

韩天富, 郭自春, 赵彦锋, 陈杰, 张会民, 柳开楼, 王慧颖, 张水清. 砂姜黑土酸化研究进展: 现状、驱动因素与改良策略[J]. 土壤学报, 2026,

HAN Tianfu, GUO Zichun, ZHAO Yanfeng, CHEN Jie, ZHANG Huimin, LIU Kailou, WANG Huiying, ZHANG Shuiqing. Research Progress on the Acidification of Shajiang Black Soil: Current Status, Driving Factors, and Remediation Strategies[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

砂姜黑土酸化研究进展: 现状、驱动因素与改良策略*

韩天富¹, 郭自春², 赵彦锋¹, 陈杰¹, 张会民³, 柳开楼⁴,
王慧颖^{5†}, 张水清^{6†}

(1. 郑州大学农业与生物制造学院, 郑州 450001; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室, 北京 100081; 4. 江西省红壤及种质资源研究所, 南昌 331717; 5. 农业农村部耕地质量和农田工程监督保护中心, 北京 100125; 6. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002)

摘要: 砂姜黑土是分布于我国黄淮海地区的重要耕作土壤类型, 具有质地黏重、结构致密、有机质含量较低、养分有效性差等特征。近年来, 受长期集约化施肥、酸沉降及作物养分移除等多重因素影响, 砂姜黑土酸化问题日益凸显, 已成为制约区域农业可持续发展的主要障碍之一。酸化不仅削弱了砂姜黑土的缓冲性能与养分供应能力, 还导致土壤结构退化、微生物群落失衡和作物产量下降。本文系统综述了砂姜黑土酸化的研究进展, 包括酸化的现状与特征、主要驱动因素及作用机制, 以及常用的改良与调控策略, 并进一步分析了当前研究的热点与未来发展方向, 提出了以耕作制度优化、养分资源管理、改酸产品适配和生物高效互作为核心的酸化分类防控路径, 旨在为砂姜黑土酸化分级防控与地力恢复提供科学依据。

关键词: 砂姜黑土; 酸化; 驱动机制; 养分循环; 改良措施

中图分类号: S156.8

文献标志码: A

Research Progress on the Acidification of Shajiang Black Soil: Current Status, Driving Factors, and Remediation Strategies

HAN Tianfu¹, GUO Zichun², ZHAO Yanfeng¹, CHEN Jie¹, ZHANG Huimin³, LIU Kailou⁴, WANG Huiying^{5†}, ZHANG Shuiqing^{6†}

(1. School of Agriculture and Biomufacturing, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3. National Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Farmland in North China / Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4. Jiangxi Institute of Red Soil and Germplasm Resources, Nanchang 331717, China; 5. Cultivated Land Quality & Farmland Engineering Supervision and Protection Center, Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 6. Institute of Plant Nutrition, Resource and Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Shajiang black soil is a major cultivated soil type distributed in the Huang-Huai-Hai region of China. It

* 国家自然科学基金项目(42207398, 42367051)、河南省重点研发计划专项(251111112200)和河南省农业科学院重大应急专项(2024ZDYJ002)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42207398, 42367051), the Key Research & Development Program of Henan Province (No. 251111112200), and the Major Emergency Project of Henan Academy of Agricultural Sciences (No. 2024ZDYJ002)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zsq510@163.com; why_soil@163.com

作者简介: 韩天富(1989-), 男, 副研究员, 主要从事土壤培肥与改良工作。Email: htf@zzu.edu.cn

收稿日期: 2025-11-16; 收到修改稿日期: 2026-05-12; 网络首发日期(www.cnki.net):

is characterized by a heavy clay texture, compact structure, low organic matter content, and poor nutrient availability. In recent years, the acidification of Shajiang black soil has become increasingly prominent due to multiple factors, including long-term intensive fertilization, acid deposition, and nutrient removal by crops. This issue has emerged as one of the key constraints on sustainable agricultural development in the region. Soil acidification not only weakens the buffering capacity and nutrient-supplying capacity of Shajiang black soil but also leads to soil structural degradation, microbial community imbalance, and reductions in crop yield. This review synthesizes current research progress on the acidification of Shajiang black soil, with a focus on its status and characteristics, major driving factors, and underlying mechanisms, as well as commonly applied amelioration and management strategies. Furthermore, it analyzes contemporary research hotspots and future development directions, and proposes a classification-based prevention and mitigation framework centered on optimizing tillage systems, improving nutrient resource management, selecting appropriate soil amendments, and enhancing biological synergistic interactions. This framework can provide scientific guidance for the graded amelioration and fertility restoration of acidified Shajiang black soil.

Key words: Shajiang black soil; Acidification; Driving mechanism; Nutrient cycling; Amelioration measures

土壤酸化是全球性农业土壤退化问题之一，尤其在集约化农业地区表现得更为突出。砂姜黑土作为我国黄淮海平原重要的耕作土壤之一，广泛分布于安徽、河南、山东、江苏等省份，河北、天津、北京和湖北等省份有少量分布，总面积约 400 万 hm^2 ，是我国粮食生产的核心区域之一，对保障国家粮食安全具有举足轻重的战略地位^[1-2]。砂姜黑土主要由黄河冲积物或古河道沉积物发育而成，具有明显的砂姜层结构特征，表层土壤质地以壤质或黏壤质为主，其母质碳酸盐含量较高，理论上具备较强的缓冲能力^[3]。但随着化学氮肥持续输入转化、盐基离子失衡和地下水位降低，导致酸性离子持续累积和碳酸盐缓冲体系减弱下移^[4-5]，最终致使土壤的酸缓冲能力下降和酸化问题突出。在砂姜黑土区域，酸化加剧了土壤结构恶化、养分流失、重金属污染、生态环境失衡等问题，成为区域农业发展的主要限制因素之一。

近年来，学者们围绕土壤酸化现状、驱动机制与改良措施等方面开展了多层次研究，然而大多数研究主要聚焦南方酸性红黄壤和东北黑土地地区，较少关注黄淮海平原等地区土壤酸化问题。政府部门同样高度重视该区域酸化土壤治理，2023 年全国首批酸化耕地治理重点县建设名单中 3 个县（盱眙、临沭、叶县）均有砂姜黑土分布^[6]，可见围绕砂姜黑土酸化问题开展研究能够完善酸化相关理论和解决国家重大需求。然而，现有研究仍存在区域性分布不均、酸化机制理解不足、长期改良效果评估缺乏等问题。与其他土壤类型相比，砂姜黑土的酸化过程因其高黏粒含量和特殊的砂姜层结构而更为复杂。因此，系统梳理砂姜黑土酸化研究进展，深入分析其驱动因素与作用机制，总结酸化对养分循环和生态功能的影响，归纳主要的改良与调控技术路径，最后提出未来研究方向与展望，以期为砂姜黑土酸化防控及该区域农业可持续管理提供科学依据。

1 砂姜黑土酸化的现状与特征

目前全国农田土壤酸化进程总体呈减缓趋势，但砂姜黑土分布区的土壤 pH 总体呈下降趋势^[7]。研究发现，黄淮海地区土壤 pH 在 1984—2007 年期间，砂姜黑土与潮土、非黄土母质发育褐土均出现了明显酸化现象，但在 2007—2017 年期间，潮土和褐土酸化明显减缓时，砂姜黑土酸化趋势仍在持续^[4]。与第二次土壤普查数据相比，2012 年河南省砂姜黑土土壤 pH 下降近 1 个单位^[8]，典型县域（正阳县）花生种植区土壤 pH 下降超过 2 个单位^[9]。皖北平原砂姜黑土区耕地酸性土壤当前占比超过 70%，与第二次土壤普查数据相比，酸化比例高达 73%^[10]。尽管国家自 2005 年起大规模推行秸秆还田和配方施肥等措施，在其他土壤类型

上显示出缓解酸化的效果,但对砂姜黑土的改良效果较为有限。例如,蒙城砂姜黑土长期定位施肥试验结果表明,与不施肥相比,化肥配合秸秆还田处理土壤 pH 下降约 2 个单位^[11]。对收集的 1980s 和 2020s 关于砂姜黑土普查和相关文献数据进行克里格插值分析,由于缺乏数据未对河北和天津等地区砂姜黑土进行插值分析,结果表明近 40 年砂姜黑土酸化问题主要集中在淮北平原地区、豫中和豫西南地区,插值分析结果表明超过 50% 的砂姜黑土 pH 降低大于 1 个单位(图 1),与当前最新的全国趋于减缓的变化趋势不一致^[7],需要结合更全面(土壤第三次普查数据等)的数据对砂姜黑土区酸化问题进行深入探究。

