

## 中国耕地土壤酸化现状、研究进展与重点方向<sup>①</sup>

滕应<sup>1,2</sup>, 沈仁芳<sup>1,2\*</sup>, 李九玉<sup>1,2</sup>, 赵学强<sup>1,2</sup>, 时仁勇<sup>1,2</sup>, 车景<sup>1,2</sup>, 刘明<sup>1,2</sup>, 徐仁扣<sup>1,2</sup>, 张佳宝<sup>1,2</sup>

(1 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 2 中国科学院红壤生态实验站, 江西鹰潭 335211)

**摘要:** 耕地土壤酸化是全球性的土壤退化问题, 导致耕地质量退化严重, 制约着区域粮食产能提升和农业可持续发展。本文系统介绍了耕地土壤酸化的概念、原理及影响因素, 全面梳理了国内外耕地土壤酸化治理研究现状与发展态势, 深入分析了当前亟须解决的关键科学和技术问题, 研究并提出“十五五”期间耕地土壤酸化治理研究的重点方向, 拟从耕地土壤酸化监测与评价、土壤酸化阻控与预防、土壤内稳性地力提升、耐酸适生高产优质作物新品种创制、土壤生物多样性及其生态功能提升、土壤环境质量提升与可持续利用、区域耕地土壤酸化防治与产能提升模式等方面开展系统攻关, 创建我国耕地土壤酸化控制和生产生态功能协同提升的调控理论与技术体系, 为我国耕地健康可持续管理和保障国家粮食安全提供重要科技支撑。

**关键词:** 耕地土壤; 土壤酸化; 研究进展; 重点方向

**中图分类号:** X53; S154 **文献标志码:** A

### Current Situation, Research Progress and Key Directions of Soil Acidification in Cultivated Land in China

TENG Ying<sup>1,2</sup>, SHEN Renfang<sup>1,2\*</sup>, LI Jiuyu<sup>1,2</sup>, ZHAO Xueqiang<sup>1,2</sup>, SHI Renyong<sup>1,2</sup>, CHE Jing<sup>1,2</sup>, LIU Ming<sup>1,2</sup>, XU Renkou<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiabao<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2 Ecological Experimental Station of Red Soil, Chinese Academy of Sciences, Yingtan, Jiangxi 335211, China)

**Abstract:** Soil acidification of cultivated land is a global issue of soil degradation, leading to a severe decline in arable land quality and constraining the enhancement of regional grain production capacity and the sustainable development of agriculture. This article systematically presented the concept, underlying mechanisms, and influencing factors of soil acidification in cultivated land. It provided a comprehensive review of the current research status and developmental trends in soil acidification control both domestically and internationally. Furthermore, it conducted an in-depth analysis of the key scientific and technological challenges that required urgent resolution, and proposed priority research directions for soil acidification control during the “15<sup>th</sup> Five-Year Plan” period. The research will focus on achieving systematic breakthroughs in areas such as monitoring and evaluation of soil acidification, prevention and mitigation strategies, enhancement of stable soil fertility, development of acid-tolerant high-yield and high-quality crop varieties, improvement of soil biodiversity and its ecological functions, enhancement of soil environmental quality and sustainable utilization, as well as regional prevention of soil acidification and enhancement of agricultural productivity. This effort aims to establish a theoretical and technical framework for regulating soil acidification and enhancing the ecological productivity of cultivated land in China, thereby providing critical scientific and technological support for the sustainable management of arable land and ensuring national food security.

**Key words:** Cultivated land; Soil acidification; Research progress; Key directions

耕地土壤酸化是全球性的土壤退化问题。我国目前土壤 pH<6.5 的酸性耕地总面积约 6 127 万 hm<sup>2</sup>, 其中强酸性(pH<5.5)耕地面积达 1 740 万 hm<sup>2</sup>, 南方红黄壤区约 1 107 万 hm<sup>2</sup><sup>[1]</sup>。当前我国酸化耕地分布

①基金项目: 国家农业科技重大项目和国家自然科学基金项目(41991330, 41671327)资助。

\* 通信作者(rfshen@issas.ac.cn)

作者简介: 滕应(1975—), 男, 贵州江口人, 博士, 研究员, 主要从事土壤环境与生物修复研究。E-mail: yteng@issas.ac.cn

区域广、面积大,呈现“酸上加酸、快速酸化、潜在酸化”的发展态势,耕地酸化加剧土壤肥力退化、生态功能衰减、重金属污染风险增加等土壤安全问题,导致耕地质量退化严重,制约着区域粮食产能提升和农业可持续发展,威胁国家粮食安全和生态安全<sup>[2-4]</sup>。因此,加强耕地酸化治理,全面遏制耕地酸化趋势,是我国耕地质量保护工作的重要举措,是保障国家粮食安全的迫切需要,是实施耕地健康可持续管理的重大科技需求。

## 1 耕地土壤酸化的概念、原理及影响因素

耕地土壤酸化是指耕地土壤 pH 下降或土壤酸度升高的过程,是一种土壤退化现象。耕地酸化的本质是大量外源和内源质子( $H^+$ )输入导致土壤中固有酸缓冲物质逐渐消耗的过程,即土壤酸缓冲能力不断下降的一个动态过程,从而致使土壤 pH 不断下降的现象<sup>[5-6]</sup>。

根据土壤中  $H^+$  来源,土壤酸化可分为自然酸化和人类活动导致的酸化<sup>[1, 5]</sup>。土壤在自然酸化过程中  $H^+$  的主要来源(内源)包括:水的电离( $H_2O=H^++OH^-$ )、

