

DOI: 10.20103/j.stxb.202312252817

李金业, 程昊, 梁晓敏, 陈祎霖, 武松伟, 胡承孝. 酸化土壤改良与固碳研究进展. 生态学报, 2024, 44(17): 7871-7884.

Li J Y, Cheng H, Liang X M, Chen Y L, Wu S W, Hu C X. Research progress of acidified soil amelioration and carbon sequestration. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7871-7884.

酸化土壤改良与固碳研究进展

李金业¹, 程昊¹, 梁晓敏¹, 陈祎霖¹, 武松伟¹, 胡承孝^{1,2,*}

¹ 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

² 新型肥料湖北省工程实验室/华中农业大学微量元素研究中心, 武汉 430070

摘要: 土壤酸化已成为全球农业系统中最严重的土地退化问题之一。综述了土壤酸化的自然和人为驱动因素及过程, 土壤酸化对土壤无机碳和有机碳的影响; 比较了有机、无机、生物和复合改良剂改良土壤酸性、培育基础肥力和增加有机碳库的优缺点。基于此, 为推进土壤酸性改良、基础肥力培育与有机碳库协同提升, 经过总结分析提出: (1) 建立土壤酸性与碱酸离子组成关系的量化模型, 构建土壤酸性-基础肥力-有机碳库相互作用机制模型, 形成以“离子平衡”和“多功能协同”改良酸性土壤的理论框架; (2) 基于酸碱离子平衡的土壤酸性分级指标、土壤-作物系统酸碱离子平衡计量方法, 明确土壤酸碱离子平衡、养分离子活化、含碳组分稳固的协同路径和降酸、培肥、固碳、减污协同提升的土壤功能技术, 构建化肥配施无机改良剂的离子平衡精准改良土壤酸性技术体系和有机-无机-生物联合的多功能协同提升绿色改良酸性土壤技术体系。研究旨在为我国农业的绿色可持续发展提供借鉴。

关键词: 土壤酸化; 酸化过程; 有机碳封存; 土壤改良剂

Research progress of acidified soil amelioration and carbon sequestration

Li Jinye¹, CHENG Hao¹, LIANG Xiaomin¹, CHEN Yilin¹, WU Songwei¹, HU Chengxiao^{1,2,*}

¹ College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

² Hubei Provincial Engineering Laboratory for New-Type Fertilizer/Microelement Research Center of Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract: Soil acidification has become one of the most serious land degradation issues in agricultural systems worldwide. In this paper, we reviewed the natural and anthropogenic driving factors and processes of soil acidification and the influence mechanism of soil acidification on soil inorganic carbon (SIC) and organic carbon (SOC), compared the advantages and disadvantages of organic, inorganic, biological and compound amendments in improving soil acidity, cultivating basic fertility and increasing organic carbon pool. Based on these, to jointly promote soil acidity improvement, basic fertility cultivation and SOC improvement, we have summarized and proposed to (i) establish a quantitative model of the relationship between soil acidity, alkalinity and acid ion composition, construct the interaction mechanism model of soil acidity, basic fertility and organic carbon pool, form a theoretical framework for improving acid soil by ion balance and multifunctional collaboration. (ii) Clarify the synergistic path of soil acid-base ion balance, nutrient ion activation and stabilization of carbon-containing components, as well as the synergistic enhancement technology of soil function for acid reduction, fertilizer cultivation, carbon sequestration and pollution reduction based on the acid-base ion balance classification index of soil and the acid-base ion balance measurement method of the soil-crop system, establish the technology system for precise improving soil acidity by ion balance of fertilizer combined with inorganic amendment, and green improving soil acidity by organic, inorganic and biological multi-functional synergistic. The study can provide a

基金项目: 云南省重大科技专项计划(202102AE090054); 国家现代农业(柑橘)产业技术体系(CARS-26)

收稿日期: 2023-12-25; 网络出版日期: 2024-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hucx@mail.hzau.edu.cn

reference for the green and sustainable development of China's agriculture.

