: 1856608.
- [48] Li R, Shi F, Fukuda K. Interactive effects of various salt and alkali stresses on growth, organic solutes, and cation accumulation in a halophyte *Spartina alterniflora* (Poaceae) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, 68(1): 66–74.
- [49] He P, Li L J, Dai S S, et al. Straw addition and low soil moisture decreased temperature sensitivity and activation energy of soil organic matter [J]. *Geoderma*, 2024, 442: 116802.
- [50] 郭慧婷, 高静, 张强, 等. 有机肥对我国酸性和碱性土壤 pH 的影响差异及原因[J]. *应用与环境生物学报*, 2024, 30(3): 496–503. Guo H T, Gao J, Zhang Q, et al. Differences and reasons for the effects of organic fertilizer on the pH of acidic and alkaline soils in China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2024, 30(3): 496–503 (in Chinese with English abstract).
- [51] Zhang Z Y, Cui Y T, Wang Z K, et al. Unlocking the potential of biofertilizer: soil microbial contributions to nutrient availability and vegetable yield[J]. *Plant and Soil*, 2025, 515(2): 1599–1612.

- [52] 冯志珍,陈太春,颜宏,等.生物肥料对连作芹菜土壤环境、生长指标和产量的影响[J].中国农学通报,2026,42(13):55-65.
Feng Z Z, Chen T C, Yan H, et al. Effects of bio-fertilizer on soil environment, growth indexes and yield of continuous-cropping celery[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2026, 42(13): 55-65 (in Chinese with English abstract).
- [53] 顾欣,孙权,王锐,等.菌肥与有机肥配施对拱棚西瓜土壤的改良效果[J].干旱地区农业研究,2017,35(3):219-225.
Gu X, Sun Q, Wang R, et al. Microbial fertilizer and organic fertilizer on soil improvement effect of plastic shed watermelon[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(3): 219-225 (in Chinese with English abstract).
- [54] 刘丽英,刘珂欣,迟晓丽,等.枯草芽胞杆菌 SNB-86 菌肥对连作平邑甜茶幼苗生长及土壤环境的影响[J].园艺学报,2018,45(10):1981-1990.
Liu L Y, Liu K X, Chi X L, et al. Effects of *Bacillus subtilis* SNB-86 bio-fertilizer on seedling growth and soil environment of *Malus hupehensis* Rehd. under apple replant-disease conditions[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2018, 45(10): 1981-1990 (in Chinese with English abstract).
- [55] 刘超,相立,王森,等.土壤熏蒸剂棉隆加海藻菌肥对苹果连作土微生物及平邑甜茶生长的影响[J].园艺学报,2016,43(10):1995-2002.
Liu C, Xiang L, Wang S, et al. Effects of dazomet fumigation and seaweed biologic fertilizer on the *Malus hupehensis* seedlings and soil microbial quantity under replant conditions[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2016, 43(10): 1995-2002 (in Chinese with English abstract).
- [56] 张继东,张亚雄,程伟,等.生物炭和有机肥配施对苹果重茬育苗地土壤理化性质和微生物群落特征的影响[J].中国农业科技导报,2024,26(8):213-222.
Zhang J D, Zhang Y X, Cheng W, et al. Effects of combined application of biochar and organic fertilizer on soil physicochemical properties and microbial community characteristics in apple recropping field[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(8): 213-222 (in Chinese with English abstract).
- [57] 张春杨,赵倩,刘红,等.微生物降解植物化感物质酚酸的研究进展[J].微生物学通报,2024,51(2):402-418.
Zhang C Y, Zhao Q, Liu H, Wang X, Ma Q Y. Research advances in microbial degradation of phenolic acids with allelopathic effects[J]. Microbiology China, 2024, 51(2): 402-418 (in Chinese with English abstract).
- [58] 王文丽,李娟,赵旭.生物有机肥对连作当归根际土壤细菌群落结构和根腐病的影响[J].应用生态学报,2019,30(8):2813-2821.