土壤溶液中  $H_2CO_3$ (主要来自降雨中的  $H_2CO_3$  及土壤呼吸产生的  $CO_2$  溶解形成的  $H_2CO_3$ ) 离解( $H_2CO_3=H^++HCO_3^-$ )、土壤中有有机酸(包括低分子量的有机酸和大分子的腐殖酸)的解离( $HA=H^++A^-$ )等<sup>[7-8]</sup>(图 1)。土壤自然酸化的速度极为缓慢。例如,我国南方酸性红壤的形成经历了成千上万年的成土过程。人为活动导致大量外源  $H^+$  输入耕地土壤,大大加速土壤酸化。外源  $H^+$  输入途径主要包括酸沉降、不合理施肥以及作物根系代谢过程<sup>[9]</sup>。酸沉降主要来源于化石燃料燃烧释放致酸气体( $SO_2$  和  $NO_x$ ),它们通过干/湿沉降的形式进入土壤<sup>[10-11]</sup>。不合理的施肥导致  $H^+$  输入土壤的途径包括酸性肥料(如过磷酸钙)和铵态氮肥等生理酸性肥料的过量施用,其中铵态氮肥长期过量施用是耕地土壤加速酸化的重要原因<sup>[9]</sup>。过量的  $NH_4^+$  在土壤中快速硝化并产酸( $NH_4^++2O_2\rightarrow NO_3^-+H_2O+2H^+$ )<sup>[12]</sup>。1 mol  $NH_4^+$  硝化将产生 2 mol  $H^+$ <sup>[13]</sup>。此外,作物生长过程中根系对钾、钙、镁等阳离子的吸收量高于阴离子,为了维持电荷平衡,根系会释放  $H^+$ 。作物地上部积累的碱性物质因收获带出土壤系统,将进一步导致土壤酸碱失衡<sup>[9]</sup>。

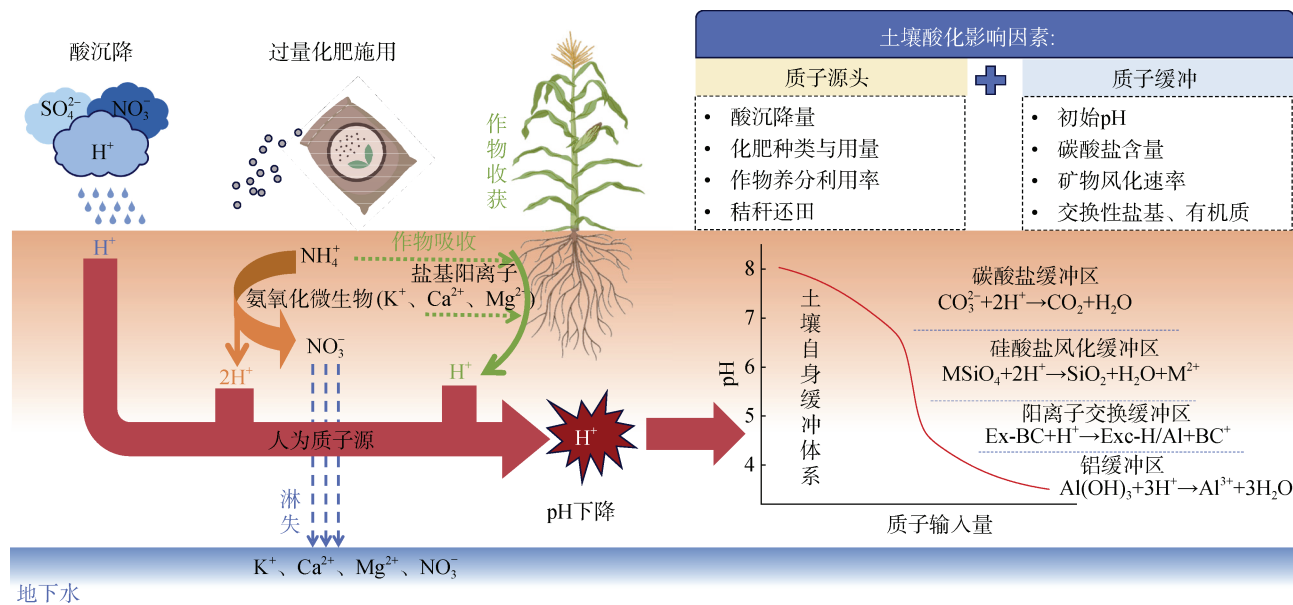


图 1 土壤酸化原理及影响因素

Fig. 1 Mechanisms and influencing factors of soil acidification

当外源和内源  $H^+$  输入土壤时,土壤中的酸缓冲物质通过中和作用等消耗  $H^+$ ,减缓土壤 pH 降低,同时酸缓冲物质逐渐消耗。土壤中的酸缓冲物质以固相为主,包括:①碳酸盐(pH 缓冲范围 8.5~6.2),其作用机制是碳酸钙( $CaCO_3$ )的酸溶解作用( $CaCO_3+2H^+=Ca^{2+}+CO_2+H_2O$ )<sup>[14]</sup>;②硅酸盐矿物(pH 缓冲范围 6.0~5.0),作用机制主要是土壤中硅酸盐矿物的风化对酸

起缓冲作用,这时从矿物晶格中释放出碱金属或碱土金属阳离子和硅酸,同时消耗质子<sup>[15]</sup>;③交换性盐基阳离子(pH 缓冲范围 5.5~4.2),作用机制是土壤通过黏土矿物表面负电荷位上吸附的交换性盐基阳离子与  $H^+$  的交换反应对酸起缓冲作用,同时产生交换性  $H^+$ ,交换性  $H^+$  不稳定,很快与土壤固相铝反应转化为交换性铝<sup>[16]</sup>,这也是土壤酸化至强酸性状态