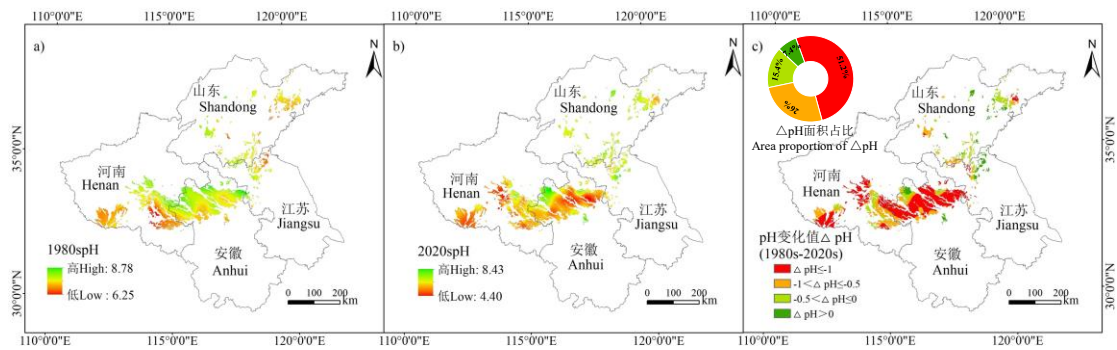


图 1 砂姜黑土区土壤 pH 时空演变 (以彩图发表)

Fig. 1 Temporal and spatial evolution of soil pH in the Shajiang black soil region

砂姜黑土酸化程度具有显著的空间差异性,这种差异不仅反映了气候、水文及人为干扰等外部环境因素的影响,更与砂姜黑土发生学类型和母质差异密切相关。在全国土壤分类系统中,砂姜黑土共划分为典型砂姜黑土、石灰性砂姜黑土和盐(碱)化砂姜黑土,前两个亚类是当前主要分布类型^[12],且对酸化的敏感度存在显著差异。总体而言,典型砂姜黑土的敏感度远高于石灰性砂姜黑土。典型砂姜黑土占该土类总面积的 75% 以上,主要分布在河南和安徽地区,其本身呈中性至微碱性,其黑土层的黏粒矿物和有机质是主要的缓冲物质^[2]。在长期高强度农业耕作,特别是生理酸性肥料(尿素、铵态氮等)被大量施用和有机肥等应用减少的情况下,土壤中的氢离子(H^+)持续累积,导致其缓冲能力被逐渐消耗和土壤 pH 逐步下降,最终出现酸化现象。相比之下,石灰性砂姜黑土富含大量的碳酸钙,能够有效地中和外源酸性物质和抵御土壤 pH 的下降^[13]。从区域分布上看,淮北平原砂姜黑土区土壤 pH 由西向东呈现先升高后降低的趋势,可能与该区域中部地势相对较高、地下水位较深、成土母质中碳酸盐含量相对较高密切相关^[14]。此外,有研究发现典型砂姜黑土和石灰性砂姜黑土随着土壤深度的增加,酸化程度逐渐减轻^[15],可见表层土壤酸化更为严重。然而当前关于砂姜黑土 pH 的空间分布和差异特征仍缺少深入研究,且较少考虑砂姜黑土发生学和母质类型的影响,这也限制了采取更加针对性的措施开展酸化农田治理。

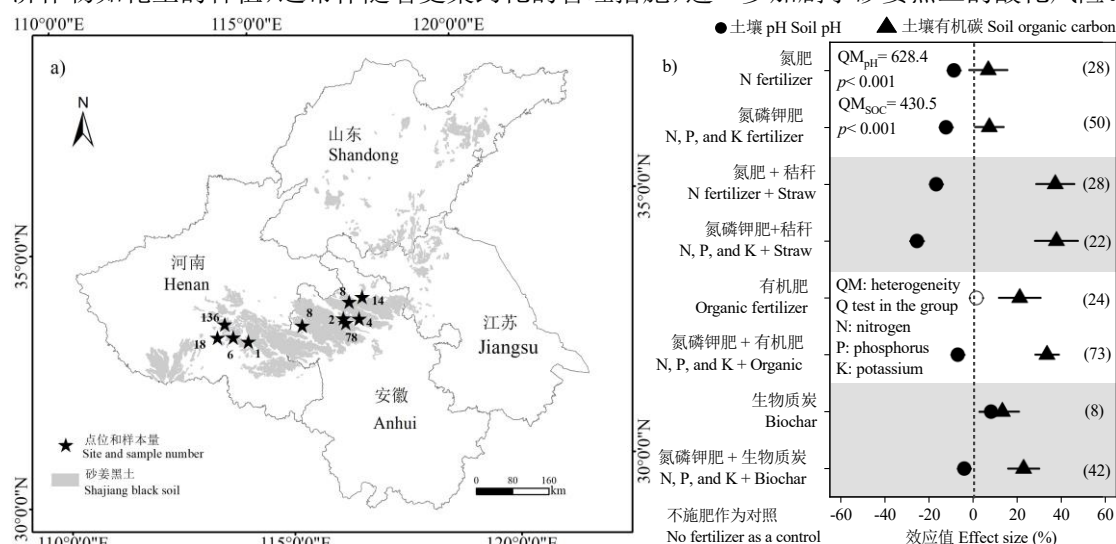
2 砂姜黑土酸化驱动因素

砂姜黑土酸化是多源驱动力长期叠加作用的结果,其本质是由 H^+ 的累积与缓冲体系衰退共同导致的,并伴随微生物地球化学过程的加速反馈^[16]。砂姜黑土的 pH 长期维持在中性至弱碱性,主要依赖其母质中富含的碳酸钙和黏性矿物,具备较强的初始缓冲能力,但随着集约化施肥、酸沉降与作物养分输出的长期积累,其化学和生物缓冲体系逐渐失衡。总体而言,驱动砂姜黑土酸化的机制主要有以下三个方面。

2.1 H^+ 持续累积

长期高强度的化肥投入是砂姜黑土酸化的首要驱动因素。首先,砂姜黑土区以小麦-玉

米轮作为主，氮肥年施用量通常超过国际推荐上限^[17-19]。氮肥在土壤中的转化过程是 H^+ 生成的重要途径，尤其是铵态氮 (NH_4^+) 经硝化作用转化为硝态氮 (NO_3^-) 时，每氧化 1 mol NH_4^+ 可产生 2 mol H^+ ，若 NO_3^- 被作物吸收或淋失，则无法中和该部分酸性，导致 H^+ 积累^[16]。通过对砂姜黑土 261 组施肥数据进行 Meta 分析 (图 2)，结果表明与不施肥相比，氮肥投入 (单施或者配施) 均显著降低土壤 pH，仅单施生物质炭能够显著提升土壤 pH；尽管单施有机肥总体上提升了土壤 pH，但没有达到显著水平。结果还进一步表明在砂姜黑土上仅靠秸秆还田较难阻止土壤酸化，可见在砂姜黑土上采用秸秆还田治理酸化的过程中应与有机肥或无机改良剂配合施用才能取得较好效果。其次，氮肥的化学组成差异决定了其酸化潜势的不同，相比铵态氮肥，液氨和尿素的酸化能力较低，因其转化为 NH_4^+ 时消耗等摩尔量的 H^+ ；有机肥中的氮元素形态与尿素类似，但其携带大量的盐基离子，可增强土壤缓冲能力和缓解土壤酸化^[20]。此外，酸沉降也是土壤中 H^+ 累积的重要途径。砂姜黑土区位于黄淮海酸沉降高发带，酸沉降不仅能直接输入 H^+ ，还能间接加剧 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的流失^[21-22]。除此之外，作物品种、轮作制度以及灌溉水源均可能间接影响 H^+ 的产生效率。特别是从传统作物转向经济作物如花生的种植，通常伴随着更集约化的管理措施，进一步加剧了砂姜黑土的酸化风险。



注：b) 中的点和误差线分别代表响应比及其 95% 的置信区间，如果误差线没有跨越零线表示处理与对照存在显著差异；括号内的数值代表样本数。Note: b) Dots with error bars in b represent the overall mean response ratio and 95% confidence interval (CI), respectively. The 95% CI that do not go across the zero line mean significant difference between treatment and control. The values in parentheses represent independent sample size.

图 2 不同施肥对砂姜黑土 pH 和有机碳的影响

Fig. 2 Effects of different fertilizers on pH and organic carbon in Shajiang black soil

2.2 酸缓冲体系衰退

砂姜黑土的本底性质是决定其酸化速率与缓冲能力的核心内在因素。自然状态下砂姜黑土母质富含碳酸钙和黏粒矿物，原本具有较强的缓冲能力 (图 3)。然而，由于 H^+ 持续累积、矿质养分补偿不充分和地下水位不断降低，表层土壤碳酸盐缓冲体系逐渐衰退甚至耗竭。统计年鉴数据表明，典型砂姜黑土区粮食总产量由 2000 年的 1 230 万吨增加至 2020 年的 2 140 万吨^[1]，若秸秆未能足量还田和矿质养分补充不到位，这部分碱性阳离子随产物被移除，导致砂姜黑土系统性碱性亏损和酸缓冲能力持续下降。理论上，若不考虑转化损失，将植物整株归还土壤不会对土壤造成酸化，同时还能显著提升土壤有机碳含量 (图 2) 和阳离子交换量^[23]，进而提升土壤酸碱缓冲能力。然而，砂姜黑土质地黏重、孔隙度小，历史上旱涝灾害频发，极端降雨或漫灌时多余的水分不能及时下渗并排出土体，导致表层易形成径流，引发土壤中盐基离子的损失问题^[24-25]。此外，砂姜黑土酸化进程与浅层地下水关系密切，随着

