

DOI: 10.11766/trxb202501230040

CSTR: 32215.14.trxb202501230040

袁洁, 徐灵颖, 王翔, 赵晏强, 陈玉琪, 赵旭. 盐碱酸化与土壤侵蚀耕地障碍消减专利分析[J]. 土壤学报, 2026, 63 (1): 164–178.

YUAN Jie, XU Lingying, WANG Xiang, ZHAO Yanqiang, CHEN Yuqi, ZHAO Xu. Patent Analysis on the Mitigation of Cultivated Land Obstacles Caused by Salinization, Acidification and Soil Erosion[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63 (1): 164–178.

盐碱酸化与土壤侵蚀耕地障碍消减专利分析*

袁 洁¹, 徐灵颖^{2†}, 王 翔¹, 赵晏强¹, 陈玉琪², 赵 旭²

(1. 中国科学院武汉文献情报中心, 科技大数据湖北省重点实验室, 武汉 430071; 2. 江苏常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135)

摘 要: 盐碱、酸化、土壤侵蚀等耕地土壤障碍问题已成为全球面临的环境挑战, 严重影响粮食安全和农业的可持续发展, 耕地如何快速消减障碍一直是各界关注的热点。基于合享(IncoPat)专利数据库, 对截至 2024 年全球 3 996 件土壤障碍消减技术专利进行计量分析, 揭示了该领域的研发态势、技术布局及创新主体特征。结果表明, 全球专利申请量呈现“三阶段”增长特征, 中国在 2015 年后占据主导地位的技术创新呈现“三核驱动”特征, 土壤盐碱消减技术是障碍消减技术研发的核心, 其中障碍土壤专用调理剂(占比 42.8%)和机械化装备改造为研发热点。企业与高校构成创新主体, 未来应加强生物修复技术研发与多学科交叉融合, 构建“监测-治理-评估”一体化技术体系, 分类打造全链条的耕地障碍消减技术模式, 同时继续加大对新技术、新材料和新产品的研发力度, 保障土壤健康和农业可持续发展。

关键词: 土壤障碍消减; 土壤盐碱化; 土壤酸化; 土壤侵蚀; 研发态势

中图分类号: S15 文献标志码: A

Patent Analysis on the Mitigation of Cultivated Land Obstacles Caused by Salinization, Acidification and Soil Erosion

YUAN Jie¹, XU Lingying^{2†}, WANG Xiang¹, ZHAO Yanqiang¹, CHEN Yuqi², ZHAO Xu²

(1. National Science Library (Wuhan), Chinese Academy of Sciences, Hubei Key Laboratory of Big Data in Science and Technology, Wuhan 430071, China; 2. Changshu National Agro-Ecosystem Observation and Research Station, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China)

Abstract: [Objective] Soil constraints, including salinization, acidification, and erosion, have evolved into pressing global environmental crises. Salinization, triggered by improper irrigation and inadequate drainage, causes salt accumulation in the soil, rendering it inhospitable for most crops. Acidification, mainly attributed to excessive use of chemical fertilizers and acid rain, disrupts the soil's pH balance, impeding plants' nutrient absorption. Erosion, aggravated by deforestation and climate change, strips away the fertile topsoil, significantly reducing soil productivity. These issues not only severely threaten food security by limiting crop yields but also degrade soil health, undermining the long-term sustainability of agriculture. Consequently, mitigating soil constraints has become a central concern for the agriculture, environmental science, and policy-making sectors.

* 江苏省自然科学基金项目(BK20242107)资助 Supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China(No. BK20242107)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xulingying@issas.ac.cn

作者简介: 袁 洁 (1990—), 女, 湖北武汉人, 博士, 助理研究员, 主要从事生态环境领域情报研究。E-mail: yuanj@mail.whlib.ac.cn

收稿日期: 2025-01-23; 收到修改稿日期: 2025-07-14; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-08-21

【 Method 】 This study conducted a quantitative analysis of 3 996 global patents related to soil constraint mitigation technologies(as of 2024)using the authoritative IncoPat patent database. Patents sourced from various regions and periods were meticulously selected. The analysis delved into aspects such as patent filing dates, applicant locations, technological classifications, and types of innovation entities, with the aim of uncovering research and development trends, technological distributions, and the characteristics of different innovators in this field.【 Result 】 The findings revealed that global patent applications exhibit a "three - phase growth pattern". Since 2015, China has taken the lead in innovation activities. Technological advancements are characterized by a "triple - core - driven" structure, with soil salinization reduction technology at its core. Specialized soil conditioners for constrained land, accounting for 42.8% of the total patents, and upgrades to mechanized equipment have emerged as major research hotspots. Enterprises and universities serve as the primary innovation entities, with enterprises focusing on practical applications and commercialization, while universities contribute to fundamental research and technological breakthroughs. To address future challenges, it is essential to enhance research and development in bioremediation technologies, promote interdisciplinary collaboration, establish an integrated "monitoring-governance-evaluation" technical framework, and develop tailored full-chain mitigation models for different soil constraints. Additionally, continuous efforts in the development of novel technologies, materials, and products are vital for safeguarding soil health and ensuring agricultural sustainability.【 Conclusion 】 This study offers a comprehensive overview of the global landscape of soil constraint mitigation technologies through patent analysis. It underscores the urgent need for collective action to address soil constraints, given their far-reaching impact on food security and agriculture. The identified trends and hotspots provide valuable insights for researchers, enterprises, and policymakers to strategically allocate resources. As the global population continues to grow, future research should prioritize sustainable and innovative solutions. By leveraging the strengths of different innovation entities and promoting international collaboration, significant progress will be made in safeguarding soil health and ensuring the long-term viability of agricultural systems.

Key words: Alleviation of soil barriers; Soil salinization; Soil acidification; Soil erosion; Research trends

耕地土壤障碍是土壤退化过程中出现的一系列功能性障碍,包括但不限于土壤酸化、盐碱化、土壤侵蚀、有机质下降、养分失衡等,严重制约土壤生产力提升与生态服务功能的发挥。据统计,全球约 40%的耕地面临酸化威胁^[1],其中,我国南方红壤区酸化面积已占国土面积的 22.7%,若不加以干预,2050 年将突破生态阈值^[2-4]。同时,全球约 13.81 亿 hm^2 盐渍化土地中我国占比达 8.3%^[5-6]。此外,土壤侵蚀也是粮食安全和社会经济可持续发展的重要挑战之一,数据显示,2023 年全国水土流失面积仍维持 262.76 万 km^2 的高位,中度以上侵蚀占比 35%^[7]。由此可见,我国耕地土壤退化问题十分严峻,多重障碍交织加剧了耕地质量危机,亟需采取科学、高效的措施加以应对。

为了积极应对土壤障碍所带来的挑战,国内外研究者围绕土壤酸化^[8]、盐碱化^[9]和土壤侵蚀^[10-12]方面开展了广泛的研究,已形成了一批以化学改良(如石灰中和)、工程调控(如暗管排盐)、生物修复(如耐盐植物筛选)等为核心的改良技术和产品。文

献计量学是通过量化分析学术文献、专利等的分布、结构和规律,揭示学科发展态势的重要研究方法,在厘清耕地障碍消减技术趋势、评估创新主体竞争力等方面有得天独厚的优势。然而,现有研究多聚焦于单一障碍类型或区域尺度,基于专利视角的系统性分析仍较为匮乏。专利作为技术创新的重要载体,能反映全球 90%以上的研发成果,它不仅能够准确展现当前技术领域的发展动态与前沿动态,还能揭示相关企业的研发战略布局和 market 发展趋势^[13-14]。近年来,土壤障碍消减技术领域作为农业研究领域的一个热点,涌现出微生物菌剂、智能监测设备等创新产品,但尚未形成基于专利大数据的技术全景图谱与产业竞争力评价体系。

综上,本文通过对土壤障碍消减技术的专利文献进行深入分析,采用“技术生命周期-创新主体-功效矩阵”三维分析框架,重点梳理以下两个问题:①全球土壤障碍消减技术发展的阶段特征与演进规律,②中国在酸化阻控、盐碱改良、侵蚀防治等细分领域的技术竞争力,进一步提出土壤障碍消减技