( $\text{pH} < 5.5$ )时产生植物铝毒害的主要原因;④铝氧化物( $\text{pH}$ 缓冲范围 $< 4.2$ ),作用机制是土壤主要通过铝氧化物的溶解消耗质子,同时产生可溶性铝<sup>[17]</sup>;⑤铁氧化物( $\text{pH}$ 缓冲范围 $< 3.2$ ),作用机制是当土壤中 $\text{pH}$ 低于氧化铁表面的电荷零点时,氧化铁可以从溶液中吸收质子,通过表面羟基的质子化使表面带正电荷( $-\text{OH} + \text{H}^+ = -\text{OH}_2^+$ )<sup>[18]</sup>。然而,这些缓冲物质在土壤中是有限的。当主要缓冲物质(尤其是碳酸盐和盐基离子)被大量消耗后,土壤对额外 $\text{H}^+$ 输入的抵抗能力显著降低。此时,即使少量 $\text{H}^+$ 输入也会引起土壤 $\text{pH}$ 的显著下降,酸化过程加速,导致大量 $\text{Al}^{3+}$ 释放,对作物产生毒害。

由上可知,耕地土壤酸化是多种因素共同作用的结果,受土壤自身抗酸化性能(内因)和人为活动引起 $\text{H}^+$ 输入过程(外因)的影响(图1)。土壤固有属性(如矿物组成、黏粒含量、阳离子交换量(CEC)和有机质含量等)决定了土壤自身抗酸化性能,进而影响土壤酸化进程。高强度人类农业活动和干湿沉降等过程则影响耕地 $\text{H}^+$ 输入量,是影响耕地酸化过程的外因,包括施肥管理不当、作物收获物和秸秆离田、土地利用方式改变、水分管理、酸沉降、酸性废水进入农田土壤等。因此,耕地土壤整体酸化速度由土壤自身抗酸化性能与不合理人为活动的耕种管理措施引起的外源 $\text{H}^+$ 输入量共同决定。

## 2 耕地土壤酸化现状及其对作物产量和生态风险的影响

当前,我国耕地土壤酸化速率呈现发展态势,与第二次土壤普查相比,酸性耕地总面积增加了26.2%,近30年耕地土壤 $\text{pH}$ 平均下降了0.5个单位,制约了区域耕地产能提升。耕地土壤酸化一方面造成铝、锰等离子的毒害,直接抑制作物根系生长,限制作物对水分和养分的吸收;同时,耕地土壤酸化易造成钙、镁、钾、磷、钼等必需养分元素的缺乏或有效性下降,土壤板结加剧,根系伸展受阻,造成作物生长不良而减产<sup>[1, 6, 19]</sup>。我国大面积种植的粮油作物,如玉米、油菜、大豆、小麦、水稻产量95%的酸害阈值分别为 $\text{pH}$  5.87、5.65、5.34、5.32和4.71,当土壤 $\text{pH}$ 低于作物酸害阈值后, $\text{pH}$ 下降会严重导致作物减产,而且强酸性旱地土壤酸化对作物产量影响大,水田酸化对水稻产量的影响较小。红壤长期定位试验研究结果发现,土壤 $\text{pH}$ 由5.4下降至4.7时,油菜籽减产达40%,红薯减产约20%,花生、芝麻减产15%左右,水稻减产约10%;土壤 $\text{pH}$ 由4.6

降至4.2时,油菜、玉米等酸敏作物接近绝收状态,水稻减产近30%。在紫色土母岩发育的水稻土上,水稻酸害阈值为 $\text{pH}$  4.5~4.7,当土壤 $\text{pH}$ 下降至4.5以下时,水稻减产幅度为6%~15%,稻米镉超标率高达90%以上。在紫色土旱地上,作物产量受土壤 $\text{pH}$ 和盐基饱和度的共同影响,粮油作物酸害阈值为 $\text{pH}$  4.8~5.0,当土壤 $\text{pH}$ 下降至5.0以下,盐基饱和度不足60%时,油菜、玉米和高粱等作物减产幅度为10%~20%,以油菜最为明显。根据全球Meta分析的结果,土壤酸化造成作物产量平均下降了13.7%,其中蔬菜下降33%,玉米和小麦分别下降18.2%和18.3%<sup>[20]</sup>。据此,如果我国继续沿用传统大量化肥施用的农田管理模式,到2050年因土壤 $\text{pH}$ 下降引起作物减产将达24%,即使目前实施氮肥零增加计划,预测到2050年也将有16%的产量损失。耕地土壤酸化也严重影响农产品品质。例如,南方一些地区稻田土壤酸化与镉等重金属污染叠加,使土壤中镉活性增加,稻米镉含量超标问题十分突出,严重威胁农业绿色发展<sup>[21]</sup>。同时,耕地土壤酸化影响植物、土壤微生物和动物物种组成,降低土壤生物多样性,土壤固碳能力减弱,导致生态功能衰减<sup>[22-23]</sup>。土壤酸化减少土壤有益微生物数量,抑制其生长和活动,从而影响土壤碳、氮、磷、硫等元素循环,而且还会造成有害微生物繁殖,加重农作物根结线虫病的滋生与蔓延等<sup>[24-26]</sup>。土壤 $\text{pH}$ 通过影响微生物和线虫多样性,间接影响生态系统多功能性,从而威胁到农田生态系统健康和生态安全<sup>[27-29]</sup>。总之,耕地土壤酸化加剧土壤肥力退化、土壤板结、重金属污染风险等问题,导致耕地质量退化严重,制约着区域粮食产能提升和农业绿色发展。

## 3 国内外耕地土壤酸化治理研究现状与趋势

### 3.1 国际上耕地土壤酸化治理研究现状

国际上对土壤酸化问题研究较多的地区为欧洲、北美洲、南美洲、南亚、东南亚及澳大利亚和日本。20世纪70—90年代,欧美日等国家深入开展了酸沉降驱动土壤致酸过程及其酸化预测,以及土壤酸化对自然生态系统的危害和经济损失等工作<sup>[30-32]</sup>,建立了系列预测土壤和地表水酸化的模型,这些研究成果为耕地土壤酸化预测模型的建立提供了基础。

