

酸性土壤改良: 基于靶向控铝的精准调控思考^①

周腾云¹, 胡敏骏², 徐君², 孟俊³, 施加春¹, 徐建明¹, 何艳^{1*}

(1 浙江大学环境与资源学院, 农业资源与环境全省重点实验室, 杭州 310058; 2 浙江省富阳区农业农村局农业技术推广中心植保土肥站, 浙江富阳 311400; 3 浙江科技大学环境与资源学院浙江省废弃生物质循环利用与生态处理技术重点实验室, 杭州 310023)

摘要: 土壤酸化的本质是酸碱平衡失调。当 pH 低于 5.5 时, 以 Al^{3+} 形式存在的活性铝含量随土壤 pH 降低迅速增加, 成为限制作物生长发育和产量的关键因子。本文系统剖析了土壤酸化与铝毒成因, 阐述了植物抗铝毒策略及其分子调控网络, 并重点论述了靶向控铝技术从单一效应向综合调控、从经验应用到精准实施的研究进展, 包括传统无机改良剂、新型有机-无机复合或纳米缓释材料应用、生物调控及精准实施技术, 深入探讨了控铝技术持久性、区域适应性以及多重胁迫协同调控等关键科学问题。综合分析表明, 植物-微生物-土壤互作改良体系构建、基于酸碱平衡的铝转化模型开发以及纳米-缓释-复合等新型材料研发是酸化土壤靶向控铝的重要发展方向, 对推动酸性土壤可持续利用具有重要理论和实践意义。

关键词: 土壤酸化; 铝毒害; 靶向控铝; 模型构建; 多维协同

中图分类号: S156 **文献标志码:** A

Amelioration of Acidic Soils: Precision Regulation Based on Targeted Aluminum Control

ZHOU Tengyun¹, HU Minjun², XU Jun², MENG Jun³, SHI Jiachun¹, XU Jianming¹, HE Yan^{1*}

(1 Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2 Agricultural Technology Extension Center, Agriculture and Rural Affairs Bureau of Fuyang District, Fuyang, Zhejiang 311400, China; 3 Key Laboratory of Recycling and Eco-Treatment of Waste Biomass of Zhejiang Province, School of Environment and Natural Resources, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The essence of soil acidification lies in the imbalance of acid-base equilibrium. When pH drops below 5.5, active aluminum in the form of Al^{3+} rapidly increases with decreasing soil pH, becoming a critical factor limiting crop growth, development, and yield. This review systematically analyzed the causes of soil acidification and aluminum toxicity, elucidated plant aluminum-tolerance strategies and their molecular regulatory networks. It emphasized research progress in targeted aluminum control technologies, transitioning from single-effect approaches to integrated regulation and from empirical application to precision implementation, including traditional inorganic amendments, novel organic-inorganic composites or nano-controlled-release materials, biological regulation, and precision implementation technologies. Key scientific issues such as the durability of aluminum control technologies, regional adaptability, and synergistic regulation under multiple stresses were thoroughly discussed. Comprehensive analysis indicates that construction of plant-microbe-soil interaction amelioration systems, development of aluminum transformation models based on acid-base ion balance, and research and development of novel materials such as nano-, controlled-release, and composite formulations represent important developmental directions for targeted aluminum control in acidified soils, holding significant theoretical and practical implications for promoting sustainable utilization of acidic soils.

Key words: Soil acidification; Al toxicity; Targeted Al control; Model construction; Multidimensional synergy

土壤酸化是全球农业面临的重大挑战,是仅次于干旱的第二大非生物胁迫因素,严重影响粮食生产和农业可持续发展^[1-2]。全球约 40%~50% 的可耕地为酸性土壤,面积达 39.5 亿 hm^2 ,主要分布在热带、亚

①基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(226-2025-00064)资助。

* 通信作者(yhe2006@zju.edu.cn)

作者简介: 周腾云(2001—),男,山东济南人,硕士研究生,主要从事酸化土壤修复等研究。E-mail: TyZhou1024@163.com

热带地区^[3]。中国酸性土壤约占国土面积的 22.7%，主要集中在长江以南及西南地区，且呈持续扩大趋势^[4-5]。近几十年来，大气酸沉降、氮肥过量施用及集约化农业生产等加剧了土壤酸化，使我国主要农田土壤 pH 在 20 年间平均下降了 0.5 个单位^[6]。土壤酸化本质是土壤胶体吸附的 H^+ 增加而盐基阳离子减少的过程，其导致养分有效性降低的同时，铝等元素活性增强，产生毒害作用^[7]。

在酸性条件下($pH < 5.5$)，土壤中以 Al^{3+} 形式存在的活性铝含量随土壤 pH 降低迅速增加，对植物根系产生显著的毒害作用：抑制根系伸长、破坏细胞结构、阻碍养分吸收，最终导致作物减产^[8]。土壤酸化防治的核心是从源头有效控制铝活化，其中，控铝是精准防治的关键。相关控铝技术研究已从传统无机改良剂发展到有机-无机复合材料及纳米缓控释技术的应用，从植物耐铝机制解析到分子水平精准调控，经历了从单一效果向综合调控、从经验施用向精准施策的转变。然而，现有技术仍面临靶向性不足的挑战，由此影响效果稳定性、区域适应性和多目标协同^[9]。本文系统梳理了土壤酸化与铝毒成因，分析了植物应对铝毒害的响应策略，综述了酸性土壤控铝技术的研究进展，提出了基于植物-微生物-土壤界面互作综合