术的未来重点方向, 以期为我国土壤障碍消减技术领域的相关科研人员和企业明确研发方向、突破技术瓶颈提供数据支撑, 同时为国家农业管理部门制定相关战略规划、优化产业政策提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文聚焦土壤障碍消减技术展开研究, 采用将土壤盐碱化、酸化、土壤侵蚀等相关概念术语与检索关键词相融合的检索策略构建检索式, 选取北京合享智慧科技有限公司开发的 incoPat 科技创新情报平台 (<http://www.incopat.com/>) 作为数据源。所构建的检索式为: “TI=((土壤 OR 耕地 OR 农田 OR 草地 OR 菜地 OR 水田 OR 旱地 OR 果园 OR 菜园 OR 林地 OR soil OR cultivated land OR farmland OR grassland OR orchard OR paddy OR dryland OR vegetable plot OR vegetable garden OR vegetable field OR woodland) AND (酸化 OR 酸性 OR 盐碱 OR 盐渍 OR 侵蚀 OR 水土流失 OR 土壤流失 OR 水土保持 OR acidic OR acidification OR saline alkali OR salt OR salinized OR erosion OR soil loss) AND (阻控 OR 控制 OR 抑制 OR 改良 OR 削减 OR control OR remediati* OR conditioner OR improvement OR inhibit* OR suppress* OR depress*))”, 检索日期为 2025 年 3 月 7 日, 旨在统计全球截至 2024 年 12 月 31 日的专利申请情况。针对初步检索得到的结果, 通过逐篇实施人工去噪操作, 去除与研究主题相关性低或错误的数据; 对重复的申请号进行合并, 确保数据的唯一性; 同时, 开展标引工作, 为后续深入分析奠定基础。最终获得有效专利文献 3 996 件。

1.2 分析方法

本研究借助 incoPat 数据库的专利分析平台, 结合 Excel 2016、Origin 2023 和 VoSViewer 分析软件对土壤障碍消减技术领域的相关专利数据进行计量统计与可视化分析, 选取专利申请量、申请单位、区域布局、专利技术特征等作为关键分析指标, 旨在精准揭示土壤障碍消减技术领域的专利分布现状, 清晰呈现全球范围内该领域的竞争态势, 全面梳理主要技术特征, 并深度挖掘研究热点以及预判研究发展趋势, 为该领域的进一步研究和产业发展

提供坚实的数据支撑与科学的决策依据。

2 结果

2.1 全球土壤障碍消减技术领域专利申请趋势

本研究聚焦耕地土壤障碍消减技术领域, 对截至 2024 年 12 月 31 日的 3 996 件专利数据展开深度分析, 揭示全球土壤障碍消减技术的演进脉络(图 1)。技术发展呈现显著的三阶段特征: (1) 技术孕育期(1936—1980 年): 年均申请量不足 1 件, 主要集中于美国、日本和德国等国家; (2) 缓慢增长期(1981—2010 年): 专利申请以年均 8.0% 速率递增, 日本保持技术领先地位; (3) 高速发展期(2011—2024 年): 专利申请年均增长率达 16.3%, 2024 年申请量达历史峰值 400 件。其中, 我国的土壤障碍消减技术领域专利申请量自 2009 年起急剧攀升, 2008 年已超越日本成为全球第一。2022—2024 年进入技术调整期, 年均增速放缓至 9.6%, 但仍保持全球主导地位(占比 95.7%)。

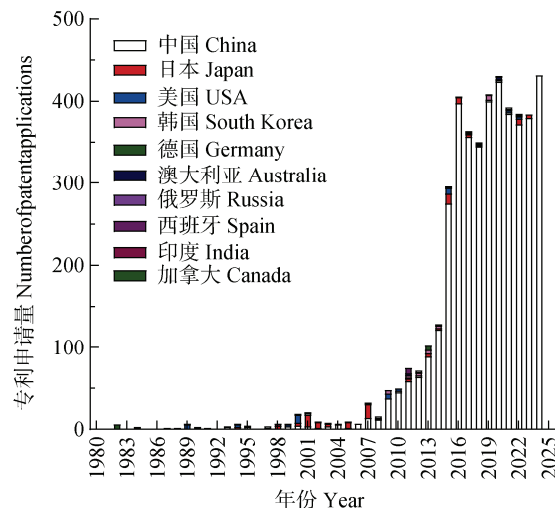


图 1 土壤障碍消减技术领域专利申请量变化

Fig. 1 Variations in the number of patent applications in the field of technologies for alleviating cultivated land soil obstacles

细分到具体的分支领域, 土壤酸化阻控领域的专利申请量为 770 件, 最早的专利申请始于 1953 年, 2010 年之前属于技术孕育期, 2011 年开始快速增长, 并于 2016 年达到顶峰, 此后每年均保持较高的专利申请量(图 2a)。土壤盐碱改良领域的专利申请量为 2 907 件, 第一件专利出现在 1957 年, 2006

年之前属于技术孕育期，2007 年开始进入专利申请的缓慢增长期，2012 年开始进入高速发展期，并于 2024 年达到峰值 346 件，其中 2016 年—2024 年均保持较高的专利申请量（图 2b）。土壤侵蚀防治技术领域的专利申请量为 394 件，该领域相对于上述两个技术领域的专利申请较早（1936 年），1960s 至 2014 年均保持缓慢发展状态，年专利申请量不足 10 件，2015 年开始逐渐上升，于 2022 年达到峰值 34 件（图 2c）。三个技术领域专利申请量进行对比发现，盐碱改良占据土壤障碍消减领域的主导地位。

在国际布局方面，耕地土壤障碍消减技术领域的相关专利主要集中在中国、日本、美国、韩国、德国、俄罗斯和澳大利亚等国家。中国、日本、美国、德国、韩国和澳大利亚均存在多边专利布局行为（表 1）。中国 3 617 件专利中仅有 1.9% 进行海外布局，主要集中于美国和澳大利亚、南非等国家。与此形成鲜明对比，日本有 44.2% 布局在海外，其中中国、韩国、澳大利亚和美国是其主要目标市场。美国的 61 件专利中，海外多边布局占比接近 40.3%，澳大利亚是其重点海外目标市场，形成区域技术壁

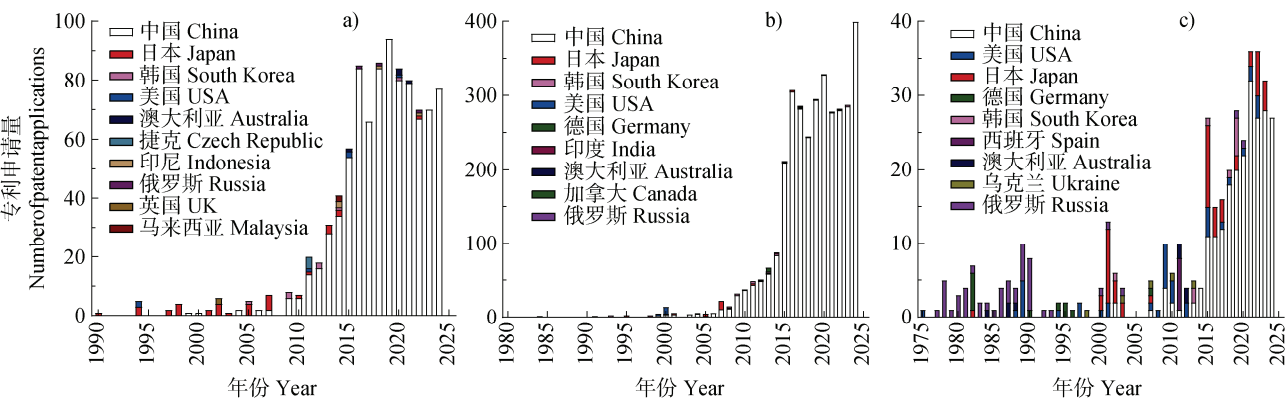


图 2 细分技术领域（a. 酸化阻控；b. 盐碱消减；c. 侵蚀防治）专利申请量变化
Fig. 2 Variations in the number of patent applications in the subdivision of technical field (a. Soil acidification prevention and control; b. Soil salinization reduction; c. Soil erosion prevention and control)

表 1 土壤障碍消减技术领域主要国家技术流向

来源国 Source country	目标国 Destination country								合计 Sum
	中国 China	美国 USA	日本 Japan	韩国 South Korea	俄罗斯 Russia	澳大利亚 Australia	南非 South Africa	德国 Germany	
	China	USA	Japan	South Korea	Russia	Australia	South Africa	Germany	
中国 ^①	4 192	14	0	0	0	2	12	1	4 273
日本 ^②	9	3	67	6	0	5	0	0	120
美国 ^③	0	40	1	0	0	3	0	0	67
韩国 ^④	1	0	0	32	0	0	0	0	34
德国 ^⑤	0	0	1	0	0	0	0	6	17
澳大利亚 ^⑥	0	3	0	0	0	9	0	0	14
俄罗斯 ^⑦	0	0	0	0	11	0	0	0	11
西班牙 ^⑧	0	0	0	0	0	0	0	1	8
印度 ^⑨	0	0	0	0	0	0	0	0	7

