

陶荣浩, 庞路遥, 熊娟, 侯静涛, 汪明霞, 谭文峰. 酸化诱导土壤铝活化的界面过程、生态效应与调控策略[J]. 土壤学报, 2027,

TAO Ronghao, PANG Luyao, XIONG Juan, HOU Jingtao, WANG Mingxia, TAN Wenfeng. Interface Processes, Ecological Effects, and Regulation Strategies of Acidification-induced Aluminum Activation in Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2027,

酸化诱导土壤铝活化的界面过程、生态效应与调控策略*

陶荣浩, 庞路遥, 熊娟, 侯静涛, 汪明霞[†], 谭文峰

(生态环境部土壤健康诊断与绿色修复重点实验室, 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 土壤酸化是全球土壤退化的重要过程之一, 显著削弱农田生态系统的稳定性与养分循环功能。受长期施用铵态氮肥、酸沉降及强烈淋溶等多重因素驱动, 酸化加速铝元素由矿物结构中的惰性形态转化为高活性的离子形态, 形成以 Al^{3+} 为主的可溶强酸性组分, 对土壤理化性质、微生物群落结构及植物根系功能产生连锁影响。本文系统综述了酸化过程驱动铝活化的化学机制, 总结了铝在土壤有机质-矿物界面的释放、络合与再固定过程, 及其在养分固持、结构稳定与生物功能退化中的关键作用; 进一步分析了铝活化对养分循环、微生物生态及植物耐铝响应的生态学效应, 在此基础上综合评述了改良材料、植物-微生物互动及耕作管理等多路径调控策略, 并展望其在抑制铝活化过程中的潜在协同作用与未来发展方向。本文从化学与生态双重视角出发, 为深入理解酸化土壤中铝的活化机制及生态效应提供理论支撑, 也为酸性土壤的生态修复与可持续利用提供科学依据。

关键词: 土壤酸化; 铝活化; 生态效应; 界面过程; 调控策略

中图分类号: S156

文献标志码: A

Interface Processes, Ecological Effects, and Regulation Strategies of Acidification-induced Aluminum Activation in Soil

TAO Ronghao, PANG Luyao, XIONG Juan, HOU Jingtao, WANG Mingxia[†], TAN Wenfeng

(Key Laboratory of Soil Health Diagnosis and Green Remediation, Ministry of Ecology and Environment, College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Soil acidification is one of the major processes driving global soil degradation, significantly undermining the stability of agroecosystems and the functioning of nutrient cycling. Driven by long-term application of ammonium-based fertilizers, acid deposition, and intensive leaching, soil acidification accelerates the transformation of aluminum from inert mineral-bound forms into highly reactive ionic species, leading to the accumulation of soluble, strongly acidic components dominated by Al^{3+} . This process exerts cascading effects on soil

*国家重点研发计划项目(2024YFD1900102)和湖北省重大科技项目(2025BBA003)资助 Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2024YFD1900102) and the Major Science and Technology Project of Hubei Province, China (No. 2025BBA003)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangmx@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 陶荣浩(1995—), 男, 安徽淮南人, 博士研究生, 主要研究方向为土壤酸化治理。E-mail: ronghaotao2022@163.com

收稿日期: 2025-12-29; 收到修改稿日期: 2026-07-27; 网络首发日期(www.cnki.net): 202 - -

physicochemical properties, microbial community structure, and plant root functioning. This review systematically synthesizes the chemical mechanisms by which acidification accelerates aluminum activation, summarizing the processes of aluminum release, complexation, and re-stabilization at the soil-organic matter-mineral interface, as well as their key roles in nutrient retention, structural stability, and biological functional degradation. Furthermore, it analyzes the ecological effects of aluminum activation on nutrient cycling, microbial ecology, and plant aluminum tolerance responses. Finally, based on this synthesis, it is comprehensively evaluated multi-pathway regulatory strategies, including soil amendments, plant-microbe interactions, and management practices. Also, their potential synergistic roles and future directions in mitigating aluminum activation are highlighted. From both chemical and ecological perspectives, this review provides a theoretical basis for advancing the understanding of aluminum activation mechanisms and associated ecological effects in acidified soils, and offers scientific support for the ecological restoration and sustainable utilization of acidic soils.

Key words: Soil acidification; Aluminum activation; Ecological effects; Interface processes; Regulation strategies

土壤酸化是全球范围内普遍存在的土地退化问题, 严重威胁农业生产安全与生态系统稳定。我国南方红壤、黄壤等典型酸性土壤区域, 受强降水淋溶、强烈母质风化以及长期施用铵态氮肥等多重因素影响, pH 持续下降, 酸性障碍加剧^[1]。第二次全国土壤普查和测土配方施肥等监测数据显示, 1980—2010 年间我国农田土壤 pH 平均下降约 0.5 个单位^[2], 其中 pH 小于 6.5 的耕地面积占比由 36% 上升至 43%^[3], 导致农田生态系统稳定性显著下降^[4]。尽管自然条件下土壤酸化进程较慢, 但氮肥过量施用显著加速了该过程。根据联合国粮食及农业组织 (FAO) 统计显示, 2020 年中国单位耕地化肥施用量 (以 N、P₂O₅、K₂O 养分总量计) 约为 187 kg·hm⁻², 高于全球平均水平 (约 113 kg·hm⁻²)^[5], 部分高投入种植体系氮肥施用量甚至超过 500 kg·hm⁻²^[6]。长期过量施肥不仅降低养分利用效率, 还减少土壤有益微生物数量与代谢功能, 影响作物生长与土壤健康。一项长期定位试验表明, 氮肥增施并未持续提升小麦、玉米等作物产量, 反而可能导致减产^[7]。基于改进型极简动态模型 (VSD+) 预测, 如果氮肥投入量以每年 1% 的速度增长, 到 2050 年中国耕地土壤 pH 平均将下降约 1.0 个单位, 作物相对产量损失将由 2010 年的约 4% 增至 24%^[8]。此外, 土壤 pH 下降还促使铜、铅、镉等有毒重金属溶解度提高, 加剧土壤污染风险, 威胁农产品质量安全^[9]。

铝 (Al) 的活化与积累是土壤酸化过程中最显著的化学变化。在中性至弱酸性土壤 (pH > 5.5) 中, Al 主要以固相矿物态和结合态存在, 具有较高稳定性和较低的生物毒性; 当土壤发生酸化导致 pH < 5.5 时, 这些固相存在的 Al 会以 Al³⁺ 形式溶出, 并进入土壤溶液或被胶体表面吸附, 从而显著增加活性 Al 的浓度, 对植物、微生物及水体环境构成潜在威胁。活性 Al³⁺ 可直接抑制作物根系伸长与分裂, 干扰细胞壁结构和膜稳定性, 限制养分吸收, 成为酸性土壤中作物减产的主要因素之一^[10]。研究表明, 土壤 pH 由 5.4 下降至 4.7 时, 油菜籽在 Al 胁迫下减产达 40%, 花生和芝麻的减产幅度约为 15%^[11]。酸化过程中交换性盐基离子的流失降低了土壤对 Al³⁺ 的缓冲能力, 进一步加剧了 Al 毒性^[12]; 同时, 酸化土壤中 H⁺ 与 Al³⁺ 浓度升高破坏了微生物群落结构, 抑制了土壤生态功能的正常运行^[13]。因此, 调控土壤 pH 和 Al 的赋存形态是提升土壤质量和保障作物健康生长的关键路径。

尽管植物在 Al 胁迫下的生理与分子反应机制已被广泛阐明, 但土壤酸化驱动 Al 由固相向活性态转变及其在土壤-植物系统中引发的连锁效应仍研究不足。且现有研究对酸化条件下 Al 的活化过程、形态转化路径及其与有机质、矿物组分和微生物过程之间的协同作用缺乏整体性梳理。因此, 深入阐明 Al 在酸性土壤中的释放与迁移规律及其对土壤理化、生物过程的影响, 对揭示土壤退化机制、优化改良策略和实现农业生态系统的可持续管理具有重要意义。基于此, 本文系统综述了土壤酸化诱导下的 Al 活化机制、过程与调控策略及其生态环境效应, 重点探讨: (1) Al 在酸化土壤中的形态演变与活化机制; (2) Al 活化对土壤理化性质和生物过程的影响; (3) 植物根际及微生物群落对 Al 胁迫的响应特征; (4)

