

刘娇娴,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.

LIU J X,CUI J,LIU H B,et al.Research progress of soil amelioration of acidified soil by soil amendments[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2022,12(1):173-184.

土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展

刘娇娴^{1,2},崔骏²,刘洪宝²,潘琦^{1,2},何小松^{1,2*}

1.桂林理工大学环境科学与工程学院

2.中国环境科学研究院

摘要 推进酸化土壤改良,提高农业生产力是实现作物提质增收和发展绿色农业的重要任务。土壤改良剂具有降低土壤酸度、增加土壤养分、优化土壤结构、提高微生物活性、改善土壤微环境等作用,在修复酸化土壤方面具有重要意义。基于上述背景,从离子迁移转化角度阐明土壤酸化成因,总结酸性改良剂分类、作用机理、改良效果及其对作物长势的影响;指明现有改良剂在酸化土壤改良方面存在的问题,提出新型土壤改良剂研发方向以及在应用过程中的关键影响因素;最后对改良剂未来发展趋势进行展望,以期土壤改良剂的研发和制备提供借鉴。

关键词 土壤改良剂;酸化土壤;酸化原因;土壤结构;提质增收

中图分类号:X53 文章编号:1674-991X(2022)01-0173-12 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20210119

Research progress of soil amelioration of acidified soil by soil amendments

LIU Jiaoxian^{1,2}, CUI Jun², LIU Hongbao², PAN Qi^{1,2}, HE Xiaosong^{1,2*}

1.College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology

2.Chinese Research Academy of Environmental Sciences

Abstract Improving acidified soil to improve agricultural productivity is an important task for improving crop quality, income and developing green agriculture. Soil amendments can reduce soil acidity, increase soil nutrients, optimize soil structure, enhance microbial activity, and improve soil microenvironment, which are of great significance in remediation of the acidified soil. The causes of soil acidification in terms of the ion migration and transformation were expounded, and the classification, action mechanism, improvement effect of the soil amendments and their influence on crop growing were summarized. The existing problems of the soil amendments in terms of acidified soil improvement was pointed out. The research and development directions of new-type soil amendments as well as the influencing factors in their applications were put forward. Finally, the future development trends of the soil amendments were prospected, which could provide reference for the research, development, and preparation of the soil amendments.

Key words soil amendment; acidified soil; acidification reason; soil structure; improve crop quality and yield

人口的快速增长和对自然资源的过度开发与索取,带来耕地面积缩减、土地肥力降低、土壤酸化等一系列土壤环境问题^[1]。其中土壤酸化是指土壤无机碱性组分与无机强酸组分差值的减少,即酸中和容量减少导致的酸度上升。我国土壤酸化面积达 $2.04 \times 10^8 \text{ hm}^2$,约占全国土地总面积的22.7%,酸化率从 $2.6 \text{ keq}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (以 H^+ 计,全文同)增至 $7.6 \text{ keq}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[2-3]。大气酸沉降过程和化肥过量施用是造成土壤酸化的主要成因。针对我国南方地区

大范围酸雨导致土壤酸化的问题,在2007年国务院颁布的《国家环境保护“十一五”规划》^[4]中,明确限制 SO_2 排放。随着土壤酸化问题越来越受到重视,现行的《土壤污染防治行动计划》明确指出,可通过减少化肥使用量的方式减缓土壤酸化。但受到可变电荷土壤特性的影响,江西、福建、重庆、广西、湖南、浙江等省(区、市)土壤酸化严重,以1:1型高岭石为代表的矿物含量高,2:1型黏土矿物含量少,导致土壤酸缓冲能力差、易酸化^[2,5]。土壤酸化影响土

收稿日期:2021-04-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFD1101300)

作者简介:刘娇娴(1997—),女,硕士研究生,研究方向为土壤修复,860942228@qq.com

* 责任作者:何小松(1982—),男,研究员,博士,主要从事土壤修复和固体废物处理处置技术研究,hexs82@126.com

壤物理、化学和生物性质,降低土壤质量,抑制作物生长,降低作物产量^[6]。因此,改善我国土壤酸化现状具有重要现实意义。

添加土壤改良剂是缓解土壤酸化的有效措施之一^[7]。土壤改良剂指的是能改善土壤物理、化学和生物特性的一类化合物^[8],如石灰类、矿物和工业副产品、有机物料和生物质炭等^[9],具有提升土壤 pH、改善土壤结构、减少养分流失、优化微生物种群结构等功能,并且有助于构建适宜植物生长的微环境。同时土壤改良剂的制备促进工农业废物的资源化利用,助推绿色生态农业高质量发展。笔者从离子平衡和迁移转换的角度分析土壤酸化原因,总结酸化土壤改良剂分类、作用机理、改良效果,阐述其对作物品质和产量的影响,并对新型土壤改良剂未来研发方向进行展望。

1 土壤酸化原因

自然和人为因素共同影响土壤中离子的迁移转换过程,其中氢离子(H⁺)和盐基离子(K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺)在土壤环境中的迁移转化是影响土壤酸化的根本原因。H⁺浓度升高,导致土壤酸中和容量降低,加剧酸化;盐基离子浓度降低,导致土壤胶体质子置换容量和酸缓冲能力降低^[10]。

可从 H⁺和盐基离子迁移转化角度解析土壤酸化原因(图 1)。大气中酸性物质(NO_x、SO_x)和水蒸气发生反应,生成 HNO₃ 和 H₂SO₄,其在大气湿沉降作用下进入土壤;此外,NO_x、SO_x 等酸性物质在大气干沉降作用下进入表层土壤,与水发生反应生成

HNO₃ 和 H₂SO₄ 等酸性物质,在干、湿沉降共同作用下,土壤酸度缓慢提升^[6]。此外,化肥的过度施用也会提升土壤酸度。肥料中含有大量尿素,其发生氨化反应,生成 NH₄⁺和 OH⁻[式 (1)],产生的 NH₄⁺分解,生成挥发态 NH₃ 和 H⁺[式 (2)]。同时,NH₄⁺发生硝化反应,生成 H⁺和 NO₃⁻[式 (3)],NO₃⁻发生反硝化生成 N₂ 及其被植物进一步吸收的过程,消耗 H⁺[式 (4)~式 (5)]。当氮肥施加过量时,植物吸收土壤环境中残余的 NH₄⁺,将其转化成氨基酸,提升土壤中 H⁺浓度[式 (6)]^[11-12];表层土壤吸收空气中的 CO₂,与水反应转化成 HCO₃⁻和 H⁺;植物根部分泌产生柠檬酸、阿魏酸和苹果酸等有机酸,易发生解离,产生 RCOO⁻和 H⁺。上述过程形成的 HCO₃⁻和 RCOO⁻易随盐基离子淋溶流失,造成土壤 H⁺累积,酸度提升^[13-14]。最后,土壤中有机的硝化和氧化、金属离子络合、还原性物质(H₂S 和 Fe₂S₃)氧化等过程,均会提升土壤酸度。此外,作为土壤的主要组成部分,盐基离子具有显著的酸缓冲特性^[15],在植物吸收、盐基离子置换和降水淋溶等作用下,导致盐基离子流失,降低土壤盐基饱和度和土壤酸缓冲性能,提升土壤酸度。植物生长发育过程吸收大量盐基离子并将其储存在植物器官内部,若植物残体不进行还田处理,会导致土壤盐基离子浓度降低,长此以往造成土壤酸化。当土壤 H⁺和 Al³⁺浓度上升时,土壤胶体交换位点的盐基离子被 H⁺和 Al³⁺置换到土壤淋溶液中,易随降水淋溶流失,提升土壤酸度^[16-19]。总之,外源 H⁺浓度升高和土壤盐基离子浓度降低,共同造成土壤酸化。