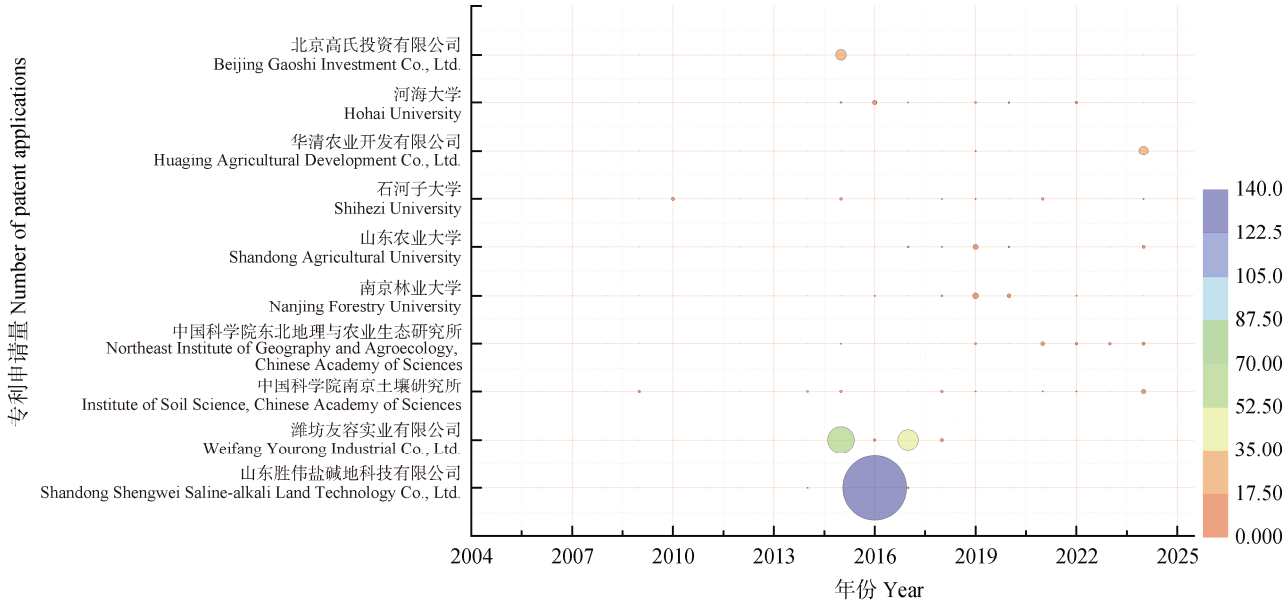
注：本表格中的专利数量为未合并申请号的专利数量。 Note: The patent numbers in this table refer to the count of patents without merging application numbers. ①China, ②Japan, ③USA, ④South Korea, ⑤Germany, ⑥Australia, ⑦Russia, ⑧Spain, ⑨India.

垒。澳大利亚较重视在美国的专利布局。韩国、俄罗斯和德国的专利布局仍以本国为主。尽管中国的技术原创国和技术目标国的排名中均位居榜首，但中国专利申请仍为内向型发展。后续应加强与国际创新主体的合作交流，同时应注意保护我国在全球产业化竞争格局中的核心竞争力。

2.2 土壤障碍消减技术领域专利申请主体

基于专利申请机构的时空分布特征（图 3），我国耕地土壤障碍消减技术领域的研发主体已形成了“企业主导技术转化-高校聚焦基础研究-院所支撑应用开发”的协同创新体系，有效推动了从实验室

成果到产业化应用的全链条发展。山东胜伟园林科技有限公司以 146 件专利位列首位，其专利申请主要集中在 2016 年，研发聚焦盐碱地研究方向。潍坊友容实业有限公司专利申请量（116 件）位列第二，其专利申请集中在 2015 年和 2017 年，技术集中于盐碱土壤调理剂配方。两企业合计占前十机构申请量的 54.2%，体现了显著的技术优势。此外，高校研发集群呈现差异化发展路径。南京林业大学、山东农业大学的专利申请集中在 2019 年，分别注重土壤侵蚀阻控、盐碱消减领域肥料和微生物菌剂研发方面。



注：圆圈颜色对应不同的数量范围，大小代表专利数量。Note: The color of the circle corresponds to different quantity ranges, and the size represents the number of patents.

图 3 土壤障碍消减技术领域主要研发机构的专利申请量变化

Fig. 3 Variations in the number of patent applications of major institutions in the field of soil obstacle reduction technologies

聚焦细分技术领域，在土壤酸化阻控技术领域主要的研发机构中，科研院所和高校占据主导地位（图 4a）。专利申请量排名前十的机构均来自中国，中国科学院南京土壤研究所在该领域排名首位，且 2009 年至今一直保持较领先的地位。浙江大学排名第二，其专利申请时间稍晚于南京土壤研究所。此外，宁夏大荣化工冶金有限公司于 2016 年有所突破，其主要关注酸性土壤调理剂的研发。土壤盐碱消减技术领域专利申请量排名前十的机构中，有 5 家企业、2 家科研院所和 3 家高校（图 4b）。但总体上，企业的专利申请时间相对于高校和企业较集中。

山东胜伟园林科技有限公司在该领域独占鳌头，中国科学院东北地理与农业生态研究所在该领域也有较大的优势，2013—2023 年间均保持较稳定的专利申请量。土壤侵蚀阻控技术领域专利申请量排名前十的机构中(图 4c),有 7 家国外机构(其中 6 家企业，1 家科研机构)，3 家国内研究机构。日韩企业在该领域有较大优势，中国科学院新疆生态与地理研究所的专利申请集中在 2016 年，浙江大学的专利申请集中在 2015 年和 2017 年，中国水利水电科学院的专利申请则相对较晚，但近几年有上升趋势。