缓解 Al 活化与酸性土壤改良的主要调控策略。旨在为深化酸性土壤中 Al 活化过程的科学认识及其调控实践提供理论支撑与技术参考。

1 土壤酸化诱导铝活化的化学机制

1.1 土壤酸化机制及影响因素

土壤酸化指土壤 pH 持续下降、土壤交换性酸不断积累的过程，它是伴随土壤发生和发育的自然演化过程^[12~14-15]。本质上是 H^+ 输入速率超过体系缓冲消耗速率所引发的界面化学失衡过程，随着外源 H^+ 持续累积，土壤缓冲体系由碳酸盐缓冲向黏土-有机质胶体缓冲，再向铁铝氧化物缓冲依次转变^[13, 15-16]。该过程中不同缓冲体系在特定 pH 区间内发挥主导作用，其作用机制受土壤母质组成和界面反应特性共同制约：碳酸盐缓冲体系主要通过碳酸盐矿物溶解来中和 H^+ ，pH 较高的土壤中最有效^[17]；黏土-有机质胶体缓冲体系依赖交换性阳离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+) 吸收 H^+ 并释放碱性阳离子，在 pH 4.2~6.2 的酸性土壤中占主导地位^[18]；而铁铝氧化物缓冲体系在 pH < 4.5 条件下，通过溶解-沉淀反应参与 H^+ 中和，同时释放 Al^{3+}/Fe^{3+} ，加剧酸化^[19]。由于南方红壤、黄壤母质中几乎不含碳酸盐，碳酸盐缓冲机制几乎缺失，酸化主要依赖胶体交换缓冲和铁铝氧化物缓冲^[20]。此外，可变电荷土壤的矿物表面电荷会随 pH 的变化发生质子化或去质子化，从而调控 H^+ 和金属离子的吸附与解吸，影响酸化响应和缓冲过程^[21]。在碳循环视角下，土壤酸化受配体类型与 pH 协同调控，有机质分解及微生物代谢通过改变土壤溶液化学环境及矿物表面电荷和界面配位，协同控制 Al 的释放与再固定过程^[22]。

人为因素是农业土壤致酸的重要原因，集约化耕作下长期施用氮肥（如尿素、碳酸氢铵等）显著加剧了土壤酸化进程^[23]。 NH_4^+ 在氨氧化微生物和亚硝酸盐氧化细菌的共同作用下经硝化转化为 NO_3^- ，释放 H^+ ^[24]；在长期施用氮肥条件下，经硝化产生的 H^+ 不断累积，同时，因土壤胶体对 NO_3^- 吸附能力较弱，易随水淋失并携带 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等盐基离子迁移流失，从而削弱土壤缓冲能力，并进一步加速土壤酸化（图 1）。此外，长期降雨、氮肥施用及酸沉降等因素的叠加作用，使酸化效应在土壤演化过程中持续累积并呈现明显增强趋势。除施肥因素外，植物根系与土壤微生物的代谢活动同样对土壤酸化具有重要影响。植物在吸收阳离子过程中常伴随 H^+ 的释放，以维持细胞内外电荷平衡；微生物分解有机质过程中产生的低分子有机酸（如柠檬酸、草酸等）在解离过程中可释放 H^+ ，当有机质输入较高、分解速率较快或土壤通气性较差导致有机酸累积时，该过程显著促进土壤酸化。

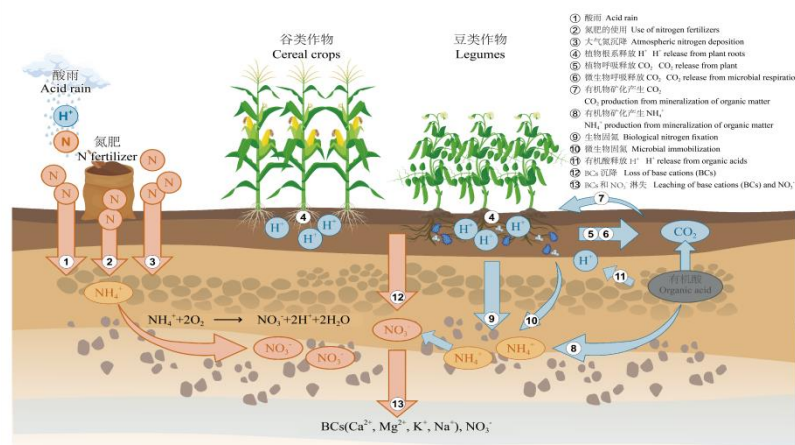


图 1 土壤酸化机制示意图（据 Raza 等^[25]修改）

Fig.1 Schematic diagram of soil acidification mechanisms (modified from Raza et al.^[25])

1.2 土壤酸化驱动铝释放的机制

土壤中 Al 的存在形态复杂,可大体划分为矿物结合态、交换态、有机结合态、非晶态以及可溶态等。其中,矿物结合态 Al 主要赋存于硅酸盐矿物(如长石、云母、高岭石、蒙脱石等)和氧化物(三水铝石、铝氧化物晶体)中,结构稳定,不易被短期释放。然而,酸性肥料施用、酸雨沉降和长期淋溶等作用引起 H^+ 浓度升高,不仅破坏矿物表面铝氧八面体结构,导致晶格 Al 缓慢溶出,还通过竞争吸附置换土壤胶体上的交换态 Al,并促进低分子有机酸对 Al^{3+} 的络合,增强潜在活性 Al 向溶液相的转化(图 2)。可溶态 Al 并非单一形态,而是通过一系列水解、聚合和络合过程维持动态平衡。其主要形式包括无机离子(Al^{3+} 、 $AlOH^{2+}$ 、 $Al(OH)_2^+$ 等)、聚合态 Al 以及与有机配体结合的络合态 Al。当 pH 下降至 5.5 以下时,单体和聚合态 Al 逐渐增加;进一步降低至 5.0 甚至 4.3 以下时, Al^{3+} 及其水解产物浓度急剧上升,在矿物表面或局部微环境条件下,上述活性 Al 可进一步发生水解聚合及与硅的结合反应,形成非晶态羟基铝和非晶态铝硅酸盐,以固相形态累积于土壤体系中^[26]。X 射线吸收近边结构光谱(XANES)和延伸精细结构光谱(EXAFS)等 X 射线吸收谱技术广泛应用于土壤中不同形态 Al 的赋存状态和配位环境的表征研究,同时 ^{15}N 、 ^{27}Al 等稳定同位素示踪技术揭示 Al 在不同温度、矿物结构和水分条件下的配位形态与迁移转化规律,为解析其在酸化过程中的活化机制及与养分循环的耦合提供关键证据^[27]。如利用 ^{27}Al 魔角旋转核磁共振(^{27}Al MAS-NMR)对含 Al 硅酸盐(如高岭石、伊利石、白云母和蛭石复合矿物等)的分析表明,矿物结合态 Al 以四面体和八面体两种配位结构存在,其中,四面体 Al 在酸化条件下更易活化释放^[28]。此外,利用 Al K 边 X 射线吸收近边结构谱(Al K-edge XANES)对森林土壤剖面及其地表有机质层(O 层)进行分析表明,有机结合态 Al 主要富集于富含枯枝落叶和腐殖质的地表有机层中,且其相对含量随土壤深度增加而逐渐降低^[29]。该结果揭示了土壤中活性 Al 库的垂向分布特征,为理解 Al 在土壤有机-无机界面的结合机制提供了实证依据。

不同形态 Al 在土壤中可通过水解、络合、沉淀和结晶相互转化,维持动态平衡。交换态 Al 以 Al^{3+} 形式吸附于土壤胶体表面,其释放过程受土壤 pH 等环境化学条件的直接控制,而施肥与有机物投入则通过调节土壤酸碱状态、络合环境及离子竞争关系,间接影响交换态 Al 的解吸与活化:酸化增加 H^+ 竞争吸附,促进 Al^{3+} 向土壤溶液中释放;氮肥硝化作用产生 H^+ ,使交换态 Al 的解吸及含 Al 矿物的溶解增强,促进 Al^{3+} 向土壤溶液中释放并提高其浓度^[30]。土壤有机物(如腐殖酸或低分子有机酸)既可与交换态 Al^{3+} 络合降低活性,也可改变胶体表面电荷,促进部分 Al 释放。同时,形成有机结合态 Al 络合物,使 Al 迁移性增加、毒性降低,其稳定性随酸碱环境变化:酸性条件下,络合物可能被质子化而部分释放出 Al^{3+} ,提高可溶态 Al 浓度;中性或弱碱性条件下,络合物相对稳定,Al 被固定在有机质上,毒性降低且不易迁移^[31]。此外,某些非晶态和氧化铁结合态 Al 是潜在活性库,在长期酸化、强还原或高温高湿条件下,通过结构破坏、溶蚀或与有机酸反应等释放进入溶液,成为植物可吸收的活性 Al,有研究显示,土壤 pH 由 5.47 降至 4.86 时,交换性 Al 由 $0.90\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 上升至 $2.19\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,表明随着土壤酸化,活性 Al 存在快速累积态势^[32]。酸化驱动下的这些过程显著提高了土壤中活性 Al 的含量,并加速不同形态之间的循环转化,最终打破原有的化学平衡。