地下水位持续下降，一方面减弱了底层土壤中盐基离子在干旱季节（如小麦季）通过毛管水分蒸发向表层转移；另一方面，水位下移优先导致表层土壤中的碳酸钙向下迁移、硝化/氧化还原增强、反硝化作用减弱和硝酸根向底层淋失（图 3），进而加剧了砂姜黑土的酸化风险。

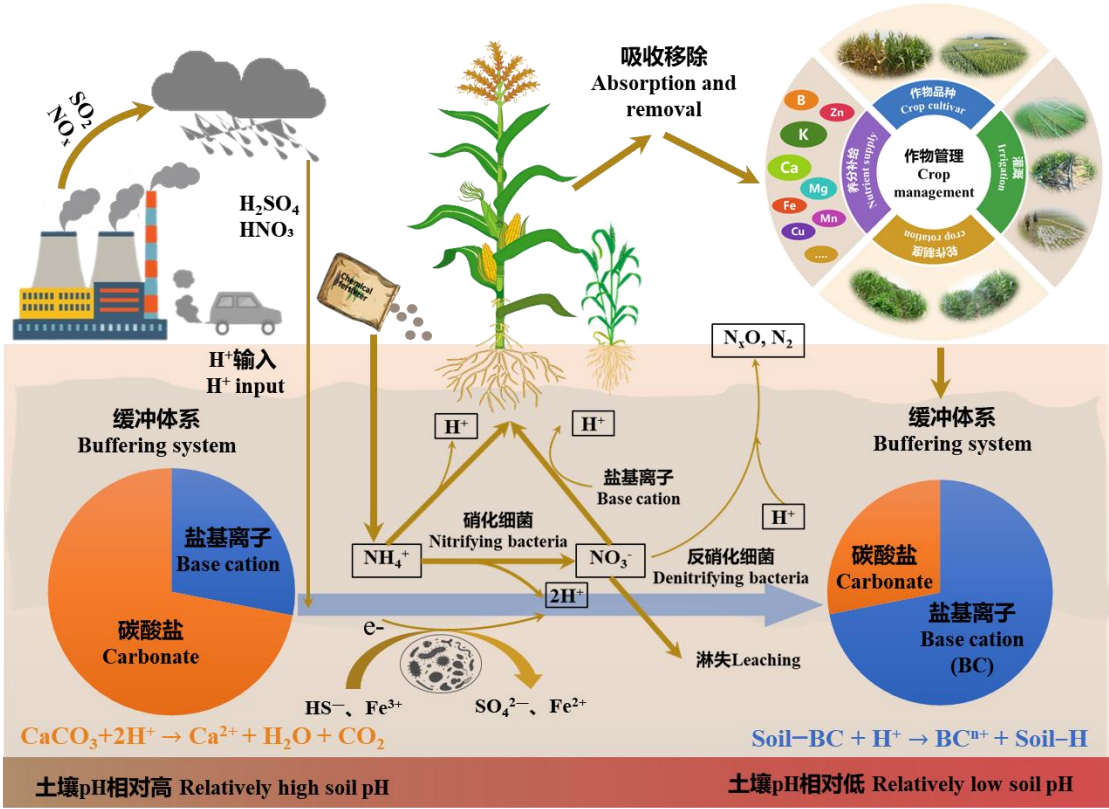


图 3 砂姜黑土酸缓冲体系转化主要过程及调控因素（以彩图发表）

Fig. 3 Main processes and regulatory factors of acid buffering system transformation in Shajiang black soil

2.3 微生物参与调控

砂姜黑土酸化不仅是化学离子平衡被破坏的结果，更是由微生物代谢过程驱动并反馈强化的生物地球化学循环重构过程（图 3）。酸化通过改变微生物群落结构与功能特征，进而调节氮循环、有机酸代谢及矿物风化反应，形成“化学—生物—矿物”多层耦合反馈系统，加速土壤酸度演变^[26]。酸化过程导致了砂姜黑土氮循环功能微生物群落的变化，如使嗜酸或耐酸型硝化菌占优，降低 *nirK* 型反硝化微生物种群丰度^[27-28]，从而加速土壤酸化进程。也有研究发现，砂姜黑土中 *Nitrosospora* 属和 *Nitrospira* 属等氨氧化微生物在酸化土壤中的相对丰度显著上升，表明微生物对酸环境的适应性演替^[29]。酸化对微生物有机酸代谢与碳循环具有显著的调节作用。低 pH 条件下，部分真菌和细菌通过分泌柠檬酸、草酸等有机酸来促进矿物风化和养分释放，短期内可络合铝离子等潜性酸实现减缓酸害，但长期积累的有机酸也会持续消耗碳酸盐体系并促进盐基离子淋失，从而加剧酸化^[30]。酸化条件促进铁还原菌、硫酸化菌活性增强，加速铁锰等活性氧化物溶解，释放金属阳离子并进一步降低 pH，形成矿物层次上的负反馈效应^[31]。部分细菌（如芽孢杆菌属）在酸性环境下可通过代谢产物释放氨类或碱性离子以中和酸度，体现出微生物的“自调节机制”，但其总体缓冲能力远不足以抵消化学致酸速率。综上，砂姜黑土酸化由“ H^+ 持续累积—酸缓冲体系衰退—微生物参与调控”三大驱动环节共同作用，但是当前的研究缺乏综合考虑氮输入、碳酸盐耗竭、离子淋失、微生物过程等多路径作用，关键控制因子与阈值范围仍不清晰，导致较难实现砂姜黑土酸化的精准调控与风险评估。

3 酸化砂姜黑土修复改良策略

砂姜黑土酸化的治理是一个复杂的系统工程，既需要从化学角度恢复土壤缓冲能力，也要从生物和管理层面重建养分循环与生态平衡。其本质目标是通过科学调控实现“阻酸、降酸、培肥、增效”的多维协同。砂姜黑土酸化防控措施应结合酸化程度、土地利用类型及经济可行性，遵循“分区分类、系统修复、长期维持”原则，构建以农艺优化、养分平衡、改良材料、生物互动与智能监测为核心的综合技术体系。

3.1 分级治理与精准调控

砂姜黑土酸化表现出显著的空间异质性，应根据土壤 pH 及酸缓冲特征分级治理。重度酸化土壤（pH < 4.5）的治理需要综合工程—化学—生物修复技术体系。首先需要采用工程措施，如深层翻耕（40~50 cm）将底层弱酸性或中性土壤翻至表层，与表层酸化土壤充分混合^[13]，其次是减少氮配合施用化学改良剂，包括石灰类、矿物类和组合类（例如石灰类+石膏）等^[32-33]；然后结合生物修复技术，如接种巨大芽孢杆菌和假单胞菌属，代谢产生的氨类物质和有机酸能够分别直接中和土壤 H⁺和间接螯合铝离子，进而构建健康的土壤生态系统^[26]；对于中度酸化土壤（pH 4.5~5.5），在优化耕作制度（如深翻、轮作等）的基础上推荐施用石灰类物质（如生石灰、石灰石粉等）、硅钙镁类调理剂（如硅钙镁肥、白云石粉等）与氮肥有机替代组合，该措施既能快速中和土壤活性酸，又能持续改良土壤结构，提供多种营养元素^[34]。轻度酸化土壤（pH 5.5~6.5）的治理应以农业生态调控为主，通过优化耕作制度和施肥模式阻止酸化进一步发展。在 pH 高于 6.5 的土壤中，酸化的潜在风险相对较小，但长期酸化可能耗尽碳酸盐缓冲物质，因此定期监测土壤质量和 pH 对避免酸化风险至关重要。砂姜黑土酸化分级治理方案的实施需考虑区域差异性和经济可行性。在实际应用中，可结合地理信息系统（GIS）和土壤酸化空间数据库，绘制区域土壤酸化等级分布图，实施分区治理与效果评估，形成“监测—调控—反馈—优化”的动态闭环管理模式。

3.2 耕作制度优化调酸补碳

优化耕作模式是改良砂姜黑土酸化的重要农艺措施之一，其核心在于通过物理手段调节土壤结构与水肥气热关系，进而影响土壤化学和生物学过程，从多途径中和酸性、阻控酸化^[35]。传统单一的旋耕模式由于耕层浅薄，不仅易形成坚硬的犁底层，阻碍根系下扎和水分下渗，更重要的是，它导致肥料尤其是铵态氮肥大量富集于表层，其硝化过程产生的 H⁺无法被深层土壤的碱性物质及时中和，从而加剧了表土的“酸化聚集”现象^[36-37]。针对这一问题，深耕作为关键改良技术，通过打破犁底层（通常深耕至 30~40 cm，深松至 35~50 cm），将底层富含钙、镁等盐基离子的中性或者弱碱性土壤与酸化表层混合，能直接、快速地提升耕层整体的 pH^[38-39]。研究表明，深耕配合生物质炭施用可使砂姜黑土 20~30 cm 土层的 pH 显著提高 0.33 个单位。更深层次的深翻技术（可达 50 cm）结合石灰施用，被证实能将土壤 pH 从 6.24 提升至 7.17，效果更为显著^[40]。这种物理混合不仅中和了活性酸，更关键的是改善了土壤通透性，促进了作物根系向深层伸展，利用深层水分和养分，减少了对表层化肥的依赖，从源头上降低了致酸物质的输入。