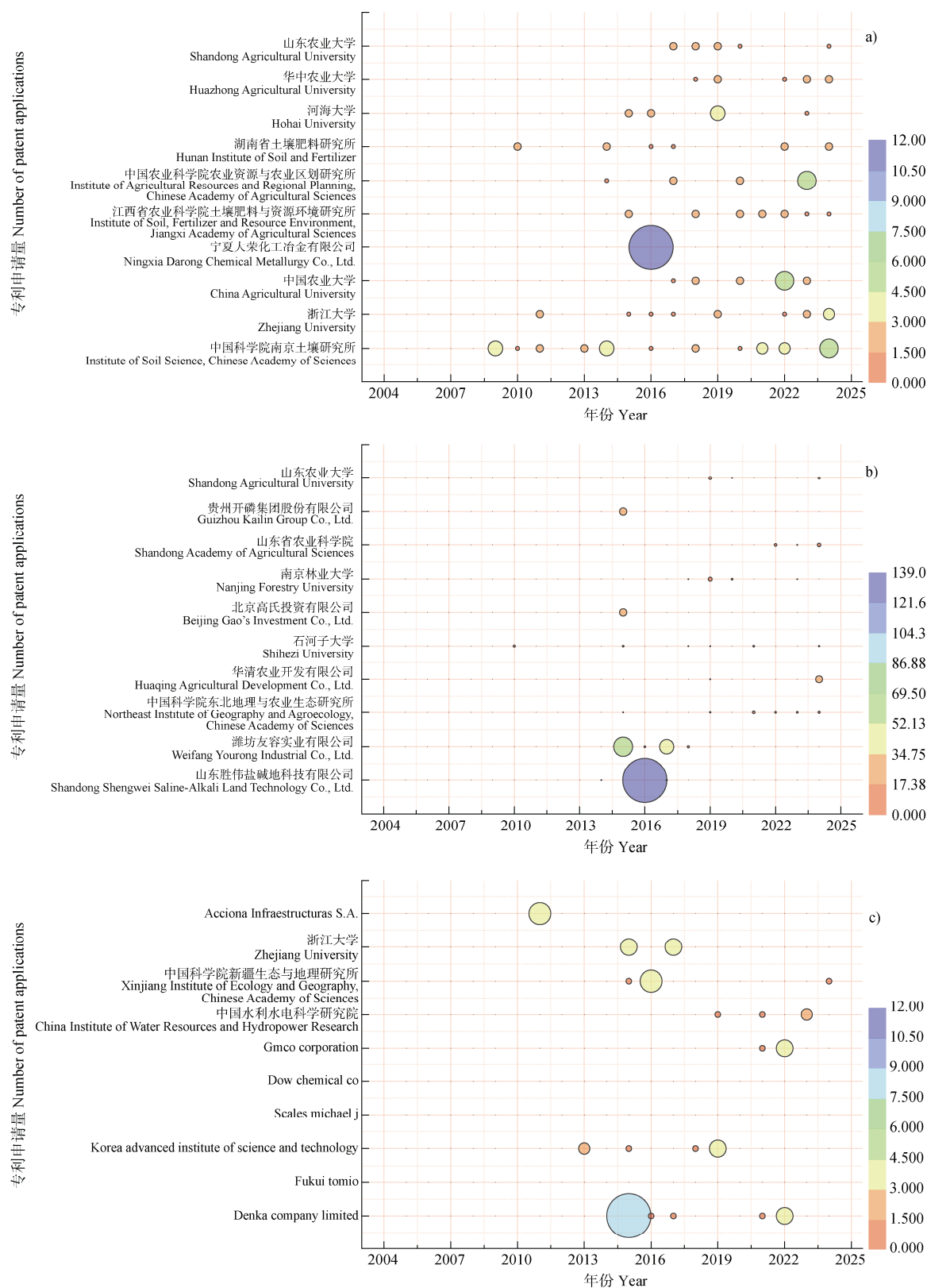


图 4 土壤障碍消减细分技术领域 (a. 土壤酸化阻控 b. 土壤盐碱消减 c. 土壤侵蚀阻控) 主要研发机构的专利申请量变化

Fig. 4 Variations in the number of patent applications of major institutions in the subdivision field of soil obstacle reduction technologies (a. Soil acidification prevention and control; b. Soil salinization reduction; c. Soil erosion prevention and control)

中国科学院南京土壤研究所和中国科学院东北地理与农业生态研究所长期深耕土壤科学和农业科学领域,持续关注土壤障碍消减问题。其中,中国科学院南京土壤研究所研发的“木质改良剂”、“有机提质肥”、“复合钙”等一系列产品在盐碱酸化土壤改良中起到了重要作用;而中国科学院东北地理与农业生态研究所高度关注黑土地耕地土壤质量与作物产能的协同提升,为黑土地的可持续发展提供了有力的技术支持。值得关注的是,在 2024 年两机构专利申请量激增,这与中国科学院 A 类先导专项“黑土地保护与利用科技创新工程”、中国科学院 A 类先导专项“盐碱酸性土壤产能提升”、“十四五”国家重点研发专项“黑土地保护与利用科技创新”、“北方干旱半干旱与南方红黄壤等中低产田能力提升科技创新”、国家农业重大科技专项“耕地土壤酸瘦阻控和肥力恢复关键技术及应用示范”等国家重大科技任务部署密切相关。以中国科学院东北地理与农业生态研究所牵头完成的“黑土区耕地退化阻控与地力提升关键技术”为例,研究团队研发了“一种耕地中侵蚀沟沟坡生态修复系统(CN2024 21206907.9)”、“侵蚀沟的治理方法(CN202410580 467.1)”、“侵蚀沟的治理结构(CN202421008176.7)”等一系列成果荣获 2024 年度中国科学院杰出科技成就奖-科技攻关奖,印证了国家战略驱动下的研发效能提升。

时空分布显示,2015—2017 年专利申请量占总申请量的 23.3%,反映出中国在该领域研发的热潮,这可能与国内土壤治理需求的增加、相关政策的推动以及技术研发能力的提升有关。如 2014 年《关于加强盐碱地治理的指导意见》(发改农〔2014〕594 号)明确了治理路径;2015 年《全国水土保持规划(2015—2030 年)》划分了重点治理区,并提出了治理目标;2016 年《土壤污染防治行动计划》提出脱硫石膏改良盐碱地试点;近几年随着《全国盐碱地综合利用总体规划》的推进,各地方政府配套实施方案的出台加速了技术研发与应用转化。此外,中华人民共和国科学技术部于 2016 年启动了“东北苏打盐碱地生态治理关键技术研发与集成示范”、“河套平原盐碱地生态治理关键技术研究集成示范”、“新疆干旱区盐碱地生态治理关键技术研究集成示范”等专项项目,要求重点开展盐碱地治理等技术模式研发与典型示范。以上各政策的颁布实施,

促进了科研机构和企业土壤障碍消减领域的研发投入及成果产出。

2.3 专利技术领域构成

在土壤障碍消减技术领域,经过系统研究形成了包含障碍土壤专用调理剂和高效肥料、障碍土壤改造的工程技术、生物技术在障碍土壤的应用、障碍土壤改良技术模式构建、侵蚀土壤动态监测方法与平台、障碍土壤改良机械化装备改造六大技术分支的研发体系(表 2),构建起“技术研发—系统集成—应用支撑”的闭环创新架构。上述技术分支相互关联又各有侧重,共同构成了土壤障碍消减技术的研究体系。该体系可分为三个核心板块:

2.3.1 土壤改良技术研发与产品创新 该板块包括障碍土壤专用调理剂和高效肥料研发、生物技术应用、机械化装备改造。该板块聚焦“改良手段创新”,涵盖化学改良(调理剂/肥料)、生物改良(微生物/植物修复)及配套装备研发(机械化作业),以“技术产品”为核心,解决土壤障碍的直接干预技术问题。以障碍土壤专用调理剂和高效肥料研发为例,其专利申请量为 1 711 件,占比 42.8%,形成了矿物源、调酸碱、疏松剂、有机物料及微生物菌剂五大类产品矩阵,且改良剂研发过程中主要以成本降低和复杂性降低为首要目标。如面对土壤酸化问题时,采用传统石灰中和存在效果不稳定、易反酸等问题,而复合调理剂通过有机物料与矿物材料的协同作用,可实现酸碱平衡的长效维持,同时改善土壤结构。高效肥料研发则围绕控释肥、复合肥、生物有机肥及叶面肥四大方向,重点解决养分精准供给与利用效率提升问题,同时兼顾作物生长和产能提升。

2.3.2 工程技术体系与模式构建 该板块强调技术集成与工程化应用,通过改造工程技术研发与改良模式构建,缩短改良周期,形成标准化解决方案,降低系统复杂性。典型技术包括排水洗盐、表土置换等工程措施,以及“生物—化学—工程”联用的复合改良模式。以重度盐碱地治理为例,采用“暗管排盐+微生物菌剂+耐盐作物”的集成模式,可实现盐分快速淋洗与土壤生物功能重建的协同效应,形成可复制推广的治理方案。

2.3.3 动态监测与可持续管理 该板块以“数据驱动”为核心,重点构建侵蚀土壤动态监测方法与

表 2 土壤障碍消减技术领域专利技术分类

Table 2 Classification of patent technologies in the field of soil obstacle reduction technology

一级技术分支 Primary technical sub - branch (items)	二级技术分支 Secondary technical sub-branch (items)	数量 Number
障碍土壤专用调理剂和高效肥料 (1 711) Specialized soil conditioners and high-efficiency fertilizers for obstacle soil (1 711 items)	土壤改良剂 Soil ameliorant	345
	生物炭 Biochar	147
	有机肥 Organic fertilizer	83
	土壤调理剂 Soil conditioner	276
	改良盐碱地 Improve saline-alkali land	163
	酸性土壤 Acidic soil	97
	聚马来酸 Polymaleic acid	50
	氨基取代基 Amino substituent	5
	硫酸亚铁 Ferrous sulfate	72
	金属镁 Magnesium metal	185
	分子筛吸附 Molecular sieve adsorption	87
	稠合杂环 Fused heterocycle	2
	地衣芽孢杆菌 Bacillus licheniformis	48
	酸性土壤改良剂 Acidic soil ameliorant	151
障碍土壤改造的工程技术 (583) Engineering technologies for obstacle soil remediation (583 items)	土壤改良 Soil improvement	131
	表层土壤 Topsoil	47
	水土流失 Water and soil loss	85
	熔盐泵 Molten salt pump	4
	盐碱地改良 Saline-alkali land improvement	87
	盐碱地 Saline-alkali land	221
	过滤层 Filter layer	3
	输送气体 Gas transportation	5
	巨大芽孢杆菌 Bacillus megaterium	119
	芽孢杆菌 Bacillus	45
生物技术在障碍土壤的应用 (256) Application of biotechnology in obstacle soil (256 items)	景泰蓝 Cloisonné	2
	盐碱地 Saline-alkali land	35
	改良盐碱地 Improve saline-alkali land	256
	含羞草 Mimosa	3
	改良剂 Ameliorant	2
障碍土壤改良技术模式构建 (528) Technical model development for obstacle soil improvement (528 items)	土壤改良剂 Soil ameliorant	267
	水土保持 Soil and water conservation	41
	控制芯片 Control chip	6
	土壤改良 Soil improvemen	52
	土壤侵蚀模数 Soil erosion modulus	39
障碍土壤改良机械化装备改造 (566) Mechanized equipment upgrades for obstacle soil improvement (566 items)	盐碱地改良 Saline-alkali land improvement	279
	柔性材料 Flexible material	2
	改良装备 Improvement equipment	164
	水土流失治理 Water and soil loss control	121