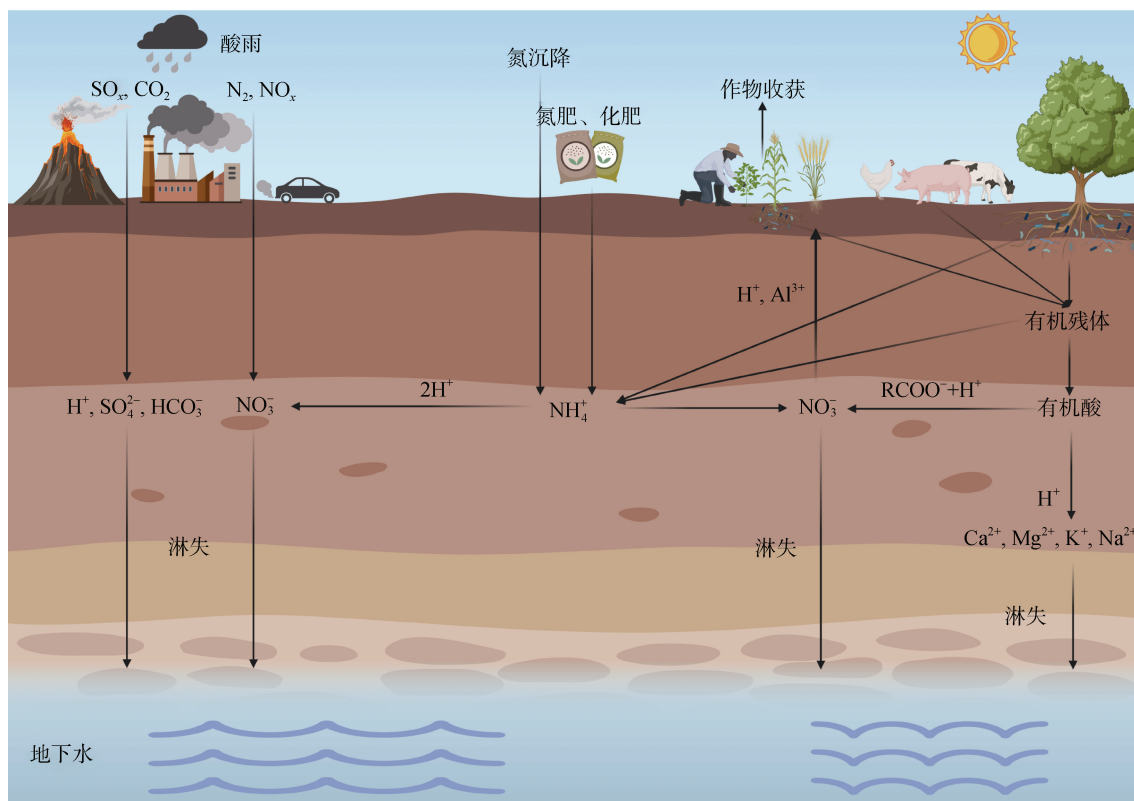
视角，构建酸碱平衡的铝转化模型指导新型靶向材料研发的理论框架，以为基于靶向控铝的酸性土壤精准调控与酸化预防提供科学依据。

1 土壤酸化与铝毒害的理论基础

1.1 土壤酸化过程及机理

土壤酸化是土壤 pH 下降和酸度增加的过程，实质是土壤中酸碱平衡被打破，主要表现为土壤溶液及交换性位点中 H^+ 浓度升高，盐基阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 等)含量相对降低^[10]。从物理化学角度分析，土壤酸化主要来源于有机酸分解和硝化作用释放 H^+ 、盐基阳离子淋溶流失，以及 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 等水解过程^[11]。

土壤酸化受自然和人为因素共同驱动^[12](图 1)。成土母质决定初始酸碱特性，而气候条件中的降水和温度通过影响养分淋溶和有机质分解影响酸化进程^[13-14]。人为因素方面，农业活动已成为加速土壤酸化的首要驱动力。氮肥(特别是铵态氮肥)在土壤中经硝化作用转化为硝态氮的过程中释放 H^+ ，显著降低土壤 pH，研究表明每施用 1 kg 氮素可产生约 2~4 mol 的 H^+ ，其酸化效应比酸沉降高 10 倍~100 倍；作物收获带走盐基阳离子和工业排放引起的酸雨也是土壤酸化的重要影响因素^[15-16]。土壤中的碳酸钙、黏土矿物和有



(图中箭头表示物质迁移和化学转化方向，土壤颜色深浅反映酸化程度)

图 1 土壤酸化过程及机理^[12]

Fig. 1 Process and mechanism of soil acidification

机质共同构成天然酸碱缓冲系统,能在一定程度上抵抗 pH 的变化。然而,当外源酸输入超过土壤缓冲阈值时,土壤 pH 将迅速下降,引发一系列土壤理化性质的连锁变化,其中铝毒害成为酸性土壤中最主要的胁迫因素^[17]。

1.2 酸性土壤中铝的形态与转化

铝作为地壳中最丰富的金属元素之一,其活性受土壤 pH 强烈调控^[8]。中性至碱性条件下,铝主要以 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 等难溶形式存在,生物有效性极低^[17];而当 $\text{pH}<5.5$ 时,铝氢氧化物解离平衡被打破,释放高配位活性的 Al^{3+} ,对植物根系产生显著毒害^[18]。

酸性土壤体系中铝元素呈现多级分配特征,主要存在形态包括可溶性铝、交换性铝、有机络合态铝、羟基结合态铝及晶格结构铝等^[19]。其中,可溶性铝与交换性铝因高迁移性和生物可给性,成为诱导植物生理障碍的主要活性组分,是酸性土壤修复的核心调控目标^[20]。铝形态分配与转化过程受多重环境因子综合调控,其中酸碱度是主导铝溶解-沉淀平衡的关键参数。随着土壤 pH 降低,铝的溶解度呈非线性增长,特别是当 $\text{pH}<4.5$ 时,游离态 Al^{3+} 在土壤溶液中占优势,加剧根际毒性风险^[21]。土壤有机质通过羧基、酚羟基等官能团与铝形成稳定的金属-有机络合物,促进交换性铝向低活性有机结合态铝转化,是重要的自然解毒机制^[4]。此外,离子强度、共存离子种类及浓度通过影响土壤胶体表面电荷特性和竞争性吸附作用,显著调节铝的环境行为及其生物地球化学循环^[22]。

1.3 铝毒害与植物耐铝策略

铝毒害是酸性土壤的关键限制因子,对植物的影响涵盖形态、生理和分子多个层次^[23]。在形态层面, Al^{3+} 优先靶向根尖分生组织,干扰细胞分裂素与生长素信号,抑制根系细胞分裂与伸长,导致根系短粗化、变褐和侧根发育受抑^[24]。长期铝胁迫通过根-冠信号传导影响地上部,诱发叶绿素合成障碍、叶缘坏死及生物量降低^[25]。在生理代谢层面,铝抑制光系统 II 电子传递,使敏感型植物光合速率降低 30%~50%;与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 竞争吸收位点引发营养紊乱^[26];诱导活性氧积累,导致脂质过氧化^[27]。在分子水平上, Al^{3+} 改变 DNA 构象,抑制复制转录,靶向膜蛋白,降低 H^{+} -ATPase 活性,干扰钙信号传导和胁迫应答^[28]。