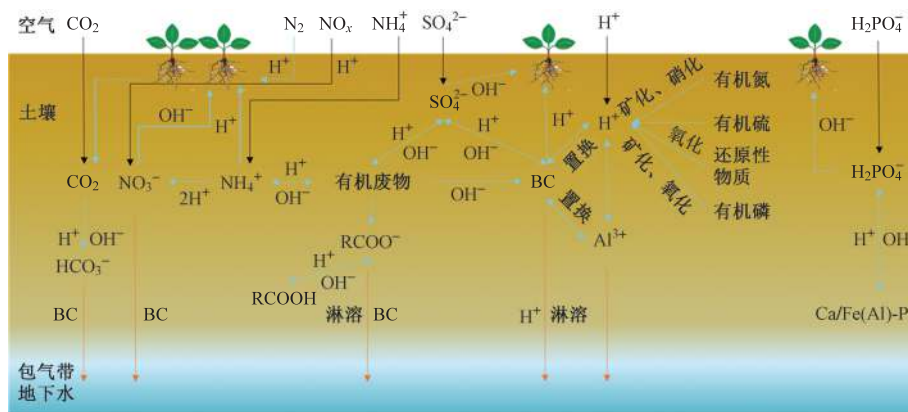
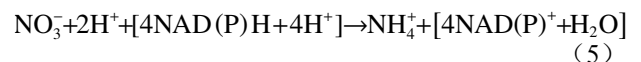
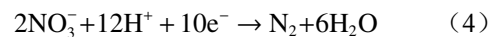
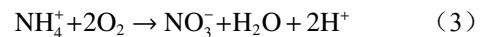
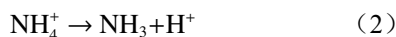
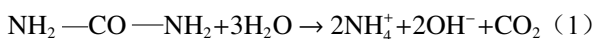


图 1 土壤酸化成因^[20-21]

Fig.1 Causes of soil acidification

土壤酸化反应式如下:





2 土壤改良剂的种类、功能及其应用

土壤改良剂又称土壤调理剂, 广义上指能改良和调节土壤理化性质的一类物质, 狭义上指加入土壤中用于改善土壤物理、化学、生物活性的物质。按原料来源可分为天然改良剂、人工合成改良剂、天然-合成共聚物改良剂和生物改良剂^[22]; 按用途可分为针对酸化土壤、盐碱地、防止土壤退化、防治土

壤侵蚀、降低土壤重金属污染等方面的改良剂; 按性质可分为酸性土壤改良剂、碱性土壤改良剂、营养型土壤改良剂、有机物土壤改良剂、无机物土壤改良剂和生物制剂改良剂等。酸性土壤改良剂可分为石灰类改良剂(石灰石、白云石等), 矿物和工业副产品(磷石膏、碱渣、粉煤灰等), 有机物料改良剂(秸秆、腐熟粪便等), 新型改良剂(聚丙烯酰胺、丛枝菌根真菌等)^[23](表 1), 目前使用较多的有石灰、粉煤灰和生物质炭^[24]。

表 1 常见酸性改良剂的优缺点^[9]

Table 1 Advantages and disadvantages of common acidification amendments

改良剂	物质组成	优点	缺点
石灰类	石灰石、生石灰、熟石灰、白云石等	酸度改良见效快、效果好; 增加土壤钙、镁浓度	亚表层酸度改良不佳; 易造成土壤板结; 用量大, 运输成本高
矿物和工业副产品	硅酸钙粉、磷石膏、碱渣、粉煤灰等	酸度改良效果好; 提供土壤无机养分	易导致重金属风险; 有机质含量低
有机物料	秸秆、腐熟粪便、堆肥产品等	增加土壤有机质、微生物和酶活性; 改善土壤物理性质	排放温室气体; 养分淋溶流失; 需与化肥配施; 需多次施用
生物质炭	生物炭、改性生物炭	无机养分较多; 增加微生物和酶活性; 固碳	排放温室气体; 养分淋溶流失; 有机质含量低; 团聚性改善效果不佳; 成本高; 长期研究不足

酸性土壤改良剂在调节土壤 pH 的同时, 具有改善土壤其他理化性质的作用: 1) 提供植物所需养分, 有效抑制养分迁移, 提升养分有效性^[25]。如 Masud 等^[26]以石灰、鸡粪、生物质炭为土壤改良剂, 不仅将土壤 pH 提高了 0.29~1.20、交换性酸度降低 29.34%~66.23%, 同时提高土壤碱解阳离子和有效磷浓度, 提高玉米产量。2) 降低土壤容重, 增加土壤孔隙, 提升土壤团聚性, 改善土壤结构, 提高土壤透气性、保水性, 促进作物对水分和营养物质的吸收。如 Bossolani 等^[27]将磷石膏和石灰配施加入土壤, 发现增加了真菌的丰富度和土壤有机碳含量, 同时促进大团聚体的形成, 降低土壤堆积密度, 增加土壤孔隙度, 提高玉米和芸苔产量。3) 影响土壤生物丰富度和多样性, 有效防治病虫害和增加养分有效性, 改善作物生长环境, 提高植物生产力, 达到增产提质的目的。如 Markakis 等^[28]发现堆肥使土壤酚类化合物浓度提高了 3.7~4.4 倍, 抑制了镰刀菌和黄萎病菌丰度, 增加了黄瓜和茄子的鲜重。4) 能通过提高土壤 pH、增加吸附位点数量促进重金属络合和沉淀, 降低重金属的生物有效性, 减少对作物的危害^[29-30]。如 Huang 等^[31]将无机和有机改良剂配施加入受重金属污染的酸性土壤, 使 pH 提高了 1.99~3.32, Cd、Pb、Cu 和 Zn 等土壤提取态浓度降低, 提升了土壤呼吸及细菌的多样性, 促进了葛苣的生长, 降低植物根和茎中 Cd、Pb、Cu 和 Zn 浓度。

3 土壤改良剂的作用原理

3.1 土壤改良剂对土壤化学性质的影响

3.1.1 对土壤酸度的影响

土壤酸度分为活性酸度和潜性酸度, 土壤溶液中 H^+ 浓度代表活性酸度 (pH), 土壤胶体上吸附态的可交换性 H^+ 和 Al^{3+} , 在离子交换作用下进入淋溶液中的酸度为潜性酸度。酸度是影响土壤环境质量, 限制作物产量的重要指标之一^[32]。通常酸化土壤中含有高浓度的 H^+ 和 Al^{3+} , 影响土壤中氧化还原、吸附解吸、沉淀溶解、络合等一系列化学反应的进行。高浓度的 H^+ 和 Al^{3+} 抑制植物根部细胞分裂、伸长和膜运输^[33], 打破植物内部激素平衡^[34-36], 抑制植物生长发育, 降低作物产量和品质。酸性土壤改良剂通过降低土壤 H^+ 和 Al^{3+} 浓度改善土壤酸环境, 其机理如图 2 所示。

酸性土壤改良剂富含碱性组分, 降低土壤溶液中 H^+ 和 Al^{3+} 浓度以及固相中交换性氢和铝含量, 达到改善土壤酸度的目的。其作用机理如下: 石灰类、生物质炭和有机改良剂富含 OH^- 、 CO_3^{2-} 、有机阴离子、氧化物等碱性组分, 易与土壤溶液中 H^+ 发生中和、复分解等反应, 产生 H_2O 和 CO_2 ^[37], 提高土壤 pH。pH 升高促进土壤溶液中 Al^{3+} 发生聚合、沉淀、配合和水解等一系列反应, 转化为低毒的 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、有机和无机铝配合物^[38], 降低 Al^{3+} 浓度; 生物质炭表面羟基、羧基官能团吸附溶液中单体铝 (Al^{3+} 为主要存在形态) 发生酯化反应, 形成有机复合