美国和澳大利亚等国家开展了主要作物的适酸特征和石灰类物质的精准施用方法研究,建立了改土适生的方法,从而实现了酸化耕地土壤的有效管理<sup>[33]</sup>。20世纪70年代美国就开展了不同作物适应酸性土壤的

研究,明确了不同作物在不同类型酸性土壤上生长的酸害阈值,并根据不同地区酸性土壤的特点开展分区分类治理,建立石灰需要量的估算方法及其配套施用技术。同时,澳大利亚开展了不当农业措施加速土壤酸化的机制及酸化耕地治理的研究,在解析不同致酸过程的基础上,通过优选适生作物品种、优化肥料管理方法,配合合理的石灰类物质施用方法,构建了酸化耕地的管理模式。另外,美国、澳大利亚和德国科学家率先开展了农林业废弃物改良土壤酸度的研究,明确了农作物秸秆、有机肥等农林业废弃物资源调节土壤酸度的机制及效果,发现磷石膏对酸性土壤表下层和底层土壤具有良好效果,集成了耕地土壤酸化有效控制的种养结合模式,获得大面积推广应用。近年来,欧美发达国家较为重视健康土壤培育与生态功能协同提升。欧盟地平线项目设立了“农田-小流域-生态农业多尺度生态系统构建”“生态系统价值链转化与服务”“创新植物系统以提高生态系统服务功能”等多个科技发展目标,实现健康土壤培育和生态功能提升。

## 3.2 我国耕地土壤酸化治理研究现状

**3.2.1 土壤酸化过程与驱动机制及效应** 系统开展了我国红黄壤区土壤资源调查、发生过程、胶体表面电学研究,目前对于典型地区耕地土壤酸化过程已有初步认识,亟须阐明全国耕地土壤酸化速率及其驱动机制,开发区域耕地土壤酸化动态预测模型,科学评估土壤酸化对耕地产能影响和生态环境效应。

从 20 世纪 50 年代起,中国科学院由李庆逵院士率领南方综合科考队进行了红黄壤区土壤资源调查与利用研究。中国科学院南京土壤研究所一直从事南方酸性红黄壤研究,针对红壤质量演变过程深入开展了红壤发生过程、胶体表面电学研究,创建了引领国际的“基于红色风化壳的发生分类学”“可变电荷土壤电化学”等理论<sup>[1, 5]</sup>。土壤酸化过程中质子在土壤矿物表面发生氢-铝转化,导致土壤固相铝的不断活化,诱发植物的铝毒害效应。近年来,我国已对酸性红壤肥力的时空演变、退化机制、养分循环等开展大量研究,初步揭示了水分养分、资源利用、生态系统退化过程中的物质循环规律,对酸性土壤中影响养分转化的微生物群落组成和分布特征也有一定的工作积累。中国农业大学与瓦赫宁根大学合作开发出农田土壤加速酸化的动态模型 VSD,量化酸沉降、氮肥投入、作物收获等对集约化农田土壤加速酸化的贡献<sup>[34]</sup>。未来亟须深入研究酸化耕地土壤质量变化规律与产能响应机制,以及酸化耕地土壤生物多样性及

其生态功能演变趋势,建立酸害风险评估方法。同时,土壤酸化使重金属的活性增加,大幅提高了作物对重金属的吸收和积累,加剧了重金属污染风险<sup>[35-36]</sup>。由于土壤重金属活性受土壤 pH、土壤类型以及区域气候条件等影响,亟须系统探明酸化耕地土壤重金属等污染物活化过程与防控原理,支撑长效治理技术创新。

**3.2.2 酸化土壤改良产品与技术** 目前已研发了基于石灰类、矿物类、工业副产品等材料的酸化土壤改良技术,研制了系列土壤培肥菌剂及有机肥产品,亟须挖掘有机无机改良剂协同降酸、抗酸、培肥潜力,创制靶向长效抑酸调理产品及其配套技术装备。

经过“十二五”中低产田改良、“十三五”化肥农药减施增效和“十四五”南方红黄壤中低产田产能提升等专项及 973 项目“东南丘陵区红壤酸化过程与调控原理”的实施,已研制一系列酸化耕地土壤改良剂和控酸技术,如无机改良技术、有机改良技术、有机-无机复合改良技术、根际微生物调控技术以及氮肥减施和有机肥部分替代化肥等农艺措施,在酸化耕地治理方面取得了一定的成效<sup>[6, 37-38]</sup>。石灰类物料是目前最常用的酸性土壤调理剂,可通过中和土壤酸性物质快速降低土壤酸度,但停用后会呈现明显的反酸现象<sup>[39]</sup>。长期大量施用则会引发土壤板结、团聚体结构破坏、钙镁钾等养分失衡等新问题<sup>[40]</sup>。因此,亟须开发多元素、高活性与缓释碱性物质兼备的土壤酸铝障碍长效消减产品。随着对耕作过程中加速土壤酸化的人为质子源及其贡献的深入认识,长效控制土壤酸度的核心是有效阻控人为加速酸化作用。目前大多通过优化施肥、秸秆还田、施用硝化抑制剂等养分管理措施阻控农田土壤酸化<sup>[5, 39, 41]</sup>,但上述单项技术往往只作用于酸化过程中的某一阶段,并未考虑土壤-植物系统中的质子产消平衡过程,难以构建有效的土壤酸化长效调控技术。研究表明作物根区是土壤质子产消的热点微域,也是植物响应土壤酸化的直接区域<sup>[19, 42]</sup>。针对养分循环过程中质子产消规律结合作物根区微域质子产消平衡特征,发展实时酸化调控技术,有望进一步提高改良效果的靶向性和长效性,突破土壤酸度长效和实时调控的技术瓶颈。利用畜禽粪便、作物秸秆等有机肥中和土壤酸度,提高土壤酸缓冲性能,也是酸化调控的主要措施。亟须充分挖掘无机、有机改良剂的降酸和抗酸潜力,根据农田土壤酸化特点,以降酸、抑酸、控铝为综合调控策略,研发靶向长效抑酸新产品,建立宜机化的配套施用技术。

