

徐明岗, 蔡泽江, 李丹丹, 等. 中国酸化耕地治理现状与提质增效战略. 土壤, 2025, 57(6): 1211–1218.

中国酸化耕地治理现状与提质增效战略^①

徐明岗^{1,2}, 蔡泽江², 李丹丹¹, 孙楠², 张文菊², 刘朝阳¹

(1 山西农业大学生态环境产业技术研究院, 土壤健康山西省实验室, 太原 030031; 2 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)

摘要: 近 40 年来, 我国耕地土壤酸化问题日益严峻, 已成为耕地质量退化的突出表现形式。2025 年中央一号文件指出“加强南方酸化退化耕地治理”, 将其列为保障国家粮食安全和生态安全的重大战略任务。尽管我国酸化耕地治理已开展了大量过程机制和防控技术研究, 但仍缺乏系统性的战略研究。为此, 本文重点论述了国内外酸化研究的发展趋势、我国酸化耕地治理取得的系列成效以及现阶段存在的问题, 并在此基础上, 结合区域酸化特点, 以科技创新为核心, 统筹基础理论、科技攻关与政策保障, 提出了适合我国酸化耕地提质增效的三大任务和六项举措, 以更好地支撑国家“藏粮于地”战略。

关键词: 酸化耕地; 区域特点; 防控技术; 分区分类; 科技创新

中图分类号: S156.99 文献标志码: A

Current Status and Enhancement Strategies for Acidified Cropland Management in China

XU Minggang^{1,2}, CAI Zejiang², LI Dandan¹, SUN Nan², ZHANG Wenju², LIU Chaoyang¹

(1 Institute of Eco-environment and Industry Technology, Shanxi Agricultural University; Soil Health Laboratory in Shanxi Province, Taiyuan 030031, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences / State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China, Beijing 100081, China)

Abstract: Over the last four decades, intensified soil acidification has emerged as a severe manifestation of cultivated land degradation in China. The No. 1 Central Document of 2025 explicitly identifies “strengthening the management of acidified and degraded cultivated land in southern China” as a key strategic measure to safeguard national food security and ecological security. Although substantial research has been conducted on the processes, mechanisms, and control technologies related to acidified croplands, systematic strategic research remains scarce. Therefore, this paper reviews recent advances in acidification research worldwide and summarizes the achievements and persistent challenges in managing acidified croplands in China. By incorporating regional acidification characteristics and centering on scientific and technological innovation, we integrate fundamental theories, technological breakthroughs, and policy support to propose three major tasks and six specific measures aimed at enhancing the quality and efficiency of acidified cultivated land. These recommendations are designed to support the national strategy of “sustainable farmland use and innovative application of agricultural technology” and contribute to sustainable agricultural development.

Key words: Acidified cropland; Regional characteristics; Control technologies; Regionalization and categorization; Technological innovation

耕地是粮食生产的命根子。然而, 多年来不合理开发利用和粗放式水肥管理, 导致我国耕地酸化问题尤为突出^[1]。酸化不仅引起土壤养分失衡^[2]、土壤结构破坏和病虫害加剧^[3-4], 还会使重金属活性增加^[5], 从而导致作物产量和品质下降^[6-7]。2025 年中央一号文件指出“加强南方酸化退化耕地治理”, 将其列为

保障国家粮食安全和生态安全的重大战略任务。

20 世纪 50 年代, 我国便开始了土壤酸度与酸化研究^[8], 倾重于研究红壤的酸度特征。20 世纪 80 年代以来, 主要开展了酸沉降对园地和林地土壤酸化影响的研究^[9-11]。自“八五”以来, 开始重视南方红黄壤区耕地土壤改良工作, 先后启动了国家重点基础

①基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目(2024-XZ-54)资助。

作者简介: 徐明岗(1961—), 陕西武功人, 博士, 中国工程院院士, 主要从事土壤酸化防控、耕地质量提升、土壤健康等领域研究。

E-mail: xuminggang@sxau.edu.cn

研究发展计划项目、国家重点研发计划项目、国家农业攻关技术重大项目等,在红黄壤区土壤酸化时空演变特征、酸化驱动因子与机制、酸化防控技术等方面取得了系列进展^[12-16]。但我国地域辽阔,自然条件、母质类型、农业管理措施以及社会发展水平差异大,酸化耕地的空间分布规律和驱动机制迥异,造成现有理论、技术和产品在实际应用中仍显不足^[17]。监测数据显示,我国耕地整体仍呈现酸化面积增加的态势,与第二次土壤普查相比,2015年前后我国酸性土壤($\text{pH} \leq 6.5$)总面积增加64.5万 km^2 ,其中南方红黄壤地区、东北地区和其他地区分别增加19.5万、23.0万和22.0万 km^2 ^[18]。可见,土壤酸化仍是耕地退化防控的重大和热点科技问题。为此,本文重点论述了国内外土壤酸化研究的发展趋势,我国酸化耕地治理取得的阶段性成效与存在问题,以及我国酸化耕地提质增效的重要举措,以更好地支撑我国“藏粮于地”战略。