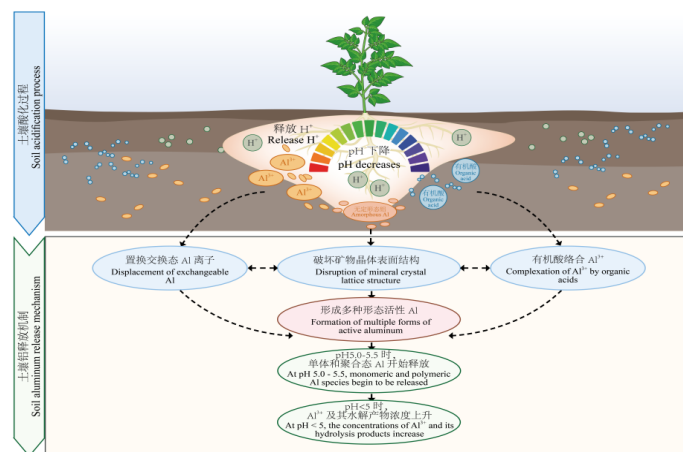


图 2 土壤酸化驱动铝释放机制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of soil acidification-driven aluminum release mechanisms

1.3 土壤有机质在铝活化中的调控机制

土壤有机质对 Al 活化的影响具有双重作用, 其既可通过络合作用抑制 Al 的毒性, 又能通过配体解吸等机制促进其活化与迁移。一方面, 土壤有机质中丰富的羧基 (-COOH)、羟基 (-OH) 和氨基 (-NH₂) 等官能团具备较强的配位潜力, 能够通过络合作用调节 Al³⁺ 的化学形态与迁移性; 其中, 腐殖酸类组分 (如富里酸与胡敏酸) 常与 Al³⁺ 形成稳定的有机复合物, 显著降低其游离活性, 从而缓解 Al 对植物根系及土壤微生物的胁迫效应^[33]。此外, 土壤有机质富含羧基 (-COOH) 和酚羟基 (-OH) 等可变电荷官能团, 可通过质子化、去质子化过程 (-COOH ⇌ -COO⁻ + H⁺) 调节表面电荷^[34]。研究表明, pH < 4.0 时, 有机质官能团发生质子化, 导致有效配位位点减少, 同时 H⁺ 与 Al³⁺ 竞争有机质配位位点, 从而抑制其络合作用; pH 升至 4.0~5.0 后其络合常数明显增大; 当 pH 接近并高于 5.5 时, Al 开始水解/沉淀, 游离 Al³⁺ 下降, 络合作用随之减弱, 由此可知, pH 4.0~5.5 时富里酸/腐殖酸对 Al 的络合作用最强^[35]。投入含腐殖质的有机物料 (如畜禽粪肥、腐熟秸秆等) 可通过腐殖酸和富里酸等活性官能团与 Al 发生络合反应, 将土壤中的活性/交换性 Al 转化为有机结合态, 降低交换性 Al 的比例并稳定其环境行为。研究表明, 施用碱性腐殖酸肥料可使交换性 Al、活性 Al 分别降低 56.7% 和 54.6%^[36]。

另一方面, 部分来源于植物根系分泌物或微生物代谢产物的柠檬酸、草酸等低分子有机酸则表现出促进 Al 活化的潜在风险^[37]。这些可溶性有机配体通过络合作用提高 Al 的迁移性, 并可通过配体交换取代矿物表面 Al-OH 上的配位基团, 削弱 Al 在矿物界面的结合强度, 从而促进矿物中 Al 的持续溶解与释放, 增加溶解态 Al 的迁移性。如柠檬酸可与 Al³⁺ 形成稳定络合物, 提高其在土壤中的移动性, 并在持续淋溶条件下促进其向下迁移。此外, 有机质自身的组成、稳定性与空间分布也影响其对 Al 活化的调控路径。高度腐殖化、结构复杂的腐殖质组分 (如腐殖酸和胡敏素) 因富含羧基和酚羟基等官能团, 具有较强的 Al³⁺ 络合与缓冲能力, 能够缓解其毒性; 而新鲜有机物或处于早期分解阶段的有机质则易释放大量低分子有机酸, 短期内可能显著增强 Al 的活性与迁移能力。因此, 不同类型有机物质在 Al 行为调控中的作用机制存在差异, 需结合土壤 pH、有机质演变特征及 Al 形态变化进行系统评价。

1.4 不同酸性土壤中铝活化的行为差异

我国酸性土壤类型多样, 不同土壤的母质来源与风化程度决定了 Al 活化的潜在机制及敏感性特征存在显著差异。高岭石及铝氧化物等矿物在酸化过程中的 Al 释放不仅受其晶体结构稳定性控制, 还与表面羟基性质及电荷特征密切相关。不同矿物由于表面电荷形成机制及界面反应路径存在差异, 在酸化过程中表现出不同的 Al 活化敏感性。其中, 高岭石等层状硅铝酸盐矿物以边缘羟基反应为主, 对 pH 变化响应较为敏感, 而铝氧化物则由于表面羟

基密度较高及双电层作用显著,对 Al 释放具有一定缓冲或抑制作用^[38]。因此,不同矿物类型通过调控表面电荷特性及界面反应路径,决定了土壤在酸化过程中 Al 活化的敏感性与响应方式,进一步印证了界面化学过程在 Al 活化中的主导作用。

红壤主要形成于热带或亚热带温暖湿润地区,风化程度高,原生矿物含量低,黏土矿物以 1:1 型高岭石和氧化铝矿物为主,结构性 Al 较多,并稳定于矿物晶格中。长期风化和酸性氮肥施用以及酸沉降胁迫下,土壤容易持续释放 Al^{3+} ,形成稳定的高水平活性 Al 积累。红壤中常见的高岭石及氧化铁铝(如针铁矿、水铝石)比表面积大,表面羟基配位能力强,可通过配合作用吸附 Al^{3+} ,形成相对低活性的络合态 Al^[39]。黄壤主要发育于亚热带温暖湿润、相对阴湿的地带,其母质长期受淋溶影响,风化程度总体低于红壤^[40]。黄壤中含有较多水化铁氧化物和部分未完全风化的黏土矿物,质地较黏重且团粒结构相对疏松。这类土壤对 Al 具有较强固持能力,但其胶体表面活性高,使交换性 Al 和可溶性 Al 在外界环境波动下易升高,在酸化条件下表现出较高的 Al 活性。相较之下,紫色土主要发育于紫色砂岩,成土过程以物理风化为主,保留较多原生矿物及以伊利石为主的 1:2 型黏土矿物,具有较高盐基饱和度和一定的阳离子缓冲能力^[41]。然而,在持续酸化条件下,盐基离子淋失会削弱其缓冲能力,并促进矿物结合态 Al 向交换态 Al 和水溶性 Al 转化。我国西南地区典型紫色土中,连续 20 年施用尿素可使表层土壤 pH 由 6.53 降至 5.23,交换性 Al 含量较对照升高 81.8%^[42]。总体而言,不同类型酸性土壤在 Al 活化动力学、缓冲能力及酸化响应上存在显著差异,这些差异决定了植物根系和土壤微生物受 Al 胁迫的程度与方式。