**3.2.3 作物和微生物耐酸适生机制** 初步揭示了植物和微生物适应酸性土壤的生理和分子机制,挖掘了一批耐酸适生的作物和微生物种质资源,亟须创制酸化土壤复合障碍胁迫下耐逆适生作物品种及相匹配的微生物组,研制酸化土壤适生微生物菌剂,建立耐酸作物育种和促生合成菌群构建技术。

针对植物适应酸性土壤的生理和分子机制,在以拟南芥和水稻为代表的模式植物上开展了大量的植物耐铝毒、锰毒和低磷的生理和分子方面的研究;植物耐铝毒、锰毒、低磷相关基因的发现,为酸性土壤上植物分子遗传改良提供了宝贵的基因资源<sup>[19]</sup>。然而,目前研究大都停留在实验室层面,在田间条件下应用实例很少,缺乏落地效应。目前在适应酸化土壤作物品种培育方面进展有限,大面积推广的品种更少。在酸化土壤逆境条件下作物适生机理和品种创制方面,前期的基础性研究主要集中于模式植物拟南芥和水稻,且多集中于单一胁迫因素,对于作物在酸化土壤复合胁迫条件下的调控机理还不清楚。亟须系统开展耐逆种质资源挖掘、育种体系建立、重大品种培育等研究,为合理利用我国酸化土壤资源提供科技支撑。中国科学院前期对酸性红壤利用研究做了系列的相关前瞻性部署,包括2018—2019年实施的“边际土地产能扩增机理与藏粮于地技术模式”重点部署项目。通过项目的实施,筛选和培育了一批耐逆植物新种质,其中耐酸铝水稻、大豆、荞麦等种质10多份。亟须充分利用已发现的酸性土壤耐逆基因,进行分子辅助设计育种,培育耐酸性土壤多重胁迫的作物新品种,发挥提高酸化土壤生产力的实际功效。

土壤微生物群落对土壤酸化极其敏感,对生态系统服务功能的维持至关重要<sup>[43-44]</sup>。作为植物的第二基因组,根际微生物组在促进植物生长、适应逆境、维持植物健康等方面已成为农业科学的研究热点<sup>[45]</sup>。酸化土壤上不同作物品种耐逆能力与根际微生物群落结构(特别是关键物种)有密切联系<sup>[46]</sup>。目前,从酸性土壤分离到一些耐酸促生微生物,并揭示了微生物耐酸促生机制。但仍缺乏针对性的基于作物根际微生物组调控的高效复合微生物菌剂,以提高植物抗逆能力、缓解土壤酸化的菌剂<sup>[47-48]</sup>。根际生物及其互作网络在农田土壤-植物系统的养分循环和植物生长等过程中发挥重要的功能,近年来中国科学院在植物-微生物协同耐酸铝机制方面取得一系列进展,开发了包括细菌等一系列具有耐酸铝促生功能的菌剂<sup>[46]</sup>,为靶向调控根区微生物组功能,促进耐酸作物适生能力提供了理论基础和菌种资源,亟须开发土-肥-根际微

生物综合调控途径。

**3.2.4 酸化土壤-作物系统养分管理技术** 研发了适地养分管理技术,优化土壤-作物养分管理以及作物种植制度和耕作制度,有效缓解土壤酸化,亟须大力开发全国区域性、流域性酸化耕地种植制度优化配置与管理技术。

加强土壤-作物系统养分管理、合理减施氮肥、优化肥料投入形态是源头控制土壤酸化的重要手段。近年来,我国研发了适地养分管理技术、优化氮肥管理措施等,通过优化土壤-作物养分管理,缓解酸化,提高养分利用效率,保障作物增产、稳产。其中,优化氮肥管理措施通过平衡施肥和有机肥投入,以及施用硝酸钙和石灰等减少硝化产酸作用,增加碱性物质投入,可以在集约种植制度下缓解土壤酸化。土壤酸化也受作物种植制度、残茬管理、轮作休耕等耕作措施影响。豆科作物通过生物固氮增加了土壤的有机氮水平,有机氮的矿化、硝化及随后的淋溶可能导致土壤酸化。研究表明,不同轮作体系下土壤的酸缓冲性能大小不同,休耕轮作措施能够增强土壤的酸碱缓冲性能<sup>[49-50]</sup>。维持高产仍是当前农业发展首要目标,亟须在保障作物稳产、增产前提下,结合区域或流域气候特征、土壤类型等特点,因地制宜制定合理的化肥管理措施,调整作物种植制度和耕作制度,确保土壤酸化治理、养分高效与产能提升协同发展。

**3.2.5 土壤酸化治理集成技术模式** 构建了酸化耕地土壤分类治理与农业高效利用配套技术模式,研发了土壤退化阻控和定向修复关键技术,亟待发展酸化土壤障碍消减-产能提升-生态保护协同绿色可持续发展模式。

近年来,我国集成了典型酸性耕地土壤精准降酸、阻控矿物铝活化的靶向控铝、有机无机配施的长效抑酸、质子源头消减的长效抑酸、“团聚体-有机质-生物功能”互作耦合的土壤生物培肥增效等技术体系,形成了酸性耕地土壤复合退化的分区分类治理与评价技术规范,提出了精准、长效和系统化的技术方案。根据南方酸性红壤区域的气候、地形地貌及土壤特点,构建了一批特色明显的酸化耕地土壤消障治理与农业高效利用配套技术模式,研发了顶林-腰果-谷农-塘鱼、油茶林-茶园-果园规模化特色种植和产业化经营模式、林-菜/烟/药立体种植、猪-沼-脐橙种养结合循环农业等各种高效农业生产模式,同时构建了红壤质量演变的定位监测-试验攻关-集成示范-辐射推广的协作体系,在我国南方17省建立了30多个千亩示范区,实现了技术研究、技术应用、技术示范