除了深耕，研究发现，秸秆覆盖还田配合少免耕有利于砂姜黑土有机质的提升和盐基离子的补充^[41-42]，能在一定程度上增强土壤的缓冲性能和维持土壤 pH 的相对稳定。因此，优化耕作模式实现的“调碳”过程，不仅直接增加了土壤碳库，更是通过增强土壤生态系统服务功能，为“改酸”提供了持久且稳定的内在动力。此外，秸秆覆盖能减少雨水对地表的直接击溅和径流，有效降低了盐基离子的淋失速度，减缓了土壤的自然酸化进程。但是也有研究发现，保护性耕作体系导致土壤 pH 略有下降，主要是由于有机物分解释放的氢离子增加、氮相关过程增强、有机酸输入（即来自作物残渣或根系分泌物）以及氮肥和作物残渣的表面

富集^[43]。进一步分析发现,不同耕作措施对土壤 pH 的影响受到土壤质地、有机质含量、气候条件以及耕作深度和频率等多重因素的调控^[44]。考虑到不同类型和品种的作物对铵态氮和硝态氮吸收利用效率不同,将合理轮作/间作和耐酸品种融入耕作模式对缓解土壤酸化至关重要^[45],但是不同作物轮作模式对土壤养分消耗和补充的影响也存在差异,其对土壤酸化的缓解机制尚需进一步阐明^[46]。因此,迫切需要结合不同耕作措施的特点,并考虑土壤类型、肥力水平、气候条件以及作物生长需求,以更好地解释耕作措施对土壤 pH 的影响机制。

3.3 养分资源管理阻酸增效

养分资源管理阻控砂姜黑土酸化的核心逻辑在于从源头和过程两个维度,最大限度减少致酸物质的输入与 H^+ 的产生。氮循环是土壤酸化的主因,当前首要策略是氮肥的精准减量与形态调控,通过基于作物需肥规律与土壤供氮能力的变量施肥技术,将氮肥用量控制在最经济高效的阈值内,实现阻控酸化和减肥增效^[20]。研究表明,在砂姜黑土区,通过测土配方可将传统习惯施氮量削减 25%,在保证较高肥料利用率和增产增收的情况下,能够直接减少等比例的潜在 H^+ 产生量^[47]。其次是氮肥形态的优化,建议优先选用酸化潜力较低的氮肥品种,例如在酸化严重的区域推荐施用缓释/控释氮肥、包膜氮肥等^[48]。此外,使用添加硝化抑制剂或脲酶抑制剂的稳定性肥料,能有效延缓铵态氮向硝态氮的转化速度,使氮素释放与作物吸收同步,这不仅提高了氮肥利用率,还显著降低了土壤中 H^+ 的瞬时浓度^[49-50],实现了对酸化过程的精准阻控。

增施有机物料或者替代部分化学氮肥也是改良砂姜黑土酸化的传统方法,本文 Meta 分析结果也表明单施有机物料能够在一定程度上阻止砂姜黑土酸化,配施化肥情况下也能在一定程度上起到缓解砂姜黑土的酸化(图 2)。一方面,有机物料能够有效改良砂姜黑土结构,显著增加有机碳含量和阳离子交换量,提升其对盐基离子的保有能力和对酸碱变化的缓冲容量;另一方面,有机物料能够提升土壤微生物活性,增强微生物分泌物和代谢产物的形成,进而促进土壤原生矿物的溶解,缓慢释放出 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等盐基离子,从而从根本上提升土壤的盐基饱和度和抗酸化能力^[51]。这种以“碳”调“酸”、以“有机”促“无机”的协同路径,是实现土壤健康长效管理的核心。需要注意的是,部分有机肥料可能携带超标重金属等有害物质,一些未彻底腐熟的有机肥料会产生毒害气体,在选择过程中应优先考虑有机肥料的来源和处理方式^[52]。除了氮肥,长期配合施用氯化钾、过磷酸钙等生理酸性肥料,其副成分(如 Cl^-)也会加剧盐基离子淋失^[53]。因此,选用生理中性或碱性肥料作为替代方案,例如用硫酸钾替代部分氯化钾^[54-55],用钙镁磷肥或磷铵替代过磷酸钙^[56-57]。这些替代品不仅能提供必需营养,其携带的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 PO_4^{3-} 等离子还有助于稳定或提升土壤 pH^[58]。

3.4 改良材料适配降酸增产

砂姜黑土的酸化改良首先依赖于对各类改良产品特性与作用机理的精准理解,并据此进行科学适配。无机改良剂,以石灰类物质(如生石灰、熟石灰、石灰石粉等)为代表,是目前最直接、最有效的酸化土壤修复手段,其核心作用机理是快速、直接的中和反应^[33],能够在短期内显著提升土壤 pH,尤其是在应对中、重度酸化的砂姜黑土时增产效果较为突出^[59]。然而,其缺点在于作用半径小、移动性差,若施用不均易造成土壤局部过碱,且过量使用可能导致微量元素(如锌、铁)固定和土壤板结^[60]。相比之下,石膏虽不能直接提高 pH,但其具有较强的溶解性和可移动性,与石灰类物质配合施用能够达到显著的改酸、培肥和增产效果^[32, 61-62]。硅钙镁肥等多元矿物肥料,则在提供钙素的同时,还能补充硅元素,有助于增强作物细胞壁强度,提高对病虫害和逆境的抵抗能力^[63],实现降酸与增产的双重目标^[64]。但是其在砂姜黑土应用的研究相对较少,需要进一步验证其效果。

生物质炭的应用是改良酸化砂姜黑土的重要措施之一^[65]。生物质炭作为一种富含稳定碳的多孔材料,其酸化改良机理是多维度的:首先,其本身通常呈碱性,可直接中和部分酸性^[66];其次,其巨大的比表面积并携带大量盐基离子,能强力吸附并保蓄 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等

离子,并通过缓慢释放持续为作物供肥,从而增强土壤的长期缓冲能力^[66-67];此外,其多孔结构为土壤微生物提供了理想的生存和繁殖场所,能有效改善土壤团聚结构和保水保肥能力^[68];最后,生物质炭能够直接影响氮循环过程,吕润锦等^[69]研究分析结果也表明生物质炭施用显著增加硝化速率和氨氧化细菌丰度,且在酸性土壤中对硝化速率的促进作用显著高于中性或碱性土壤。腐植酸、商品有机肥等则主要通过增加土壤的阳离子交换能力、促进土壤团粒结构形成以及刺激微生物活性,进而间接缓解酸害^[59,70-71]。有机改良剂施用对 pH 提高效率弱于石灰,但其作用更全面、持久,且能同步实现改酸与培肥,对于追求土壤健康与可持续发展的现代农业至关重要^[16,72]。要实现砂姜黑土酸化治理的最大效益与可持续性,关键在于突破单一产品使用的局限,转向有机无机改良剂的协同配施。通过同步改善土壤的物理、化学和生物学性质,为作物构建了一个健康、高产的根际环境,实现从“降酸”到“增产”、从“治理”到“生态培育”的升华,是砂姜黑土区实现农业绿色高质量发展的必由之路。

3.5 生物互作构建耐酸体系

选择耐酸或调酸能力强的植物进行轮作是砂姜黑土酸化缓解的生态化途径。耐酸植物通过其独特的生理生态机制进行调酸降酸:一方面,其根系能分泌诸如苹果酸、柠檬酸等有机阴离子,这些分泌物能有效络合(螯合)土壤中的铝、锰等毒性离子,直接减轻作物面临铝、锰毒害的潜在风险^[73];另一方面,其优先吸收铵态氮的习性,能够直接抑制硝化过程^[74],实现对产酸源头的控制。然而,仅依靠植物自身的力量是有限的,必须结合根际生命共同体进行综合调控^[75-76]。在此框架下,耐酸基因挖掘和植物选育是系统的核心驱动^[77-78],而农业管理措施则是优化整个系统的调控手段。例如,在田间通过玉米—大豆轮作或间作耐酸豆科绿肥,便能利用不同植物根系分泌物与养分吸收模式的差异,动态调节根际的化学生物环境^[79-80],为构建多样化的根际微生物群落创造必要条件。此外,进一步结合土壤深翻、秸秆深还、养分协同集成技术,不仅直接改善了植物的根系生长空间,更关键的是为根际生命共同体的繁荣创造了深厚的物理空间和丰富的食物网络。