植物在长期自然选择压力下演化形成了系统性铝毒抗性网络,包括根际屏障、细胞解毒和分子调控^[29]。根际屏障作为首道防线,主要通过分泌柠檬酸等有机酸与活性铝形成稳定络合物,降低其生物有效性^[30];

部分耐铝植物还能调控根际 pH 微环境,创造不利于铝活化的条件^[31]。当铝突破根际屏障后,植物依靠细胞内解毒系统进行防御,包括形成低活性配合物、液泡区室化隔离和抗氧化酶系统清除活性氧^[32]。分子水平上,MATE 家族负责柠檬酸转运,ALMT 家族介导苹果酸外排,STOP1/ART1 等转录因子感知铝胁迫并激活下游耐铝基因^[28];此外,参与细胞壁结构修饰的基因(如果胶甲基转移酶)和抗氧化系统基因(如谷胱甘肽转移酶)也在铝毒抗性中发挥重要作用^[33]。

2 酸化土壤控铝技术研究进展

2.1 土壤控铝产品

2.1.1 传统无机改良剂 施用无机改良剂是控制酸性土壤铝毒害的基础措施,主要包括施用石灰类、硅酸盐类和磷酸盐类改良剂,其通过不同机制缓解铝毒害^[34]。石灰类材料(CaCO_3 、 CaO 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$)主要通过中和土壤酸度提高 pH,降低铝活性,同时还能增加土壤 Ca^{2+} 含量,改善土壤结构,但存在深层土壤改良困难和长期施用易导致土壤板结等问题^[35]。硅酸盐类改良剂不仅能中和土壤酸度,还能提供硅元素,增强植物抗逆性,同时释放 OH^{-} 及 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等,对铝毒害具有 2~3 年长效改良作用,且不易导致土壤板结。近年来,利用钢渣、矿渣等工业副产品制备的硅酸盐改良剂有效降低了改良成本^[33]。磷酸盐类改良剂通过形成难溶磷酸铝达到特异性控铝效果,不依赖 pH 变化,适用于酸性底层土壤改良,能使交换性铝降低 30%~50%,但须控制用量,防止磷营养富集,且宜采取深施和局部施用提高其利用效率^[36]。

2.1.2 有机-无机协同的控铝体系 有机物料不仅能通过有机酸配位作用促进交换性铝转化为有机结合态铝,还能通过增加土壤有机碳、提升阳离子交换容量和优化团聚体稳定性改善土壤胶体特性;同时,其还能调节微生物介导的铝生物地球化学转化过程^[33]。田间试验表明,秸秆还田可使交换性铝降低 20%~40%,富含腐殖酸和富里酸的农家肥可使交换性铝降低 30%~50%^[37]。

有机-无机联合改良体系通过材料协同增效,显著提升控铝效能^[4]。新型功能材料为酸性土壤铝毒害治理提供了精准高效的解决方案。改性生物质炭材料通过引入壳聚糖、海藻酸钠等功能性组分,增强了表面含氧官能团密度和酸缓冲容量,显著提高了 Al^{3+} 吸附能力^[38];生物质炭基功能性肥料整合铝毒抑制功能与养分缓释功能,提高了生物质炭利用效率,仅需 0.9 t/hm² 即可实现等同于 15~30 t/hm² 常规生物

质炭的增产效果^[4];腐殖酸复合肥等功能性肥料依托其丰富的羧基、酚羟基等官能团,与铝形成结构稳定的铝-有机复合物,同时通过“桥联”作用促进土壤颗粒胶结,增强团聚体稳定性^[39];聚丙烯酰胺等高分子改良剂通过其特殊的分子构型和活性基团,在中和土壤酸度的同时,显著改善土壤孔隙结构和水分特性,增强土壤保水保肥能力^[40]。

2.1.3 中微量元素促进控铝 基于中微量元素的营养调控也是控铝研究的重要内容,其中镁、硅等元素在缓解铝毒害中表现出显著效能^[12]。镁通过多途径缓解铝毒:与 Al^{3+} 竞争细胞质膜结合位点,提高 $\text{Mg}^{2+}/\text{Al}^{3+}$ 比值可减轻膜结构损伤^[20];参与活化根系有机酸合成与分泌系统,上调 *MATE* 转运体表达,促进有机酸外排形成根际解毒屏障^[23];通过上调 *OsMGT1* 等铝-镁转运蛋白基因表达,形成正反馈调节环路,增强植物镁吸收与内稳态维持能力^[27];作为叶绿素中心元素和酶辅因子,优化光合系统和代谢网络^[41]。田间试验表明,镁营养调控可使中度铝胁迫下作物产量损失降低 50%~70%^[42]。硅元素缓解铝毒途径:通过在根系表皮和内皮层细胞壁沉积形成硅质物理屏障,限制铝向中柱鞘和木质部转运,降低植物体内铝累积^[43];通过激活植物抗氧化防御系统关键组分,显著增强铝胁迫条件下植物清除过氧化氢、超氧阴离子等活性氧能力,维护细胞氧化还原平衡^[44];参与铝响应信号传导网络,调控 *ALMT1*、*MATE* 等关键基因表达,增强植物内源耐铝机制^[43]。此外,其他微量元素如锌(通过调节抗氧化系统和基因表达,可使小麦耐铝性提高 10%~15%)和硼(与铝在根尖吸收位点拮抗)也对缓解铝毒有显著效果^[45]。

2.2 生物调控技术

2.2.1 植物生物学调控 植物自身耐铝功能主要与 3 类关键功能基因有关^[46-47]:一是,参与耐铝的相关蛋白主要包括 *ALMT* 和 *MATE* 家族转运蛋白基因及细胞壁修饰蛋白基因^[48];二是,顶层调控基因如转录因子基因(*STOP1/ART1*)^[49];三是,信号传导通路相关基因,如水稻柠檬酸转运蛋白基因 *OsFRDL4*,其受转录因子 *ART1* 直接调控,与 *ART1* 共同构成完整的铝响应信号传导通路,介导根尖柠檬酸外排以缓解铝毒害^[50]。基于上述耐铝基因资源,提升植物自身耐铝能力主要通过:①转运系统强化,通过异源或同源过表达 *ALMT*、*MATE* 转运蛋白基因(如将强耐铝作物小麦基因 *TaALMT1*、高粱基因 *SbMATE* 导入敏感作物),增强根系有机配体外排能力^[51];②代谢网络调控,通过过表达柠檬酸合成酶(*CS*)、苹果酸酶