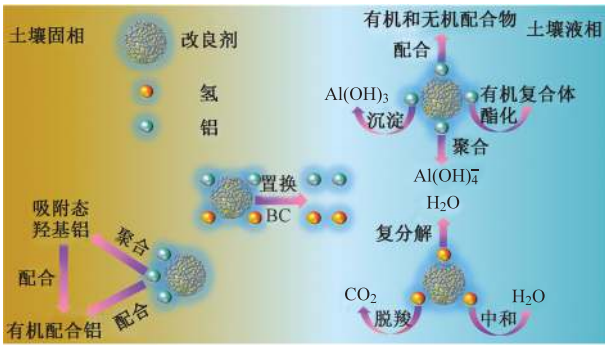


图 2 土壤改良剂改善土壤酸环境机理

Fig.2 Mechanism of soil amendments to improve soil acid environment

体, 硅酸盐与 Al^{3+} 共沉淀, 生成 $KAlSi_3O_8$ 等化合物^[39], 降低土壤酸度; 磷石膏中富含 SO_4^{2-} , 作用于土壤胶体交换出 OH^- 产生石灰效应, 有机质分解过程中, 有机氮在氨化作用下产生 OH^- , 中和 H^+ 和 Al^{3+} 酸度^[40]; 改良剂中碱基阳离子也能将土壤溶液中 H^+ 和 Al^{3+} 置换到土壤胶体表面, 降低酸度。Butterly 等^[41] 以有机物料为改良剂, 发现有机氮在氨化作用下产生 OH^- , 降低 H^+ 和 Al^{3+} 浓度, 改善了土壤酸度。改良剂还能降低土壤固相中交换性氢和铝含量, 改善土壤酸环境。交换态铝以 Al^{3+} 为主要形态, 吸附在土壤黏粒或胶体表面。改良剂促进土壤溶液中 Al^{3+} 或胶体表面交换性铝聚合生成吸附态羟基铝, 交换态铝、羟基铝有机质配合成有机配合态铝^[38], 降低潜在酸度。Elisa 等^[42] 发现硅酸钙中单硅酸形式硅吸附土壤表面交换性铝, 形成稳定化合物, 减少 Al^{3+} 溶出, 实现改良酸性土壤的目的。

改良剂种类、剂量和联合配施方式是影响土壤酸环境的重要因素。粪肥中腐殖质类物质富含羧基、酚基、烯基等官能团, 比秸秆消耗更多质子^[43], 而石灰和工业副产品碱度比有机改良剂高^[44]。因此, 改良剂改善酸度效果遵循粪肥>作物残渣、无机改良剂>有机改良剂。通常改良剂剂量和改善效果

呈正相关。Raboin 等^[45] 把生物质炭、白云石加入酸性土壤, 发现土壤 pH 随改良剂用量增大而增大, 且土壤 pH 提升至 5 以上。2 种及 2 种以上有机改良剂和无机改良剂配施是近期研究热点和研究趋势。如 Zhao 等^[44] 将油菜、花生秸秆与碱性矿渣共同加入酸性土壤, 发现复合改良剂对土壤 pH 和有机质含量提升效果明显, 促进 Al^{3+} 转化为羟基铝、氢氧化铝和无毒性有机复合体。Shi 等^[46] 配施生物灰分、骨粉和碱渣改良酸性土, 发现复合改良剂使 pH 升高 0.63~1.37, 且 3 种改良剂联合施用效果最佳, 交换性酸度下降 80.1%~96.9%。

改良剂在改善土壤环境酸度方面也存在一定负面影响。石灰类改良剂因溶解度低, 在土壤垂直剖面移动速度缓慢, 对土壤亚表层酸度改良效果不佳, 同时易复酸且酸化程度严重^[47]。磷石膏还会增加土壤溶液可溶性 Al 浓度, 促进低毒 Al 向高毒 Al 转化^[48]。此外, 生物质炭、有机物料和石灰等改良剂用量大, 需多次施用和混施化肥, 成本较高, 但高施用量不能大幅提高土壤 pH。因此, 要综合考虑改良效果, 选取最适改良剂。目前改良剂类别、剂量、投加方法和联合配施方式的研究较为深入, 但土壤类型、植物种类和其他影响因素的研究还远远不够, 不同条件下, 土壤、微生物、植物和改良剂间作用方式有较大差异。因此, 应开展长期的大田试验, 综合考虑多因素系统评价改良剂效果, 为土壤改良剂的广泛应用提供科学依据。

3.1.2 对土壤养分的影响

土壤养分是植物生长发育的必需条件之一, 其含量与土壤肥力密切相关。酸化增加土壤胶体正电荷, 土壤逐渐呈正电性, 在静电作用下减少吸附碱基阳离子, 易使养分随降水淋溶, 故酸化土壤养分含量低。改良剂通过补充养分和提升养分固持力增加土壤养分(图 3), 减缓土壤酸化进程, 为植物生长提供营养, 增加作物产量, 提升作物品质。

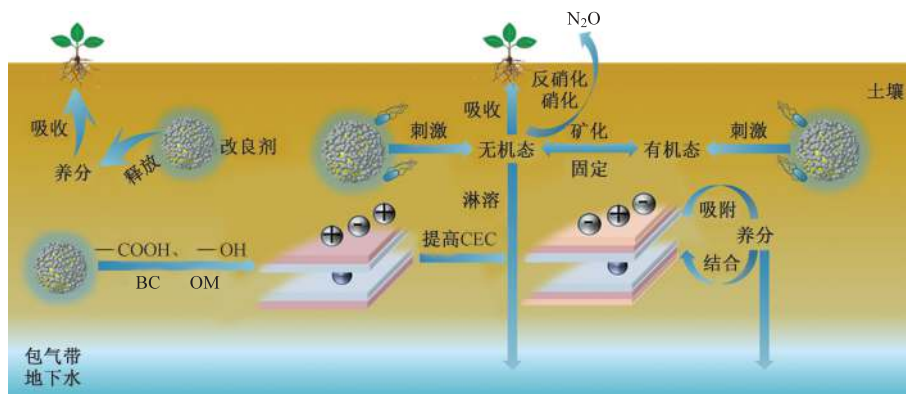


图 3 土壤改良剂改善养分机理

Fig.3 Mechanism of soil amendments to improve nutrients

改良剂富含植物生长发育必需的大量、中量和微量元素,其加入土壤会增加养分含量,其养分含量影响土壤养分的增加程度。Dai等^[49]由文献总结提出,原料组成、热解温度控制生物质炭养分含量,表现为粪肥来源>木材来源>草料来源,热解温度高,原料中碳、氮等物质易挥发,养分含量较低。同时,有机物料改良剂富含Ca、Mg、N、P及K,粉煤灰富含B、Mo及Se,堆肥改良剂含有Mn、Zn及Cu等,加入土壤均能提高土壤对应的养分,促进植物生长。Mahmood等^[50]把羊粪、农家肥和猪粪加至土壤,增加了土壤总氮、总磷、全钾和土壤有机碳含量。Crusciol等^[51]以磷石膏、石灰和硅酸盐为改良剂,提高了土壤全剖面K、Ca、Mg、NO₃⁻和SO₄²⁻含量,改善了早稻生长条件。改良剂可提高土壤阳离子交换量(CEC),增加养分固持力,降低养分淋失。石灰和钙-蒙脱石富含盐基离子,减少碱基阳离子置换出土壤胶体,增加CEC^[40]。有机改良剂能补充土壤有机质,提高CEC,还能通过无机氮转为有机氮形式,在微生物矿化下分解有机氮,减少淋溶氮,增加养分利用率^[52]。矿物调理剂将1:1型高岭石转化为呈负电性2:1型伊利石,提高了土壤CEC,进而吸附NH₄⁺,又因与PO₄²⁻结合能力表现为黏土矿物>铝/铁氧化物,也固定了磷^[53]。生物质炭表面富含—O、—OH、—COOH等官能团,其加入可提高土壤CEC。纳米膨润土因带负电荷、比表面积高和活性吸附位点多,既能改善土壤养分保持力,也能充当化肥缓释载体,提高植物养分利用率^[54]。改良剂还能影响微生物活性,增加土壤养分。Plaimart等^[55]发现,生物质炭能降低土壤氨氧化细菌、氨氧化古菌和甲烷氧化菌丰度,抑制土壤硝化作用,减少硝酸盐淋溶。Borchard等^[56]通过文献总结提出,生物质炭影响微生物群落结构,降低土壤硝化/反硝化作用,减少硝酸盐浸出量(13%)和N₂O排放量(38%)。Chen等^[57]发现生物质炭降低了分解有机碳的放线菌、变形菌、厚壁菌和子囊菌的相对丰度,增强了土壤有机-矿物质相互作用,提高了微生物碳利用效率,从而减少土壤碳流失。

此外,改良剂也通过影响土壤酸度、水分等理化性质,增加养分有效性,促进植物生长。Pandit等^[58]将生物质炭加入酸性土壤,结果表明,其既增加土壤pH和水分含量,提高土壤PO₄³⁻、K⁺、Ca²⁺和P-Al浓度,又提升了土壤钾、磷有效性和玉米产量。Yang等^[59]以缓释氮肥为改良剂,改善了土壤理化性质,促进水稻氮素吸收、减少氮淋溶和氮排放,提高叶片中硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶含量,进而增