微生物调控是砂姜黑土酸化的生物改良前沿领域。微生物在代谢过程中会产生酸性或碱性代谢产物,从而对土壤酸碱度进行动态调节^[81-82]。研究表明芽孢杆菌通过分泌酸性和碱性代谢物来改变土壤 pH^[83]。而将不同功能的微生物组合成(复合菌群),则是实现协同增效、突破单一菌剂应用瓶颈的必然趋势^[84-85]。近年来,技术的突破已不再局限于利用天然菌种。例如,海南大学的研究人员开发了一种表面工程化的功能固氮菌,通过在菌株(*Pseudomonas stutzeri* A1501)表面引入 pH 响应性共聚物和磷酸钙纳米颗粒,使其在酸性土壤中不仅能高效固氮,还能同步释放 Ca^{2+} 和磷元素,在提高土壤 pH 的同时改善了土壤肥力结构与微生物菌群,展现了工程菌剂在复杂田间环境下的巨大应用潜力^[86]。如将这种复合菌群与有机肥、生物质炭等载体结合制成菌剂,不仅解决了功能菌在土壤中存活与定殖的难题,更能系统性地调控根际微环境,从单纯提供氮源到全面“降酸、解毒、培肥”的功能升级,为砂姜黑土的生物改良提供了强大而持久的技术工具。

3.6 新材料新技术综合治酸

随着科技进步,新技术、新材料与大数据分析在土壤酸化治理领域的应用日益广泛,为砂姜黑土酸化改良提供了新的解决方案。这些创新技术不仅提高了酸化治理的精准度和效率,也推动了土壤质量管理模式的变革。新型改良材料的研发与应用是砂姜黑土酸化治理的前沿领域。传统改良材料如石灰、石膏等虽然有效,但存在作用时间短、施用不均、可能引起微量元素缺乏等局限性^[87]。近年来,功能型生物质炭、纳米矿物材料、高分子保水剂等新型功能化改良剂的开发为酸化土壤治理提供了新选择^[68]。例如,功能化修饰的生物质炭(如负载铁氧化物、碳酸钙、磷酸盐等)进一步增强了针对酸化土壤的改良效果,实现了酸性中和、养分调控和污染物固定的多功能一体化^[88-89]。纳米矿物材料在土壤酸化治理中也展现出巨大潜力^[90-91],其具有粒径小、比表面积大、反应活性高等特点,可快速中和土壤酸度^[92]。

此外,复合型改良剂的研发成为热点,通过将不同功能的材料优化组合,实现协同改良。例如,将生物质炭与石灰、腐殖酸、有益微生物等复合,制成兼具快速中和与持久调理功能的多功能土壤改良剂,可同时解决土壤酸化、贫瘠、板结等多重问题^[93]。然而这些新材料在砂姜黑土上的改酸效果目前仍不清楚,能否通过与有机物料配合施用达到事半功倍的效果也是未来研究的重要方向。

智能监测与预警技术的发展实现了对砂姜黑土酸化的实时监测和早期预警。传统的土壤酸化监测依赖于周期性取样和实验室分析,成本高、时效性差。近年来,物联网技术、传感器技术和遥感技术的进步使土壤酸化的实时监测和精准预警成为可能^[94]。具体而言,土壤多参数传感器可实时监测土壤 pH、湿度、电导率等指标的变化,并通过无线网络将数据传输至云平台^[95]。此外,高光谱遥感和无人机遥感技术可实现区域尺度土壤酸化的快速普查和制图,通过土壤表面光谱特征与 pH 的关联模型,大范围评估土壤酸化状况^[96]。这些智能监测技术结合人工智能算法,可建立土壤酸化预测预警模型,为酸化风险防控提供决策支持。大数据与精准治理平台的建设是应对区域尺度砂姜黑土酸化的必然趋势。随着土壤普查数据的积累和监测网络的完善,如何高效管理和分析海量土壤数据,并将其转化为治理决策的依据,成为亟待解决的问题。智能化装备与精准作业技术是落实酸化治理方案的重要保障。近年来,智能深耕机、变量施肥机、土壤改良剂精准撒施机等智能化装备的发展,大大提高了酸化治理的效率和精准度。然而,这些技术推广面临成本高、农民接受度低、专业人才缺乏等挑战,需要政府、科研机构和企业协同努力,通过政策支持、技术培训和示范推广,加速新技术在砂姜黑土酸化治理中的应用。

4 未来研究方向与展望

砂姜黑土酸化问题已从局部性退化演变为区域性生态风险,其复杂性源于物质循环、微生物过程与管理措施的多层耦合。未来的研究应从机理深化、技术创新与系统集成三方面入手,构建“酸化监测—机制解析—智能调控—持续恢复”的整体框架,实现砂姜黑土酸化的科学治理与生态修复。

4.1 深化砂姜黑土酸化形成机理

目前对砂姜黑土酸化的认识多集中于 H⁺输入来源、机制与 pH 变化,而对其矿物学与微观结构演变机制的研究仍显不足。未来研究应从微观层面揭示酸化过程中的矿物溶解、阳离子交换与次生矿物的形成机制。一方面,应重点关注剖面土壤碳酸盐、铁锰氧化物及黏土矿物的结构演变规律,明确它们在酸化环境下的溶解动力学过程与转化路径。例如,酸性条件下铁锰氧化物的还原溶解释放可加剧重金属活化,而黏土矿物结构退代会削弱其阳离子交换与缓冲能力。另一方面,可利用 XRD、XPS、FTIR、同步辐射等多尺度表征技术,解析离子在矿物界面的迁移与配位行为,构建酸化驱动下矿物结构重组的过程模型。此外,需加强矿物—有机质—微生物三部分交互作用研究,揭示矿物溶解与有机质稳定之间的竞争与协同机制,推动砂姜黑土酸化治理与“双碳”战略深度融合,为恢复土壤健康与碳库稳定性提供理论基础。

4.2 微生物机制研究:构建“生物—化学—矿物”耦合模型

微生物过程是砂姜黑土酸化的核心调节环节。未来研究应着重突破以下三个方面:微生物群落结构与功能网络解析:通过宏基因组学、代谢组学与稳定同位素示踪技术,识别在酸化环境下关键功能菌群(如氨氧化菌、耐酸细菌等)的代谢路径与生态位分布,探究其在氮氧化、有机酸分泌及金属还原等过程中的贡献率,解析酸化条件下微生物群落功能重构、养分转化路径及根际生态调节机制。酸化反馈过程的定量模拟:构建“化学致酸—微生物响应

—代谢反馈”耦合模型，定量分析微生物代谢对 H^+ 平衡的调控程度，并识别酸化阈值与恢复临界点。功能菌群构建与生态修复应用：通过筛选耐酸、解毒、固碳及促生型菌株，构建复合功能微生物群落，实现酸中和、致酸离子钝化及地力提升的综合效应。结合基因工程与生态共生技术，可开发智能型菌剂，为砂姜黑土酸化的生物防控提供新思路。未来应形成基于宏基因组与代谢网络的“微生物—化学—矿物”多维机制框架，实现从现象解释到过程预测的跨尺度突破，为生物修复技术提供理论基础。

4.3 构建酸化监测与模型预测体系

砂姜黑土酸化的空间异质性与时间动态性强，迫切需要建立高时空分辨率的监测与预测体系。在监测方面，应结合土壤普查数据，集成地面观测、传感器监测与遥感反演技术，构建区域酸化时空数据库。通过 pH、盐基离子、碳酸盐含量及微生物指标的多源融合，实现酸化动态追踪。在模型预测方面，应发展多因子耦合的酸化动态模型，将氮输入、气候变化、水文过程与土地利用等变量纳入系统。利用机器学习与地统计学方法，可实现砂姜黑土酸化趋势、缓冲衰退速率与改良剂投放效率的定量预测。此外，应建立酸化风险预警与分级治理模型，从“静态评估”向“动态调控”的转变，为政府与农户提供科学决策支持。通过数据驱动与模型集成，可实现砂姜黑土酸化从“经验治理”向“数字化、智能化管理”的跨越。

4.4 技术集成与绿色修复路径

未来砂姜黑土酸化治理的重点在于实现多技术的协同集成与区域化推广。农艺优化与改良材料结合：应构建“深耕+有机还田+石灰/生物质炭”三位一体的改良体系，在不同酸化阶段实施分层干预，实现结构改良与缓冲恢复的协同。生物修复与化学调控耦合：通过联合施用耐酸菌剂与矿物改良剂，增强 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 再分布与有机酸络合能力，形成“快速降酸—长期稳酸—持续培肥”的生态链条。智能化装备与精准施改技术：发展变量施改机械、无人农机精准撒施与自动配肥系统，提高改良剂利用率与施用均匀度，降低人力与资源消耗。生态-农业-社会协同：将酸化治理与地力提升、碳汇增强及绿色生产模式相结合，形成可复制、可推广的区域化综合治理模式。这些集成措施将推动砂姜黑土酸化治理从单一要素干预走向系统调控，实现“稳酸—培肥—提质”的综合效应。此外，由于当前在酸化耕地治理的基础上实现治酸、培肥和土壤健康协同目标还缺乏统一的技术规范和分区分类的轻简化标准体系，建议科学规划，分类分期，按序推动团体标准、省级地方标准、农业行业标准和国家标准的制定工作。

5 结 论

砂姜黑土酸化是威胁我国黄淮海平原粮食安全和土地可持续利用的重大土壤退化问题。本文系统梳理了砂姜黑土酸化的现状、时空特征、驱动因素及改良技术研究进展，发现砂姜黑土酸化趋势明显，且具有表层聚集和空间异质性的特点。总体而言，砂姜黑土酸化治理正从“单因分析”迈向“系统调控”，从“被动修复”走向“主动防控”，从“经验操作”转向“智能决策”。面对气候变化与高强度农业利用的新形势，砂姜黑土酸化问题仍在持续加剧。未来研究应以机制解析为基础、模型预测为支撑、技术集成为核心、智能治理为方向，构建科学高效的防控体系。通过矿物学机制阐释、微生物驱动研究与数字化管理平台的协同推进，可实现砂姜黑土的酸化防控、地力恢复与生态系统韧性提升，为保障我国粮食安全与农业可持续发展提供坚实支撑。

参考文献 (References)

- [1] Peng X H, Zhang Z B, Guo Z C. Principle and technology of improving Shajiang black soil[M]. Beijing: Science Press, 2022. [彭新华, 张中彬, 郭自春. 砂姜黑土改良的原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2022.]