(*MDH*)等关键代谢节点酶基因,增强细胞内有机酸的合成和积累;③信号-效应整合,联合过表达上游调控因子和下游效应基因,构建协同增效的分子网络^[48]。

2.2.2 微生物介导的控铝技术 从酸性土壤中分离的植物生长促进菌(PGPR)可通过分泌有机酸螯合铝离子、碱化微环境、促进植物激素合成和增强抗氧化防御等机制缓解铝毒害^[52]。田间试验表明,接种芽孢杆菌属和假单胞菌属等耐铝菌株可使高铝胁迫环境下作物生物量提高 15%~30%,产量增加 10%~25%^[53]。近年来,基于系统设计的合成微生物菌群(*SynCom*)为酸性土壤中铝毒调控开辟了新途径,其主要通过宏基因组学、宏转录组学等微生物组学技术,筛选具有代谢功能互补性和生态位分化差异的多种耐铝菌株,构建结构稳定、功能协同、抗干扰能力强的合成菌群^[54]。例如,在水稻根际微生态研究中,已鉴定出多种高效控铝根际菌株(如鼠李糖杆菌属、假单胞菌属、芽孢杆菌属等),基于其构建的稳定高效 *SynCom* 可提高酸性铝毒土壤水稻产量 26.36%^[55]。

生物-化学联合控铝体系通过整合微生物调控与化学改良技术,构建多尺度协同作用机制。微生物功能菌株接种与化学改良剂协同应用,显著提升土壤铝形态转化效率,延长控铝作用持续期^[47]。研究发现,PGPR 接种结合低剂量石灰施用比单一措施效果更佳,可降低石灰用量 30%~50%,有效减轻土壤板结风险^[56]。这种联合控铝技术呈现多阶段特征:初期化学改良剂快速中和土壤酸度,创造适宜微生物定植的环境;继而接种微生物在根际定殖后,通过多重生物化学途径持续转化活性铝。化学改良与生物调控形成正反馈机制,通过物理-化学-生物过程耦合,构建自维持的土壤健康体系^[57]。

3 酸性土壤靶向控铝关键问题

3.1 铝毒与多重胁迫因子共存

酸性土壤中,植物常同步遭受铝毒与多种环境胁迫^[27]。铝毒害与磷缺乏共存并形成恶性循环:活性铝促使磷素形成难溶性磷酸铝化合物导致有效性降低;磷缺乏则削弱植物铝解毒防御机制^[11]。分子水平上,铝胁迫降低 *PHT1* 家族磷转运蛋白表达,影响磷吸收和转运;磷缺乏通过影响三羧酸循环,限制植物有机酸合成及分泌,进而削弱铝的络合和排除^[58]。为此,主要调控策略包括:采用深施缓释磷肥以避免表层高铝区^[35];施用有机磷源减少磷铝结合^[54];接种兼具解磷和耐铝功能的微生物以提高磷生物有效性^[52]。

此外,工矿区及其周边农田常见铝毒与重金属污

染的复合胁迫。低 pH 增强了 Cd、Pb、Cu 等重金属活性,与铝形成协同毒性^[59]。部分必需微量元素如 Zn、Mn 等还能通过离子通道竞争、转运蛋白调控等机制对抗铝胁迫,形成复杂的互作关系^[46]。多重金属胁迫可导致根系形态畸变,抗氧化系统超负荷,金属转运蛋白表达紊乱,从而导致元素吸收失衡^[60]。常用修复策略包括:高吸附容量有机物料(如生物炭、腐殖酸)施用^[34];多功能螯合剂(如 EDDS、柠檬酸)合理使用^[59];具有多金属耐性和转化功能的微生物菌剂应用^[52]。

3.2 控铝时效性

控铝技术时效性是影响其实际应用效果的关键因素。其科学评价体系需整合短期指标(土壤 pH、铝形态转化、植物初期响应)与长期指标(土壤性质演变、改良效果衰减曲线、作物多季表现)^[21]。土壤酸碱平衡模型结合关键评价参数(pH 持续效应、交换性铝降低率、土壤缓冲能力)可准确预测控铝技术持续性^[61]。各类控铝技术时效性差异显著:石灰改良剂因易淋溶,控铝效果持续 2~3 年;硅酸盐类改良剂溶解缓慢,控铝效果持续 3~5 年;高木质素有机物料改良剂,控铝效果达 5~8 年;微生物技术根据菌株定殖能力不同,控铝效果持续 2~4 年;有机-无机联合改良,控铝效果可达 8~10 年以上^[33]。提高控铝技术持续性的关键策略包括:设计多元复合改良技术实现快速与缓效结合;优化分期分批施用方案将有效期延长 30%~50%;建立土壤酸度和铝活性监测系统及时补充改良剂^[62]。这种系统化的持续控铝管理对大面积酸性土壤改良具有重要的经济和生态意义,也是未来研究的核心方向。

3.3 控铝技术的区域适应性

不同土壤类型对控铝技术响应差异显著。红壤因高岭石为主的黏土矿物组成导致铝活性高,对改良剂需求量通常比黄壤高 30%~50%,而黄壤中 2:1 型黏土矿物含量较高,使改良效果更持久^[63]。黏质土壤对改良剂反应较慢但持久;砂质土壤反应快但持续时间短,易“返酸”,需增加改良频率^[64]。有机质含量高的土壤因其对铝的络合作用强,使同等剂量改良剂效果提高 20%~40%^[65]。气候条件也显著影响控铝效果,高温多雨地区改良剂流失快,宜选用溶解度低的硅酸盐材料或聚合物包裹缓释技术;温带干旱地区则改良剂分解释放缓慢,初期效果不显著但持续时间长^[14]。因此,构建区域适应性控铝技术体系需综合考虑多种因素,南方红壤区宜采用“无机改良+有机物料+耐铝品种”综合策略,北方酸化土壤区以“精准改良+

合理施肥”为主^[6]。同时,应建立区域性铝毒害预警与防控体系,通过土壤酸度和铝活性监测网络,结合气候农业管理数据,构建风险预警模型,以实现精准防控,提高控铝技术的区域适应性^[30]。