1 国内外耕地酸化研究的发展趋势

1.1 国际耕地酸化研究发展历程

以Web of Science核心合集为数据源,围绕“土壤酸化”(soil acidification)主题,设定时间范围为1980年1月1日—2024年7月1日(下同),共检索到9207篇相关研究文献。结果显示,该领域的研究呈现显著的指数增长趋势(图1,论文数与年度的拟合曲线决定系数 $R^2=0.744$),反映出国际学界对耕地酸化问题的持续关注^[19]。图2展示了国际土壤酸化研究在不同发展阶段的高频关键词共现图谱。氮肥施用与酸沉降作为核心驱动因素^[20],贯穿整个研究历程,是推动研究持续深化的关键背景。在过去40余年间“土壤酸化”关键词出现频次增长了逾百倍,研究主题也经历了由现象描述向机制解析的不断推进。根据文献数量变化与研究重点的变化,国际耕地酸化研究可划分为4个阶段:1980—1990年为探索期(文献占比4.1%),聚焦酸化现象及其对土壤化学性质的影响^[21];1991—2000年与2001—2010年为发展期(合计占比41.4%),研究逐步扩展至酸化与铝/重金属活性及有机质含量之间的关系,并开始关注酸化对土壤微生物的影响;2011—2024年为爆发期(占比54.6%),文献数量已超过前三阶段总和,研究重点转向微生物多样性对酸化的响应机制、酸化阻控技术及其与固碳减排的协同效应^[22-23],表明该领域研究已进入机制深化与综合调控的新阶段。

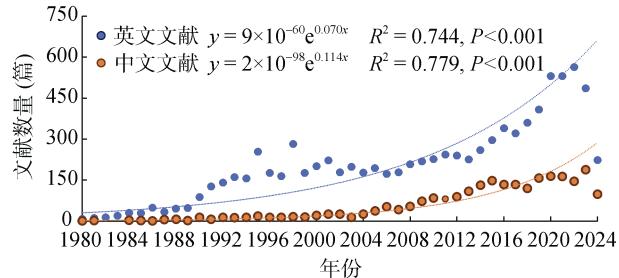


图1 1980—2024年国内外耕地酸化研究文献数量变化

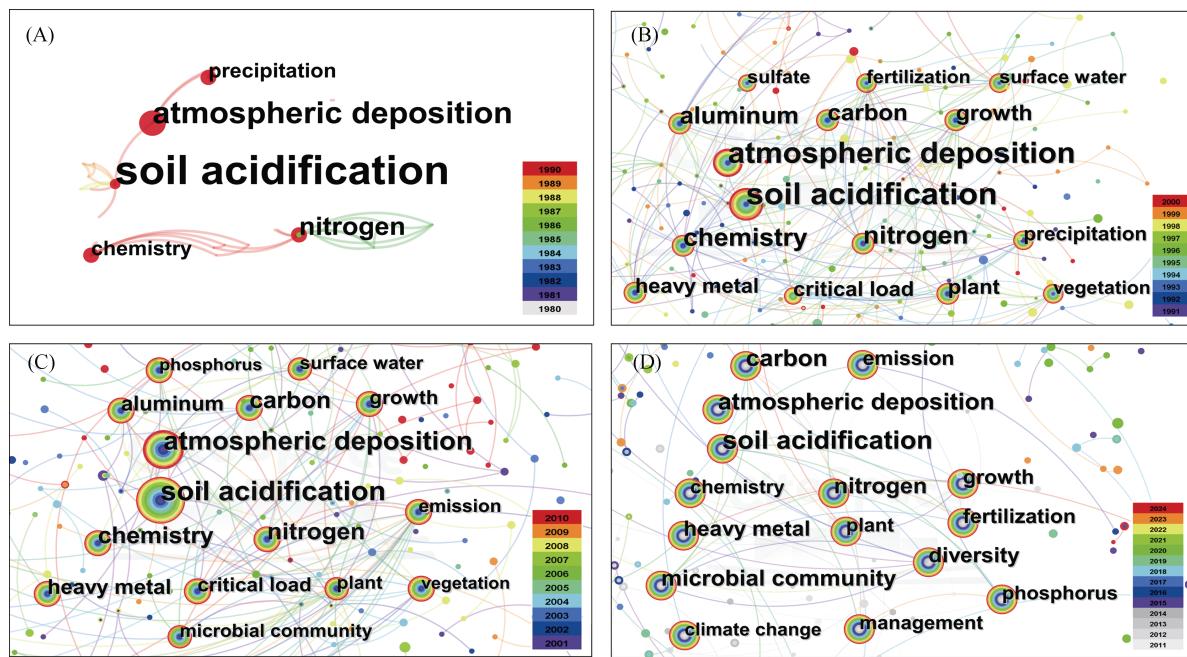
Fig. 1 The change in number of published papers related to soil acidification annually at home and abroad

1.2 国内耕地酸化研究发展历程

中国耕地酸化研究以中国知网(CNKI)数据库为数据源,以“土壤酸化”为主题词,共筛选出相关研究文献2469篇。根据文献数量的变化趋势(图1),我国耕地酸化研究同样呈显著的指型增长态势($R^2=0.779$)。最近15年,中文文献的年均复合增长率约为英文文献的1.6倍,充分体现了我国学者对本土耕地酸化问题的快速响应与深入研究^[24]。这一增长趋势不仅反映了学术界对耕地酸化问题的高度关注,也与国家层面推动的耕地保护政策(如《土壤污染防治行动计划》)密切相关,同时受到酸化耕地面积扩大、粮食安全需求升级等现实压力的共同驱动。然而,中文文献总量仍明显低于英文文献,仅占其27%,表明我国耕地酸化研究在国际学术舞台上的影响力仍有待提升。