2 酸性土壤中铝活化的环境效应

2.1 土壤养分特性的变化

土壤酸化通过诱导 Al 的活化使其成为影响养分有效性的核心驱动力。大量活化的 Al^{3+} 不仅直接毒害根系,还可与磷酸根结合生成难溶性磷酸铝沉淀,并通过增加土壤表面正电荷密度强化对磷的吸附,从而显著降低磷的有效性。同时,在南方酸性土壤中,持续酸化通常伴随着有机质矿化过程的加快,有机质分解释放的低分子有机酸虽可暂时促进铝磷沉淀的解离,但其在酸性环境中易被快速矿化或重新吸附,难以持续缓解 Fe/Al 对磷的固定作用,最终限制了磷的有效释放与循环^[43]。在氮素方面, Al^{3+} 对微生物群落的毒害效应使氨氧化和矿化过程受阻,造成有机氮转化受限;在低 pH 条件下,铵态氮以离子形式稳定存在,不易挥发;但酸化会抑制硝化作用,削弱氮的转化与供应能力。同时,硝态氮因迁移性增强而随水分淋失,共同导致氮素供给不足、利用效率下降。对于钾素,活化的 Al^{3+} 竞争阳离子交换位点并置换吸附态 K^+ ,促使其随水迁移流失,同时 Al^{3+} 可进入层状硅酸盐矿物结构,增强黏土对钾的层间固定作用,抑制其再释放。湖南祁阳红壤的施肥长期定位试验发现,连续施氮肥使土壤 pH 在 10 年内下降约 1.2 个单位(降至 pH 4.5 以下),这期间有效磷及养分释放能力显著下降,养分循环功能受损^[44]。除此之外, Al^{3+} 与有机质官能团结合会破坏腐殖质的结构稳定性,使溶解性有机碳组成由疏水性大分子为主逐渐转向亲水性小分子,削弱对金属离子的稳定络合作用,并改变养分在胶体上的吸附-解吸平衡,间接加剧氮、磷、钾的损失^[45]。综上,酸化诱导的 Al 活化通过磷固定、氮损失、钾流失以及有机质形态转化等相互耦合的机制,系统性削弱土壤的养分供给与保持能力,制约农田生态系统的稳定性与生产潜力。

2.2 土壤物理结构的影响

土壤物理结构通过调节 Al 的释放、迁移和转化,间接控制其活性水平。良好的土壤团粒结构能够增强孔隙连通性与通气性,促进水分和离子的扩散,有利于酸-碱中和反应和离子缓冲过程的发生。例如,团聚体内部常包裹有机质和低分子有机配体,这些物质可与活性 Al 发生络合或沉淀反应,降低其在溶液中的积累,从而减轻根际的毒害风险^[46]。然而,当

Al 过量释放时,反过来会破坏土壤结构。一方面, Al^{3+} 与土壤胶体表面结合,会削弱胶体的负电荷特性,降低阳离子交换能力,造成团聚体解体,孔隙度下降,水气通透性减弱^[47]。另一方面, Al^{3+} 也能与黏土矿物(如高岭石、蒙脱石等)的层间或边缘部位发生作用,诱导矿物颗粒间的絮凝与过度聚集,使土壤颗粒结合更加紧密,进而导致结构致密化和板结化^[28]。这些变化不仅限制了土壤的水分和空气传导,还显著抑制作物根系的生长与养分吸收。土壤物理性状(如容重、孔隙度和持水性)也会影响 Al 活化过程。在质地紧实、通透性较差的土壤中,酸性物质容易累积,导致土壤局部酸化加剧,进一步加速 Al 的水解释放和迁移;在酸雨频繁或长期施用铵态氮肥条件下,这种效应更为显著^[48]。结构疏松、孔隙分布合理的土壤能够促进 Al^{3+} 在土壤溶液中的扩散与迁移,降低其有效态在局地环境中的累积风险,从而削弱其生物可利用性和毒性表现^[34]。这表明土壤物理结构既是 Al 释放与转化的重要调控因子,同时也受 Al 活性反馈作用的影响,二者形成相互耦合的动态机制。

2.3 微生物活动和生态功能

土壤酸化显著改变微生物生境,影响群落组成、代谢潜能及养分循环。pH 下降抑制了放线菌和固氮菌等优势微生物的生长繁殖,导致多样性下降、结构简化^[49]。同时,酸性条件下活性 Al 及其聚合形态的积累进一步增强毒性胁迫。 Al^{3+} 可与微生物细胞壁和膜表面的带负电基团结合,干扰离子平衡和物质转运,破坏细胞膜的完整性,并通过影响细胞器能量代谢与酶合成过程抑制微生物活性^[49]。在长期适应过程中,不同类群的微生物形成了多样的耐 Al 机制以维持生态功能。细菌通常通过胞外分泌物质或表面修饰降低 Al^{3+} 毒性,如荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)和枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)依靠胞外多糖与有机酸分泌螯合 Al^{3+} ,形成屏障以减少离子进入胞内;根瘤菌(*Rhizobium*、*Bradyrhizobium*)及放线菌(*Streptomyces*)通过胞外多糖包被与络合反应稳定细胞表面结构,维持固氮与代谢活性^[50]。真菌和酵母则以有机酸分泌与细胞壁修饰为主要耐受途径,其中,丛枝菌根真菌(*Glomus* 属)及真菌青霉(*Penicillium*)、曲霉(*Aspergillus*)能通过分泌草酸或柠檬酸固定 Al^{3+} ^[51];而酵母菌如台湾红酵母(*Rhodotorula taiwanensis*)和酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)则通过增加细胞壁厚度与降低表面电荷密度减少 Al^{3+} 进入胞内^[52]。除对群落结构的影响外, Al^{3+} 还可通过直接作用于关键酶系统削弱土壤养分循环功能,其与酶蛋白活性位点结合或改变空间构象,显著降低催化效率。高 Al 条件下,磷酸酶活性下降,阻碍有机磷矿化并限制有效磷释放,脲酶受抑,减缓有机氮向铵态氮的转化,硝酸盐还原酶活性降低,削弱了硝酸盐还原及氮素同化过程^[53]。总体而言,酸化诱导的 Al 活化不仅改变了微生物群落结构与功能特征,还通过酶活性抑制与养分转化受阻削弱了碳、氮、磷等关键元素的循环效率,降低土壤生态系统的稳定性与恢复能力。

3 铝活化对植物生长与养分调控的生物效应

3.1 铝对植物根系毒害机制

酸性土壤中活性 Al 的积累是限制植物根系发育和作物产量的关键胁迫因子之一。植物对 Al 毒的响应通常表现为根尖伸长的迅速抑制,其机制是 Al^{3+} 对根尖分生组织细胞的结构与功能造成了由外向内的多层次损伤^[4]。 Al^{3+} 与细胞壁中的果胶和木质素等带负电荷基团(如羧基、羟基)发生静电吸附,取代 Ca^{2+} 并降低细胞壁的可塑性,从而破坏细胞伸长所需的壁松弛过程^[54]。同时, Al^{3+} 还能调控果胶甲酯酶和木聚糖酶等细胞壁修饰酶的活性,促进果胶去甲酯化和壁组分交联,进一步增强细胞壁的硬化效应,抑制细胞的伸长与分裂,使根尖生长受限。 Al^{3+} 可通过离子通道或与有机配体形成络合物后进入细胞质,引发活性氧过量生成和膜脂过氧化,造成质膜结构破坏与通透性增加,离子稳态被打破^[55]。膜电位失衡与 Ca^{2+} 信号紊乱进一步干扰了根尖细胞的离子吸收与信号传递功能,导致代谢紊乱和生理失衡。进入

细胞后的 Al^{3+} 主要分布于液泡和线粒体。液泡可通过螯合或隔离作用暂时缓解其毒性，但当解毒能力不足时， Al^{3+} 在细胞器中的积累会造成更深层的破坏^[56]。研究表明， Al^{3+} 不仅能干扰线粒体电子传递链，抑制腺嘌呤核苷三磷酸（ATP）合成，导致能量代谢障碍，它还影响多种关键酶的合成与转运，造成细胞活性下降与代谢紊乱^[57]。除单一的 Al^{3+} 外，多核羟基 Al 等聚合形态在酸性环境中亦具有较强毒性，能够通过增强氧化胁迫和离子紊乱等途径协同加剧对根尖的损伤。总体而言，Al 对植物根系的毒害过程从细胞壁结合与硬化开始，逐步引发膜结构破坏、氧化胁迫增强以及细胞器功能障碍，最终导致根系伸长受阻和水分、养分吸收能力下降。