加土壤氮素有效性和水稻产量。改良剂还能促进土壤有机态氮、磷、钾和碳的矿化作用,增加养分有效性。Ren等^[60]以秸秆和粪肥为改良剂,发现其增加了土壤微生物生物量碳和生物量氮,促进养分转化相关酶的分泌,提高土壤氮、磷和钾的有效性。Zhao等^[61]发现有机改良剂刺激了硝化螺旋菌、假单胞菌和链霉菌生长,增加微生物生物量,进而促进土壤硝化作用和有机质矿化,增加氮、磷有效性和小麦产量。Hou等^[62]发现生物质炭提高硝化螺菌、亚硝化螺菌和亚硝化单胞菌相对丰度,增加了土壤溶解性有机碳、溶解性有机氮和有效磷浓度,从而提升养分有效性。改良剂也能促进有机态磷和无机磷向可溶性磷转化,增加土壤磷有效性。Afkairin等^[63]将溶磷微生物蓝藻加入土壤,发现增加了土壤水溶性磷和交换态磷浓度,提升了磷有效性。

虽然改良剂可增加土壤养分,减少化肥用量,但秸秆和生物质炭可能促进土壤硝化作用和反硝化作用,导致养分随降水淋溶和温室气体排放^[64]。长期大量添加的秸秆若没有分解完全,秸秆残渣促进大团聚体形成,导致土壤孔隙变大,养分易随降水流失。生物质炭还能与土壤养分发生沉淀或吸附反应,降低养分利用率^[65]。此外,工业副产品、粪肥衍生改良剂和新型人工合成改良剂可能造成重金属风险、水体富营养化。因此,为提高改良剂改良效果和提升土壤农业生态系统健康,控制改良剂中有毒有害物质,研发低毒、高效改良剂是未来研究的重点。

3.2 土壤改良剂对土壤物理性质的影响

3.2.1 对土壤结构的影响

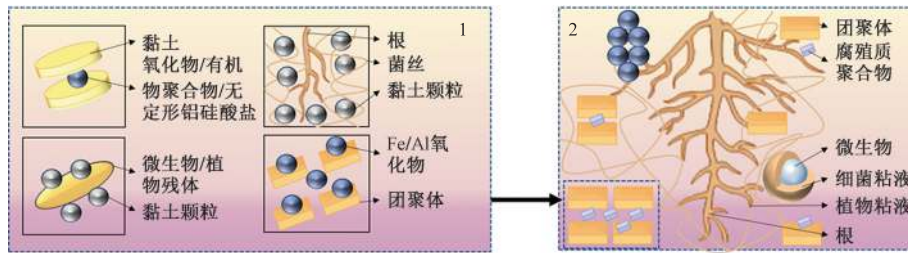
土壤结构指土壤颗粒或团聚体与孔隙组成的三维结构,决定土壤水、肥、气、热贮存和传输。土壤结构主要包括土壤孔隙和土壤团聚体。酸化增加土壤容重,降低土壤孔隙度和田间持水量,导致土壤板结严重,水肥气热通透性极差。改良剂主要通过改善土壤孔隙和土壤团聚性改良土壤结构,促进有机质分解、土壤养分活化、微生物活动和植物根系的伸长。

土壤孔隙指土壤颗粒或团聚体之间的孔隙和团聚体内部的孔隙,影响土壤溶质、水分和气体的迁移转化,也是微生物运动和生存的场所。改良剂通过改变土壤容重、饱和导水率和孔隙分布等影响土壤孔隙,改善土壤结构^[66]。陈丹平^[67]发现以污泥炭和秸秆炭作为改良剂能降低红壤容重,增加土壤总孔隙度,使土质更加疏松,有利于植物吸收养分和水分,并增加小麦产量。改良剂提高土壤孔隙度可归

因其自身多孔性和大比表面积,以及对土壤结构和稳定性的改善^[68]。Hardie 等^[69]发现高孔径生物质炭可填充或调节土壤孔隙,改善土壤团聚体稳定性,增加土壤孔隙度。通常土壤孔隙度随生物质炭含量增加而增大,但其颗粒大小也影响土壤孔隙。Glqb 等^[70]发现沙土中生物质炭使用量越多,土壤堆积密度越低,容重越小,总孔隙度也越高,同时小粒径生物质炭填充土壤孔隙,显著增加了土壤大孔隙(0.5~500 μm)数量,从而提高土壤有效水分和水力传导率,增加土壤保水性。此外,土壤质地也影响土壤孔隙分布,如土壤团聚体总孔隙度与土壤含砂量呈显著正相关,与粉土和黏粒含量呈显著负相关^[71]。

土壤团聚体的数量、分布及其稳定性是目前土壤结构的研究重点,团聚体数量的增加,小、微团聚体向大团聚体的转化,以及团聚体稳定性的增强都会改善土壤结构^[72]。改良剂通过改变土壤有机质、氧化物含量和保水性等影响土壤团聚体,改善土壤结构(图 4)^[73]。有机质和氧化物主要充当团聚体胶结剂,影响土壤团聚体形成和稳定性。Yu 等^[74]研究发现,堆肥可增加微团聚体间有机质含量,促进微团聚体转化为大团聚体,提高土壤几何平均直径和质量平均直径,形成水稳性团聚体。黏质红壤中非晶态 Fe/Al 氧化物、砖红壤中螯合 Al 氧化物也作为胶结剂影响团聚体形成。Yin 等^[73]研究发现,水稳性团聚体、大团聚体数量与 Fe 氧化物含量呈正相关,黏土颗粒边缘氧化物能促进团聚体形成。Du 等^[75-76]研究发现,生物质炭与土壤内源性、外源性矿物作用形成有机矿物复合物,增加土壤团聚性,同时矿物质(Ca、Fe)促进生物质炭表面聚集有机质,进一步增

强团聚体稳定性,改善土壤结构。丛生根也能通过根外菌丝的缠连作用、分泌物的胶合作用,形成微团聚体和大团聚体,增加团聚体稳定性,改善土壤结构^[77]。土壤保水性与土壤含水量(SWC)、水分动力学有关,影响团聚体形成和稳定。当土壤 SWC 较低时,团聚体破碎与土壤崩塌作用有关^[78];而土壤 SWC 较高时,土壤不均匀膨胀制约破碎机制^[79]。水分动力学通常与团聚体稳定性呈负相关。He 等^[80]研究发现,自然降水降低团聚体稳定性。但 Rahman 等^[81]研究发现,密集干湿循环增强团聚体中碳稳定性,促进有机碳作为黏结剂形成水稳性团聚体,增强土壤团聚体稳定性,改善土壤结构。低分子量改良剂更能改善土壤团聚体性质,改良土壤。Albalasmeh 等^[82]研究发现,低分子量聚丙烯酰胺(PAM)因进入团聚体,稳定在土壤内部和外表面,相比高分子量 PAM 更能降低土壤容重、渗透率和饱和导水性,增加土壤保水性,促进水稳性团聚体形成。Zhang 等^[83]研究发现,生物质炭使大团聚体含量增加 19.61%,水稳性团聚体含量增加 27.72%。但石灰类调理剂长期施入土壤造成土壤板结,增加土壤容重,减少土壤孔隙,导致土壤结构变差。生物质炭有机质和氧化物等胶合剂含量少,也可能堵塞土壤微孔,对土壤结构改善效果不佳。目前对土壤结构影响因素已有一定的认识,但不少研究认为,由于研究方法和理论的限制,现阶段土壤结构的研究结果更多取决于选用方法,而非结构本身性质的科学反映。因此,有必要采用新型无损伤技术对团聚体的结构特征进行定量研究^[84]。



注: 1 为微、小团聚体团聚方式; 2 为大团聚体团聚方式。

图 4 土壤团聚体团聚方式^[85]

Fig.4 Mode of soil aggregate formation

3.2.2 对土壤温度的影响

土壤温度影响土壤养分动态循环、水力特性、有机质矿化、微生物活性和植物生长。土壤改良剂通过改变土壤剖面热力传播和土壤表面能量分配等方式改善土壤温度波动。热导率、热扩散率和热容