Wang W L, Li J, Zhao X. Effects of biological organic fertilizer on rhizosphere soil bacteria community and root rot diseases of continuous cropping *Angelica sinensis*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(8): 2813-2821 (in Chinese with English abstract).
- [59] 陈德乐,王兴祥,张亚楠,等.持续施用生物有机肥对花生产量和根际细菌群落的影响[J].土壤,2021,53(3):537-544.
Chen D L, Wang X X, Zhang Y N, et al. Effect of persistent application of bioorganic fertilizer on peanut yield and rhizosphere bacterial community[J]. Soils, 2021, 53(3): 537-544 (in Chinese with English abstract).
- [60] 刘星,张文明,张春红,等.土壤灭菌-生物有机肥联用对连作马铃薯及土壤真菌群落结构的影响[J].生态学报,2016,36(20):6365-6378.
Liu X, Zhang W M, Zhang C H, et al. Combination of the application of soil disinfection and bio-organic fertilizer amendment and its effects on yield and quality of tubers, physiological characteristics of plants, and the soil fungal community in a potato monoculture system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): 6365-6378 (in Chinese with English abstract).
- [61] Kang Y L, Ma Y W, Xie C Y, et al. Bioorganic fertilizer drives the root system architecture and rhizosphere microbiome interactions to stimulate aboveground growth of pear trees in acid red soil[J]. Plant and Soil, 2025, 516(1): 629-650.
- [62] 李大荣,李小玲,周武先,等.有机肥替代部分化肥对湖北贝母生长及土壤性质的影响[J].中国农业科技导报(中英文),2025,27(3):216-226.
Li D R, Li X L, Zhou W X, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer on growth and soil properties of *Fritillaria hupehensis*[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2025, 27(3): 216-226 (in Chinese with English abstract).
- [63] Senouci-Rezkallah K, Jobin M P, Schmitt P. Adaptive responses of *Bacillus cereus* ATCC14579 cells upon exposure to acid conditions involve ATPase activity to maintain their internal pH[J]. Microbiology Open, 2015, 4(6): 1001.
- [64] Sun L, Cheng L, Ma Y H, et al. Exopolysaccharides from *Pantoea alhagi* NX-11 specifically improve its root colonization and rice salt resistance[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 209: 396-404.
- [65] Wan W J, Tan J D, Wang Y, et al. Responses of the rhizosphere bacterial community in acidic crop soil to pH: changes in diversity, composition, interaction, and function[J]. Science of the Total Environment, 2020, 700: 134418.
- [66] Zhang S T, Liu X J, Zhou L H, et al. Alleviating soil acidification could increase disease suppression of bacterial wilt by recruiting potentially beneficial rhizobacteria[J]. Microbiology Spectrum, 2022, 10(2): e02333-21.
- [67] Knights H E, Ramachandran V K, Jorin B, et al. *Rhizobium* determinants of rhizosphere persistence and root colonization[J]. The ISME Journal, 2024, 18(1): wrac072.
- [68] Das S, Dutta S, Ghosh S, et al. Chitinolytic microorganisms for biological control of plant pathogens: a comprehensive review and meta-analysis[J]. Crop Protection, 2024, 185: 106888.
- [69] Geisseler D, Smith R, Cahn M, et al. Nitrogen mineralization from organic fertilizers and composts: literature survey and model fitting[J]. Journal of Environmental Quality, 2021, 50(6): 1325-1338.
- [70] 李军,袁亮,赵秉强,等.磷肥中腐植酸添加比例对玉米产量、磷素吸收及土壤速效磷含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(3):641-648.
Li J, Yuan L, Zhao B Q, et al. Effect of adding humic acid to phosphorous fertilizer on maize yield and phosphorus uptake and soil available