3.2 植物对铝胁迫的适应机制

植物对酸性土壤中 Al 胁迫的适应主要包括外部排斥机制与内部耐受机制，并在根际与叶际形成协同调控体系（图 3）。外排机制主要通过限制 Al^{3+} 进入根细胞来减轻毒害。根尖感受到 Al 刺激后，迅速分泌的低分子有机酸与 Al^{3+} 形成稳定络合物，降低其跨膜进入能力。细胞壁中的羧基、羟基等官能团可吸附并络合 Al^{3+} ，构成第一道屏障。尽管质子泵（如 H^+ -ATPase）活化会加剧根际酸化，但植物通过分泌有机酸盐或增强阴离子吸收等途径中和根际 H^+ ，促进 Al^{3+} 向氢氧化铝沉淀形态转化。分子水平上，铝激活苹果酸转运蛋白（ALMT 家族）和多药及毒性化合物外排转运蛋白（MATE 家族）分别介导苹果酸与柠檬酸外排，是外排机制的关键调控因子。结构生物学研究表明， Al^{3+} 可诱导 ALMT 蛋白发生构象变化，激活有机酸通道^[58]。当部分 Al^{3+} 仍进入细胞后，植物通过细胞内螯合与隔离实现无害化。细胞质中有机酸、酚类、多肽等可与 Al^{3+} 形成稳定络合物，并经由天然抗性相关巨噬细胞蛋白（NRAMP）、ATP 结合盒转运蛋白（ABC）转运体等跨膜蛋白转运至液泡中储存，降低其对代谢系统的干扰^[59]。此外，Al 胁迫常诱导活性氧（ROS）积累，植物通过上调超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）和过氧化氢酶（CAT）等抗氧化酶活性，缓解氧化胁迫并维持细胞稳态。

除根际响应外，叶际在植物耐 Al 过程中亦发挥重要作用。部分 Al^{3+} 可经木质部转运至地上部，并在叶片的叶脉、细胞间隙及表皮组织中被重新分布，与有机酸或酚类物质形成稳定络合物，并减少其在叶肉等代谢活跃组织中的积累^[60]。研究表明，部分植物可通过叶片表皮细胞分泌有机酸或酚类化合物，将 Al 固定于表面或气孔周围，降低其再进入活性细胞的风险^[61]。进入叶肉细胞的 Al^{3+} 可被低分子有机配体螯合，经液泡膜转运蛋白（如 ALS3、ABC 转运体）导入液泡中储存，或结合于细胞壁中去甲酯化果胶的羧基位点上实现固定，减少自由 Al^{3+} 的细胞毒性^[62]。此外，部分植物还可通过 Ca^{2+} /丝裂原活化蛋白激酶（MAPK）等信号通路将 Al 胁迫信号传递至叶部，诱导系统性防御反应，增强全株抗性。总体而言，植物通过根际外排、叶际再分配及胞内解毒等多层次机制共同维持 Al 稳态并减轻其毒害作用。

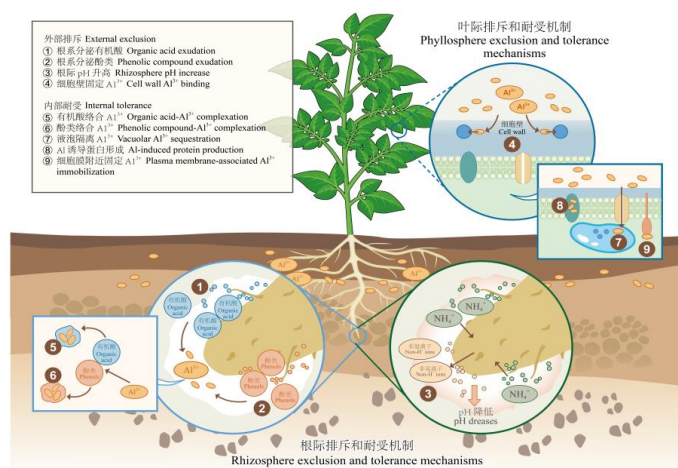


图3 植物对铝的排斥和耐受机制示意图

Fig. 3 Schematic diagram of aluminum exclusion and tolerance mechanisms in plants

3.3 氮磷调控植物对铝的响应机制

酸性土壤中, Al^{3+} 的活化积累常与氮素供应不足和磷素有效性降低并存, 对植物生长形成复合胁迫。氮与磷作为关键营养元素, 在根际化学环境调控及 Al 毒害缓解中发挥核心作用。不同氮源对植物的 Al 耐受性影响存在显著差异, 如以铵态氮为主要氮源时, 水稻、茶树等作物通常表现出较高的逆境适应性。研究发现, Al 胁迫可抑制根系质子泵 ($\text{PM H}^+\text{-ATPase}$) 活性, 降低铵态氮吸收通量, 表明质子泵功能受损可能同时影响多种氮形态的吸收^[63]。相反, 硝态氮供应通常增强植物对 Al 毒害的敏感性, 特别是在以 NO_3^- 为优势氮源的大麦和小麦中。通常, 铵态氮吸收伴随质子外排, 使局部根际 pH 降低, 从而促进 Al^{3+} 与有机酸的络合或沉淀, 减弱其生物有效性; 而硝态氮吸收伴随 OH^- 或 HCO_3^- 释放, 通常导致根际 pH 升高并改变 Al 的可溶性状态^[64]。上述效应可理解为在一定条件下的主导趋势, 但实际根际 pH 的变化受质子泵活性、土壤缓冲能力、微生物硝化速率及植物分泌物等多重因素调控。此外, 不同氮素形态可通过调控谷氨酰胺合成酶 (GS)、硝酸还原酶 (NR) 等关键代谢途径, 影响植物的能量代谢与抗氧化防御, 改变对 Al 毒害的敏感性^[65]。

磷素在缓解酸性逆境中同样起核心作用。磷酸根 (PO_4^{3-}) 可与 Al^{3+} 形成难溶化合物, 降低其生物活性, 但该效应受植物磷吸收效率及根际化学环境制约。当磷供应过量或根际有机酸分泌较弱的情况下, 此时的磷酸根与 Al^{3+} 在细胞壁或液泡中形成不溶性沉淀, 或通过提高根表负电荷密度促进 Al^{3+} 吸附与进入细胞, 加剧细胞结构损伤与生理失衡, 同时, Al 与 PO_4^{3-} 生成的沉淀又会降低磷的可利用性, 造成养分与毒性双重限制^[66]。部分作物 (如大豆、荞麦) 可通过分泌有机酸 (如苹果酸、柠檬酸) 以及磷酸酶等根外分泌物, 共同促进根际磷的释放并络合 Al^[67]。此外, 植物体内的转录因子 (如 PHR1)、膜转运体 (如 PHT1 家族) 以及与 Al 响应相关的基因 (如水稻的 *4CL4/RAL1*) 共同参与调控, 使植物在酸性土壤中维持根系活力与磷利用率^[68]。总体上, 氮素形态通过调节根际 pH、有机酸分泌及氮代谢网络影响 Al 敏感性, 磷素则通过根际络合、体内转运与信号调控改变 Al 活性与养分平衡。

4 土壤铝活化的调控与改良

酸性土壤中活性 Al 累积是限制植物根系发育和生长的关键因素, 调控其活性、降低生物毒性对农业可持续生产与土壤生态稳定至关重要。相关调控策略主要包括: (1) 施用改良材料, 提高土壤 pH 并固定活性 Al, 从源头上抑制 Al 的活化; (2) 强化植物根际调控, 通过有机酸分泌、抗氧化防御及微生物互作提升作物耐 Al 能力; (3) 优化耕作管理, 改善土壤理化性质与结构稳定性, 降低活性 Al 累积风险。

4.1 施用改良材料

无机和有机材料是调控酸性土壤 Al 活化及改善土壤酸化的重要措施。以石灰 (CaO)、白云石 [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] 等为代表的无机改良剂, 通过中和土壤酸度、促进 Al^{3+} 向 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 等难溶形态转化, 在短期内显著降低活性 Al 含量^[69]。然而石灰颗粒易在表层富集, 其溶解与扩散受限, 难以实现深层土壤的调控及持久改良。相比之下, 有机肥富含腐殖质及羧基、羟基等含氧官能团, 可与 H^+ 和 Al^{3+} 形成稳定络合物, 在降低活性 Al 的同时提升 pH 稳定性^[70]。此外, 有机肥的持续分解过程能够释放有机酸和碱性阳离子, 增强土壤缓冲能力与阳离子交换量。长期定位试验结果表明, 以有机肥部分替代化肥不仅可提高养分利用效率, 还能增强土壤结构稳定性与微生物活性, 有效减缓酸化进程并提升作物生产力^[71]。秸秆还田在酸性土壤调控中具有双重效应。一方面, 秸秆富含有机阴离子及盐基离子, 其分解过程中通过脱羧反应消耗 H^+ , 并释放可与 Al^{3+} 络合的有机配体, 能够在短期内提升土壤 pH 并降低 Al 的活