平台,实现改良效果的长期追踪与调控。通过多源传感器网络与智能分析系统,实时采集土壤理化性状、微生物群落及作物生长数据,结合模型预测技术,指导技术优化和适应性管理,确保改良效果的可持续性,有效支撑科学决策。该体系从单项技术突破(第一板块)→技术体系构建(第二板块)→效果追踪管理(第三板块),形成完整闭环。符合“研发-示范-推广”的农业技术转化链条,兼顾短期效果与长期稳定。

未来需进一步强化产学研协同创新,重点突破调理剂与肥料的协同增效机理、智能化装备与农艺措施的适配性等关键技术瓶颈,开发具有成本竞争力和操作便捷性的区域化解决方案,推动土壤障碍消减技术向精准化、智能化方向升级。

就细分领域的研发核心而言,不同的土壤障碍

类型对应不同的研究重点与关键要素。耕地土壤酸化阻控技术功效矩阵分布图(图 5a)显示,土壤本身是该领域的重点关注对象,且主要研发目标聚焦于提高作物产量、提升主控效率以及降低成本这几个方面,同时,研发过程中必须高度重视、保证研发产品的环保性和便利性。这意味着研发人员不仅要关注技术的有效性,还要充分考虑其在实际应用中的可持续性和可操作性,以实现经济效益与环境效益的双赢。在土壤盐碱消减技术领域(图 5b),降低碱度是整个研发工作的核心。为实现该目标,研发过程主要关注降低成本、提高效率以及提高便利性等关键要素。只有在这些方面取得突破,才能使得研发成果在实际盐碱地治理中得到广泛应用和推广。在土壤侵蚀阻控技术领域(图 5c),监测方法和平台建设是研发的核心内容。提高监测精度、

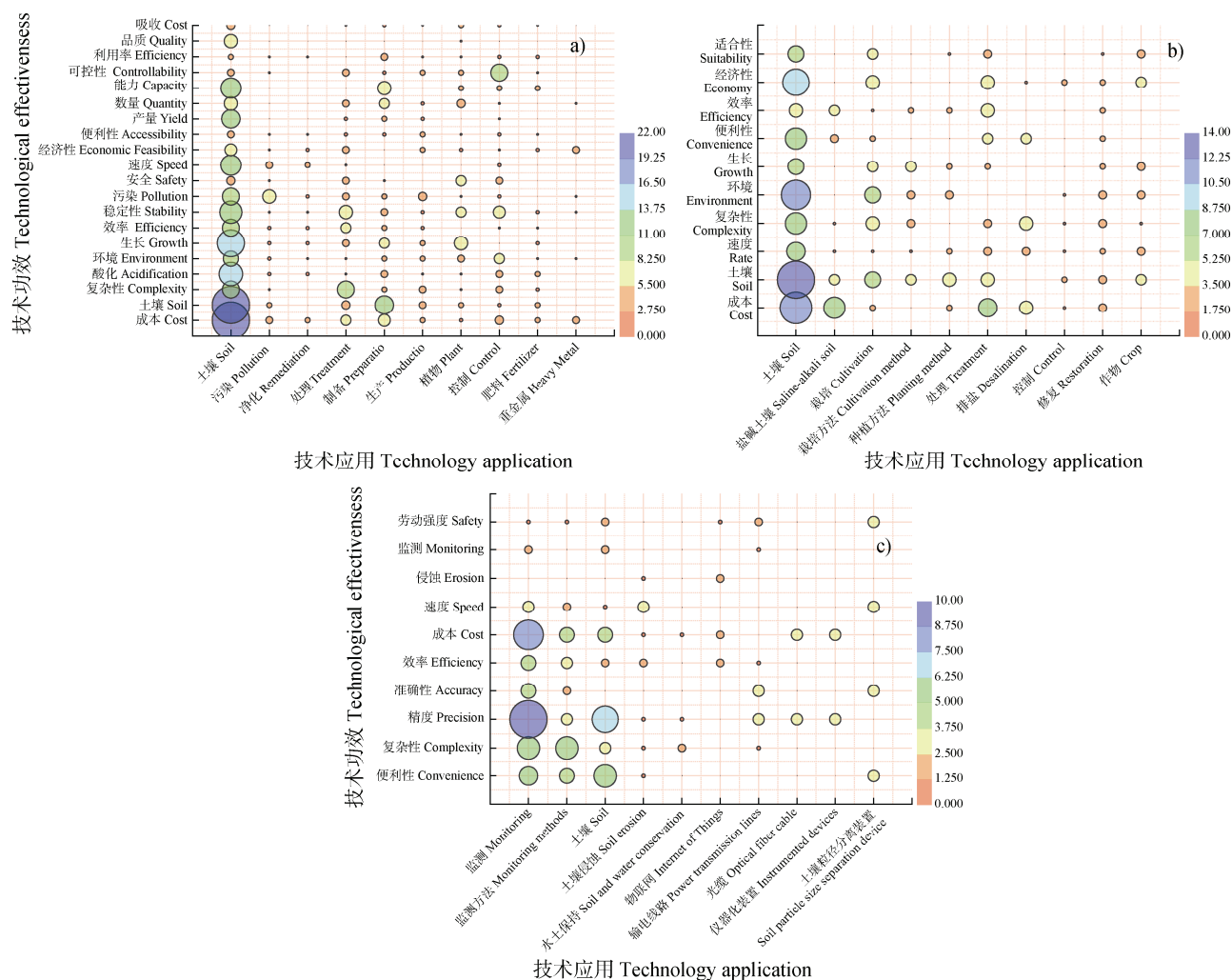


图 5 土壤障碍消减分支领域 (a. 土壤酸化阻控; b. 土壤盐碱消减; c. 土壤侵蚀阻控) 技术功效矩阵

Fig. 5 Technical efficacy matrix for sub-fields of soil obstacle reduction (a. soil acidification prevention and control; b. soil salinization and alkalization reduction; c. soil erosion prevention and control)

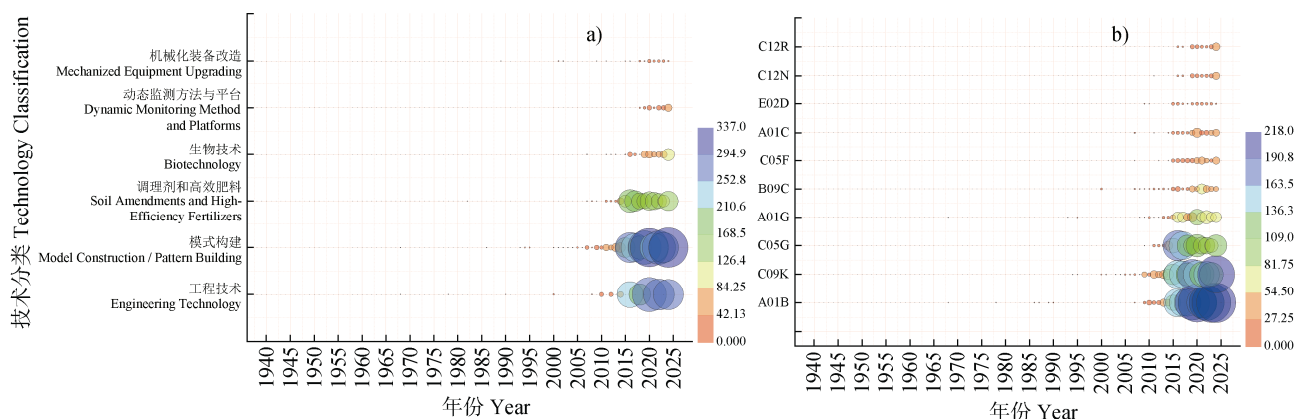
增强设备的便利性及降低成本是该技术关注的重点方向。通过构建精准、便捷且经济的监测体系,能够及时、准确地掌握土壤侵蚀状况,为采取有效的阻控措施提供科学依据。

3 讨 论

3.1 土壤障碍消减技术领域发展态势与政策导向剖析

土壤障碍消减技术领域在各技术分支的发展、细分领域的研发以及整体技术趋势演变等方面呈现出丰富多样且极具研究价值的特征。从各技术类别专利申请的年度分布(图 6a 和图 6b)可以看出,土壤障碍

消减技术领域的发展可划分为三个阶段。2015 年之前,该技术领域的技术研发处于萌芽状态,专利申请量相对较少。工程技术体系与模式构建一直是该领域研发的重点。1968 年,在农业设备研发、植物栽培技术、播种施肥和水利工程技术方面取得了显著进展。而在 1984 年以前,受我国改革开放初期解决粮食危机、提高作物产量这一首要任务的影响,在土壤障碍消减技术研发方面主要关注农业设备的研发。1984 年以后,随着国家经济的发展和农业技术需求的多元化,研发领域逐渐拓展至植物栽培技术、各种应用材料以及肥料等多个方面。2000 年,在污染土壤再生技术方面有所突破。2007 年起,农业设备、各类应用材料和肥料的研究逐渐受到重视,专利申请量快速增长。



注: A01B: 农业设备; C09K: 应用材料; C05G: 混合肥料; A01G: 植物栽培技术; B09C: 污染土壤再生; C05F: 有机肥料; A01C: 播种施肥; E02D: 水利工程技术; C12N: 微生物菌剂; C12R: 微生物其他技术。Note: A01B: Agricultural equipment; A01G: Plant cultivation techniques; C09K: Application materials; G01N: Determination and analysis techniques; C05G: Mixed fertilizers; B09C: Polluted soil regeneration; A01N: Plant growth regulators; C02F: Sewage and sludge treatment; C05F: Organic fertilizers; C12N: Microbial agents.