图3展示了我国耕地酸化防控研究的高频关键词共现图谱,结合图1与图3可见,国内相关研究也呈现出明显的阶段性演变特征。其中,“土壤酸化”和“酸沉降”始终为研究热点。1980—1990年,文献占比仅为1.5%,研究尚处于起步阶段,关键词数量有限^[9];1991—2000年,文献占比升至5.8%,开始关注酸化对植物生长的影响,关键词如“酸性土壤”“茶园土壤”等反映出区域性与作物相关问题的探索^[10-11,25];2001—2010年,文献占比达17.4%,研究逐步聚焦于土壤肥力变化与酸化成因,同时防控措施开始受到重视^[1];2011—2024年,文献占比高达75.3%,研究主题显著拓展,涵盖作物产量、土壤改良、养分调控、连作障碍与综合治理等方向^[26]。近年来,研究重点逐渐转向酸化对作物产量的影响及改良技术的集成^[27-28],反映出我国耕地酸化问题的加剧态势与治理需求的紧迫性。

综上,40余年来,国内外耕地酸化研究均呈指数增长态势,其中我国在近15年的研究增速尤为显



(图谱中的英文关键词: soil acidification(土壤酸化)、atmospheric deposition(酸沉降)、precipitation(酸雨)、chemistry(化学)、nitrogen(氮肥)、sulfate(硫酸盐)、fertilization(施肥)、surface water(地表水)、aluminum(铝)、carbon(碳)、growth(作物生长)、heavy metal(重金属)、critical load(临界负荷)、plant(植物)、vegetation(植被)、phosphorus(磷)、emission(排放)、microbial community(微生物群落)、diversity(多样性)、management(管理)、climate change(气候变化))

图2 1980—1990年(A)、1991—2000年(B)、2001—2010年(C)和2011—2024年(D)4个时间段国际耕地酸化文献高频关键词共现图谱

Fig. 2 Co-occurrence network of keywords of international references related to soil acidification at different periods: 1980—1990(A), 1991—2000(B), 2001—2010(C) and 2011—2024 (D)

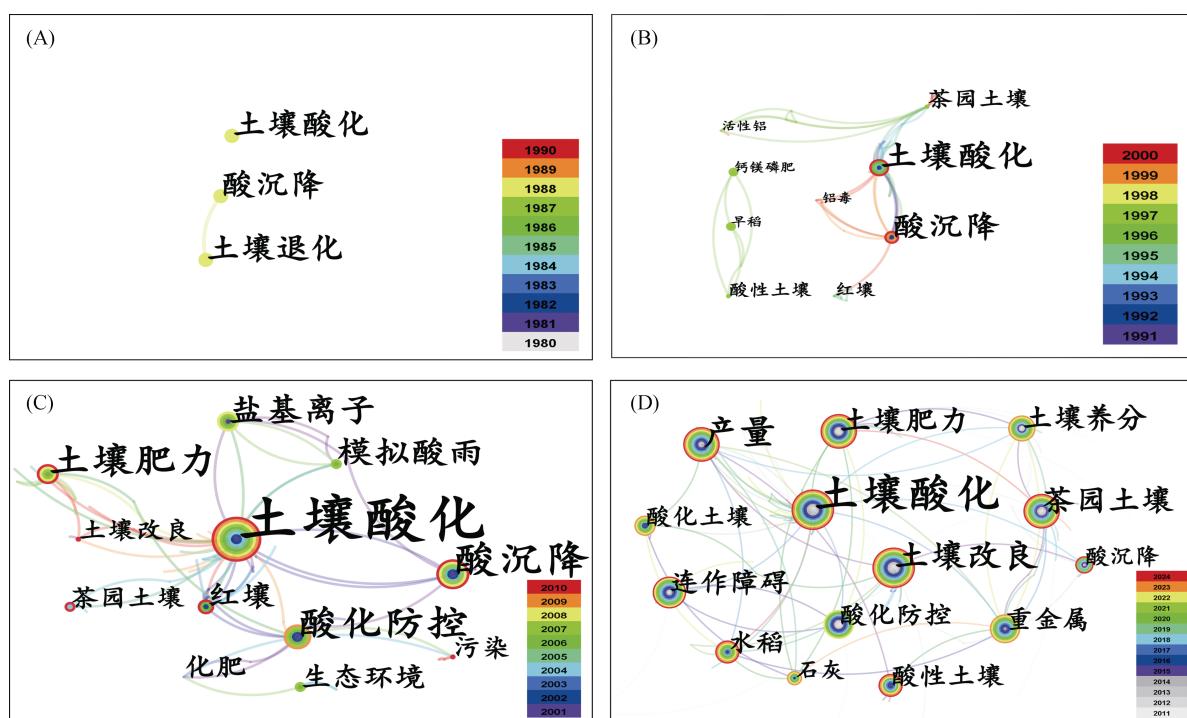


图3 1980—1990年(A)、1991—2000年(B)、2001—2010年(C)和2011—2024年(D)4个时间段中国耕地酸化文献高频关键词共现图谱

Fig. 3 Co-occurrence network of national references of soil acidification at different periods: 1980—1990(A), 1991—2000(B), 2001—2010 (C) and 2011—2024(D)