- [2] Guo X S. Chinese Shajiang black soils[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024. [郭熙盛. 中国砂姜黑土[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024.]
- [3] Li D C, Zhang G L, Gong Z T. On taxonomy of Shajiang black soils in China[J]. *Soils*, 2011, 43(4): 623-629. [李德成, 张甘霖, 龚子同. 我国砂姜黑土土种的系统分类归属研究[J]. *土壤*, 2011, 43(4): 623-629.]
- [4] Wei X T, Zhao Y F, Niu Y X, et al. Spatiotemporal changes of soil pH in recent 35 years and driving factors in a typical agricultural region of North China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(5): 1042-1051. [魏鑫涛, 赵彦锋, 牛银霞, 等. 近35年来华北典型农业区土壤pH时空变化及其驱动因子分析[J]. *土壤通报*, 2021, 52(5): 1042-1051.]
- [5] Lei M, Kong X B, Zhang X L, et al. Land use change and impact on groundwater storage in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Resources Science*, 2017, 39(6): 1099-1116. [雷鸣, 孔祥斌, 张雪靓, 等. 黄淮海平原区土地利用变化对地下水资源量变化的影响[J]. *资源科学*, 2017, 39(6): 1099-1116.]
- [6] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Circular of the General Office of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on Doing a Good Job in the Management of Acidized Farmland in Key Counties[EB/OL]. [2023-07-11]. https://ntjss.moa.gov.cn/tzgg/202307/t20230711_6431909.htm. [中华人民共和国农业农村部. 农业农村部办公厅关于做好重点县酸化耕地治理的通知[EB/OL]. [2023-07-11]. https://ntjss.moa.gov.cn/tzgg/202307/t20230711_6431909.htm.]
- [7] Zhang W B, Wei C L, Li J Y, et al. Stabilization of acidification in China's cropland soils[J]. *Nature Geoscience*, 2025, 18(11): 1125-1132.
- [8] Li S C, Wan H Y, Wang X K, et al. Basic properties variation of fluvo-aquic soil and lime calcic black soil in Henan Province[J]. *Soils*, 2014, 46(5): 920-926. [李少丛, 万红友, 王兴科, 等. 河南省潮土、砂姜黑土基本性质变化分析[J]. *土壤*, 2014, 46(5): 920-926.]
- [9] 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. [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.]
- [10] Li P F, Du G Q, Liu C, et al. Acidity and basicity characteristics and acidification trend of the farmland soil in Huaibei Plain, Anhui Province[J]. *East China Geology*, 2019, 40(3): 234-240. [李朋飞, 杜国强, 刘超, 等. 安徽淮北平原农田土壤酸碱度特征及酸化趋势研究[J]. *华东地质*, 2019, 40(3): 234-240.]
- [11] Zhang R. Study on organic phosphorus components and loss characteristics of Shajiang black soil under long-term fertilization[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022. [张睿. 长期施肥下砂姜黑土有机磷组分及流失特征研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022.]
- [12] Gong Z T. Chinese soil taxonomy: Theory · Method · Practice[M]. Beijing: Science Press, 1999. [龚子同. 中国土壤系统分类——理论·方法·实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [13] Liu H Y, Li Y P. Soil profile characteristics and improvement suggestions of lime concretion black soil in Henan Province[J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2013, 34(3): 78-81. [刘海艳, 李跃鹏. 河南省砂姜黑土土壤剖面特征及利用改良建议[J]. *华北水利水电学院学报*, 2013, 34(3): 78-81.]
- [14] Chen Y M, Gao L, Zhang Z B, et al. Spatial distribution of Shajiang content in Shajiang black soil of Huaibei Plain and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(1): 148-160. [陈月明, 高磊, 张中彬, 等. 淮北平原砂姜黑土区砂姜的空间分布及其驱动因素[J]. *土壤学报*, 2022, 59(1): 148-160.]
- [15] Chen W J, Li P P, Wen Q, et al. Characteristics of acidification and the distribution of available phosphorus along soil depths in heavy clay soils in southern Henan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(1): 126-132. [陈文举, 李培培, 文倩, 等. 豫南黏板土土壤分层酸化和耕层速效磷分布特征[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(1): 126-132.]
- [16] Wu F, Zhao Y F, Zhang S Q, et al. Analysis and prospect of the causes and prevention measures of soil

acidification in farmland[J]. Environmental Science, 2026, 47(1): 531-542. [武菲, 赵彦锋, 张水清, 等. 农田土壤酸化成因及防治措施分析与展望[J]. 环境科学, 2026, 47(1): 531-542.]

[17] Liu Q P, Sun J R, Pu L J. Comparative study on fertilization intensity and integrated efficiency in China and Euro-American major countries[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(14): 9-16. [刘钦普, 孙景荣, 濮励杰. 中国及欧美主要国家化肥施用强度与综合效率比较研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 9-16.]

[18] Lü J L, Gao Y B, Luo X S, et al. Characteristics of soil mineral nitrogen distribution and nitrogen transport under different nitrogen application rates and wheat-maize rotation in lime concretion black soil[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2025, 42(4): 990-999. [吕金岭, 高燕哺, 骆晓声, 等. 砂姜黑土麦玉轮作不同施氮量下土壤矿质氮运移规律及分布特征[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(4): 990-999.]

[19] Song Y F, Wu Z J, Fu K X, et al. Selection of combined application mode of organic fertilizer and inorganic nitrogen in winter wheat planting area of lime concretion black soil in Southeast Henan[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2025, 59(1): 38-48. [宋一凡, 武紫君, 付凯霞, 等. 豫东南砂姜黑土冬小麦种植区有机肥和无机氮配施组合模式选择[J]. 河南农业大学学报, 2025, 59(1): 38-48.]

[20] Wang P S, Xu D H, Lakshmanan P, et al. Mitigation strategies for soil acidification based on optimal nitrogen management[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2024, 11(2): 229-242.

[21] Yu Q, Ge X D, Zheng H T, et al. A probe into the acid deposition mitigation path in China over the last four decades and beyond[J]. National Science Review, 2024, 11(4): nwae007.

[22] Yu Q, Duan L, Hao J M. Acid deposition in China: Sources, effects and control[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(3): 731-746. [余倩, 段雷, 郝吉明. 中国酸沉降: 来源、影响与控制[J]. 环境科学学报, 2021, 41(3): 731-746.]

[23] Fan Q F, Sheng S H, Yang C L, et al. Effects of different straw returning methods on the soil acidification of dryland in low mountain and hilly areas of Liaodong[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(12): 2984-2990. [范庆锋, 盛诗涵, 杨春璐, 等. 玉米秸秆还田形式对辽东低山丘陵区旱田土壤酸化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(12): 2984-2990.]

[24] Sun H W. Moisture characters of calcic concretion black soil and their relationship with soil drought[J]. Acta Pedologica Sinica, 1993, 30(4): 423-431. [孙怀文. 砂姜黑土的水分特性及其与土壤易旱的关系[J]. 土壤学报, 1993, 30(4): 423-431.]

[25] Zhang Y F, Wang Y F, Liu L X. Function mechanism between the drought and waterlogging disaster and the soil-structure of the Shajiang soil in Huaibei Plain[J]. Progress in Geography, 2001, 20(2): 169-176. [张义丰, 王又丰, 刘祥祥. 淮北平原砂姜黑土旱涝(渍)害与水土关系及作用机理[J]. 地理科学进展, 2001, 20(2): 169-176.]

[26] Shu S Q, Luo H, Shi X J, et al. Functional mechanisms and application prospects of acid-tolerant bacteria in ameliorating acidic soils[J]. Microbiology China, 2025, 52(6): 2424-2440. [舒思祺, 罗欢, 石孝均, 等. 耐酸细菌在酸性土壤改良中的功能机制与应用前景[J]. 微生物学通报, 2025, 52(6): 2424-2440.]

[27] Meng C B, Xing Y T, Ding Y, et al. Soil acidification induced variation of nitrifiers and denitrifiers modulates N₂O emissions in paddy fields[J]. Science of the Total Environment, 2023, 882: 163623.