与推广的有机结合。当前亟须开发适应“耕地产能提升和生态环境保护并举”的综合技术体系,构建区域耕地土壤酸化分区分类治理集成技术模式,实现全国酸化耕地土壤产能提升和可持续利用。

## 4 重点研究方向

为彻底扭转我国耕地土壤酸化趋势,提升酸化耕地土壤产能与健康水平,未来亟须解决的关键科学和技术问题:①阐明耕地土壤酸化过程与驱动机制,明确酸化耕地土壤内稳性地力提升与培育机制、耐酸作物适生高产协同机制、生物多样性和环境功能恢复与土壤健康协同原理;②创新高强度利用下耕地土壤酸化控制理论体系,包括高强度施肥条件下耕地土壤酸化控制和生产生态功能协同提升的调控理论体系;③建立不同尺度耕地土壤酸化有效治理与阻控技术、产品与装备体系,创建区域酸化耕地土壤分区分类治理与生态农业开发利用技术模式,以及区域智慧监测网络与大数据服务平台。基于以上亟须解决的关键科学和技术问题,建议今后重点在以下几个方向开展研究。

### 4.1 耕地土壤酸化监测与评价

基于全国土壤普查、区域土壤调查等海量土壤数据和多源环境大数据,构建酸化土壤空间分布预测制图大模型,明确酸化耕地土壤资源清单,揭示我国耕地土壤酸化的时空演变特征、驱动因子及其影响过程、途径和强度;研究不同区域典型作物种植模式下加速土壤酸化的关键驱动过程,量化不同过程质子产生通量,解析致酸途径及其关键的控制因子;研究典型区域土壤酸化诱导铝活化的微观机制和表观效应,建立土壤酸化过程中质子转运与氢铝转化预测模型,评估主要农业生产区土壤酸铝毒害的潜在风险;解析耕地土壤酸化对粮食产能的影响强度,明晰管理措施和气候变化叠加影响下土壤酸化对作物产量影响强度的变化态势;构建区域酸化耕地土壤智慧监测网络与大数据服务平台。

### 4.2 酸化耕地土壤酸化阻控与预防

针对强酸性土壤整个剖面酸度强、铝毒害严重、复酸化频发等问题,研究石灰类等材料对不同土壤降酸固铝的效果,创制新型无机类高效降酸固铝均养、速效与长效、兼具表下层改良等功能的土壤调理剂,构建强酸性土壤的精准降酸技术;针对目前不同典型种植模式下耕地土壤酸化过程阻控困难的问题,研发适宜的中碱性、缓释的肥料产品,研制以氮肥高效利用和秸秆碱性物质高效归还为核心的源头控酸技术,研发适应于根区土壤质子实时消纳的抑酸产品及配

套施用技术,开发富碱提质增效有机肥和生物质炭制备技术,以及快速酸化土壤的靶向控酸技术。针对酸化耕地土壤酸化速率快、酸化阻控与作物生产协同难等关键问题,研究土壤-作物系统养分综合运筹酸化阻控机制,研发有机无机养分优化酸化阻控关键技术与新产品,创新集成典型作物体系土壤-作物综合管理控酸技术体系,构建土壤潜在酸化的养分综合运筹预防技术。

### 4.3 酸化耕地土壤内稳性地力提升

针对酸化耕地土壤有机质数量少、质量低、不稳定、难以快速提升且长效保持效果差等问题,研究不同类型酸化耕地土壤有机质累积受限的机理,研发土壤有机质量质协同快速提升与长效保持技术。针对酸化耕地土壤团聚体难以形成且稳定性差等问题,研究酸化耕地土壤团聚体结构特征与形成过程及其稳定机制,研发有机无机复合体培育、大团聚体快速培育和稳定关键技术;针对酸化耕地土壤生物多样性下降、土壤生物网络复合功能退化等问题,研究酸化耕地土壤生物多样性形成与演替规律及其对酸化和铝毒的响应和反馈机制,研发靶向促进大团聚体养分保蓄增效和作物根际养分均衡供给的沃土生物网络构建技术与配套产品,构建酸化耕地土壤生物培育技术体系;针对新整治耕地土体结构不良、优质耕作层缺乏、地力产能水平双低下、常规培育时间冗长的问题,研发新整治耕地降酸抗蚀增效、土壤结构障碍消减与土体构建、瘠薄耕层快速熟化技术,制定相应的工程技术规范以及产品标准。

### 4.4 耐酸适生高产优质作物新品种创制

针对南方红壤中酸性、铝毒、养分缺乏等逆境限制作物生长的问题,筛选出耐酸性强的品种,并分析对酸度和铝毒的耐受性,研究不同酸性土壤条件下作物的适应机制;针对酸性土壤障碍因子限制作物生长等问题,研究耐酸基因的分子机制,分析不同土壤条件下基因的表达模式,揭示基因-环境的复杂关系,构建系统性的耐酸分子机制模型;针对酸化耕地土壤酸铝毒害严重、可推广且遗传稳定的耐酸铝作物新品种缺乏等问题,系统性设计作物耐酸铝分子模块,构建耐酸铝主粮作物分子育种体系,创制适合当地气候条件的耐酸铝高产且能稳定遗传的主粮作物新品种。针对常规栽培种植制度不完全适合耐酸铝高产作物品种,研发耐酸高产作物种植制度优化配置与栽培种植技术,创新酸性土壤适生种植模式。