著,充分体现了学术界对本土酸化问题的快速响应与高度重视。该领域发展受学科创新与社会需求双重驱动。系统科学的进步和新技术的应用不断提升了研究水平,其中土壤微生物学作为前沿方向,揭示了微生物在物质循环和生态系统中的核心作用。当前国际研究更注重学科基础,强调耕地酸化发展的内在驱动因素,同时关注全球变化、环境污染等与人类福祉密切相关的新兴学科;而我国研究更突出区域特色,聚焦于土壤肥力提升、作物产量保障和酸化阻控等现实问题。然而,由于我国农田长期处于高强度利用状态,现有农田土壤酸化的理论与方法体系仍需进一步完善。

2 我国酸化耕地治理取得的成效

近年来,我国在酸化耕地治理研究领域已取得阶段性进展:基本摸清了耕地土壤酸化现状;针对红黄壤快速酸化的问题,探明了不合理施用化学氮肥是加剧农田土壤酸化的主要原因;硝化作用释放的氢离子和硝酸根的淋溶是化学氮肥引起农田土壤酸化的主要过程;研发了有机替代阻酸、减氮控酸、硝化抑制产品等抑制酸化的技术和产品^[18,26,29]。如中国农业科学院于 20 世纪 90 年代便系统阐明了酸化、贫瘠化等土壤退化的现状、条件、过程、原理及综合防治技术,研究成果“南方红黄壤地区综合治理与农业可持续发展技术研究”获 2002 年国家科技进步奖二等奖;在酸化改良方面,阐明了有机肥降酸阻酸双重作用机制,创建了有机肥替代阻酸等关键技术,标志性成果

“我国典型红壤区农田酸化特征及防治关键技术”获得 2018 年国家科技进步奖二等奖。上述研究成果对红壤酸化阻控具有重要指导意义。

2.1 基本摸清了耕地土壤酸化现状

1980—2020 年,我国耕地发生不同程度的酸化,土壤 pH 平均下降了 0.5~0.8 个单位。我国目前酸化耕地面积($\text{pH}<6.5$)已有 61.3 万 km^2 (9.20 亿亩),不仅南方红黄壤区耕地严重酸化,东北及华北部分区域耕地土壤 pH 也有明显的下降趋势^[30]。当前,我国 $\text{pH}<6.50$ 的酸性土壤总面积约 311 万 km^2 ,其中,60.3% 分布在南方红黄壤地区,23.3% 分布在东北地区,其他地区占 16.4%; $\text{pH}<5.50$ 的酸性土壤总面积约 44.8 万 km^2 ,其中,75.0% 分布在南方红黄壤地区,17.0% 分布在东北地区,其他地区占 8.0%(图 4)^[26]。红黄壤地区又分为川、贵、滇黄壤亚区和华中、华南的红壤亚区,其中红壤地区酸化耕地面积最大,问题尤为严重^[18]。

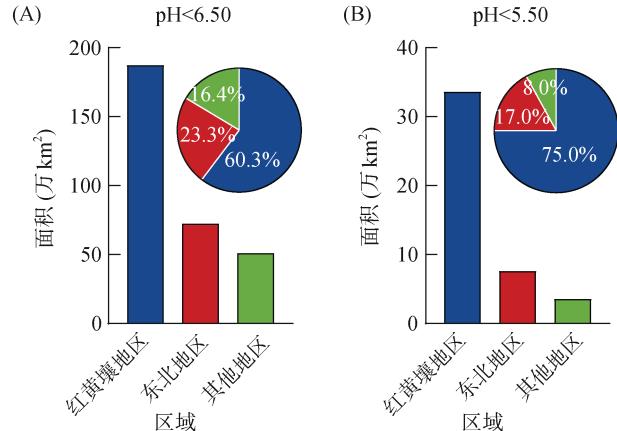


图 4 我国不同区域耕地酸化面积:不同区域耕地 $\text{pH}<6.50$ 的面积和占比(A)和不同区域耕地 $\text{pH}<5.50$ 的面积和占比(B)^[26]

Fig. 4 Areas and percentages of acidified croplands across different regions in China: Areas and proportions of croplands with $\text{pH}<6.50$ (A); Areas and proportions of croplands with $\text{pH}<5.50$ (B)

2.2 初步解析了酸化成因

在酸化耕地中,化肥施用量普遍偏高,尤其是氮肥的过量使用现象较为突出。由于不同作物对养分的需求存在差异,不合理的施肥方式,如一次性大量施肥、施肥不均匀等,均会进一步加剧土壤酸化问题^[1]。以果园为例,部分果农为追求高产,往往在果树周围集中施用大量化肥,却忽视了对整个果园土壤的均衡施肥^[2]。这种施肥方式不仅会导致局部土壤酸化加剧,还会影响果树根系的正常发育。研究表明,长期大量施用氮肥是南方耕地酸化的主要驱动因素,对酸化贡献率达 65% 以上^[31-32]。