图 6 1936—2024 年土壤障碍消减技术类别 (a) 和不同专利技术分类 (b) 的发展演变趋势

Fig. 6 Development trends of soil obstacle reduction technologies (a) and different patent technologies (b) during 1936-2024

2012 年《“十二五”规划纲要》的出台成为土壤障碍消减技术发展的重要转折点,该纲要将土壤修复纳入环保产业重点发展范畴,国家在资金投入上给予了强有力的支持,直接推动了各项相关技术研发力度的逐步加大,并在 2016 年达到顶峰。这一时期,障碍土壤改良技术模式构建成为研发重点,重点强调“技术系统集成”,通过各类技术模式(如“生物-化学-工程”联用)的整合,形成可推广的标准化改良方案。该变化主要得益于 2016 年 5 月国务院印发的《土壤污染防治行动计划》,该计划明确提出了土壤污染防治的具体目标与任务,促使科研机

构与企业进一步加大对土壤障碍消减技术的研发投入。“十四五”期间,中华人民共和国生态环境部在国家重点研发计划“大气与土壤、地下水污染综合治理”专项中,部署了多个与土壤污染防治和修复相关的项目,积极推动土壤减污降碳协同增效,涵盖污染场地绿色可持续修复评估体系与方法、污染场地土壤功能重构与持续利用新技术等多个方面,为土壤障碍消减技术研发提供了有力的项目和资金支持。

2022 年新修订的《高标准农田建设通则》增设“农田地力提升工程”章节,着重强调了地力提升在

高标准农田建设中的重要性。土壤障碍消减作为地力提升的关键前提,使得各地在高标准农田建设过程中更加重视土壤障碍的消减工作,纷纷加大了对相关技术和设备的研发投入,推动了耕地相关农业设备的研发进程。同年,农业农村部下发“做好退化耕地治理工作”的通知,重点针对不同区域土壤酸化、盐碱化问题,加强科研与商业推广的融合。近几年我国也不断出台了一系列农业规划与实施方案,如《全国现代设施农业建设规划(2023—2030年)》《设施农业现代化提升行动实施方案(2023—2025年)》《中共中央办公厅国务院办公厅关于推动盐碱地综合利用的意见》等,均为土壤障碍问题的技术研发工作提供了政策支持和指导方针,引导该领域朝着更加科学、高效、可持续发展的方向发展。

3.2 土壤障碍消减的产品化技术

我国目前面临着严重的土壤酸化、盐碱化和土壤侵蚀退化等土壤障碍问题。在相关技术的研发方面,土壤障碍消减技术专利主要涉及土壤酸化阻控、土壤盐碱消减及土壤侵蚀退化防治等方面,涵盖模拟预测方法、改良技术和装置等。其中,改良剂的合理运用以及土壤养分的提升备受关注,研发重点在于提高技术的经济性、便利性以及改善土壤和提高作物产量等。同时,如何提升土壤肥力与提高设备、方法的效率,促进土壤质量改善进程,也是研发人员关注的核心问题。

3.2.1 土壤酸化阻控技术构建与挑战 土壤酸化类型复杂多样,既有源于成土过程原生的障碍,比如酸、板等问题,也有源于立地条件衍生的问题,比如干旱、耕层浅薄等问题;此外,人为作用(过度施肥等)的影响也不可忽视。过去几十年间我国在人为活动强烈、土地高强度利用和严重过垦的已有耕地土壤酸化阻控理论、化学-生物-农艺综合调控技术原理与对策方面研究已取得长足进步,部署了“北方干旱半干旱与南方红黄壤等中低产田能力提升科技创新”、“十四五”国家重点研发计划“松嫩平原北部黑土增碳降酸与产能提升技术集成和示范”等一系列重大科技任务,也取得一些阶段性成果^[15]。例如,2009年山东省农业科学院土壤肥料研究所申请了“一种营养型果园酸化土壤改良剂及其制备方法与应用”(CN200910018585.9)的专利,该改良剂适用于多数果园酸化土壤的改良。2010年,

山东省栖霞市农业局土肥站申请了“一种防止土壤酸化的碱性有机肥”(CN201010600816.X)专利,上海丰廷生物科技有限公司申请了“有机物解毒造肥催腐剂”(CN201010022505.X)专利。安徽阜阳还建立了土壤酸化调理剂中试线,研发了一系列土壤结构改良剂、酸化调理剂等物化技术产品^[16]。

但现有技术存在明显局限性,如石灰类改良剂反酸周期短(小于2年),有机物料投入量大但改良效率低。针对东南丘陵区1.5亿亩(1亩为667 m²,下同)后备酸性红壤资源,亟需突破“酸铝毒害—养分贫瘠—耕层浅薄”多障碍协同治理技术瓶颈,研发具有长效缓冲能力的复合型调理剂。尤其是针对东南丘陵区酸化更为顽固、肥力更为瘠薄、生态脆弱、尚存有潜在可开发利用的1.5亿亩后备酸性红壤土地资源高值化利用,尚缺乏完备的系统理论基础知识与系统的改良技术体系。例如,南方强酸性土壤顽固酸化、酸铝毒害、养分贫瘠、耕层瘦且板结等植物生长限制的突出土壤多障碍问题叠加下,如何实现产能与生态效益双提升等问题均缺乏研究,仍迫切需要更多针对性强、高效实用的复合型专利技术。

3.2.2 盐碱地治理技术创新与实践 盐碱地改良利用是全球农业科技领域的共性难题,国内外已形成以水利工程措施为核心的治理共识,通过淡水淋洗压盐、地下水临界埋深控制等技术实现盐分有效调控。在破解土壤盐渍化障碍的基础上,提升土壤养分利用效率是提高耕地产能的重要途径。我国盐碱地氮磷肥利用率明显低于普通耕地,过量施肥导致次生盐渍化,造成土壤质量退化,进一步影响耕地产能提升。针对该问题,潍坊市农业科学院和山东省水利科学研究院在2024年分别申请了专利“一种盐碱地改良用液体改良剂匀洒装置”(CN202411890059.2)和“一种用于盐碱地改良剂生产的发酵设备”(CN202411657233.9),均对盐碱地养分增效、作物增产起到促进作用。

值得注意的是,盐碱地问题呈现显著的时空异质性:成因上既有成土过程的原生盐渍化及因灌溉不当引发的次生盐渍化差异,又有海水入侵或地下水矿化程度高等引发的滨海盐渍化及成土母质盐分高且蒸降比高致使盐分随地下水上升所导致的内陆干旱盐渍化分异。治理上需突破淡水资源时空分布不均的约束,实施分区分类施策。例如,针对滨海