量是土壤温度的主要反映参数,热导率和热扩散率与温度呈正相关,热容量则与温度呈负相关,受土壤水分、结构、容重和有机质含量的影响^[86]。改良剂改变热导率和热容量,影响土壤剖面热力传播。Obia 等^[87]发现生物质炭能降低土壤密度和容重,增

大土壤孔隙,使孔隙充斥更多空气,从而增加土壤热容量,降低土壤温度;虽然孔隙水含量也会增加,导致热导率升高,提高土壤温度,但前者降低的温度高于后者升高的温度,因此,总体上可降低土壤温度,减少温度波动范围。Zhang 等^[88]发现添加生物质炭降低了土壤容重、热导率和热扩散率,进而降低土壤温度。改良剂也能改变土壤阳光反射率,控制土壤表面能量。颜色较黑的改良剂施入土壤,加深土壤颜色,降低土壤反射率。Oguntunde 等^[89]将木炭加入土壤,发现土壤反射率降低了 37%,土壤温度提高了 4 ℃。Genesio 等^[90]研究发现,在环境温度较低时,添加生物质炭能降低红外波长反射率,增加土壤比热容和导热率,吸收更多热能,提高土壤温度,减少昼夜温差。可见,改良剂即可提高土壤温度,又可降低土壤温度,目前对改良剂改善温度机理的研究尚不深入,应加大研究力度。同时,还需要考虑环境温度,在温度较高时降低土壤温度,反之亦然,从而减少土壤温度波动带来的不利影响。

3.3 土壤改良剂对土壤微生物和酶活性的影响

微生物和酶是土壤环境变化的重要传感器,参与 C、N、P 等元素地球生物化学循环。酸化土壤酸度大、土壤结构差、养分含量和有效性低,影响微生物多样性和酶活性。土壤改良剂通过改变土壤物理、化学性质等方式,为微生物提供适宜生境,提高参数水平(表 2),促进有益、功能性微生物和酶改良土壤。

表 2 微生物测试指标^[91]

Table 2 Microbiological test indicators

微生物/酶	测试指标
微生物	群落结构、丰富性和多样性、总生物量、生物量
酶(碳循环)	β -D-纤维二糖苷酶、 β -葡萄糖苷酶、 β -木糖苷酶、 α -葡萄糖苷酶、转化酶、蔗糖酶、水解酶
酶(氮循环)	脲酶、亮氨酸氨基肽酶、蛋白酶
酶(硫循环)	硫酸酯酶、芳基硫酸酯酶
酶(磷循环)	磷酸单酯酶、碱性/酸性磷酸酶
酶(碳和氮循环)	N-乙酰基- β -氨基葡萄糖苷酶
酶(氧化酶)	过氧化物酶、酚氧化酶、脱氢酶、过氧化氢酶
酶(真菌活性)	几丁质酶

改良剂通过影响土壤物理、化学性质,塑造微生物适宜生境,增加微生物数量和活性。膨润土能提高土壤有机碳、全氮、全磷和水分含量,增加微生物生物量。He 等^[92]研究发现,以生物质炭为改良剂增加了土壤累积孔隙度、孔表面积密度,促进了紧密块

状土壤结构转变为多孔结构(大孔、中孔),为微生物提供栖息地,提高微生物丰富度和多样性。Eibl 等^[93]发现秸秆会刺激微生物活性,增强基质诱导呼吸作用,显著增加微生物生物量。同时,改良剂粒径会影响改良效果,也会影响微生物群落结构,增加有益菌丰度,抑制致病菌数量。Tubieleh 等^[94]研究发现,堆肥可引进多酚毒性化合物,诱导系统抗性,降低黄萎病菌丰度,减少甜椒黄萎病发病率。此外,耕种年限也会影响微生物丰富度和多样性。Rong 等^[95]发现随耕种年限增长,细菌和放线菌的数量和活性增大,并在第 4 年达到最大值。改良剂也会影响土壤理化性质,增加酶活性。Luo 等^[96]研究发现,采用秸秆调节土壤碳磷比(C/P)和微生物生物量氮,会影响分泌磷酸酶的微生物种群结构,与纯矿物施肥相比,可使磷酸酶活性提高 22%~53%。Wang 等^[97]研究发现,腐熟猪粪能改善土壤透气性和保水能力,减少微团聚体数量,促进土壤大团聚体形成,增加大团聚体中 β -葡萄糖苷酶和几丁质酶活性。同时粪肥富含养分且微生物种类丰富,可提供土壤微生物底物,改善根际土壤微生物群落结构,提高土壤酶活性。生物质炭表面维持大多数酶活性,并提供微生物利用养分,增加土壤酶活性。Khan 等^[98]研究发现,大麦秸秆可显著增加革兰氏阳性菌、真菌数量,提高水解酶(碳循环)活性;而豌豆秸秆可增加革兰氏阴性菌丰度,提高蛋白酶、脲酶(氮循环)和磷酸酶(磷循环)活性。

但改良剂也不一定都能增加微生物和酶活性,有时甚至会抑制其活性。Li 等^[99]发现水稻土施用石灰时,因植被过于单一,土壤初始 pH 小于 6.5 及土壤有机碳浓度增幅不大,对真菌多样性和群落结构作用不明显。Zheng 等^[100]研究发现,生物质炭增加了土壤 pH、SOC 和碳氮比(C/N),减少了真菌数量,使子囊菌和担子菌丰度分别降低 11% 和 66%。生物质炭表面官能团还会固定酶底物和胞外酶,影响活性位点上底物与酶结合,降低酶活性。Lin 等^[101]研究发现,以石灰和猪粪改良酸性土壤,可降低固氮菌(偶氮水单胞菌、偶氮螺旋菌)丰富度和多样性,影响土壤固氮能力,降低生物可利用氮含量。李兆林等^[102]发现生石灰可提升土壤 pH,但显著抑制蔗糖酶活性。由于目前分离、检测优势微生物有一定难度,因此开发微生物和酶的高分辨分析检测技术,可为高效优质改良剂研发奠定基础。

4 土壤改良剂对作物产量和品质的影响

作物产量和品质提升是改良剂对酸化土壤物

理、化学和生物性质改变的综合表现。向酸化土壤添加改良剂可增加作物产量。于翔宇^[103]以石灰为改良剂,发现可以减轻土壤酸度,增加竹豆根部表面积、总长度和体积,促进竹豆茎和叶生物量增加。Vidal 等^[104]将蒙脱石和蚯蚓堆肥共同加入土壤,减轻了过量释放可溶性有机碳、无机氮危害植物毒性,同时促进根际微生物固定根源性有机碳,使黑麦草生物量提升了 2.3 倍。Fonte 等^[105]用蚯蚓和石灰改良酸性土壤,发现可增强土壤结构,改善土壤气体交换、水分固定、根系伸长和碳固定,同时促进植物吸收氮,使横卧草生物量增加了 180%。Li 等^[106]发现木质有机改良剂降低了土壤堆积密度和入渗率,增大了土壤总孔隙度和最大持水量等物理特性,增加了微生物呼吸量、微生物生物量碳、纤维素酶和过氧化氢酶活性,进而提升了小麦产量。Bharti 等^[107]发现蓝藻改良剂增加土壤氮和碳有效性,促进植物根际生物膜和土壤多糖、球囊霉素相关土壤蛋白形成,进而增加植物抗氧化酶、防御酶活性,使菊花鲜重增产 35%、花色加深 35%。