性^[72]。另一方面,该过程受秸秆化学组成及 C/N 比调控,部分低 C/N 比秸秆在快速分解过程中可能促进氮素矿化与硝化作用,增加 NO_3^- 淋失风险,间接加剧酸化^[73]。生物质炭作为秸秆等有机物热解生成的固体产物,在调控土壤活性 Al 含量和改善根际环境方面具有多重功能。其多孔结构与高比表面积赋予良好的阳离子交换能力,可释放盐基离子置换土壤中的 Al^{3+} ,并促进其沉淀为 $\text{Al}(\text{OH})_3$,降低活性 Al 含量^[74]。尽管可溶性有机碳(DOC)可能促进金属迁移,但生物质炭富含的 DOC 以高分子芳香结构为主,与 Al^{3+} 形成稳定络合物并在固相中沉积,减少 Al 的活性与迁移性。部分研究还指出,生物质炭可通过其表面活性位点与 Al^{3+} 竞争吸附,抑制 Al 羟基聚合物的形成,降低活性 Al 对根系的毒害^[75]。

此外,部分新型改良材料也展现出良好应用潜力。碱性硅质材料(如硅酸钠、稻壳灰)不仅可中和土壤酸度、释放盐基离子^[76],还能与 Al^{3+} 形成稳定铝-硅络合物,限制其向植物体内迁移,同时为需硅作物如水稻提供营养支持^[77]。天然高分子材料(如壳聚糖、海藻酸钠)富含羧基、氨基等络合基团,可与金属离子形成稳定络合物,降低 Al 活性^[78],并具备碱性调节能力,可改善根际环境,提高养分转化效率^[79]。

4.2 植物-微生物协同调控

植物与微生物协同调控措施的核心是通过优化根际环境与激活植物防御系统,实现对活性 Al^{3+} 的固定、络合与解毒。在植物层面,筛选和培育耐 Al 作物品种是生物调控的基础途径。耐性作物根系可通过分泌柠檬酸、苹果酸等低分子有机酸,将 Al^{3+} 螯合于根表,限制其跨膜进入,降低细胞毒性,同时部分植物能将进入细胞的 Al^{3+} 结合于细胞壁或转运至液泡中,实现亚细胞水平的隔离固定^[80]。这些过程由一系列关键基因与调控元件共同控制,其中 ALMT 与 MATE 家族转运蛋白介导有机酸的跨膜分泌,其上游转录因子 STOP1 和 ART1 可调节相关基因的表达强度,从而构建植物对 Al 胁迫的主动防御体系^[81]。通过分子育种和基因编辑等技术手段导入这些耐 Al 位点,已成为当前提升作物抗 Al 的有效策略。在根际生态层面,功能性微生物的调控作用同样关键。丛枝菌根真菌、解磷细菌及芽孢杆菌等通过分泌有机酸、胞外多糖及特定酶类,调节根际 pH 并促进 Al^{3+} 的络合与沉淀,降低其活化与迁移能力^[82]。此外,微生物还会诱导植物抗逆相关基因表达,提升抗氧化系统活性,增强根系对 Al 毒的耐受性。近年来,利用功能菌剂接种、绿肥或生物质炭协同施用等综合生物管理措施,显著优化了根际微生物群落结构,增强其稳定性与代谢功能,实现对 Al^{3+} 活性的长期抑制^[83]。这类以植物-微生物互作为核心的调控路径,不仅能够降低 Al 的生物有效性,还能通过促进养分循环与改善土壤结构,为酸性土壤的可持续治理提供绿色和系统性的解决方案。

4.3 耕作与管理措施

通过优化耕作制度、轮作方式以及作物覆盖管理,可显著改善土壤理化与生物环境,减轻植物对 Al 毒害的响应风险^[84]。保护性耕作(如少耕或免耕)能够减少土壤扰动,维持团聚体结构稳定,促进有机质积累和阳离子交换容量的提升,增强土壤对游离态 Al^{3+} 的吸附与络合能力,改善土壤的酸碱缓冲特性和养分保持能力。不同的覆盖作物(浅根和深根作物)在调控根际环境和 Al 活性方面存在差异性。浅根作物(如豆科绿肥)主要在耕层发挥作用,其根系分泌的有机酸、酚酸及多糖类物质能够调节根际 pH,并提供可与 Al^{3+} 络合的有机配体,降低其生物有效性^[85]。浅根作物残体腐解后进一步增强土壤有机质和盐基离子供给,有助于 pH 稳定。相较之下,深根作物(如油菜、紫花苜蓿等)则具有更强的垂直穿透能力,可突破浅层致密障碍并改善下层土壤的通气与水分分布,其深层根际促进氧化还原环境稳定化与微界面碳输入,增强下层土壤中 Al 与有机质或矿物表面的结合,推动活性态 Al 向络合态或沉淀态转化^[86]。此外,保护性耕作与有机质还田相结合可显著提高有机碳稳定性并限制酸性离子迁移,为 Al 固定提供持续的有机配体来源。就微生态角度而言,耕作与覆盖措施还能通过重塑微生物群落结构,促进具有 Al 耐受和固碳功能的微生物增殖,这些微生物分泌的代谢产物可与 Al 形成难溶络合物,抑制其迁移与毒性释放^[87]。施肥管理同样是不可忽视的调控环节。合理控制氮肥施用量并优化氮源结构,有助于减缓酸化进程。相较单施化肥,

配施有机肥或秸秆还田可通过补充碱性阳离子、增强缓冲能力及改善根际环境,降低活性 Al 的生物有效性。整体上,耕作制度、施肥方式与有机物料管理的协同优化,可通过结构、化学与生物过程的耦合作用,实现酸性土壤中 Al 活性的持续钝化与毒害风险的有效缓解。

5 结论与展望

尽管关于酸性土壤 Al 活化及其生态效应的研究取得了一定进展,但在界面过程解析与生态过程耦合等方面仍存在诸多亟待深入的问题。酸化驱动下 Al 活化的矿物-有机界面反应机制仍缺乏原位尺度证据。现有研究多依赖化学提取方法推断 Al 形态变化,难以准确反映其配位结构及界面反应路径,未来研究可利用高分辨光谱技术(如同步辐射)、固体核磁共振等先进表征技术,从分子尺度解析酸化过程中 Al 的配位环境变化及其释放-再固定机制。Al 形态转化与土壤生态过程之间的耦合关系仍有待系统研究。酸化不仅改变矿物界面反应,还会通过影响微生物群落结构和植物根际过程,形成复杂的生态反馈机制。未来应加强矿物界面、微生物群落与植物根际过程的多尺度协同研究,以构建酸化驱动下 Al 活化的生态过程框架。酸性土壤改良研究需从单一措施向综合调控转变。在化学改良材料、有机物料投入及植物-微生物互作等多种措施的基础上,结合长期定位试验与模型模拟,系统评估不同调控策略对土壤酸化进程及 Al 活化风险的长期影响。同时,应开发基于 pH、Al 形态和生态风险的监测预警体系,结合大数据、过程模型和区域管理措施,形成适用于不同酸化程度土壤的分区分类治理策略。

参考文献 (References)

- [1] Zou H Y, Li W F, Guo X, et al. Spatial heterogeneity of soil acidification driven by cropping patterns and soil types in red soil dryland of Southern China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2025, 170: 127783.
- [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] Zuo W G, Yi S Q, Gu B X, et al. Crop residue return and nitrogen fertilizer reduction alleviate soil acidification in China's croplands[J]. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(11): 3144-3155.
- [4] Zhao X Q, Chen R F, Shen R F. Coadaptation of plants to multiple stresses in acidic soils[J]. *Soil Science*, 2014, 179(10/11): 503-513.
- [5] FAO. Fertilizer use (kg per hectare of arable land)-China[EB/OL]. <https://openknowledge.fao.org/bitstreams/cd12276d-6933-4971-8fb9-b577c8bfd5c/download>. [2020-12-31].
- [6] Wang C, Zheng M M, Song W F, et al. Impact of 25 years of inorganic fertilization on diazotrophic abundance and community structure in an acidic soil in southern China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 113: 240-249.
- [7] Deng M H, Ma H, Sadeghpour A, et al. Responses of crop production and soil health to chemical nitrogen fertilization in a maize-wheat rotation system[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11: 1108288.
- [8] 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.
- [9] Cui J Q, Li H B, Shi Y, et al. Influence of soil pH and organic carbon content on the bioaccessibility of lead and copper in four spiked soils[J]. *Environmental Pollution*, 2024, 360: 124686.
- [10] Qi Q, Hu C X, Lin J H, et al. Contamination with multiple heavy metals decreases microbial diversity and favors generalists as the keystones in microbial occurrence networks[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 306: 119406.
- [11] Xu R K, Li J Y, Zhou S W, et al. Scientific issues and controlling strategies of soil acidification of croplands in China[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 160-167. [徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 160-167.]