Key Words: soil acidification; acidizing process; organic carbon sequestration; soil amendment

土壤酸化已成为全球农业系统中最严重的土地退化问题之一^[1],全球受酸化影响的耕地多达 40%^[2]。中国是土壤酸化最严重的国家之一,自 1980 年以来,中国农业土壤 pH 约下降 0.5^[3],预计到 2050 年中国农业将面临严重的土壤酸化风险^[4]。土壤酸化通过化学和微生物过程直接或间接调节土壤无机碳(SIC)和有机碳(SOC)的动态变化及土壤碳封存潜力^[5-7]。SIC 含量高的钙质土壤缓冲能力强,pH 变化较小,SIC 含量的损失通常被忽视。目前研究多集中于土壤酸化对 SOC 的影响^[7-9],将增加 SOC 封存作为提高作物产量、缓解气候变暖的策略之一,但研究结论较为片面和分散,存在较大的争议^[10],缺乏系统性的深入研究。

土壤改良剂具有改善土壤物理结构和化学性质、减少土壤养分流失以及优化微生物群落结构的功能,有助于构建适宜动植物生长的微环境,是缓解土壤酸化、保障农业生产力和生态环境安全的有效措施^[11-12]。多数研究表明施用土壤改良剂会增加 SOC 含量^[13-15]。但是,影响酸化土壤改良和 SOC 封存的因素较多,土壤改良剂的应用效果存在显著差异,改良剂在降低土壤酸度过程中对土壤碳储量的调控机制尚不明确。本文力图分析自然和人为因素驱动土壤酸化的作用,明晰土壤改良剂对酸化土壤 SIC 和 SOC 的动态变化及 SOC 封存的影响,以期为我国农业绿色低碳和可持续发展提供参考。

1 土壤酸化的驱动因素

土壤酸化是各种自然因素和人为因素导致土壤缓冲能力退化的过程,通常伴随着碱性阳离子(BCs)如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 的流失以及酸性阳离子(H^{+} 、 Al^{3+})和阴离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 、 HCO_3^{-})的增加,影响碳氮硫等元素在土壤-大气中的循环转化。土壤缓冲能力与 pH 密切相关,当 $\text{pH} > 8.5$ 时,土壤主要由碳酸盐提供缓冲能力;当 pH 为 6.5—8.5 时,由碳酸盐和土壤阳离子交换能力(CEC)共同平衡土壤 H^{+} 输入和产生;当 pH 为 5.0—6.5 时,硅酸盐矿物风化和土壤 CEC 有助于增强土壤缓冲能力;当 $\text{pH} < 4.2$ 时,土壤主要通过溶解氧化铝和氢氧化铁提供缓冲能力^[7,16]。

1.1 自然驱动因素

自然驱动的土壤酸化过程非常缓慢,主要受到成土母质化学性质、年降水量和蒸发量的影响^[7]。酸雨是土壤酸化的主导原因,土壤风化产生的大量盐基离子使土壤自身具备了抵抗酸化的能力,但天然的酸性降雨(pH 约为 5.0—5.5)和高降水量(> 600 — 800 mm)导致土壤盐基离子淋失,交换性酸(H^{+} 和 Al^{3+})逐渐形成^[17]。此外,其他自然因素如土壤动植物呼吸产生碳酸、微生物分解有机质产生有机酸、植物生长吸收阳离子、植物和微生物固定大气氮以及火山爆发释放硫化物^[7]等都直接或间接降低了土壤缓冲能力,导致土壤呈(强)酸性(图 1)。

1.2 人为驱动因素

人为驱动的土壤酸化中影响最大的因素是酸沉降和施用氮肥(图 2)。自第二次工业革命,大量化石燃料燃烧产生的污染物(SO_2 、 NO_x 和 NH_x 等)排入大气,经反应生成酸性物质(H_2SO_4 、 HNO_x 和 NH_4NO_3 等)以干或湿沉降形式进入土壤,引起土壤酸化。20 世纪中后期,欧美地区的酸沉降已得到有效控制,而中国等发展中国家的酸沉降和土壤酸化研究较晚^[17]。1980 年—2014 年,我国降雨 pH 约为 4.6—5.6^[18],酸雨区主要分布在长江以南、青藏高原以东的广大地区及四川盆地,酸沉降严重地区与酸性红黄壤分布区重叠,氮沉降是造成我国森林和草原土壤酸化的主要原因^[19]。

在过度施肥的情况下,大量的氮输入增加了微生物如氨氧化古/细菌的活性,提高了有机氮的矿化和硝化速率,而植物利用的氮素不到总氮输入的一半,多余氮素随着阳离子从土壤中浸出^[20]。据统计,氮输入使全球土壤 pH 平均降低了 0.26^[21],氮肥引起的硝化作用对中国农田土壤 H^{+} 的直接贡献为 10 — $30 \text{ kmol hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,