土壤改良剂不仅可提高作物生产力,而且还可提升作物品质。Liang 等^[108]将堆肥施入苹果园,提高了土壤 pH、有机质和有效养分含量,减少了芽孢菌属、苯细菌属、硝化螺旋菌属、鞘氨单胞菌属和亚硝化螺旋菌属等可能引起移栽病害的微生物数量,使果实产量、平均重量和可溶性固形物含量分别提高了 9.5%、9.6%、5.6%。陈士更^[109]发现腐植酸调理剂使苹果增产 4.84%,总糖含量提高 9.35%~15.46%,糖酸比也提高了 21.84%~46.58%。Qiu 等^[110]研究发现,生物菌肥可提高木霉菌、芽孢杆菌和链霉菌等有益微生物丰度,抑制镰刀菌数量,提升黄瓜产量,使枯萎病发病率降低 83%。Chen 等^[111]以生物质炭为改良剂,发现可以提高土壤 pH,增加有机碳和有效氮浓度,降低致病雷氏菌数量,增加固碳、固氮潜在有益细菌丰度,显著抑制烟草青枯病发病率,增加烟草产量和品质。Mi 等^[112]研究发现,将膨润土施入土壤可增加土壤水分、有机碳、全氮和全磷含量,促进土壤养分循环及有效性,并提高微生物活性,使微生物生物量碳、氮和磷分别增加 5%~50%、3%~42% 和 3%~34%,同时显著提升了小米的产量和品质。Zhang 等^[113]研究发现,将生物质炭加入橘园土壤可增加土壤有益细菌和腐生真菌丰度,提升柑橘果实品质。

但不合理施用土壤改良剂会减少作物产量,降低作物品质。粉煤灰中硼量较高,若施入含硼量高的土壤,会减弱植物对真菌和细菌等病原菌抗逆性,

极易对植物造成危害。长期大量投加石灰类改良剂,可能引发土壤钾、钙和钠等元素失衡,导致作物减产。堆肥中有效养分含量低,养分常以有机态形式存在,难以被植物利用,投加后短期内对作物生长发育影响不大。Kloss 等^[114]研究发现,生物质炭可促进土壤固氮,减少土壤有效养分含量,但抑制了作物生长,使芥末、大麦和红三叶草产量降低了 68%。Mukherjee 等^[115]研究发现,长期添加生物质炭会造成养分失衡和碱基阳离子过剩,降低蔬菜和谷物的产量。生物质炭还会显著促进杂草生长,与作物竞争吸收更多养分。Safaei 等^[116]发现生物质炭在扁豆栽培期间使杂草产量增加 200%。

5 结论与展望

酸化土壤改良是土壤退化的重点和难点,应用土壤改良剂在降低土壤酸度的同时,可增加土壤养分、优化土壤结构、提高微生物活性、改善土壤微环境,符合资源循环利用和低碳、环保、可持续发展的绿色发展理念。当前,土壤改良剂抑制酸化土壤机理的研究仍不够透彻,施用土壤改良剂后增产提质的效果不太理想。另外,应用土壤改良剂还存在一定的负面影响,如抑制微生物活性,增加温室气体排放、地下水重金属和水体富营养化等环境风险,以及危害植物降低作物产量。

基于上述分析,提出土壤改良剂研究的方向和建议:1)深入详述土壤改良剂作用机理,解析土壤物质转化规律与趋势,构建统计学层面的改良剂-土壤-植物作用关系,为精确研发相应改良剂和提升土壤农业生态系统健康提供科学根据;2)土壤改良剂类别、剂量、投加方法和联合配施方式是研究探讨的热点,但土壤类型、植物种类和环境因素等条件也影响着改良效果。我国土壤改良研究起步较晚,大都局限于短期盆栽试验。因此,建议开展长期大田试验,综合考虑多种条件系统评价改良剂性能,为研发高效改良剂奠定基础。此外,土壤结构定量分析和微生物分离检测方法有限,开发运用高新、高分辨分析技术和研发专一型、多功能型、环保型土壤改良剂,对促进土壤改良剂发展具有深远意义。

参考文献

- [1] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7615-7622.
ZHAO Q G, HUANG G Q, MA Y Q. The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7615-7622.
- [2] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification

- in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327: 1008-1010.
- [3] LU X K, MAO Q G, MO J M, et al. Divergent responses of soil buffering capacity to long-term N deposition in three typical tropical forests with different land-use history[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(7): 4072-4080.
- [4] 国务院关于印发国家环境保护“十一五”规划的通知: 国发〔 2007〕 37号 [A/OL]. (2007-11-26)[2021-02-05]. http://www.gov.cn/zwggk/2007-11/26/content_815498.htm.
- [5] ROWELL D L. Chemistry of variable charge soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(3): 541-549.
- [6] 虞璐. 生物质炭对酸化土壤的改良效应及其对土壤硝化作用的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [7] LIU W J, LI W W, JIANG H, et al. Fates of chemical elements in biomass during its pyrolysis[J]. *Chemical Reviews*, 2017, 117(9): 6367-6398.
- [8] 徐胜涛. 土壤改良剂对马铃薯生长和土壤质量的作用机制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
- [9] 戴中民. 生物炭对酸化土壤的改良效应与生物化学机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [10] BOWMAN W D, CLEVELAND C C, HALADA L, et al. Negative impact of nitrogen deposition on soil buffering capacity[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(11): 767-770.
- [11] DUAN L, HUANG Y M, HAO J M, et al. Vegetation uptake of nitrogen and base cations in China and its role in soil acidification[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 330(1/2/3): 187-198.
- [12] DRISCOLL C T, DRISCOLL K M, MITCHELL M J, et al. Effects of acidic deposition on forest and aquatic ecosystems in New York State[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 123(3): 327-336.
- [13] 高雪峰, 贾渊. 荒漠草原植物根分泌物中有机酸组分分析及其生态效应研究[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(10): 1927-1934.
- GAO X F, JIA Y. Analysis of organic acid components in root exudates and their ecological effects of the plants in desert steppe of Inner Mongolia[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(10): 1927-1934.
- [14] HUBOVA P, TEJNECKY V, ASH C, et al. Low-molecular-mass organic acids in the forest soil environment[J]. *Mini-Reviews in Organic Chemistry*, 2017, 14(1): 75-84.
- [15] YUAN Z Y, CHEN H Y. A global analysis of fine root production as affected by soil nitrogen and phosphorus[J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2012, 279: 3796-3802.
- [16] MENG C F, LU X N, CAO Z H, et al. Long-term effects of lime application on soil acidity and crop yields on a red soil in Central Zhejiang[J]. *Plant and Soil*, 2004, 265(1/2): 101-109.
- [17] CAI J P, LUO W T, LIU H Y, et al. Precipitation-mediated responses of soil acid buffering capacity to long-term nitrogen addition in a semi-arid grassland[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 170: 312-318.
- [18] ZHU Q C, de VRIES W, LIU X J, et al. Enhanced acidification in Chinese croplands as derived from element budgets in the period 1980-2010[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1497-1505. (in Chinese)
- [19] FINKEL O M, CASTRILLO G, HERRERA PAREDES S, et al. Understanding and exploiting plant beneficial microbes[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2017, 38: 155-163.
- [20] YU Z P, CHEN H Y H, SEARLE E B, et al. Whole soil acidification and base cation reduction across subtropical China[J]. *Geoderma*, 2020, 361: 114107.
- [21] 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.
- [22] 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.
- LI Y, LIU D, FAN R Q, et al. Research progress of soil ameliorants[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(10): 63-69.
- [23] 矫威. 不同改良剂对作物生长发育及酸性土壤理化性状的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [24] 洪灿. 土壤改良剂对酸性土壤磷的生物有效性和土壤物理性质的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [25] 郭浩, 彭昌盛, 寇长江, 等. 污泥堆肥对针茅和车前草生长的影响[J]. *环境工程技术学报*, 2015, 5(2): 136-142.
- GUO H, PENG C S, KOU C J, et al. Influence of sewage sludge compost on the growth of plant *Stipa capillata* Linn. and *Plantago asiatica* Linn[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2015, 5(2): 136-142.
- [26] MASUD M M, BAQUY M A A, AKHTER S, et al. Liming effects of poultry litter derived biochar on soil acidity amelioration and maize growth[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 202: 110865.
- [27] 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.
- [28] MARKAKIS E A, FOUNTOULAKIS M S, DASKALAKIS G C, et al. The suppressive effect of compost amendments on *Fusarium oxysporum* f.sp. *radicis-cucumerinum* in cucumber and *Verticillium dahliae* in eggplant[J]. *Crop Protection*, 2016, 79: 70-79.
- [29] 罗飞, 宋静, 董敏刚, 等. 菜籽饼生物炭中污染物赋存特征及其用于土壤改良的适宜性评价[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(11): 1292-1297.
- LUO F, SONG J, DONG M G, et al. Characterization of contaminants in rapeseed cake-derived biochars and evaluation of their suitability for soil improvement[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(11): 1292-1297.
- [30] 彭成法, 肖汀璇, 李志建. 热解温度对污泥基生物炭结构特性及对重金属吸附性能的影响[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(10): 1637-1644.
- PENG C F, XIAO T X, LI Z J. Effects of pyrolysis temperature on structural properties of sludge-based biochar and its adsorption for heavy metals[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(10): 1637-1644.
- [31] HUANG L M, YU G W, ZOU F Z, et al. Shift of soil bacterial community and decrease of metals bioavailability after immobilization of a multi-metal contaminated acidic soil by