### 4.5 酸化耕地土壤生物多样性及其生态功能提升

结合第三次全国土壤普查的土壤生物数据集分



析,揭示全国尺度酸化耕地土壤生物多样性及其空间格局,明确酸化耕地土壤生物多样性的形成和维持机理,阐明生物多样性的分布格局与驱动因素;研究酸化耕地土壤中的微食物网结构,揭示跨营养级传递过程与规律,建立酸化耕地土壤生态系统多功能性评价体系,评估酸化对土壤生态功能的影响;阐明影响酸化耕地土壤生态系统多功能性的关键因素和贡献大小,明确耕地土壤酸化对生物多样性及其生态功能的影响与作用机制;构建适用于酸化耕地耐酸促生合成微生物组调控技术体系,高效提升酸化耕地的生态功能和生物生产力;明确限制酸化耕地土壤生物多样性及生产力的生物和非生物因素,探索酸化耕地土壤生物多样性及生产力恢复的核心机制与实施路径,实现酸化土壤微生物组的生态功能提升。

#### 4.6 酸化耕地土壤环境质量提升与可持续利用

针对酸化耕地土壤-作物重金属超标、新污染物凸现等问题,厘清酸化土壤区重金属/新污染物累积的源汇动态平衡机制和形成机制;针对酸化土壤区重金属总量高且有效性强、农作物安全生产难的问题,研制酸化土壤重金属超稳矿化固定材料和装备,建立酸化土壤超稳矿化稳定化技术体系;研发基于合成微生物组功能设计的酸化耕地重金属污染土壤修复技术,发展基于基因编辑的超/高积累植物吸收累积重金属的强化技术;针对酸化土壤有机污染消减能力弱问题,构建典型新污染物高效降解合成菌群,研发酸化土壤新污染物合成微生物组靶向消减技术,建立基于根际微生物组调控的物理-化学-生物强化消减技术;针对酸化土壤固碳减排与丰产难协同等问题,研发固碳减排协同的功能菌群构建和靶向调控技术,集成区域土壤固碳减排与产能协同提升技术体系。

#### 4.7 区域耕地土壤酸化防治与产能提升模式

针对华南地区赤红壤、砖红壤酸化严重和复合障碍等问题,研发增碳扩容、控铝阻酸、培肥抑酸精准长效控酸技术,以及农作物病虫害绿色防控、农田杂草绿色消除、农田降污净土等酸、瘦、毒、病一体化治理技术,构建华南酸化土壤防治与可持续安全利用技术模式;针对东南红黄壤地区土壤酸化、板结、肥力低下等障碍因子,集成化学生物降酸固土培肥、稻田秸秆还田、深耕培肥技术,茶果园有机替代、绿肥套种的绿色低碳技术,以及种-管-收配套机械装备,构建东南红黄壤作物配置控酸培肥与产能提升协同的综合技术模式;针对江南丘陵红壤区土壤酸化、贫瘠、耕层浅薄、季节性干旱等问题,以“丘谷种粮、丘上经作、山腰挂果、山顶护林”为核心,集成有机

肥与改良剂施用轻简、精准、智能农机装备,创建绿色高效与生态保护协同的江南丘陵红壤开发模式;针对中南区红黄壤酸化趋势加剧且酸度空间变异大、养分贫瘠、重金属毒害、生物多样性下降等问题,集成低山丘陵区降酸控蚀、平原湖区控酸培肥降渍耦合与生物多样性提升的酸化耕地治理技术与装备,构建中南地区土壤降酸减污降渍与产能提升的种养加绿色循环综合模式;针对西南丘陵紫色土和高原红黄壤坡耕地酸化速率快、酸瘦并存、结构差、水土肥流失、石漠化、生态退化严重等问题,集成西南丘陵紫色土和高原红黄壤坡耕地降酸-培肥-控蚀一体化的耕地质量-农田产能-流域生态协同提升综合技术模式;针对华北地区土壤酸化产生机制不清、酸化对作物产量影响量化不足、酸化防治综合技术较少等问题,集成秸秆直接粉碎还田、过腹还田及炭化还田等有机资源高效利用技术体系,构建华北地区土壤酸化与作物产能提升,肥水、有机资源及养分资源高效利用综合技术模式;针对东北黑土地地区土壤酸化加速加剧、土壤生物功能下降等问题,集成种植制度优化、酸度和养分精准调控、有机肥提质增效、秸秆还田方式优化、酸化黑土生物多样性保护等酸瘦防控关键技术,构建黑土降酸增碳与产能协同提升的技术模式;基于多模型和多情景量化分析,建立全国分区分类耕地土壤酸化评价技术体系,提出高、中、低风险区耕地土壤酸化阻控对策和系统解决方案。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Shen R F, Teng Y. The frontier of soil science: Soil health[J]. *Pedosphere*, 2023, 33(1): 6-7.
- [3] 张佳宝,孙波,骆永明,等.开展健康耕地建设行动 夯实粮食安全基础[J].中国农村科技,2023(1):21-22.
- [4] 徐仁扣.土壤酸化及其调控研究进展[J].土壤,2015,47(2):238-244.
- [5] 徐仁扣.酸化红壤的修复原理与技术[M].北京:科学出版社,2013.
- [6] 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.
- [7] 凌大炯,章家恩,欧阳颖.酸雨对土壤生态系统影响的研究进展[J].土壤,2007,39(4):514-521.
- [8] Ritchie J D, Perdue E M. Proton-binding study of standard and reference fulvic acids, humic acids, and natural organic matter[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(1): 85-96.
- [9] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.