4 总结与展望

土壤酸化是全球范围内的重要环境问题。当 pH<5.5 时,以 Al^{3+} 形式存在的活性铝迅速增加,对作物产生严重铝毒害,表现为从根际吸附到细胞内分子水平的多层次系统性伤害。适用于酸性土壤酸化预防的控铝技术正在从单一控铝向综合调控、从经验施用向精准施策转变,其中基于酸碱平衡的精准改良、中微量元素营养调控、合成微生物菌群控铝及有机-无机-生物联合改良是重要发展方向。然而,控铝技术的靶向性、长效性、区域适应性及多重胁迫协同控制仍是亟待突破的关键科学问题。未来研究需重点关注植物-微生物-土壤界面铝行为机制,建立土壤-作物系统酸碱平衡计量方法,明确酸碱调节、养分活化与有机碳稳固的协同路径,构建控铝、降酸、培肥、固碳、减污多目标协同的技术体系。

4.1 加强植物-微生物-土壤界面铝行为研究

根际作为植物与土壤相互作用的核心界面,其微环境特性对铝的化学形态转化和生物有效性具有决定性影响。深入理解这一界面的铝行为是揭示铝毒害机制与开发精准控铝技术的关键基础^[23]。根系分泌物通过调节 pH、改变电荷分布和增强络合能力影响铝的形态平衡,这种过程又受到根际微生物群落代谢活动的修饰^[55]。同步辐射 X 射线吸收光谱(XANES)、环境扫描电镜(ESEM)和纳米级质谱成像等先进技术的应用,突破了传统研究方法在时空分辨率上的局限,能够实时追踪铝元素在根-微生物-土壤界面的迁移转化轨迹,揭示铝与细胞结构的微观相互作用机制^[66]。

多组学技术的整合应用使铝毒害研究进入系统生物学层面^[20]。转录组学已鉴定出多种铝胁迫响应基因,而蛋白质组学和代谢组学分析揭示了铝胁迫下代谢网络的重构过程^[67-68]。整合多组学数据构建的代谢通量模型表明,铝胁迫除激活有机酸合成和分泌等应答途径外,还引发能量代谢重编程、激素信号网络重组和抗氧化系统调控等全局性代谢调整^[69]。根际微生物组作为连接植物与土壤的功能性桥梁,其群落结构和功能对铝循环具有深远影响。宏基因组学和宏转录组学分析揭示,长期铝胁迫导致根际微生物群落多样性降低,而特定耐铝菌株比例增加^[54]。这些微生物通过分泌有机酸等螯合剂转变铝的赋存状态或

直接参与铝的矿化过程,调节铝的生物可利用性^[70]。界面微观过程的量化表征和铝循环的多尺度解析为铝毒机制的认知提供了新视角,也为铝行为预测模型参数优化提供了理论基础^[30],未来研究应着力于植物生理、微生物功能和土壤化学特性的多维视角研究,实现从基因调控到生态系统响应的跨尺度认知。

4.2 铝形态转化动力学模型开发

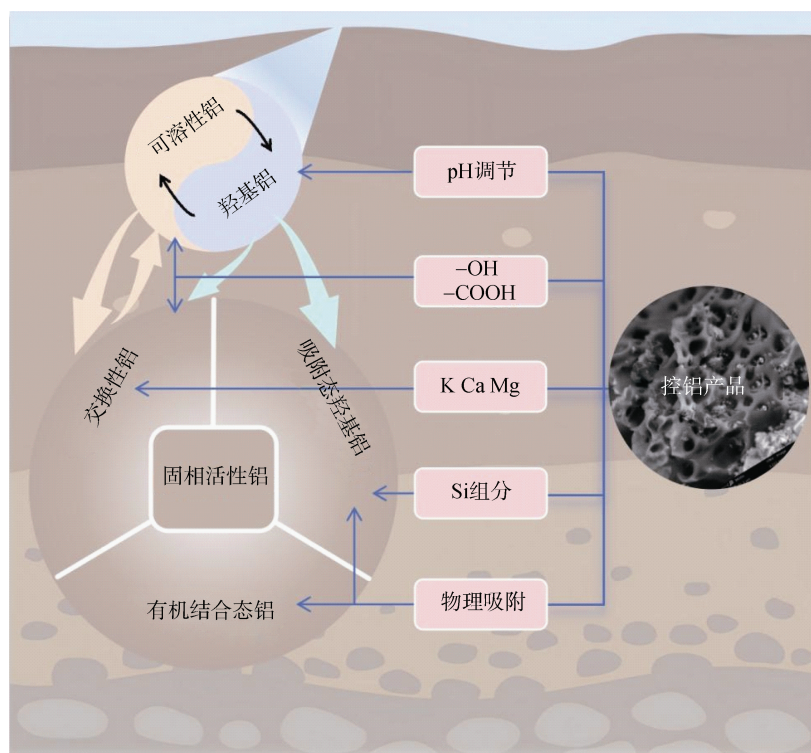
土壤中铝的活性直接决定其毒性效应强度^[20]。铝形态转化动力学模型已从单一pH驱动的平衡模型逐步向多因素耦合系统发展。根际微区研究已证实,根系分泌物与微生物代谢产物对铝转化的调控作用^[71],尤其是有机酸介导的Al-羧基络合物形成过程中的速率常数和平衡常数测定,为突破传统模型在非稳态条件下的预测瓶颈提供了关键参数,这些动态参数的引入将使模型更准确地模拟田间真实条件下铝的行为规律^[36]。多组学研究揭示的植物响应网络,包括ALMT1/MATE转运体表达调控、铝感知信号传导和有机酸合成关键酶活性变化等级联反应,将为模型从简单预测铝毒性发展为模拟完整的生物-环境互作系统提供理论依据^[72]。

多维视角的铝转化动力学模型还需整合土壤肥力状况、黏土矿物组成和改良材料组分等关键因素。深入解析土壤矿物、治酸材料与活性铝间的分子水平耦合机制,特别是有机-无机复合胶体对铝吸附-解吸