此外,我国酸化耕地的土地利用方式以集约化种植为主,复种指数较高,缺乏合理的轮作、休耕。例如,南方红壤区的复种指数普遍在 200% 以上,一些地区甚至达到 270%,这意味着在同一块土地上一年内可能会种植两到三季作物^[33]。这种高强度的土地利用方式使得土壤长期处于高强度消耗状态,缺乏自我修复和调整的时间,导致土壤酸化加剧,肥力持续下降^[34]。

2.3 形成了一些防治技术模式

20 世纪 90 年代以来,由于化肥的长期过量施用,我国红壤普遍出现酸化现象,且酸化进程持续加快。该阶段的治理思路主要集中于撒施石灰、化肥减量、秸秆还田、有机肥施用等措施。进入 21 世纪,治理手段趋向多元化。针对不同耕地酸化程度,逐步形成了“石灰降酸+钙镁磷肥”“有机肥阻酸+秸秆还田”

“减氮控酸+冬种绿肥”等复合治理模式。目前,已有酸化耕地治理技术规程 18 项、主推技术 8 项和酸化耕地治理技术模式 12 项。在此期间,酸化耕地治

理领域共申请及授权专利 1 167 件(图 5)。尤其是 2010 年以后,专利数量呈现指数级增长。专利涉及作物从果茶经济作物到粮食作物;改良材料也从传统碱性物质拓展至碳基材料、菌剂等新型材料;专利内容从早期的降酸增产到酸化、结构障碍、连作障碍等协同消减并重,从单一化学改良延伸至酸化预警模型构建等系统性技术。

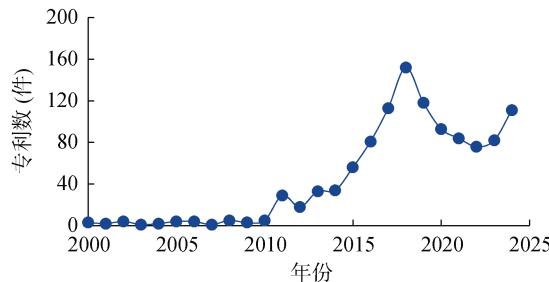


图 5 2000—2024 年我国有关酸化耕地治理相关专利
Fig. 5 Trend in patents concerning acidified cropland management in China over the period 2000—2024

这些技术体系主要聚焦于我国南方红黄壤酸化耕地治理。通过在江西、湖南等酸化耕地治理重点县推行“测土配方+综合改良”模式,酸化耕地治理区域土壤 pH 提高了 0.3~0.6 个单位,作物产能提升 8%~15%。以峡江县为例,该地区红壤酸化突出(全县 96.2% 耕地 pH<5.5),且有机质含量普遍偏低。当地采用“生石灰调酸+有机肥增施+绿肥种植+秸秆还田”的综合治理模式后,2023 年治理区耕地土壤 pH 较 2020 年提升了 0.3 个单位,土壤有机质含量从 2020 年的 29.6 g/kg 提升至 2023 年的 35.5 g/kg,耕地质量等级提升 0.2~0.3 个等级^[35-36]。这些技术模式为我国其他地区酸化耕地治理提供了可借鉴的实践路径。

3 我国酸化耕地提质增效存在的问题

3.1 治理酸化耕地中存在的问题

基于覆盖 15 个省(区、市)20 个重点治理试点县的调查评估显示,对土壤 pH<5.5 的酸性耕地和 pH<4.5 的强酸性耕地,现行主要防控技术体系包括秸秆还田与有机肥增施、绿肥种植、石灰物质施用、土壤调理剂调控等综合措施^[37]。这些模式在提升土壤 pH 方面效果良好,但存在酸化防控与产能提升难以协同的问题(图 6)。主要原因在于:

1)体制机制不全。当前,我国耕地保护工作正经历从“重数量”向“提质量”的战略转型,但现有治理体系仍存在系统性效能短板。在顶层设计方面,多元治理主体间的协同困境尤为突出。技术支撑体系不

足,全国层面尚未建立统一的耕地质量修复效果评估标准,加之监测网络布局分散、数据采集规范不一,严重影响了精准施策的科学性^[38]。政策实施环节面临双重制约:一方面,基层技术服务覆盖不足、激励手段单一等问题突出;另一方面,新型农业经营主体对质量提升的认知有限、成本承受能力较弱等因素形成了阻力。调研数据显示,在规模化新型经营主体中,主动开展土壤酸化治理的比例较低,这折射出更深层次的制度缺陷:现有政策未能有效整合技术推广、金融配套和市场激励等关键要素,导致“政府推动积极、市场响应不足、农户参与犹豫”的尴尬局面。要突破这种贯穿规划制定、政策实施和效果评估全流程的体制机制障碍,必须通过系统性制度创新来全面提升治理效能,为耕地质量保护提供持续动力^[39]。

2)科技支撑不足。在农业集约化快速发展进程中,耕地酸化治理面临科技体系支撑不足的问题,严重制约治理效能提升。当前,作物高产与土壤酸化阻控的协同机理仍不明晰,基础研究与技术应用存在脱节^[27]。具体表现为:全国层面尚未构建覆盖酸化耕地类型、空间分布、驱动因子及修复需求的动态数据库,导致区域差异化治理缺乏精准数据支撑;配套技术标准体系严重滞后,难以支撑“分区分类、精准施策”的科学治理路径。此外,现有技术体系重“治”轻“防”,未能构建“防控”技术解决方案;缺乏适合大规模推广应用的轻简化、低成本技术手段,尤其是缺乏兼具即时改良效果与长期抑酸功能的创新产品。这种技术供给的结构性失衡,阻碍了治理模式在农户层面的有效推广落地,亟待加快研发“经济有效、操作简便、可持续抑酸”的技术产品组合^[40]。