- [10] Driscoll C T, Lawrence G B, Bulger A J, et al. Acidic Deposition in the Northeastern United States: Sources and Inputs, Ecosystem Effects, and Management Strategies: The effects of acidic deposition in the northeastern United States include the acidification of soil and water, which stresses terrestrial and aquatic biota[J]. *BioScience*, 2001, 51(3): 180–198.
- [11] Zhao Y, Duan L, Xing J, et al. Soil acidification in China: Is controlling SO<sub>2</sub> emissions enough?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(21): 8021–8026.
- [12] Xu R K, Coventry D R, Farhoodi A, et al. Soil acidification as influenced by crop rotations, stubble management, and application of nitrogenous fertiliser, Tarlee, South Australia[J]. *Soil Research*, 2002, 40(3): 483.
- [13] Yan P, Shen C, Fan L C, et al. Tea planting affects soil acidification and nitrogen and phosphorus distribution in soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 254: 20–25.
- [14] Müller K, Magesan G N, Bolan N S. A critical review of the influence of effluent irrigation on the fate of pesticides in soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 120(2/3/4): 93–116.
- [15] 姜雯琪, 徐从斌, 孙天然. 硅酸盐矿物对酸化土壤的调理及无机碳固定性能的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2025, 44(2): 461–470.
- [16] 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.
- [17] Zhao X Q, Shen R F. Aluminum-nitrogen interactions in the soil-plant system[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 807.
- [18] 程鹏飞, 王莹, 程宽, 等. 红壤可变电荷矿物的酸碱缓冲能力及表面络合模型[J]. *化学学报*, 2017, 75(6): 637–644.
- [19] 沈仁芳. 铝在土壤—植物中的行为及植物的适应机制[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [20] Du L X, Zhang Z Y, Chen Y Q, et al. Heterogeneous impact of soil acidification on crop yield reduction and its regulatory variables: A global meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2024, 319: 109643.
- [21] 骆永明, 滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1137–1142.
- [22] 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.hjxk.202503077>.
- [23] Qiu S H, Xia S T, Liu F C, et al. Acid deposition promotes soil carbon sequestration in terrestrial ecosystems of China[J]. *Plant and Soil*, 2025, 510(1): 871–886.
- [24] Shen W S, Ni Y Y, Gao N, et al. Bacterial community composition is shaped by soil secondary salinization and acidification brought on by high nitrogen fertilization rates[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 108: 76–83.
- [25] Meng C, Tian D S, Zeng H, et al. Global soil acidification impacts on belowground processes[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(7): 074003.
- [26] Li X G, Chen D L, Carrión V J, et al. Acidification suppresses the natural capacity of soil microbiome to fight pathogenic *Fusarium* infections[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5090.
- [27] 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.
- [28] Hu Z K, Delgado-Baquerizo M, Fanin N, et al. Nutrient-induced acidification modulates soil biodiversity-function relationships[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 2858.
- [29] Kong W B, Eisenhauer N, Peñuelas J, et al. Climate and soil pH modulate global negative effects of nitrogen enrichment on soil nematodes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2025, 208: 109860.
- [30] Caputo J, Beier C M, Sullivan T J, et al. Modeled effects of soil acidification on long-term ecological and economic outcomes for managed forests in the Adirondack region (USA)[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 565: 401–411.
- [31] Goulding K W T. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom[J]. *Soil Use and Management*, 2016, 32(3): 390–399.
- [32] De Vries W, Breeuwsma A. The relation between soil acidification and element cycling[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1987, 35(3): 293–310.
- [33] Dai Z M, Zhang X J, Tang C, et al. Potential role of biochars in decreasing soil acidification - A critical review[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 581/582: 601–611.
- [34] Zhu Q C, Liu X J, Hao T X, et al. Modeling soil acidification in typical Chinese cropping systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 613/614: 1339–1348.
- [35] Liao B H, Guo Z H, Probst A, et al. Soil heavy metal contamination and acid deposition: Experimental approach on two forest soils in Hunan, Southern China[J]. *Geoderma*, 2005, 127(1/2): 91–103.
- [36] Abdu N, Abdullahi A A, Abdulkadir A. Heavy metals and soil microbes[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2017, 15(1): 65–84.
- [37] 孙波, 朱安宁, 姚荣江, 等. 潮土、红壤和盐碱地障碍消减技术与产能提升模式研究进展[J]. *土壤学报*, 2023, 60(5): 1231–1247.
- [38] Zhang W B, Wei C L, Li J Y, et al. Stabilization of acidification in China's cropland soils[J]. *Nature Geoscience*, 2025: 1–8.
- [39] 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.
- [40] 索琳娜, 马杰, 刘宝存, 等. 土壤调理剂应用现状及施用风险研究[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(6): 1141–1149.
- [41] 申梦雪, 郝芮, 刘新伟, 等. 化肥减量配施秸秆和有机肥对酸化土壤改良及侵蚀阻控的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(6): 333–342.



- [42] 周可欣, 王小瑞, 米世灿, 等. 土壤污染根际修复研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(4): 769–782.
- [43] 徐明岗, 段英华, 白珊珊, 等. 基于长期定位试验的土壤健康研究与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1253–1261.
- [44] 刘自强, 张艺锐, 邹佳雨, 等. 酸雨对土壤微生物网络复杂性、群落组装和生态系统多功能性的影响[J]. 科学通报, 2025, 70(S2): 4914–4928.
- [45] Dwivedi S L, Vetukuri R R, Kelbessa B G, et al. Exploitation of rhizosphere microbiome biodiversity in plant breeding[J]. Trends in Plant Science, 2025, 30(9): 1033–1045.
- [46] Liu C Y, Jiang M T, Yuan M M T, et al. Root microbiota confers rice resistance to aluminium toxicity and phosphorus deficiency in acidic soils[J]. Nature Food, 2023, 4(10): 912–924.
- [47] 张瑞福, 陈玉, 孙新丽, 等. 中国生物肥料与有机肥料研究三十年：回顾与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1262–1273.
- [48] 朱永官, 沈仁芳, 贺纪正, 等. 中国土壤微生物组：进展与展望[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(6): 554–565.
- [49] 徐影, 李彦生, 刘晓冰, 等. 长期施肥改变玉米大豆轮作/连作黑土农田酸化速率和酸中和容量[J]. 土壤, 2024, 56(4): 750–759.
- [50] 赵敏, 黄明镜, 赵聪, 等. 浅谈耕地休耕模式及实现路径[J]. 农学学报, 2020, 10(10): 46–49.