过程的动力学特性,将为预测不同控铝措施的效果提供理论依据^[73]。同步辐射光谱和原位成像等先进技术已实现对铝-有机质络合动力学和铝在矿物表面吸附-解吸过程的精确表征,这些微观界面机制的阐明为模型参数优化开辟了新途径^[74]。此外,机器学习方法的引入可以优化模型参数估算与预测能力,整合来自细胞、生物和土壤环境等多尺度数据的抑酸控铝智能预测系统,将为新型靶向控铝材料设计和精准施用提供更加精确的指导,推动酸性土壤的酸化预防从经验应用向理论驱动的精确调控转变^[75]。

4.3 控铝材料创新：从单一功能到多维协同

土壤酸化与铝毒害问题的解决正经历从传统石灰改良向精准靶向控铝技术的转变,其中新型靶向材料的开发应用将成为这一领域技术革新的关键驱动力(图2)。土壤中铝主要以可溶性铝、羟基铝、交换性铝、有机结合态铝和吸附态羟基铝等形态存在(其中固相活性铝由交换性铝、吸附态羟基铝和有机结合态铝组成)。控铝产品主要通过5种途径调控铝毒害：提高土壤pH,促进活性铝向固相转化；羟基(-OH)和羧基(-COOH)功能团络合铝；补充K、Ca、Mg等盐基阳离子,竞争铝吸附位点；提供硅组分,影响铝的形态转化；物理吸附固定活性铝。上述多种作用机制协同实现铝的稳定化,最终降低铝的生物有效性。



(图中彩色粗箭头代表不同铝形态之间的转化关系；蓝色细箭头表示控铝产品调控铝毒害的5种主要途径)

图2 土壤中铝的主要赋存形态及靶向控铝产品的作用机制

Fig. 2 Main occurrence forms of Al in soil and mechanism of action of targeted Al-controlling products

功能性纳米材料以其独特的物理化学特性展现出卓越的 Al^{3+} 调控能力。纳米硅钙材料凭借高比表面积和特殊晶体结构,既能高效吸附土壤溶液中活性 Al^{3+} ,又可逐步释放 Ca^{2+} 中和酸性,形成“吸铝—解毒—调 pH”的协同作用机制^[76]。纳米羟基磷灰石则通过表面羟基与 Al^{3+} 的特异性配位作用,实现对铝的选择性固定,同时磷酸根的缓释效应能显著改善植物磷营养,这种“控铝—供磷”双重功能对解决酸性土壤中普遍存在的磷限制问题具有独特价值^[17]。研究表明,纳米材料在低剂量下即可显著降低铝饱和度,其控铝效率比传统石灰材料高出 3 倍 ~ 5 倍,且对土壤微生物活性的抑制作用明显减弱^[77]。

缓释型靶向控铝材料的发展为酸性土壤长效改良提供了新思路。聚合物包膜石灰、碳酸钙微胶囊等包膜改良剂通过精确控制碱性物质的释放动力学特性,实现了与土壤铝活性变化的时空匹配,有效克服了传统石灰材料“立竿见影但后劲不足”的局限^[78]。基于壳聚糖、淀粉或纤维素衍生物构建的智能水凝胶载体系统,能够感知土壤 pH 或 Al^{3+} 浓度变化,触发调控物质的靶向释放,形成对铝毒害的精准响应^[79]。田间试验证实,缓释技术的应用不仅将材料的控铝持续时间从数月延长至 2 ~ 3 年,还显著提高了改良剂的利用效率,减少了过量施用导致的次生问题^[80]。

多功能复合靶向控铝材料的开发标志着控铝技术进入系统解决方案阶段。将生物炭作为载体负载硅钙材料,或构建腐殖酸和特定功能微生物的复合体系,能够实现控铝、调节土壤团聚结构、增加土壤有机质含量和激活土壤微生物功能的多重目标^[81]。基于矿物改性的层状复合材料则通过层间插层技术,将阳离子交换剂、缓释性养分和有益微生物组装成具有协同功能的复合体,实现“固铝—供肥—改良—促生”的一体化效应^[82]。这类材料在实现靶向控铝基础功能的同时,通过改善土壤物理结构、优化养分平衡和调控微生物群落组成,系统提升了酸性土壤的生产功能与生态功能^[83]。

参考文献:

- [1] Hong S B, Piao S L, Chen A P, et al. Afforestation neutralizes soil pH[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 520.
- [2] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010.
- [3] Shabtai I A, Wilhelm R C, Schweizer S A, et al. Calcium promotes persistent soil organic matter by altering microbial transformation of plant litter[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6609.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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] 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*, 2018, 115(16): 4045–4050.
- [8] Dong Y, Yu Y C, Wang R H, et al. Insights on mechanisms of aluminum phytotoxicity mitigation by canola straw biochars from different regions[J]. *Biochar*, 2022, 4(1): 57.
- [9] Fakhar A, Galgo S J C, Canatoy R C, et al. Advancing modified biochar for sustainable agriculture: A comprehensive review on characterization, analysis, and soil performance[J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 8.
- [10] Bossolani J W, Crusciol C A C, Leite M F A, et al. Modulation of the soil microbiome by long-term Ca-based soil amendments boosts soil organic carbon and physicochemical quality in a tropical no-till crop rotation system[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 156: 108188.
- [11] Zhu X F, Shen R F. Towards sustainable use of acidic soils: Deciphering aluminum-resistant mechanisms in plants[J]. *Fundamental Research*, 2024, 4(6): 1533–1541.
- [12] 李金业, 程昊, 梁晓敏, 等. 酸化土壤改良与固碳研究进展[J]. *生态学报*, 2024(17): 7871–7884.
- [13] Hu Z M, Zhao X Q, Bao X M, et al. A potential contribution of the less negatively charged cell wall to the high aluminum tolerance of *Rhodotorula taiwanensis* RS1[J]. *Yeast*, 2016, 33(11): 575–586.
- [14] 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.
- [15] Hartemink A E. Soil science in tropical and temperate regions—Some differences and similarities[M]. Elsevier, 2002: 269–292.
- [16] Gardos G, Cole J O. Maintenance antipsychotic therapy: Is the cure worse than the disease [J]. *The American Journal of Psychiatry*, 1976, 133(1): 32–36.
- [17] Yuan G H, Cao Y C, Schulz H M, et al. A review of feldspar alteration and its geological significance in sedimentary basins: From shallow aquifers to deep hydrocarbon reservoirs[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 191: 114–140.
- [18] Li W, Johnson C E. Relationships among pH, aluminum solubility and aluminum complexation with organic matter in acid forest soils of the Northeastern United States[J]. *Geoderma*, 2016, 271: 234–242.

- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] De Vries W, Breeuwsma A. The relation between soil acidification and element cycling[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1987, 35(3): 293–310.
- [23] 刘强, 郑绍建, 林咸永. 植物适应铝毒胁迫的生理及分子生物学机理[J]. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1641–1649.
- [24] 彭李顺, 曹峥英, 杨本鹏, 等. 植物激素对铝毒胁迫反应调控的研究进展[J]. 广东农业科学, 2022, 49(12): 10–19.
- [25] Liao H, Wan H Y, Shaff J, et al. Phosphorus and aluminum interactions in soybean in relation to aluminum tolerance. Exudation of specific organic acids from different regions of the intact root system[J]. Plant Physiology, 2006, 141(2): 674–684.
- [26] Chen R F, Shen R F, Gu P, et al. Response of rice (*Oryza sativa*) with root surface iron plaque under aluminium stress[J]. Annals of Botany, 2006, 98(2): 389–395.
- [27] Liang C Y, Piñeros M A, Tian J, et al. Low pH, aluminum, and phosphorus coordinately regulate malate exudation through GmALMT1 to improve soybean adaptation to acid soils[J]. Plant Physiology, 2013, 161(3): 1347–1361.
- [28] Wang C, Zhao X Q, Aizawa T, et al. High aluminum tolerance of *Rhodotorula* sp. RS1 is associated with thickening of the cell wall rather than chelation of aluminum ions[J]. Pedosphere, 2013, 23(1): 29–38.
- [29] 沈仁芳, 孙波, 施卫明, 等. 地上-地下生物协同调控与养分高效利用[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(6): 566–574.
- [30] 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.
- [31] Tao L, Xiao X Y, Huang Q Y, et al. Boron supply restores aluminum-blocked auxin transport by the modulation of PIN2 trafficking in the root apical transition zone[J]. The Plant Journal, 2023, 114(1): 176–192.
- [32] Wang C, Guo L, Shen R F. Rare microbial communities drive ecosystem multifunctionality in acidic soils of Southern China[J]. Applied Soil Ecology, 2023, 189: 104895.
- [33] 李赟, 刘迪, 范如芹, 等. 土壤改良剂的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(10): 63–69.
- [34] Fan B B, Ding S, Peng Y T, et al. Supplying amendments alleviates aluminum toxicity and regulates cadmium accumulation by spinach in strongly acidic soils[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 324: 116340.
- [35] 刘娇娟, 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.
- [36] Ur Rahman S, Han J C, Ahmad M, et al. Aluminum phytotoxicity in acidic environments: A comprehensive review of plant tolerance and adaptation strategies[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2024, 269: 115791.
- [37] 周晓阳, 徐明岗, 周世伟, 等. 长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1615–1621.
- [38] Silva Almeida C, Simão Neto F, da Silva Sousa P, et al. Enhancing lipase immobilization via physical adsorption: Advancements in stability, reusability, and industrial applications for sustainable biotechnological processes[J]. ACS Omega, 2024, 9(47): 46698–46732.
- [39] Deng A N, Wu X F, Su C L, et al. Enhancement of soil microstructural stability and alleviation of aluminium toxicity in acidic latosols via alkaline humic acid fertiliser amendment[J]. Chemical Geology, 2021, 583: 120473.
- [40] Kebede B, Tsunekawa A, Haregeweyn N, et al. Effect of Polyacrylamide integrated with other soil amendments on runoff and soil loss: Case study from northwest Ethiopia[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2022, 10(3): 487–496.
- [41] Dong Y, Yang J L, Zhao X R, et al. Soil acidification and loss of base cations in a subtropical agricultural watershed[J]. Science of the Total Environment, 2022, 827: 154338.
- [42] Wang Y F, Li J N, Xu L, et al. EDTA functionalized Mg/Al hydroxides modified biochar for Pb(II) and Cd(II) removal: Adsorption performance and mechanism[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 335: 126199.
- [43] da Silveira Sousa Junior G, Hurtado A C, de Cassia Alves R, et al. Silicon attenuates aluminum toxicity in sugarcane plants by modifying growth, roots morphoanatomy, photosynthetic pigments, and gas exchange parameters[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 4717.
- [44] Jiang D X, Xu H, Sheng Y G, et al. Silicon alleviates aluminum-induced inhibition of photosynthetic and growth attributes in rice by modulating competitive pathways between ethylene and polyamines and activating antioxidant defense[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2025, 222: 109785.
- [45] Huang S, Ma J F. Role of calcium signaling in aluminum tolerance in *Arabidopsis*[J]. New Phytologist, 2022, 233(6): 2327–2329.
- [46] Ofoe R, Thomas R H, Asiedu S K, et al. Aluminum in plant: Benefits, toxicity and tolerance mechanisms[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 13: 1085998.
- [47] Ribeiro A P, de Souza W R, Martins P K, et al. Overexpression of BdMATE gene improves aluminum tolerance in *Setaria viridis*[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 865.
- [48] Anwar A, Kim J K. Transgenic breeding approaches for improving abiotic stress tolerance: Recent progress and future perspectives[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(8): 2695.
- [49] Daspute A A, Sadhukhan A, Tokizawa M, et al. Transcriptional regulation of aluminum-tolerance genes in