3)管理措施不细。当前酸化耕地治理存在管理不细等问题^[41]:其一,责任主体不明导致治理效能弱化。由于未明确划分相关部门的权责边界,导致治理责任落实出现“真空地带”,政策宣传与执行链条断裂,致使基层农户及新型经营主体对治理政策认知不足、参与度低。其二,激励政策不完善,制约长效投入。现有财政补贴多聚焦短期工程性措施,对土壤调理剂研发企业、有机废弃物循环利用主体等关键参与方缺乏针对性奖补,且社会资本投资回报机制尚未建立,进而抑制了土壤改良产业链的规模化发展和技术创新活力。其三,全流程管理制度缺位影响可持续性。从技术研发到田间应用再到后期管护,缺乏系统化的标准规范与考核机制,科技成果转化“最后一公里”受阻,改土培肥效果难以长期保持,影响治理工作的整体性和延续性^[42]。

3.2 关键技术应用限制因素

1)酸化土壤改良技术推广面临经济适用性挑战。当前,酸化耕地治理中广泛采用的石灰、有机肥和生物质炭等土壤改良材料,虽在技术层面效果显著,但受制于较高的综合投入成本,其大规模推广仍面临经济可行性瓶颈^[43]。石灰的施用涉及原料采购、长途运输及机械撒施等环节,推高了单位面积改造成本;而有机肥与生物质炭的应用则需额外考虑原料收储、加工转化及品质控制等产业链成本。尤其在大面积连片治理场景下,上述成本叠加效应更为明显,导致基层农户与新型经营主体应用意愿不足,直接制约了技术模式的普及与实施规模。亟需通过优化原料供应链、创新财政补贴机制、探索区域性成本共担模式等路径,破解成本约束难题,为土壤改良技术推广提供可持续的经济支撑。

2)配套农机缺乏,制约酸化耕地治理效能。当前酸化耕地治理面临农机适配性不足的突出短板,一方面,现有农机装备难以满足精准化作业需求,特别是土壤调理剂、有机肥等改良材料的施用设备普遍存在精度不足、均匀性差的问题,直接影响治理效果^[27];另一方面,部分区域农田道路、田块平整度等基础设施

施不完善,进一步制约了农机作业的覆盖率和作业质量。为了提高改良剂的施用效率和效果,需加强专用农机研发与推广。如通过开发智能变量施肥机、生物质炭深施机等高效装备,实现改良材料的精准化、减量化施用,既可降低生产成本,又能显著提升土壤改良的时效性与可持续性。同时,应推动农机农艺融合,结合区域农田条件优化装备参数与作业模式,为酸化耕地系统性治理提供机械化支撑。

3)酸化耕地改良技术推广面临多重制约因素。尽管石灰、有机肥、生物质炭等土壤改良材料在酸化耕地治理中展现出显著成效,但其推广应用仍受到多因素制约(图 6)。技术认知与培训缺位导致农户对改良剂作用机理、施用方法等知识匮乏,接受度普遍偏低;政策激励不足使得改良成本分担机制不健全,农户因经济风险而持观望态度。同时,可复制的示范样板稀缺,缺乏可视化、可量化的成功案例引领,进一步削弱了技术辐射带动力。这些因素相互叠加,制约了土壤改良技术的规模化落地,亟需构建“培训—政策—示范”一体化的推广体系,让酸化耕地改良技术顺利进村入户^[27-28]。

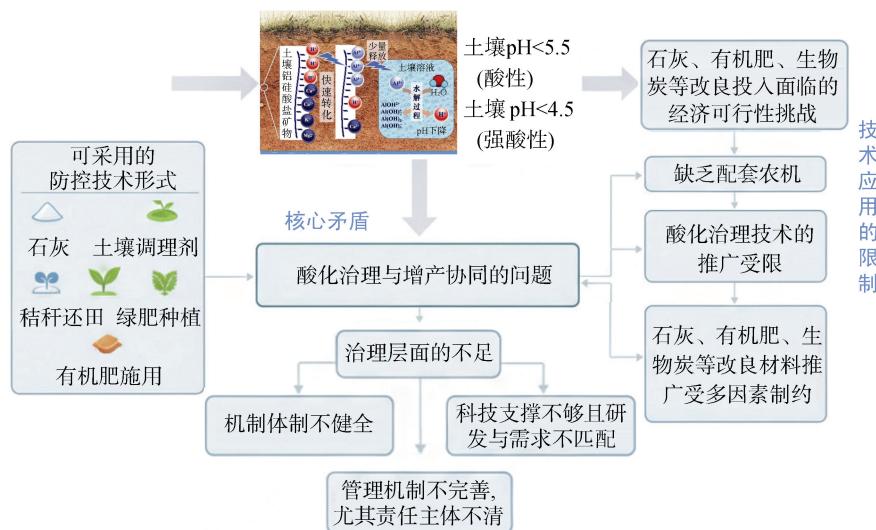


图 6 我国酸化耕地提质增效存在的问题

Fig. 6 Challenges in improving the quality and efficiency of acidic cultivated land in China