- [12] Xu Y, Yu Z H, Li Y S, et al. Research progresses on soil acidification and its effects on soil-microorganism-crop systems in agricultural soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(2): 562-572. [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.]
- [13] Xia H, Riaz M, Zhang M Y, et al. Biochar increases nitrogen use efficiency of maize by relieving aluminum toxicity and improving soil quality in acidic soil[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 196: 110531.
- [14] Xu R K. Research progresses in soil acidification and its control[J]. Soils, 2015, 47(2): 238-244. [徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 238-244.]
- [15] 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.]
- [16] Li A W, Li C J, Zhang Y Y, et al. The driving factors and buffering mechanism regulating cropland soil acidification across the Sichuan Basin of China[J]. Catena, 2023, 220: 106688.
- [17] Wang P S, Xu D H, Lakshmanan P, et al. Mitigation strategies for soil acidification based on optimal nitrogen management[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2024, 11(2): 229-242.
- [18] Shi R Y, Liu Z D, Li Y, et al. Mechanisms for increasing soil resistance to acidification by long-term manure application[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 185: 77-84.
- [19] Xu R K, Li K W. Researches on soil acidification and its regulation focusing on aluminum chemical behaviors[J]. Soils, 2025, 57(6): 1252-1261. [徐仁扣, 李科伟. 基于铝化学行为的土壤酸化与调控研究[J]. 土壤, 2025, 57(6): 1252-1261.]
- [20] Tao L, Li F B, Liu C S, et al. Mitigation of soil acidification through changes in soil mineralogy due to long-term fertilization in Southern China[J]. Catena, 2019, 174: 227-234.
- [21] Xu R K, Zhao A Z, Ji G L. Effect of low-molecular-weight organic anions on surface charge of variable charge soils[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2003, 264(2): 322-326.
- [22] Li K W, Xu R K. Role of carbon cycle in soil acidification and its inhibition[J]. Soils, 2025, 57(3): 485-497. [李科伟, 徐仁扣. 碳循环在土壤酸化与调控中的作用[J]. 土壤, 2025, 57(3): 485-497.]
- [23] Tao R H, Hu J Y, Bao G L, et al. A review of the present situation and harm of farmland soil acidification and its control measures in South China[J]. Ecological Science, 2025, 44(2): 271-279. [陶荣浩, 胡婧怡, 鲍广灵, 等. 我国南方农田土壤酸化现状和危害及防治措施综述[J]. 生态科学, 2025, 44(2): 271-279.]
- [24] Li Y Y, Chapman S J, Nicol G W, et al. Nitrification and nitrifiers in acidic soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2018, 116: 290-301.
- [25] Raza S, Miao N, Wang P Z, et al. Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands[J]. Global Change Biology, 2020, 26(6): 3738-3751.
- [26] Hu X Y, Wang Y W, Fang Y W, et al. Research progress on alleviating aluminum stress of soybean in acidic soil[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(33): 4517-4531. [胡湘云, 王奕文, 方幽文, 等. 酸性土壤下缓解大豆铝胁迫的研究进展[J]. 科学通报, 2023, 68(33): 4517-4531.]
- [27] Chen L, Andreas E, Federico B, et al. The need for *operando* modelling of ^{27}Al NMR in zeolites: The effect of temperature, topology and water[J]. Chemical Science, 2023, 14(34): 9101-9113.
- [28] Li K W, Shi Y, Nkoh J N, et al. Effect of coordination structure of aluminum on its activation from minerals and Oxisols during their acidification[J]. Pedosphere, 2024, 34(5): 916-928.
- [29] Prietzel J, Ayala G V, Häusler W, et al. Aluminum speciation in forest soils and forest floor density fractions using synchrotron-based XANES spectroscopy[J]. Geoderma, 2023, 431: 116373.
- [30] Li K W, Xu R K. Effect of aluminum oxides on the activation of aluminum during phyllosilicate minerals and red soil acidification[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(6): 1557-1567. [李科伟, 徐仁扣. 铝氧化物对层状硅酸盐矿物和红壤酸化过程中铝活化的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(6): 1557-1567.]
- [31] 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.

- [32]Regasa A, Haile W, Abera G. Variation in soil acidity across different land uses, soil types and altitudinal gradients in Western Oromia, Ethiopia[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 31565.
- [33]Wang C Q, Kuzyakov Y. Soil organic matter priming: The pH effects[J]. Global Change Biology, 2024, 30(6): e17349.
- [34]Li K W, Lu H L, Nkoh J N, et al. Aluminum mobilization as influenced by soil organic matter during soil and mineral acidification: A constant pH study[J]. Geoderma, 2022, 418: 115853.
- [35]Zhao J Y, Nelson D J. Fluorescence study of the interaction of Suwannee River fulvic acid with metal ions and Al^{3+} -metal ion competition[J]. Journal of Inorganic Biochemistry, 2005, 99(2): 383-396.
- [36]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.
- [37]Fang Z G, Xie J T, Yang Q, et al. Role and mechanism of low molecular-weight-organic acids in enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil[J]. Environmental Science, 2022, 43(10): 4669-4678. [方治国, 谢俊婷, 杨青, 等. 低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4669-4678.]
- [38]Li J Y, Xu R K. Inhibition of acidification of kaolinite and an Alfisol by aluminum oxides through electrical double-layer interaction and coating[J]. European Journal of Soil Science, 2013, 64(1): 110-120.
- [39]Yang J L, Dong Y, Feng W L, et al. Proton production and consumption in red soil critical zone and their environmental effects: A review[J]. Earth Science Frontiers, 2025, 32(3): 231-247. [杨金玲, 董岳, 冯文澜, 等. 红壤关键带质子产生和消耗及其环境效应综述[J]. 地学前缘, 2025, 32(3): 231-247.]
- [40]Luo B L, Li J W, Tang J H, et al. Microtopography effects on pedogenesis in the mudstone-derived soils of the hilly mountainous regions[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 11998.
- [41]Li Z Y, Wang P S, Liu L, et al. High negative surface charge increases the acidification risk of purple soil in China[J]. Catena, 2021, 196: 104819.
- [42]Xie J, Wang D, Chen Y X, et al. Neutral purple soil acidification and mineralogical property changes due to long-term urea application in southwest China[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 244: 106227.
- [43]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.
- [44]Xu M G, Zhou S W, Zhang W J, et al. Long-term soil fertilizer experiments and sustainable agriculture in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(Z1): 395-403. [徐明岗, 周世伟, 张文菊, 等. 我国土壤肥料长期定位试验与农业可持续生产[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(Z1): 395-403.]
- [45]Sun B, Zhu A N, Yao R J, et al. Research progress on barrier remediation technology and productivity enhancement model for fluvo-aquic soil, red soil, and saline-alkali soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1231-1247. [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.]
- [46]Lin Z, Huang Z G, Liao D L, et al. Effects of soil organic matter components and iron aluminum oxides on aggregate stability during vegetation succession in granite red soil eroded areas[J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(9): 2634-2650.
- [47]Wen X C, Li J Y, Song J, et al. Research progress on the acid-base properties of variable charge soils using potentiometric titration[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(4): 910-923. [温晓翠, 李九玉, 宋洁, 等. 电位滴定法研究可变电荷土壤表面酸碱性质的进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 910-923.]
- [48]Tao J J, Fan L C, Jiang T, et al. *In situ* visualization of soil profile acidification and processes following nitrogen fertilization and liming[J]. Geoderma, 2025, 456: 117243.
- [49]Zhang L, Zhang R L, Ma Z Y, et al. Construction strategies and mechanisms of synthetic microbial communities in crop rhizospheres in red soil regions: A review[J]. Soils, 2025, 57(6): 1268-1275. [张理, 张若琳, 马志远, 等. 红壤区作物根际合成菌群构建策略与作用机制[J]. 土壤, 2025, 57(6): 1268-1275.]
- [50]Niu H, Leng Y F, Ran S M, et al. Toxicity of soil labile aluminum fractions and aluminum species in soil water extracts on the rhizosphere bacterial community of tall fescue[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 187: 109828.
- [51]Shi Q H, Liu Y T, Shi A Q, et al. Rhizosphere soil fungal communities of aluminum-tolerant and-sensitive soybean genotypes respond differently to aluminum stress in an acid soil[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 1177.