- inorganic-organic mixed amendments: a field study[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 130: 104-119.
- [32] BROWN T T, KOENIG R T, HUGGINS D R, et al. Lime effects on soil acidity, crop yield, and aluminum chemistry in direct-seeded cropping systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(3): 634-640.
- [33] LI X W, LI Y L, QU M, et al. Cell wall pectin and its methylesterification in transition zone determine Al resistance in cultivars of pea (*Pisum sativum*)[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 39.
- [34] LUPWAYI N Z, BENKE M B, HAO X Y, et al. Relating crop productivity to soil microbial properties in acid soil treated with cattle manure[J]. *Agronomy Journal*, 2014, 106(2): 612-621.
- [35] WAN W J, TAN J D, WANG Y, et al. Responses of the rhizosphere bacterial community in acidic crop soil to pH: changes in diversity, composition, interaction, and function[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 700: 134418.
- [36] YAMAMOTO Y. Aluminum toxicity in plant cells: mechanisms of cell death and inhibition of cell elongation[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2019, 65(1): 41-55.
- [37] HOLLAND J E, BENNETT A E, NEWTON A C, et al. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610/611: 316-332.
- [38] DELHAIZE E, RYAN P R. Aluminum toxicity and tolerance in plants[J]. *Plant Physiology*, 1995, 107(2): 315-321.
- [39] QIAN L B, CHEN B L, HU D F. Effective alleviation of aluminum phytotoxicity by manure-derived biochar[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(6): 2737-2745.
- [40] 王梅. 钙-蒙脱石和石灰对两种酸性土壤的改良研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [41] BUTTERLY C R, BALDOCK J A, TANG C. The contribution of crop residues to changes in soil pH under field conditions[J]. *Plant and Soil*, 2013, 366(1/2): 185-198.
- [42] ELISA A A, NINOMIYA S, SHAMSHUDDIN J, et al. Alleviating aluminum toxicity in an acid sulfate soil from Peninsular Malaysia by calcium silicate application[J]. *Solid Earth*, 2016, 7(2): 367-374.
- [43] WONG M T F, NORTCLIFF S, SWIFT R S. Method for determining the acid ameliorating capacity of plant residue compost, urban waste compost, farmyard manure, and peat applied to tropical soils[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 29(19/20): 2927-2937.
- [44] ZHAO W R, LI J Y, JIANG J, et al. The mechanisms underlying the reduction in aluminum toxicity and improvements in the yield of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) after organic and inorganic amendment of an acidic ultisol[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 288: 106716.
- [45] RABOIN L M, RAZAFIMAHAFALY A H D, RABENJARISOA M B, et al. Improving the fertility of tropical acid soils: liming versus biochar application: a long term comparison in the Highlands of Madagascar[J]. *Field Crops Research*, 2016, 199: 99-108.
- [46] SHI R Y, LI J Y, XU R K, et al. Ameliorating effects of individual and combined application of biomass ash, bone meal and alkaline slag on acid soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 162: 41-45.
- [47] CARMEIS FILHO A C A, PENN C J, CRUSCIOL C A C, et al. Lime and phosphogypsum impacts on soil organic matter pools in a tropical Oxisol under long-term no-till conditions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 241: 11-23.
- [48] ILLERA V, GARRIDO F, VIZCAYNO C, et al. Field application of industrial by-products as Al toxicity amendments: chemical and mineralogical implications[J]. *European Journal of Soil Science*, 2004, 55(4): 681-692.
- [49] 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.
- [50] MAHMOOD F, KHAN I, ASHRAF U, et al. Effects of organic and inorganic manures on maize and their residual impact on soil physico-chemical properties[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2017, 17(1): 22-32.
- [51] CRUSCIOL C A C, ARTIGIANI A C C A, ARF O, et al. Soil fertility, plant nutrition, and grain yield of upland rice affected by surface application of lime, silicate, and phosphogypsum in a tropical no-till system[J]. *CATENA*, 2016, 137: 87-99.
- [52] SIEDT M, SCHÄFFER A, SMITH K E C, et al. Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 751: 141607.
- [53] 晏晓丹. 矿物质土壤调理剂对氮磷的固持影响及其机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [54] EL-NAGAR D A, SARY D H. Synthesis and characterization of nano bentonite and its effect on some properties of sandy soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 208: 104872.
- [55] PLAIMART J, ACHARYA K, MROZIK W, et al. Coconut husk biochar amendment enhances nutrient retention by suppressing nitrification in agricultural soil following anaerobic digestate application[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 268: 115684.
- [56] BORCHARD N, SCHIRRMANN M, CAYUELA M L, et al. Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2354-2364.
- [57] CHEN J H, SUN X, ZHENG J F, et al. Biochar amendment changes temperature sensitivity of soil respiration and composition of microbial communities 3 years after incorporation in an organic carbon-poor dry cropland soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54(2): 175-188.
- [58] PANDIT N R, MULDER J, HALE S E, et al. Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress in a moderately acidic low-input Nepalese soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 1380-1389.
- [59] YANG Y, LIU B M, NI X Y, et al. Rice productivity and profitability with slow-release urea containing organic-inorganic matrix materials[J]. *Pedosphere*, 2021, 31(4): 511-520.
- [60] REN F L, SUN N, XU M, et al. Changes in soil microbial biomass with manure application in cropping systems: a meta-analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 194: 104291.