4 我国酸化耕地提质增效的战略思考

酸化耕地治理事关国家粮食安全与农业可持续发展,需以科技创新为核心,统筹基础理论、科技攻关与政策保障,构建“评价—监测—防控—管理”全链条治理体系,凝聚多方合力,保数量、提质量,为全面推进农业现代化提供坚实科技支撑(图 7)。当前有三大任务、六项举措需要完成,详细论述如下。

4.1 强化科技支撑,有效提升酸化耕地治理水平

1)设立“酸化耕地治理”跨学科国家科技专项,制定国家酸化评判标准,围绕耕地致酸机理、成因解析、危害评估、防控技术创新等关键问题,重点支持智能化、新材料、新技术等基础理论研究,支持跨学科联合研发轻简化智能农机装备,促进多领域、多学科综合的酸化耕地治理科技突破。

2)构建学科数据共享平台,依据规范的酸化风险

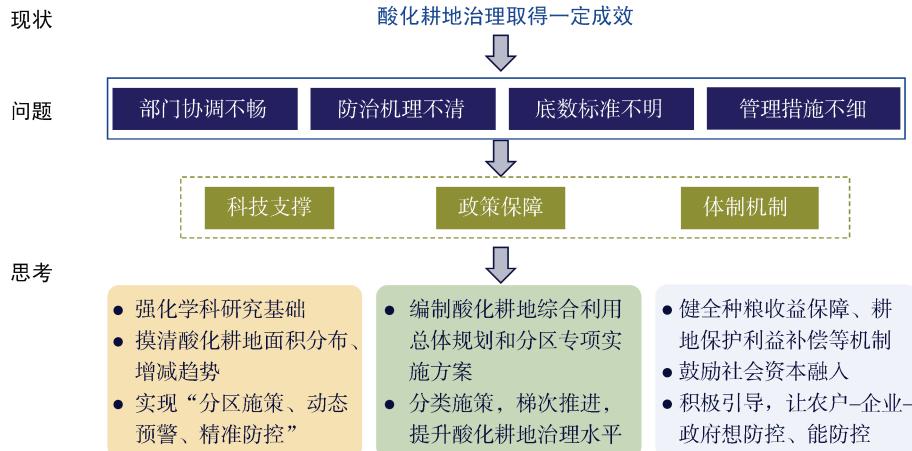


图7 我国酸化耕地提质增效的战略思考

Fig. 7 Strategic considerations for improving the quality and efficiency of acidified farmland in China

评估体系，将全国耕地划分为轻度、中度、重度三级酸化风险区和非风险区，设立国家级长期酸化监测点，搭建“天—空—地”一体化国家级长期酸化监测平台，建立国家级多学科土壤酸化数据库，绘制酸化监测一张网、一幅图、一个数据库，实现“分区施策、动态预警、精准防控”。

4.2 加强顶层设计，建立健全酸化耕地治理政策

1)成立酸化耕地治理专班和专家咨询委员会，编制酸化耕地综合利用总体规划和分区专项实施方案，将酸化耕地治理工作成效作为耕地质量保护与提升的重要内容，纳入耕地保护和粮食安全考核。

2)健全多元主体协同的酸化耕地治理政策，将酸化耕地治理与高标准农田建设、基本农田集中连片整治、化肥减量增效、酸化耕地治理重点县建设等项目有机结合起来，坚持分类施策，梯次推进酸化耕地治理。

4.3 深化产业融合，激发各类主体对耕地酸化防治的积极性

1)鼓励和支持社会资本参与耕地酸化防治，探索构建政企产学研多方协同的创新体系，培育“农户-村集体-专业化公司”三方耕地托管服务组织，健全种粮收益保障、耕地保护利益补偿等机制，探索“投资-收益”一体化利益分配机制和“使用-管护”常态化保障机制。

2)组建“酸化耕地治理科技创新联盟”，围绕酸化耕地防治开展科技创新、产品研发、产业应用和技术服务，促进产业融合发展，通过示范引领，促进农户、企业、政府真正做到想防控耕地酸化、能防控耕地酸化。

参考文献：

- [1] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008–1010.

- [2] 陈海宁, 张占田, 姚杰, 等. 胶东苹果园土壤退化现状及对策[J]. 烟台果树, 2024(1): 41–41, 43.
- [3] 高欣雨, 李丹丹, 李子旭, 等. 土壤酸化胁迫下细菌和真菌的多样性差异与群落重构[J/OL]. 环境科学, 2025: 1–22. (2025-06-16). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjkx.202503077>.
- [4] 陈娟妮, 李姗蓉, 况觅. 影响蔬菜连作病害发生的土壤因子[J]. 植物医学, 2025, 4(4): 28–37.
- [5] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 261–272.
- [6] 蔡泽江, 孙楠, 王伯仁, 等. 长期施肥对红壤pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 71–78.
- [7] 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.
- [8] 凌云霄, 于天仁. 土壤酸度与代换性氢、铝的关系[J]. 土壤学报, 1957(3): 234–246.
- [9] 于天仁. 中国土壤的酸度特点和酸化问题[J]. 土壤通报, 1988, 19(2): 49–51.
- [10] 王敬华, 张效年, 于天仁. 华南红壤对酸雨敏感性的研究[J]. 土壤学报, 1994, 31(4): 348–355.
- [11] 赵其国. 我国红壤的退化问题[J]. 土壤, 1995, 27(6): 281–285.
- [12] 何园球. 江西省耕地保育与持续高效现代农业技术研究与示范[R]. 江西省: 中国科学院红壤生态实验站, 2011-03–31.
- [13] 曾希柏, 张佳宝, 魏朝富, 等. 中国低产田状况及改良策略[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 675–682.
- [14] 徐明岗. 我国典型红壤区农田酸化特征及防治关键技术构建与应用[R]. 北京市: 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 2017-12-20.
- [15] 孙波, 梁音, 徐仁扣, 等. 红壤退化与修复长期研究促进东南丘陵区生态循环农业发展[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(7): 746–757.
- [16] 沈仁芳. 红壤区农田抑铝降酸与产能提升关键技术创建及应用[R]. 江西省: 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 2024-11-15.