湿润区, 重点聚焦上移盐分阻隔技术研发, 山东大学于 2017 年申请了“一种滨海盐碱地耕层下铺膜阻盐改良方法”(CN201710351422.7)的专利, 上海大禾生态科技有限公司于 2024 年申请了专利“使用黄腐酸组合物改良滨海黏性盐碱地低产田达到高标准农田的方法”(CN202410460941.7)。2021 年上海华泽环境科技有限公司申请了专利“一种水资源循环高效改良滨海盐碱土的系统”(CN202110790077.3), 该系统通过铺设暗管排盐, 灌溉或雨水冲刷土壤, 使盐从管道排出, 从而不断去除盐碱。针对内陆干旱区, 中国科学院新疆生态与地理研究所于 2015 年申请了“一种干旱区次生盐渍化土地造林方法”的专利, 中国科学院东北地理与农业生态研究所在 2015 年申请了“一种改良苏打盐碱地水田的泡田期灌排水方法”的专利。2023 年, 天津农学院申请了专利“一种利用秸秆与解磷微生物改良盐碱地的方法”(CN202311205736.8), 实现土壤的快速改良和长效保持, 使土壤达到高等级农田的标准。随着研究的不断深入, 专利申请主体逐渐开始关注盐碱地土地障碍消减-产能提升协同的技术体系和模式构建, 例如水发三志(青海)农业科技有限公司积极探索环境脆弱地区盐碱地改良新模式, 打造了集“物理改良、化学改良、生物改良、种植制度改良”为一体的盐碱地改良治理体系, 从而实现盐碱土的快速脱盐与长效稳控。新洋丰农业科技股份有限公司申请了专利“一种用于中度盐碱地土壤改良的种植方法”(CN202411400419.6), 通过“种植—施肥—还田”的技术核心, 形成了“改良—培肥—增产”的良性循环技术路径。

但由于盐碱地土壤障碍因子致障程度高, 常附带其他次要障碍因子(土壤碱障、有机质缺乏), 未来仍需关注物理阻盐技术研发、矿物-有机-微生物复合的长效降盐碱提质土壤调理剂以及靶向、多功能调控新产品的研发工作, 同时进一步加强环渤海与苏北等滨海盐碱地、西北内陆盐碱地等不同应用场景的大规模实践, 并开展不同气候区(干旱、半干旱、湿润)盐碱地土壤改良技术、产品的安全性、经济性和长效性评估^[17-19]。

3.2.3 土壤侵蚀防治进展与展望 土壤侵蚀每年都会导致巨大的水资源与生产力损失^[20]。中国是世界上水土流失较为严重的国家之一, 加强土壤侵蚀防治对于改善生态环境、保障水资源安全以及促进

农业经济可持续发展具有至关重要的意义。土壤侵蚀形式多样, 包括水力侵蚀、风力侵蚀、冻融侵蚀等, 且不同地区的侵蚀情况差异显著, 目前研发热点主要包括防治技术和智能监测两个方面^[21-23]。

针对土壤侵蚀防治问题, 当前已形成“工程—农艺—生态”三位一体防治体系: 首先, 在水土保持工程措施方面, 主要采用梯田建设、沟道整治等工程措施, 如江苏绿岩生态技术股份有限公司申请的专利“一种侵蚀沟治理方法”(CN202311607183.9)。其次, 合理轮作、节水灌溉、保护性耕作、养分管理等是减少土壤侵蚀、提高农作物产能的重要农艺技术途径。例如, 中国科学院新疆生态与地理研究所于 2024 年申请了专利“一种土壤风蚀治理用缓释肥制备机”(CN202411838895.6), 该设备针对风蚀土壤养分库容低的问题, 通过改善缓释肥原料的混合效果从而提高土壤养分利用效率。此外, 植被恢复等生态措施也值得关注, 如青岛冠中生态股份有限公司申请的“一种小型侵蚀沟生态修复方法”(CN202410396378.1)等。该方法可提升荒漠化及水土流失严重区域的苗木成活率, 缩短植被覆盖所需时间。植物生物修复技术凭借其费用低和二次污染低的优点, 在土壤障碍消减技术领域具有巨大的发展潜力, 理应成为未来重点发展的方向之一。相关研究机构和科研人员应加大在此方向的投入, 深入挖掘植物生物技术在土壤障碍修复中的应用潜力, 推动该技术的快速发展。生态补偿政策作为一种有效的激励机制, 能够激发公众积极参与土壤侵蚀防治工作, 形成全社会共同参与的良好局面。

在监测方面, 早在 1992 年, 美国企业 Hershey Foods Corp 就申请了专利“关于土壤侵蚀的监测及未来研究: 水情及土壤侵蚀监测”(FI921946), 并于同年在芬兰首次公开。2003 年, 西南农业大学申请了“自然坡面九孔分流水土流失监测系统”(CN200310110900.3)的专利。此外, 现有的水土保持工作重点偏重治理而非监测, 且动态监测需高精度侵蚀预测模型, 现有模型(如通用土壤流失模型 USLE/RUSLE)多基于静态参数, 难以适应实时变化, 机器学习与人工智能(AI)技术在该领域的应用尚需进一步探索。

综上, 未来研究应构建以侵蚀阻控、抗旱提质和产能提升等多目标协同的土壤侵蚀阻控技术评估体系, 提出不同气候与环境条件下效益最大化的土

壤侵蚀阻控技术模式,并建立全国尺度的侵蚀阻控技术精确配置与高效管理平台,集成“监测—诊断—决策”一体化系统,最终达成耕地质量、生态效应与粮食产能的协同提升^[24]。

3.3 研发主体与未来建议

在土壤障碍消减技术领域的研发中,企业凭借其强大的技术研发实力,成为研发的主力军(占比48.9%),这充分表明该技术领域具有广阔的市场前景。然而,科研院校在人才培养和科研创新方面具有独特的优势,高校(19.5%)与科研院所(17.1%)在基础研究领域的知识溢出效应尚未充分转化,知识转移转化率低。未来应充分发挥高校和科研院所的知识优势,搭建起高价值专利向企业转移的有效渠道,促进科研成果的高效产出与转化,实现产学研的深度融合。

当前技术布局呈现明显的地理锁定效应,我国当前专利技术布局主要集中在国内市场(占比90.5%),这在一定程度上限制了技术的提升与成果的转化。建议采用技术轨道理论(Technology trajectory)指导研发方向,在“一带一路”沿线国家建立联合实验室,积极加大在海外市场的布局,促进高质量成果的产出以及关键核心技术的突破。

国家监测网络建设为技术研发提供了重要支撑,已建成的1300+耕地质量定位监测点与2.8万个区域监测站构成了典型的“观测—实验—模拟”研究范式。中国科学院围绕土壤盐碱化改良、土壤酸化改良、土壤侵蚀防治等开展了深入的理论研究和技术研发,构建了土壤障碍因子分类消减、保护性耕作和分类施策耕地利用等理论与技术体系。2024年4月,中国农业科学院启动实施“盐碱地改良和综合利用技术集成示范”重大科技任务,进一步加强了靶向消减障碍关键技术的突破与产品研发。

未来研究应聚焦智能监测技术开发,构建“空—天—地”一体化监测网络。中华人民共和国农业农村部于2021年提出“实施农田基础设施建设工程和农田地力提升工程,将土壤改良、障碍土层消除、土壤培肥等纳入工程体系”,已建成的国家农业科学观测监测网络为农业灾害预警和科技创新提供了坚实的支撑。在2025年—2030年重点突破土壤健康智能诊断系统、障碍因子协同消减技术包等关键领域,为保障国家粮食安全与农业可持续发展提供科技支

撑^[25-27]。

4 结 论

基于IncoPat专利检索平台,对全球土壤障碍消减技术领域的专利进行深入剖析,发现我国在土壤酸化阻控、脱盐降碱及侵蚀退化防治三大关键技术领域专利申请量占比居全球首位,其中土壤侵蚀防控领域专利申请起步最早,但近年申请量较少,盐碱消减与酸化阻控领域更受国际关注。专利申请前十的机构中,企业与高校占比较高,初步形成“企业主导转化、高校开展基础研究、院所支撑开发”的协同创新体系,凸显该领域商业潜力。当前研发聚焦于障碍土壤专用调理剂、高效肥料^[28-29],工程技术与模式构建及机械化装备改造^[30]亦受重视;未来应加大生物技术应用研发投入,整合改良技术以实现土壤快速脱盐与长效稳控,同时注重降低成本与技术复杂性以推动商业推广。尽管该领域已取得成果,但研发态势趋缓,未来需强化核心技术创新,促进多学科技术融合,包括构建耕地酸化风险预警模型、开发盐碱障碍长效消减技术体系、研创土壤侵蚀多功能协同提升技术等,以重建土壤生态与生产功能,聚焦全球粮食安全,推动农业可持续发展。

参考文献(References)

- [1] Wang Y, Yao Z S, Zhan Y, et al. Potential benefits of liming to acid soils on climate change mitigation and food security[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(12): 2807—2821.
- [2] Zhao Y C, Wang M Y, Hu S J, et al. Economics-and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4045—4050.
- [3] Zhu Q C, Liu X J, Hao T X, et al. Cropland acidification increases risk of yield losses and food insecurity in China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 256: 113145.
- [4] Chen X, Liang L Z, Dong X Y, et al. Patent analysis of acid soil improvement technology[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*. 2023(5): 174—182. [陈香, 梁林洲, 董晓英, 等. 酸性土壤改良技术领域专利情报分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(5): 174—182.]
- [5] FAO. Global status of salt-affected soils – Main report[R]. Rome: FAO, 2024.
- [6] Yang J S. Development and prospect of the research on