[28] Zhao Y X, Hu J J, Wang J Q, et al. Comammox *Nitrospira* act as key bacteria in weakly acidic soil via potential cobalamin sharing[J]. iMeta, 2025, 4(1): e271.

[29] Sun R B, Wang D Z, Guo Z B, et al. Combined application of organic manure and chemical fertilizers stabilizes soil N-cycling microflora[J]. Soil Ecology Letters, 2023, 5(3): 220165.

[30] Ma Y Y. Effect mechanism of long-term fertilization on microbial community in Shajiang black soil wheat field[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2019. [马玉颖. 长期施肥对砂姜黑土麦田微生物群落的影响机制[D]. 南京: 南京林业大学, 2019.]

[31] Chen S C, Li X M, Battisti N, et al. Microbial iron oxide respiration coupled to sulfide oxidation[J]. Nature,

2025, 646(8086): 925-933.

[32] Bossolani J W, Crusciol C A C, Mariano E, et al. Long term co-application of lime and phosphogypsum increases ^{15}N recovery and reduces ^{15}N losses by modulating soil nutrient availability, crop growth and N cycle genes[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 149: 126907.

[33] Han T F, Liu K L, Zhao Y F, et al. Variation of soil pH in acidic farmland soil response to inorganic amendments: A meta-analysis[J]. *Soils and Crops*, 2025, 14(1): 25-33. [韩天富, 柳开楼, 赵彦锋, 等. Meta 分析评估无机改良剂对酸性农田土壤 pH 的影响[J]. *土壤与作物*, 2025, 14(1): 25-33.]

[34] Xu R K, Li J Y, Zhou S W, et al. Scientific issues and controlling strategies of soil acidification of croplands in China[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 160-167. [徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 160-167.]

[35] Çelik İ, Günel H, Acar M, et al. Strategic tillage may sustain the benefits of long-term no-till in a Vertisol under Mediterranean climate[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 185: 17-28.

[36] Wang Y K, Guo Z C, Zhang Z B, et al. Effect of tillage practices on soil physical properties and maize growth in Shajiang black soil(vertisol)[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(6): 1370-1380. [王玥凯, 郭自春, 张中彬, 等. 不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和玉米生长的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(6): 1370-1380.]

[37] Yang Q H, Gao E M, Ma X M. Study on growing dynamic of maize root system in Shajiang black soil[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(5): 587-593. [杨青华, 高尔明, 马新明. 砂姜黑土玉米根系生长发育动态研究[J]. *作物学报*, 2000, 26(5): 587-593.]

[38] Cheng S X, Liu W L, Jin Y J, et al. Effects of subsoiling depth on topsoil properties, crop yield and water use efficiency in Lime Concretion Black soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(9): 1355-1365. [程思贤, 刘卫玲, 靳英杰, 等. 深松深度对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(9): 1355-1365.]

[39] Xie Y X, Jin H Y, Meng Q Y, et al. Deep tillage improving physical and chemical properties of soil and increasing grain yield of winter wheat in lime concretion black soil farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(10): 167-173. [谢迎新, 靳海洋, 孟庆阳, 等. 深耕改善砂姜黑土理化性状提高小麦产量[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 167-173.]

[40] Chen W J. Spatial characterization of acidification and improvement technology under different tillage and fertilization systems in a vertisol of southern Henan Province[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2022. [陈文举. 豫南砂姜黑土空间酸化态势及耕作培肥改良技术研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2022.]

[41] Jiang R, Liu S, Jiang F H, et al. Soil organic carbon trade-offs under conservation tillage: Carbon stock versus stability mediated by particulate and mineral-associated fractions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2025, 254: 106704.

[42] Wang X B, Che W, Ji R T, et al. Effects of straw returning and conservation tillage patterns on the contents of organic matter and nitrogen nutrient in the lime concretion black soil[J]. *Soils*, 2015, 47(3): 483-489. [王晓波, 车威, 纪荣婷, 等. 秸秆还田和保护性耕作对砂姜黑土有机质和氮素养分的影响[J]. *土壤*, 2015, 47(3): 483-489.]

[43] Zhao X, He C, Liu W S, et al. Responses of soil pH to no-till and the factors affecting it: A global meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(1): 154-166.

[44] Lü L G, Gao Z B, Liao K H, et al. Impact of conservation tillage on the distribution of soil nutrients with depth[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 225: 105527.

[45] Xu Y, Li Y S, Yu Z H, et al. Roles of soil organic acids and base cations in Mollisol acidification during the peak growth stage of crops[J]. *Soil and Tillage Research*, 2025, 254: 106726.

[46] Su Y F, Bao W B, Li Y S, et al. A review of soil acidification: Principles, risk and mitigation measures in farmland[J]. *Soils and Crops*, 2025, 14(1): 1-14. [苏亚飞, 包文彬, 李彦生, 等. 农田土壤酸化: 原理、危害及缓解措施[J]. *土壤与作物*, 2025, 14(1): 1-14.]

- [47] Li Y C. Effects of soil testing and formula fertilization on summer maize yield and fertilizer utilization efficiency in the Shajiang black soil area of Northern Anhui Province[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2025, 31(12): 19-22. [李运超. 测土配方施肥对皖北砂姜黑土区夏玉米产量及肥料利用率的影响[J]. *安徽农学通报*, 2025, 31(12): 19-22.]
- [48] Wang Z, Tao T T, Wang H, et al. Forms of nitrogen inputs regulate the intensity of soil acidification[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(14): 4044-4055.
- [49] Li S G, Liu Y W, Sha Z P, et al. Adding nitrification inhibitors to N fertilisers induces rhizosphere acidification and enhances P acquisition: A meta-analysis[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 151: 126967.
- [50] Abalos D, Jeffery S, Sanz-Cobena A, et al. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 189: 136-144.
- [51] Li K W, Xu R K. Role of carbon cycle in soil acidification and its inhibition[J]. *Soils*, 2025, 57(3): 485-497. [李科伟, 徐仁扣. 碳循环在土壤酸化与调控中的作用[J]. *土壤*, 2025, 57(3): 485-497.]
- [52] Ning C C, Wang J W, Cai K Z. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(1): 175-181. [宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(1): 175-181.]
- [53] Ji J H, Lü Z Z, Liu S Z, et al. Long-term application of chemical fertilizers induces soil acidification and soil exchangeable base cation loss on paddy in Southern China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(13): 2599-2611. [冀建华, 吕真真, 刘淑珍, 等. 长期施用化肥对南方稻田土壤酸化和盐基离子损失的影响[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(13): 2599-2611.]
- [54] Lu Y, Cong P, Kuang S, et al. Long-term excessive application of K_2SO_4 fertilizer alters bacterial community and functional pathway of tobacco-planting soil[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1005303.
- [55] Sardans J, Peñuelas J. Potassium: A neglected nutrient in global change[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 24(3): 261-275.
- [56] Zeng M F. Mechanisms of cropland soil acidification induced by the long-term fertilization and mitigation strategy[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. [曾沐梵. 长期施肥导致农田土壤酸化的机制及缓解策略[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.]
- [57] Ji B J, Li W H, Xu M Y, et al. Varying synthetic phosphorus varieties lead to different fractions in calcareous soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(12): 2581-2594. [吉冰洁, 李文海, 徐梦洋, 等. 不同磷肥品种在石灰性土壤中的磷形态差异[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(12): 2581-2594.]
- [58] Zhang Y J, Ye C, Su Y W, et al. Soil Acidification caused by excessive application of nitrogen fertilizer aggravates soil-borne diseases: Evidence from literature review and field trials[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 340: 108176.
- [59] Zhao X Q, Pan X Z, Ma H Y, et al. Scientific issues and strategies of acid soil use in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1248-1263. [赵学强, 潘贤章, 马海艺, 等. 中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J]. *土壤学报*, 2023, 60(5): 1248-1263.]
- [60] Wu Y, Lu H M, Cao H S, et al. Effects of combined application of limestone and organic matter on soil acidification alleviation and their influences on available Fe, Mn, Cu, Zn, and microbial biomass carbon and nitrogen[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2025, 52(2): 301-309. [吴郁, 卢洪美, 曹海生, 等. 石灰质与有机物联合降酸效应及其对土壤有效铁、锰、铜、锌和微生物碳氮的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2025, 52(2): 301-309.]
- [61] Lu W H, Wang Y F, Liu J, et al. Phosphogypsum(PG)harmless modification and its application in farmland soil improvement: A review[J]. *Soils*, 2023, 55(4): 699-707. [卢维宏, 王要芳, 刘娟, 等. 磷石膏无害化改性及其在农田土壤改良中的应用研究进展[J]. *土壤*, 2023, 55(4): 699-707.]
- [62] Shruthi, Prakash N B, Dhumgond P, et al. The benefits of gypsum for sustainable management and utilization

of acid soils[J]. *Plant and Soil*, 2024, 504(1): 5-28.

[63] Chen H N, Gao W S, Zheng L, et al. Effects of silicon-calcium-potassium-magnesium fertilizer combined with fulvic acid potassium on soil chemical properties, yield and quality of fruit in apple orchard with acidified soils[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2023(3): 82-87. [陈海宁, 高文胜, 郑磊, 等. 硅钙钾镁肥与黄腐酸钾配施对酸化果园土壤化学性质及苹果产量和品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(3): 82-87.]