- [17] 沈仁芳, 赵学强. 酸性土壤可持续利用[J]. 农学学报, 2019, 9(3): 16–20.
- [18] 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.
- [19] 袁浩亮, 龙泽东, 孙梅, 等. 国际土壤酸化研究知识图谱分析[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 989–997.
- [20] Tian D S, Niu S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(2): 024019.
- [21] Rodhe H. Acidification in a global perspective[J]. Ambio, 1989, 18(3): 155–160.
- [22] Yu M X, Wang Y P, Deng Q, et al. Soil acidification enhanced soil carbon sequestration through increased mineral protection[J]. Plant and Soil, 2024, 503(1): 529–544.
- [23] Li Z X, Gao X Y, Li D D, et al. Differential responses of bacteria, fungi, and C, N, P functions to soil acidification in farmland: A meta-analysis[J]. Environmental Technology & Innovation, 2025, 40: 104499.
- [24] 郑梅迎, 林伟, 徐茜, 等. 基于 CNKI 数据库的土壤酸化文献计量分析[J]. 土壤, 2020, 52(4): 811–818.
- [25] 王维君, 陈家坊, 何群. 酸性土壤交换性铝形态的研究[J]. 科学通报, 1991, 36(6): 460–463.
- [26] 杨帆, 贾伟, 杨宁, 等. 近 30 年我国不同地区农田耕层土壤的 pH 变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(7): 1213–1227.
- [27] 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.
- [28] 徐影, 于镇华, 李彦生, 等. 土壤酸化成因及其对农田土壤-微生物-作物系统影响的研究进展[J]. 土壤通报, 2024, 55(2): 562–572.
- [29] 周海燕. 我国典型区域农田酸化特征及防治技术研究取得重大进展[J]. 基层农技推广, 2018(9): 124.
- [30] 沈仁芳. 因地制宜探索酸化耕地治理模式[N]. 经济日报, 2025, 47.
- [31] 周晓阳. 邵阳县土壤酸化时空演变及磷有效性变化特征[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [32] 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.
- [33] 谭杰扬, 陈丽桦, 张晓杰, 等. 复种指数视角下湖南省域及典型县域粮食增产潜力时序特征分析[J]. 湖南农业科学, 2024(11): 87–95.
- [34] 张桃林, 李忠佩, 王兴祥. 高度集约农业利用导致的土壤退化及其生态环境效应[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 843–850.
- [35] 峡江县人民政府. 峡江县酸化耕地治理项目总体实施方案 2023—2025 年[R/OL]. (2013-08-11). <http://www.xiajiang.gov.cn/xxgk-show-10210528.html>.
- [36] 胡晓军, 李玉兰, 王洋, 等. 江西峡江: 治理酸化土壤实现藏粮于地[N]. 光明日报, 2024-05-23(3).
- [37] 孙笑梅, 同军营, 程道全, 等. 河南省耕地土壤酸碱度状况与酸化土壤治理途径[J]. 中国农学通报, 2017, 33(24): 91–94.
- [38] 陈红, 陈莎, 叶艳妹. 面向农业高质量发展的耕地保护转型研究[J]. 农业现代化研究, 2023, 44(1): 55–64.
- [39] 农业农村部办公厅. 关于开展酸化耕地治理重点县建设的通知 [EB/OL]. (2023-03-28). https://ntjss.moa.gov.cn/tzgg/202305/t20230508_6427010.htm.
- [40] 李楠. 国家酸化耕地治理科技创新联盟. 国家酸化耕地治理科技创新联盟成立公告 [EB/OL]. (2025-09-05). <https://iarpp.caas.cn/ysdt/mtbd/5e7d6289aa254667a866db732d5afd7c.htm>.
- [41] 郝亮, 汪晓帆, 张丛林, 等. 中国耕地生态管护制度碎片化困境与整体性治理研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(8): 26–35.
- [42] 新华社. 中共中央办公厅 国务院办公厅. 关于加强耕地保护提升耕地质量的意见 [EB/OL]. (2024-09-24). https://www.gov.cn/zhengce/202409/content_6976192.htm.
- [43] 鄢礼阳, 林威鹏, 张风姬, 等. 生物炭对酸性土壤改良的研究进展[J]. 广东农业科学, 2021, 48(1): 35–44.