- salt-affected soils in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (5): 837—845.[杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45 (5): 837—845.]
- [7] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China soil and water conservation bulletin 2023[EB/OL], (2024-03-31) [2025-01-20]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202403/t20240329_1708287.html. [中华人民共和国水利部. 2023 中国水土保持公报[EB/OL]. (2024-03-31) [2025-01-20]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202403/t20240329_1708287.html.
- [8] Wang H X, Sheng M M, Yang X D, et al. Overview and trends of international research on soil acidification in tea plantations[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32 (12): 2107—2116.[王贺新, 盛曼曼, 杨向德, 等. 茶园土壤酸化国际研究概况和趋势[J]. 中国生态农业学报, 2024, 32 (12): 2107—2116.]
- [9] Ma K, Rao L Y. Research lineage and hot spot analysis of soil salinization in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28 (11): 90—102.[马凯, 饶良懿. 我国土壤盐碱化问题研究脉络和热点分析[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28 (11): 90—102.]
- [10] Wu Y X, Ren X H, Yan J W, et al. Bibliometric analysis of soil erosion research at runoff plot scale based on Web of Science from 1992 to 2023[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2024, 35 (4): 212—224.[吴悦溪, 任小花, 严靖雯, 等. 基于 Web of Science 的 1992—2023 年径流小区土壤侵蚀研究文献计量分析[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35 (4): 212—224.]
- [11] Li T L, Li B B, Zhang F B, et al. Bibliometric analysis of soil erosion study by machine learning[J]. *Yangtze River*, 2024, 55 (1): 82—90.[李潼亮, 李斌斌, 张凤宝, 等. 应用机器学习研究土壤侵蚀的文献计量分析[J]. 人民长江, 2024, 55 (1): 82—90.]
- [12] Zhang Y T, Xiao H B, Nie X D, et al. Evolution of research on soil erosion at home and abroad in the past 30 Years--Based on bibliometric analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (4): 797—810.[张宇婷, 肖海兵, 聂小东, 等. 基于文献计量分析的近 30 年国内外土壤侵蚀研究进展[J]. 土壤学报, 2020, 57 (4): 797—810.]
- [13] Sekar S, Paulraj P. Strategic mining of cyanobacterial patents from the USPTO patent database and analysis of their scope and implications[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2007, 19 (3): 277—292.
- [14] Liu C Y, Yang J C Y. Decoding patent information using patent maps[J]. *Data Science Journal*, 2008, 7: 14—22.
- [15] 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.]
- [16] Science and Technology Department of Jiangxi Province. The National Science and Technology Support Program project "Research and Integrated Demonstration of Remediation Technologies for Secondary Obstacles in Red Soil Farmland" has passed the acceptance inspection[EB/OL]. 2015-05-13[2025-01-21]. https://www.most.gov.cn/dfkj/jx/zxdt/201505/t20150512_119409.html[江西省科技厅. 国家科技支撑计划“红壤耕地次生障碍修复技术与集成示范”项目通过验收[EB/OL]. 2015-05-13[2025-01-21]. https://www.most.gov.cn/dfkj/jx/zxdt/201505/t20150512_119409.html]
- [17] Wang Z J, Yu S Y, Xu X. Quantitative review of soil salinization research dynamics based on bibliometric analysis[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2024, 62 (2): 303—317.[王忠静, 于苏越, 许兴. 基于文献计量学的土壤盐渍化研究动态定量综述[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2024, 62 (2): 303—317.]
- [18] Huang G Z, Huang L H, Liu B S, et al. Evaluation of improvement effect and analysis of influencing factors of different amendments on saline-sodic soils based on a meta-analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62 (2): 388—399.[黄广志, 黄立华, 刘伯顺, 等. 基于 Meta 分析的苏打盐碱土改良效果评估[J]. 土壤学报, 2025, 62 (2): 388—399.]
- [19] Jiang Z B, Ning S R, Wang Q L. A comprehensive evaluation of the effect of desulfurized gypsum for improving saline-alkali Soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61 (3): 699—713.[姜展博, 宁松瑞, 王全九. 脱硫石膏改良盐碱土壤综合评价研究[J]. 土壤学报, 2024, 61 (3): 699—713.]
- [20] Borrelli P, Robinson D A, Panagos P, et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070)[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117 (36): 21994-22001.
- [21] Feng K Y, Ma L X, Yu D S, et al. Experimental research on soil erosion monitoring of different ground cover conditions using terrestrial laser scanning (TLS) [J]. *Soils*, 2022, 54 (4): 856—864.[冯凯月, 马利霞, 于东升, 等. 基于地基激光雷达监测不同地表覆盖条件的土壤侵蚀试验研究[J]. 土壤, 2022, 54 (4): 856—864.]
- [22] Dou Z N, Wang B, Zhou J X. Prediction of soil erosion spatial distribution and analysis of influencing factors using machine learning: A case study of Yunlong Country of Yunnan Province in the alpine canyon region of Southwest of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, doi: 10.20103/j.stxb.202411112748.[窦占宁, 王彬, 周金星.

- 基于机器学习的土壤侵蚀空间分布预报及影响因子分析——以西南高山峡谷区云南省云龙县为例[J]. 生态学报, 2025, doi: 10.20103/j.stxb.202411112748].
- [23] Ma L, Bu Z H, Liang W G, et al. Method for quantitative monitoring of soil erosion based on USLE principle and 3S technology and its application[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (3): 602—614.[马力, 卜兆宏, 梁文广, 等. 基于 USLE 原理和 3S 技术的水土流失定量监测方法及其应用研究[J]. 土壤学报, 2019, 56 (3): 602—614.]
- [24] Deng Y S, Cai C F. Progress of survey, monitoring, and control technology of Benggang erosion in red soil hilly area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(2): 322—333. [邓羽松, 蔡崇法. 红壤丘陵区崩岗侵蚀调查与监测防治技术进展[J]. 土壤学报, 2025, 62 (2): 322—333.]
- [25] Hainan University. The 2024 annual project summary meeting of the National Key Research and Development Program project "Precise Identification and Mitigation Strategies for Spatiotemporal Distribution of Soil Constraint Factors in Medium and Low-Productivity Farmland" was held in Haikou[EB/OL]. 2024-12-24 [2025-01-21].<https://staf.hainanu.edu.cn/info/1401/14881.htm>. [海南大学. 国家重点研发计划项目“中低产田土壤障碍因子时空分布精准识别与消减策略”2024 年度课题总结会在海口召开 [EB/OL]. 2024-12-24[2025-01-21].<https://staf.hainanu.edu.cn/info/1401/14881.htm>]
- [26] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. The start-up meeting of the National Key Research and Development Program project "Key Technologies, Supporting Equipment and Demonstration for Reducing Soil Structural Obstacles" was held in Nanjing by the Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences[EB/OL]. 2024-04-03 [2025-01-21]. https://issas.cas.cn/xwzx/kydt/202404/t20240403_7072295.html. [中国科学院南京土壤研究所. 国家重点研发计划项目“土壤结构性障碍消减的关键技术及配套装备与示范”启动会在南京召开 [EB/OL]. 2024-04-03 [2025-01-21]. https://issas.cas.cn/xwzx/kydt/202404/t20240403_7072295.html]
- [27] Zhu Y G, Chen W P. Soil health cultivation: Innovative exploration from theory to practice[J]. *Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering*, 2025, 40 (5): 9. [朱永官, 陈卫平. 土壤健康培育: 从理论到实践的创新探索[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2025, 40 (5): 9.]
- [28] Wang D Z, Wu Q F, Ge Y Y, et al. Improvement effects of different conditioners on acidic soils of newly reclaimed land in the hilly region of the southern China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2025, 56(2): 561—569. [王道泽, 邬奇峰, 葛媛颖, 等. 不同调理剂对南方丘陵新垦耕地酸性土壤的改良效果[J]. 土壤通报, 2025, 56 (2): 561—569.]
- [29] Tang Q Z, Wang F, Shi J Z, et al. Effects of partial substitution of organic fertilizer for nitrogen fertilizer on saline-alkali soil improvement and rice yield increase[J]. *Soils*, 2024, 56 (1): 97—102. [唐奇志, 汪帆, 时金泽, 等. 有机肥部分替代氮肥的盐碱土壤改良与水稻增产效应研究[J]. 土壤, 2024, 56 (1): 97—102.]
- [30] 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]

(责任编辑: 陈荣府)