- [61] ZHAO J, NI T, LI J, et al. Effects of organic-inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice-wheat cropping system[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 99: 1-12.
- [62] HOU Q, ZUO T, WANG J, et al. Responses of nitrification and bacterial community in three size aggregates of paddy soil to both of initial fertility and biochar addition[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 166: 104004.
- [63] AFKAIRIN A, IPPOLITO J A, STROMBERGER M, et al. Solubilization of organic phosphorus sources by cyanobacteria and a commercially available bacterial consortium[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 162: 103900.
- [64] HE L L, SHAN J, ZHAO X, et al. Variable responses of nitrification and denitrification in a paddy soil to long-term biochar amendment and short-term biochar addition[J]. *Chemosphere*, 2019, 234: 558-567.
- [65] XU G, ZHANG Y, SUN J N, et al. Negative interactive effects between biochar and phosphorus fertilization on phosphorus availability and plant yield in saline sodic soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 568: 910-915.
- [66] 张猛. 干湿交替过程中土壤容重、水分特征曲线和热特性的动态变化特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [67] 陈丹平. 第四纪红土发育红壤孔隙的数量特征、控制因子和重构[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [68] YANG Y H, WU J C, ZHAO S W, et al. Assessment of the responses of soil pore properties to combined soil structure amendments using X-ray computed tomography[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 695.
- [69] HARDIE M, CLOTHIER B, BOUND S, et al. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability[J]. *Plant and Soil*, 2014, 376(1/2): 347-361.
- [70] GLĄB T, PALMOWSKA J, ZALESKI T, et al. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil[J]. *Geoderma*, 2016, 281: 11-20.
- [71] ZHAO Y D, HU X, LI X Y. Analysis of the intra-aggregate pore structures in three soil types using X-ray computed tomography[J]. *CATENA*, 2020, 193: 104622.
- [72] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 等. 不同利用方式旱地红壤水稳性团聚体及其碳、氮、磷分布特征[J]. *土壤学报*, 2009, 46(2): 255-262.
- LIU X L, HE Y Q, LI C L, et al. Distribution of soil water-stable aggregates and soil organic C, N and P in upland red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2): 255-262.
- [73] YIN Y, WANG L, LIANG C H, et al. Soil aggregate stability and iron and aluminium oxide contents under different fertiliser treatments in a long-term solar greenhouse experiment[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(5): 760-767.
- [74] YU H Y, DING W X, LUO J F, et al. Long-term application of organic manure and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124: 170-177.
- [75] DU Z L, ZHAO J K, WANG Y D, et al. Biochar addition drives soil aggregation and carbon sequestration in aggregate fractions from an intensive agricultural system[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(3): 581-589.
- [76] ZHENG H, WANG X, LUO X X, et al. Biochar-induced negative carbon mineralization priming effects in a coastal wetland soil: roles of soil aggregation and microbial modulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610/611: 951-960.
- [77] PANG J Y, RYAN M H, SIDDIQUE K H M, et al. Unwrapping the rhizosphere[J]. *Plant and Soil*, 2017, 418(1): 129-139.
- [78] ALGAYER B, le BISSONNAIS Y, DARBOUX F. Short-term dynamics of soil aggregate stability in the field[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(4): 1168-1176.
- [79] 徐爽, 王益权, 王浩, 等. 不同肥力水平土壤团聚体的稳定性及对氮肥盐溶液的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(5): 1135-1143.
- XU S, WANG Y Q, WANG H, et al. Effects of nitrogen fertilizer solution on stability of soil aggregates under different fertility levels[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5): 1135-1143.
- [80] HE Y B, XU C, GU F, et al. Soil aggregate stability improves greatly in response to soil water dynamics under natural rains in long-term organic fertilization[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 184: 281-290.
- [81] RAHMAN M T, GUO Z C, ZHANG Z B, et al. Wetting and drying cycles improving aggregation and associated C stabilization differently after straw or biochar incorporated into a Vertisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 28-36.
- [82] ALBALASMEH A A, HAMDAN E H, GHARAIBEH M A, et al. Improving aggregate stability and hydraulic properties of Sandy loam soil by applying polyacrylamide polymer[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 206: 104821.
- [83] ZHANG S, CUI J W, WU H, et al. Organic carbon, total nitrogen, and microbial community distributions within aggregates of calcareous soil treated with biochar[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 314: 107408.
- [84] 赵冬. 黄土丘陵区植被恢复过程土壤团聚体结构演变特征及其量化表征[D]. 西安: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2017.
- [85] 尚莉莉. 长期定位施肥与土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [86] AL-KAYSSI A W, AL-KARAGHOULI A A, HASSON A M, et al. Influence of soil moisture content on soil temperature and heat storage under greenhouse conditions[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1990, 45: 241-252.
- [87] OBIA A, CORNELISSEN G, MARTINSEN V, et al. Conservation tillage and biochar improve soil water content and moderate soil temperature in a tropical Acrisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 197: 104521.
- [88] ZHANG Q Z, WANG Y D, WU Y F, et al. Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(5): 1478-1487.
- [89] OGUNTUNDE P G, ABIODUN B J, AJAYI A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(4): 591-

- 596.
- [90] GENESIO L, MIGLIETTA F, LUGATO E, et al. Surface albedo following biochar application in durum wheat[J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(1): 014025.
- [91] HE M J, XIONG X N, WANG L, et al. A critical review on performance indicators for evaluating soil biota and soil health of biochar-amended soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 414: 125378.
- [92] HE L L, ZHAO J, YANG S M, et al. Successive biochar amendment improves soil productivity and aggregate microstructure of a red soil in a five-year wheat-millet rotation pot trial[J]. *Geoderma*, 2020, 376: 114570.
- [93] ELBL J, MAKOVÁ J, JAVOREKOVÁ S, et al. Response of microbial activities in soil to various organic and mineral amendments as an indicator of soil quality[J]. *Agronomy*, 2019, 9(9): 485.
- [94] TUBEILEH A M, STEPHENSON G T. Soil amendment by composted plant wastes reduces the *Verticillium dahliae* abundance and changes soil chemical properties in a bell pepper cropping system[J]. *Current Plant Biology*, 2020, 22: 100148.
- [95] RONG Q L, LI R N, HUANG S W, et al. Soil microbial characteristics and yield response to partial substitution of chemical fertilizer with organic amendments in greenhouse vegetable production[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(6): 1432-1444.
- [96] LUO G W, SUN B, LI L, et al. Understanding how long-term organic amendments increase soil phosphatase activities: insight into phoD- and phoC-harboring functional microbial populations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 139: 107632.
- [97] WANG Y D, HU N, GE T D, et al. Soil aggregation regulates distributions of carbon, microbial community and enzyme activities after 23-year manure amendment[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 111: 65-72.
- [98] KHAN M I, GWON H S, ALAM M A, et al. Short term effects of different green manure amendments on the composition of main microbial groups and microbial activity of a submerged rice cropping system[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 147: 103400.
- [99] LI S N, JI X H, CHAO C, et al. Effects of increasing lime application rates on microbial diversity and community structure in paddy soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 161: 103837.
- [100] ZHENG J F, CHEN J H, PAN G X, et al. Biochar decreased microbial metabolic quotient and shifted community composition four years after a single incorporation in a slightly acid rice paddy from southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 206-217.
- [101] LIN Y X, YE G P, LIU D Y, et al. Long-term application of lime or pig manure rather than plant residues suppressed diazotroph abundance and diversity and altered community structure in an acidic Ultisol[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 123: 218-228.
- [102] 李兆林, 赵敏, 王建国, 等. 施用生石灰对土壤酶活性及大豆产量的影响[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2008, 24(4): 480-484.
- LI Z L, ZHAO M, WANG J G, et al. Effect of quicklime application on soil enzymes activity and soybean yield[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2008, 24(4): 480-484.
- [103] 于翔宇. 施用石灰与生物炭对酸性土壤竹豆生长及养分吸收的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [104] VIDAL A, LENHART T, DIGNAC M F, et al. Promoting plant growth and carbon transfer to soil with organic amendments produced with mineral additives[J]. *Geoderma*, 2020, 374: 114454.
- [105] FONTE S J, BOTERO C, QUINTERO D C, et al. Earthworms regulate plant productivity and the efficacy of soil fertility amendments in acid soils of the Colombian Llanos[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 129: 136-143.
- [106] LI Z G, SCHNEIDER R L, MORREALE S J, et al. Woody organic amendments for retaining soil water, improving soil properties and enhancing plant growth in desertified soils of Ningxia, China[J]. *Geoderma*, 2018, 310: 143-152.
- [107] BHARTI A, PRASANNA R, KUMAR G, et al. Cyanobacterial amendment boosts plant growth and flower quality in *Chrysanthemum* through improved nutrient availability[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 162: 103899.
- [108] LIANG B W, MA C Q, FAN L M, et al. Soil amendment alters soil physicochemical properties and bacterial community structure of a replanted apple orchard[J]. *Microbiological Research*, 2018, 216: 1-11.
- [109] 陈士更. 腐植酸土壤调理剂研制及其在酸化果园土壤上的应用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [110] QIU M H, ZHANG R F, XUE C, et al. Application of bio-organic fertilizer can control *Fusarium* wilt of cucumber plants by regulating microbial community of rhizosphere soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(7): 807-816.
- [111] CHEN S, QI G F, MA G Q, et al. Biochar amendment controlled bacterial wilt through changing soil chemical properties and microbial community[J]. *Microbiological Research*, 2020, 231: 126373.
- [112] MI J Z, GREGORICH E G, XU S T, et al. Changes in soil biochemical properties following application of bentonite as a soil amendment[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2021, 102: 103251.
- [113] ZHANG M Y, ZHANG L, RIAZ M, et al. Biochar amendment improved fruit quality and soil properties and microbial communities at different depths in *Citrus production*[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 292: 126062.
- [114] KLOSS S, ZEHETNER F, WIMMER B, et al. Biochar application to temperate soils: effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, 177(1): 3-15.
- [115] MUKHERJEE A, LAL R. The biochar dilemma[J]. *Soil Research*, 2014, 52(3): 217.
- [116] SAFAEI KHORRAM M, FATEMI A, KHAN M A, et al. Potential risk of weed outbreak by increasing biochar's application rates in slow-growth legume, lentil (*Lens culinaris* Medik.)[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(6): 2080-2088. ◇