[64] Han T F, Shen Z, Liu K L, et al. Inorganic amendments increase soil carbon sequestration across global acidic agroecosystems: A meta-analysis[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2026, 14(1): 100577.

[65] Liu S W, Cen B T, Yu Z N, et al. The key role of biochar in amending acidic soil: Reducing soil acidity and improving soil acid buffering capacity[J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 52.

[66] Gao L, Li Z H, Wang F, et al. Application progress and risk analysis of biochar in soil amelioration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(19): 19-31. [高亮, 李志合, 王芳, 等. 生物炭在土壤改良中的应用进展与风险分析[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(19): 19-31.]

[67] Aurangzeib M, Zhang S L, Yan S H, et al. Biochar application can improve most of the chemical properties of acidic soils: A global meta-analysis[J]. *ACS Agricultural Science & Technology*, 2024, 4(3): 292-306.

[68] Hu R, Long Q L, Wang L M, et al. Progress on effects and mechanism of biochar on amelioration of acidified soils[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2025, 44(4): 11-21. [胡仁, 龙巧玲, 王力敏, 等. 生物炭对酸性土壤改良效果及机制的研究进展[J]. *华中农业大学学报*, 2025, 44(4): 11-21.]

[69] Lü R J, Zhou S J, Dai W Y, et al. Heterogeneous effects of biochar on nitrification in agricultural soils[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2025, 49(5): 11-18. [吕润锦, 周思静, 代雯雅, 等. 生物炭对农田土壤硝化作用的异质性效应研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2025, 49(5): 11-18.]

[70] Luo Y, Li X L, Zhang S S, et al. Characteristics of different humic acid and its effects on soil and crops[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2015, 17(2): 118-125. [罗煜, 李晓亮, 张姗姗, 等. 不同腐植酸特性比较及其对土壤与作物的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2015, 17(2): 118-125.]

[71] Zhao P, Huang Z B, Ren Z X, et al. Research and application on advance of soil conditioners of primary degraded soils in China[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(6): 618-625. [赵鹏, 黄占斌, 任忠秀, 等. 中国主要退化土壤的改良剂研究与应用进展[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(6): 618-625.]

[72] Ming R T, Wan F, Na L P, et al. Effect of soil acid reduction and fertilizer cultivation under conditioner application: Meta-analysis based on acid soil improvement studies in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(2): 400-410. [明润廷, 万方, 那立苹, 等. 改良剂施用下的土壤降酸培肥效果——基于中国酸性土壤改良研究的Meta分析[J]. *土壤学报*, 2025, 62(2): 400-410.]

[73] Dong X Y, Shen R F, Chen R F, et al. Secretion of malate and citrate from roots is related to high Al-resistance in *Lespedeza bicolor*[J]. *Plant and Soil*, 2008, 306(1): 139-147.

[74] Jiang Z M, Wang W, Chu C C. Towards understanding of nitrogen use efficiency in plants[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2018, 30(10): 1060-1071. [蒋志敏, 王威, 储成才. 植物氮高效利用研究进展和展望[J]. *生命科学*, 2018, 30(10): 1060-1071.]

[75] Liu X S, Wang Y F, Shi Y F, et al. Construction and regulation of soil structure in root zone based on the theory of rhizobiont[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(5): 972-979. [刘学松, 王翼飞, 师娜菲, 等. 基于根际生命共同体理论的根区土壤结构构建与调控[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(5): 972-979.]

[76] Shen J B, Bai Y, Wei Z, et al. Rhizobiont: An interdisciplinary innovation and perspective for harmonizing resources, environment, and food security[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(4): 805-813. [申建波, 白洋, 韦中, 等. 根际生命共同体: 协调资源、环境和粮食安全的学术思路与交叉创新[J]. *土壤学报*, 2021, 58(4): 805-813.]

[77] Lu Y, Wang C X, Wang L L, et al. Physiological responses of different peanut varieties to acid stress at seedling stage[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(1): 73-80. [路亚, 王春晓, 王丽丽, 等. 花生幼苗对酸胁迫

的生理响应及品种间差异[J]. 华北农学报, 2020, 35(1): 73-80.]

[78] Liu D X, Nian H, Yang C Y, et al. Screening and identifying soybean germplasm tolerant to acid aluminum[J]. Soybean Science, 2013, 32(1): 46-49. [刘德兴, 年海, 杨存义, 等. 耐酸铝大豆品种资源的筛选与鉴定[J]. 大豆科学, 2013, 32(1): 46-49.]

[79] Li X X, Yang Y Q, Zhong Y J, et al. Genetic improvement for nutrient efficient roots of leguminous crops adapted to acidic soils[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 186-194. [李欣欣, 杨永庆, 钟永嘉, 等. 豆科作物适应酸性土壤的养分高效根系遗传改良[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 186-194.]

[80] Liu C Y, Zhang L Y, Zhou J, et al. Research progress on the intensification of agroecosystem functions through legume-based crop rotation[J]. Acta Agronomica Sinica, 2024, 50(8): 1885-1895. [刘春燕, 张利影, 周杰, 等. 豆科作物轮作强化农田生态系统功能的研究进展[J]. 作物学报, 2024, 50(8): 1885-1895.]

[81] Philippot L, Chenu C, Kappler A, et al. The interplay between microbial communities and soil properties[J]. Nature Reviews Microbiology, 2024, 22(4): 226-239.

[82] Duan Y L, Zhang J B, Petropoulos E, et al. Soil acidification destabilizes terrestrial ecosystems *via* decoupling soil microbiome[J]. Global Change Biology, 2025, 31(4): e70174.

[83] 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 & Biochemistry, 2025, 210: 109949.

[84] Zhao X Z, Jiang C Y, Liu S J. Synthetic microbiomes: Rational design, engineering strategies, and application prospects[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(6): 2221-2235. [赵晔泽, 姜成英, 刘双江. 人工合成微生物组: 理性设计、精准构建与应用前景[J]. 生物工程学报, 2025, 41(6): 2221-2235.]

[85] Jing J Y, Garbeva P, Raaijmakers J M, et al. Strategies for tailoring functional microbial synthetic communities[J]. The ISME Journal, 2024, 18(1): wrac049.

[86] Li J J, Chen W X, Lu Z Z, et al. Nanoengineered *Azotobacter pseudomonas stutzeri* A1501 for soil ecology restoration and biological nitrogen fixation[J]. ACS Nano, 2025, 19(19): 18143-18155.

[87] Liu J X, Cui J, Liu H B, et al. Research progress of soil amelioration of acidified soil by soil amendments[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1): 173-184. [刘娇娴, 崔骏, 刘洪宝, 等. 土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1): 173-184.]

[88] Yameen M Z, Naqvi S R, Juchelková D, et al. Harnessing the power of functionalized biochar: Progress, challenges, and future perspectives in energy, water treatment, and environmental sustainability[J]. Biochar, 2024, 6(1): 25.

[89] Su J Z, Wang C C, Zhang M Y, et al. Advances and prospectives of iron/biochar composites: Application, influencing factors and characterization methods[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 205: 117496.

[90] Liu Y Y, Wei X H, He J R, et al. Application and prospects of nanomaterials in the treatment of compound contaminated soil[J]. Chemical Reagents, 2024, 46(7): 50-58. [刘煜莹, 魏晓贺, 何建荣, 等. 纳米材料在治理复合污染土壤中的应用与展望[J]. 化学试剂, 2024, 46(7): 50-58.]

[91] Chen S S, Teng Y, Luo Y M, et al. Threats to the soil microbiome from nanomaterials: A global meta and machine-learning analysis[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2024, 188: 109248.

[92] Wan L L, Cui B F, Wang L J. A review on preparation raw materials, synthesis methods, and modifications of hydroxyapatite as well as their environmental applications[J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2024, 38: 101447.

[93] Lan Y, Meng J, Han X R, et al. Advances in research on biochar-based products and their effects on soil fertility improvement[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2024, 30(7): 1396-1412. [兰宇, 孟军, 韩晓日, 等. 生物炭基产品及其对土壤培肥改良效应的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1396-1412.]

[94] Liu Y F, He Y, Liu F, et al. Application and market of agricultural sensor technology in China: Current status and future perspectives[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2023, 49(3): 293-304. [刘

羽飞, 何勇, 刘飞, 等. 农业传感器技术在我国的应用和市场: 现状与未来展望[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2023, 49(3): 293-304.]

[95] Zhou Y, Ji R P, Hu W Y, et al. Advancement and prospect in methods and techniques for soil multi-parameter rapid detection of China[J]. Soils, 2019, 51(4): 627-634. [周怡, 纪荣平, 胡文友, 等. 我国土壤多参数快速检测方法和技术研发进展与展望[J]. 土壤, 2019, 51(4): 627-634.]

[96] Mazur P, Gozdowski D, Wnuk A. Relationships between soil electrical conductivity and sentinel-2-derived NDVI with pH and content of selected nutrients[J]. Agronomy, 2022, 12(2): 354.

(责任编辑: 檀满枝)