- higher plants: Clarifying the underlying molecular mechanisms[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1358.
- [50] Li G Z, Wang Z Q, Yokosho K, et al. Transcription factor WRKY22 promotes aluminum tolerance via activation of OsFRDL4 expression and enhancement of citrate secretion in rice (*Oryza sativa*)[J]. *New Phytologist*, 2018, 219(1): 149–162.
- [51] Bhattacharyya C, Banerjee S, Acharya U, et al. Evaluation of plant growth promotion properties and induction of antioxidative defense mechanism by tea rhizobacteria of Darjeeling, India[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 15536.
- [52] Chakraborty N, Das A, Pal S, et al. Exploring aluminum tolerance mechanisms in plants with reference to rice and *Arabidopsis*: A comprehensive review of genetic, metabolic, and physiological adaptations in acidic soils[J]. *Plants*, 2024, 13(13): 1760.
- [53] Zhang S T, Jiang Q P, Liu X J, et al. Plant growth promoting rhizobacteria alleviate aluminum toxicity and ginger bacterial wilt in acidic continuous cropping soil[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 569512.
- [54] Wen Z L, Yang M K, Chen X Y, et al. Bacterial composition, function and the enrichment of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in differential rhizosphere compartments of Al-tolerant soybean in acidic soil[J]. *Yi Chuan*, 2021, 43(5): 487–500.
- [55] Qin H C, Wang Z X, Sha W Y, et al. Role of plant-growth-promoting rhizobacteria in plant machinery for soil heavy metal detoxification[J]. *Microorganisms*, 2024, 12(4): 700.
- [56] Ali Panhwar Q, Naher U A, Radziah O, et al. Eliminating aluminum toxicity in an acid sulfate soil for rice cultivation using plant growth promoting bacteria[J]. *Molecules*, 2015, 20(3): 3628–3646.
- [57] Kari A, Nagymáté Z, Romsics C, et al. Evaluating the combined effect of biochar and PGPR inoculants on the bacterial community in acidic sandy soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 160: 103856.
- [58] Hu D D, Zhang J Y, Yang Y M, et al. Molecular mechanisms underlying plant responses to low phosphate stress and potential applications in crop improvement[J]. *New Crops*, 2025, 2: 100064.
- [59] Charan K, Banerjee S, Mandal J, et al. Soil stressors on ecophysiology of bauxite mine impacted soil: Heavy metal–acidity–organic matter nexus[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2025, 54(2): 435–449.
- [60] Naaz S, Ahmad N, Jameel M R, et al. Impact of some toxic metals on important ABC transporters in soybean (*Glycine max* L.)[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(30): 27597–27611.
- [61] 梁焯, 李云祯, 牟海燕, 等. 钝化土壤酸化过程机理及关键影响因子研究[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(6): 193–197.
- [62] 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(中英文)*, 2024, 32(12): 2107–2116.
- [63] Nurcholis M, Tokashiki Y, Oya K, et al. Relationship between clay mineralogy and exchangeable Al in red and yellow soils from the Islands of Okinawa and Java[J]. *Soil Research*, 1998, 36(3): 411–422.
- [64] Huang J Y, Hartemink A E. Soil and environmental issues in sandy soils[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 208: 103295.
- [65] Vieira F C B, Bayer C, Zanatta J, et al. Organic matter kept Al toxicity low in a subtropical no-tillage soil under long-term (21-year) legume-based crop systems and N fertilisation[J]. *Soil Research*, 2009, 47(7): 707–714.
- [66] Smagin A V, Sadovnikova N B, Belyaeva E A, et al. Gel-forming soil conditioners of combined action: Field trials in agriculture and urban landscaping[J]. *Polymers*, 2022, 14(23): 5131.
- [67] van Veelen A, Koebernick N, Scotson C S, et al. Root-induced soil deformation influences Fe, S and P: Rhizosphere chemistry investigated using synchrotron XRF and XANES[J]. *New Phytologist*, 2020, 225(4): 1476–1490.
- [68] Bandara C D, Schmidt M, Davoudpour Y, et al. Microbial identification, high-resolution microscopy and spectrometry of the rhizosphere in its native spatial context[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 668929.
- [69] Kadiyala K, Konjengbam N S, M J, et al. Molecular signatures that translate across omics layers and crops under high aluminium and low phosphorus stress facilitate the identification of reliable molecular targets for genotyping in lentil[J]. *Functional & Integrative Genomics*, 2025, 25(1): 52.
- [70] 刘欢, 马明珠, 黄璐, 等. 镁营养缓解植物铝毒机制的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(4): 810–818.
- [71] Liu C Y, Jiang M T, Yuan M M, et al. Root microbiota confers rice resistance to aluminium toxicity and phosphorus deficiency in acidic soils[J]. *Nature Food*, 2023, 4(10): 912–924.
- [72] 汪吉东, 许仙菊, 宁运旺, 等. 土壤加速酸化的主要农业驱动因素研究进展[J]. *土壤*, 2015, 47(4): 627–633.
- [73] Dong G, Lu H L, Pan X Y, et al. Application of measuring electrochemical characteristics on plant root surfaces in screening Al-tolerant wheat[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 281: 116993.
- [74] Benti Chalchissa F, Kuris B K. Modeling the impacts of extreme climate scenarios on soil acidity (pH and exchangeable aluminum) in Abbay River Basin, Ethiopia[J]. *Heliyon*, 2024, 10(12): e33448.
- [75] Hou D Y, Jia X Y, Wang L W, et al. Global soil pollution by toxic metals threatens agriculture and human health[J]. *Science*, 2025, 388(6744): 316–321.
- [76] Fletcher R S. On-the-go prediction of soil pH using generalized additive models in Mississippi Delta: A case study[J]. *Open Journal of Soil Science*, 2025, 15(4): 225–234.
- [77] de Sousa A, Saleh A M, Habeeb T H, et al. Silicon dioxide nanoparticles ameliorate the phytotoxic hazards of aluminum in maize grown on acidic soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133636.

- [78] Yan G C, Huang Q Y, Zhao S J, et al. Silicon nanoparticles in sustainable agriculture: Synthesis, absorption, and plant stress alleviation[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1393458.
- [79] Olego M Á, Quiroga M J, Mendaña-Cuervo C, et al. Long-term effects of calcium-based liming materials on soil fertility sustainability and rye production as soil quality indicators on a typic palexerult[J]. *Processes*, 2021, 9(7): 1181.
- [80] Pushpamalar J, Langford S J, Ahmad M B, et al. Eco-friendly smart hydrogels for soil conditioning and sustain release fertilizer[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2018, 15(10): 2059–2074.
- [81] Rahim H U, Allevato E, Vaccari F P, et al. Biochar aged or combined with humic substances: Fabrication and implications for sustainable agriculture and environment-a review[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2024, 24(1): 139–162.
- [82] Bohari F L, Ahmad Izaddin Sheikh Mohd Ghazali S, Dzulkifli N N, et al. Studies on the intercalation of calcium–aluminium layered double hydroxide-MCPA and its controlled release mechanism as a potential green herbicide[J]. *Open Chemistry*, 2023, 21: 20220291.
- [83] Singha Roy A, Kesavan Pillai S, Ray S S. Layered double hydroxides for sustainable agriculture and environment: An overview[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(24): 20428–20440.