- [52]Zhao X Q, Aizawa T, Schneider J, et al. Complete mitochondrial genome of the aluminum-tolerant fungus *Rhodotorula taiwanensis* RS1 and comparative analysis of Basidiomycota mitochondrial genomes[J]. Microbiology Open, 2013, 2(2): 308-317.
- [53]Zhao X Q, Shen R F. Aluminum-nitrogen interactions in the soil-plant system[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 807.
- [54]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.
- [55]Ryan P R, Yang J L. Sensing the toxic aluminum cations in acidic soils[J]. Cell Research, 2024, 34(4): 269-270.
- [56]Dhandapani S, Sng Y H, Agisha V N, et al. Mitigating aluminum toxicity and promoting plant resilience in acidic soil with *Penicillium olsonii* TLL1[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1423617.
- [57]Yan J F, Zhu W B, Wu D S, et al. Mechanisms of aluminum toxicity impacting root growth in Shatian pomelo[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(24): 13454.
- [58]Wang J Q, Yu X F, Ding Z J, et al. Structural basis of ALMT1-mediated aluminum resistance in *Arabidopsis*[J]. Cell Research, 2022, 32(1): 89-98.
- [59]Qin L, Tang L H, Xu J S, et al. Cryo-EM structure and electrophysiological characterization of ALMT from *Glycine max* reveal a previously uncharacterized class of anion channels[J]. Science Advances, 2022, 8(9): eabm3238.
- [60]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.
- [61]Tolrà R, Martos S, Hajiboland R, et al. Aluminium alters mineral composition and polyphenol metabolism in leaves of tea plants (*Camellia sinensis*)[J]. Journal of Inorganic Biochemistry, 2020, 204: 110956.
- [62]Huang C F, Ma Y T. Aluminum resistance in plants: A critical review focusing on STOP1[J]. Plant Communications, 2025, 6(2): 101200.
- [63]Zhou X H, Zhou Z Y, Dong Y Q, et al. Effect of plasma membrane H⁺-ATPase on nitrate uptake in rice under aluminum stress[J]. Research Square, 2025, 10: 21203.
- [64]Su C, Wang J B, Feng J, et al. OsAIR3 regulates aluminum tolerance through promoting the secretion of organic acids and the expression of antioxidant genes in rice[J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 618.
- [65]Yang L T, Hu N J, Fu Q X, et al. Effects of aluminum (Al) stress on nitrogen (N) metabolism of leaves and roots in two *Citrus* species with different Al tolerance[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 334: 113331.
- [66]Zhao X Q, Shen R F. Strategies for increasing the utilization of nitrogen and phosphorus by plants under aluminum stress[J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(10): 1583-1589. [赵学强, 沈仁芳. 提高铝毒胁迫下植物氮磷利用的策略分析[J]. 植物生理学报, 2015, 51(10): 1583-1589.]
- [67]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.
- [68]Xiao X, Hu A Y, Dong X Y, et al. Involvement of the 4-coumarate: Coenzyme A ligase 4CL4 in rice phosphorus acquisition and rhizosphere microbe recruitment via root growth enlargement[J]. Planta, 2023, 258(1): 7.
- [69]Zhang H Z, Yang J L, Zhang G L. Research progresses on acidification processes and integrated management of red soils[J]. Soils, 2025, 57(6): 1228-1241. [张昊哲, 杨金玲, 张甘霖. 红壤酸化过程与综合治理研究进展[J]. 土壤, 2025, 57(6): 1228-1241.]
- [70]Liu J A, Shu A P, Song W F, et al. Long-term organic fertilizer substitution increases rice yield by improving soil properties and regulating soil bacteria[J]. Geoderma, 2021, 404: 115287.
- [71]Zhu Y H, Yin J, Ma Z H, et al. Effect of organic fertilizer replacing nitrogen fertilizer on major grain yield in China[J]. Environmental Science, 2025, 46(1): 478-488. [朱银浩, 尹娟, 马正虎, 等. 有机肥代替氮肥对中国主要粮食产量的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(1): 478-488.]
- [72]Islam M U, Guo Z C, Jiang F H, et al. Does straw return increase crop yield in the wheat-maize cropping system in China? A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2022, 279: 108447.
- [73]Liang F, Li B Z, Vogt R D, et al. Straw return exacerbates soil acidification in major Chinese croplands[J]. Resources,

- Conservation and Recycling, 2023, 198: 107176.
- [74] Bolan N, Sarmah A K, Bordoloi S, et al. Soil acidification and the liming potential of biochar[J]. Environmental Pollution, 2023, 317: 120632.
- [75] Singh H, Northup B K, Rice C W, et al. Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: A meta-analysis[J]. Biochar, 2022, 4(1): 8.
- [76] Hu J Y, Tao R H, Xie X Y, et al. Basal application combined with topdressing and foliar application of silicon and selenium fertilizers reduces soil cadmium and lead bioavailability and their translocation to brown rice[J]. Pedosphere, 2025, 35(4): 667-677.
- [77] 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.
- [78] Zhao X L, Wang X J, Lou T. Preparation of fibrous chitosan/sodium alginate composite foams for the adsorption of cationic and anionic dyes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403: 124054.
- [79] Balusamy S R, Rahimi S, Sukweenadhi J, et al. Chitosan, chitosan nanoparticles and modified chitosan biomaterials, a potential tool to combat salinity stress in plants[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 284: 119189.
- [80] Che J, Zhao X Q, Shen R F. Molecular mechanisms of plant adaptation to acid soils: A review[J]. Pedosphere, 2023, 33(1): 14-22.
- [81] Hu Z K, Delgado-Baquerizo M, Fanin N, et al. Nutrient-induced acidification modulates soil biodiversity-function relationships[J]. Nature Communications, 2024, 15: 2858.
- [82] Duan S L, Feng G, Limpens E, et al. Cross-Kingdom nutrient exchange in the plant-arbuscular mycorrhizal fungus-bacterium continuum[J]. Nature Reviews Microbiology, 2024, 22(12): 773-790.
- [83] Woo S L, Hermosa R, Lorito M, et al. *Trichoderma*: A multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture[J]. Nature Reviews Microbiology, 2023, 21(5): 312-326.
- [84] Li J Y, Cheng H, Liang X M, et al. Research progress of acidified soil amelioration and carbon sequestration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7871-7884. [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, 44(17): 7871-7884.]
- [85] Cao W D, Zhou G P, Gao S J, et al. Effects and mechanisms of green manure on endogenous improving soil health[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(7): 1274-1283. [曹卫东, 周国朋, 高嵩涓, 等. 绿肥内源驱动土壤健康的作用与机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1274-1283.]
- [86] Poeplau C, Don A, Schneider F. Roots are key to increasing the mean residence time of organic carbon entering temperate agricultural soils[J]. Global Change Biology, 2021, 27(19): 4921-4934.
- [87] Zhao X Q, Li Y, Liu Y L, et al. Red-yellow soil aggregates-organic matter-microbes interactions for synergistic acid reduction and fertility improvement: A review[J]. Soils, 2025, 57(6): 1285-1292. [赵学强, 李渝, 刘彦伶, 等. 红黄壤团聚体-有机质-微生物互作与降酸培肥研究进展[J]. 土壤, 2025, 57(6): 1285-1292.]

(责任编辑: 陈荣府)