- phosphorus content[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2017, 23(3): 641–648 (in Chinese with English abstract).
- [71] Duan Y L, Li D, Li Z D, et al. Enhancing phosphorus bioavailability in lateritic red soil: combining *Bacillus subtilis* inoculated microbial organic fertilizer with reduced chemical input[J]. *Soil Use and Management*, 2024, 40: e12987.
- [72] Chang D N, Song Y R, Liang H, et al. Planting Chinese milk vetch with phosphate-solubilizing bacteria inoculation enhances phosphorus turnover by altering the structure of the phoD-harboring bacteria community[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2024, 123: 103678.
- [73] Prasad R, Shivay Y S. Phosphorus $\times$ other plant nutrient interactions, reaction products, anion exchange and phosphate fixation in soil and strategies to increase availability of the native and applied P to crop plants: a mini review and critique[J]. *Agricultural Reviews*, 2021, 42: 220–224.
- [74] 刘亚军, 逯昀, 王文静, 等. 有机肥与土壤调理剂对连作甘薯生长发育及土壤肥力的影响[J]. *作物杂志*, 2024(3): 168–174.
- Liu Y J, Lu Y, Wang W J, et al. Effects of organic fertilizer and soil conditioner on the growth and development of continuous cropping sweet potato and soil fertility[J]. *Crops*, 2024(3): 168–174 (in Chinese with English abstract).
- [75] Zhang Z X, Chen Q, Xu K Y, et al. Selective modifier-assisted humic acid extraction: implications for soil quality enhancement[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(22): 9896–9907.
- [76] Deng W P, Gong J S, Peng W C, et al. Alleviating soil acidification to suppress *Panax notoginseng* soil-borne disease by modifying soil properties and the microbiome[J]. *Plant and Soil*, 2024, 502(1/2): 653–669.
- [77] Shi Y, Li Y T, Yang T, et al. Threshold effects of soil pH on microbial co-occurrence structure in acidic and alkaline arable lands[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 800: 149592.
- [78] Balón-Rosas L Y, Luna-Bulbarela A, Serrano-Carreón L, et al. pH-driven metabolic reprogramming in *Bacillus velezensis* 83 regulates metabolite synthesis and sporulation: a transcriptional approach for bioprocess development[J]. *Journal of Biotechnology*, 2025, 405: 191–204.
- [79] 叶家骏, 张书静, 杨亚蕊, 等. 细菌胞外多糖在农业中的应用研究进展与发展潜力[J/OL]. *农业资源与环境学报*, 2025–12–23. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2025.1330>.
- Ye J J, Zhang S J, Yang Y R, et al. Research progress and development potential of bacterial extracellular polysaccharide in agriculture[J/OL]. *China Industrial Economics*, 2025–12–23. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2025.1330> (in Chinese with English abstract).
- [80] Hou Q H, Kolodkin-Gal I. Harvesting the complex pathways of antibiotic production and resistance of soil bacilli for optimizing plant microbiome[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2020, 96(9): fiaa142.
- [81] Hu Z K, Delgado-Baquerizo M, Fanin N, et al. Nutrient-induced acidification modulates soil biodiversity-function relationships[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 2858.
- [82] Chen S, Sun X L, Zhang S W, et al. Acidic soil amendments enhance maize nutrient uptake, grain yield and biomass accumulation: a global meta-analysis[J]. *European Journal of Agronomy*, 2026, 177: 128085.
- [83] Wang S B, Gao P L, Zhang Q W, et al. Application of biochar and organic fertilizer to saline-alkali soil in the Yellow River Delta: effects on soil water, salinity, nutrients, and maize yield[J]. *Soil Use and Management*, 2022, 38(4): 1679–1692.
- [84] Ahmad S, Wang M R, Zhang H M, et al. Synergistic application of biochar and lime modulates rhizosphere microbiome, suppresses pathogens, and enhances disease resistance in sugarcane[J]. *BMC Microbiology*, 2025, 25: 622.
- [85] Munir A, Ali S M, Ali M, et al. Advancing agriculture: harnessing smart nanoparticles for precision fertilization[J]. *BioNanoScience*, 2024, 14(4): 3846–3863.

责任编辑: 刘怡辰



徐大兵, 湖北省农业科学院植保土肥研究所副研究员, 湖北省生态循环农业创新体系岗位专家, 第三次土壤普查省级指导专家和省级科技特派员。主要从事土壤障碍修复和农业废弃物资源化利用研究。主持国家重点研发计划和湖北省重大专项等项目 5 项。获湖北省科技进步奖二等奖和三等奖各 1 项, 软件著作权 2 项。以第一或通信作者发表论文 30 余篇。



赵书军, 湖北省农科院植保土肥研究所三级研究员, 中国植物营养与肥料学会理事, 湖北省农业科学院“领军人才”, 农业农村部“国家土壤质量洪山观测试验站”站长。主要从事中低产稻田地力提升、旱地障碍因子消减等研究工作。自 2000 年以来, 获省部级奖励 4 项, 以第一作者或者通信作者发表论文 30 余篇, 参编专著 3 部。