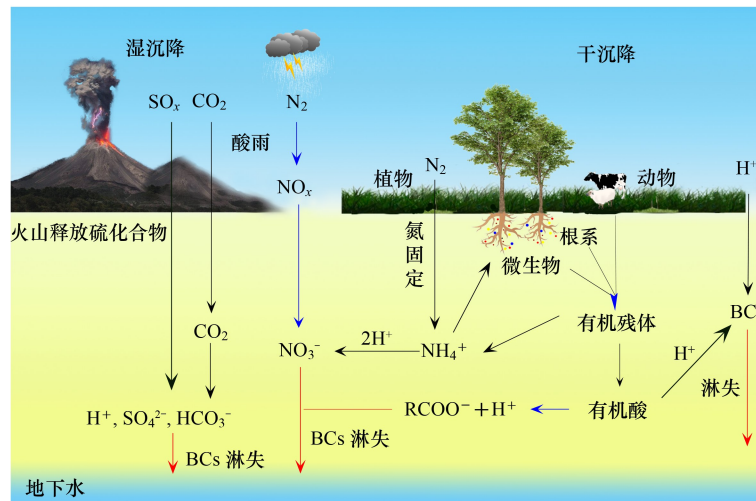
图1 土壤酸化的自然驱动因素^[7]

Fig.1 Natural driving factors of soil acidification

高于酸沉降等因素的数倍甚至数十倍^[22]。

作物生长和耕作制度导致的土壤酸化问题也日渐突出^[23],主要原因在于土壤与作物间离子输入-输出不平衡,如作物生长和收割大量消耗了土壤中的钙(Ca)、镁(Mg)、钾(K)等盐基养分,由此造成的土壤酸化程度可能高于酸沉降和施肥^[24];树木吸收BCs和枝叶修剪是加速果园土壤酸化的主要原因之一^[25];植物根系吸收阳离子释放质子及其对阴阳离子吸收不平衡均加剧土壤酸化,如豆科类植物^[18]和茶树生长^[26]引起的土壤酸化。

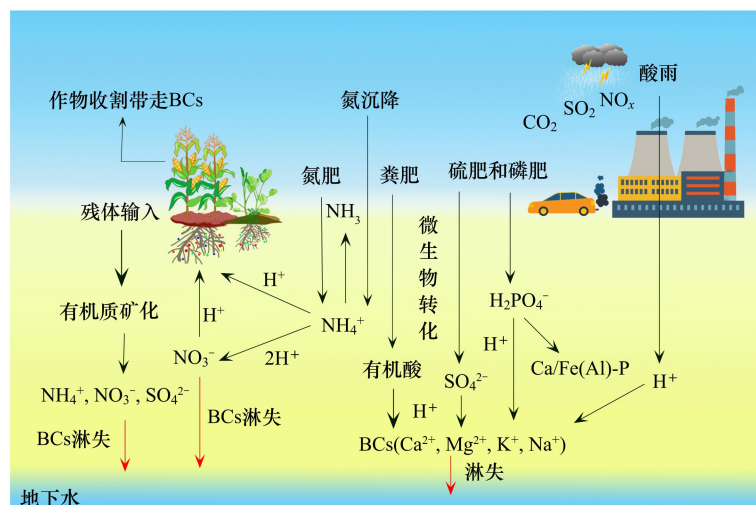
图2 土壤酸化的人为驱动因素^[7]

Fig.2 Anthropogenic driving factors of soil acidification

2 土壤酸化对土壤碳库的影响

2.1 土壤酸化对土壤无机碳(SIC)的影响

集约化农业生产(尤其是过量施用氮肥)引起的土壤酸化加剧了全球SIC损失。洛桑试验站的一项长期试验表明过量施氮导致表土碳酸盐在100年内完全耗尽,土壤pH迅速下降^[27]。钙质土壤约占地球表面的

50%^[28],对土壤酸化的缓冲能力较强,其酸化过程中 SIC 流失有 3 种形式:以 CO_2 的形式释放到大气、以 HCO_3^- 的形式浸出到深层土壤以及重新沉淀形成次生碳酸盐^[7]。土壤 pH 显著受到碳酸盐含量影响,碳酸盐平均含量大于 36.76 g/kg 时,碳酸盐是主要的酸缓冲系统,pH 保持相对恒定;碳酸盐含量低于阈值时 pH 急剧下降,CEC 提供酸缓冲能力^[17]。所以,土壤初始酸化时 pH 变化较小,碳酸盐淋溶是潜在的土壤酸化过程。在土壤剖面研究中,表层土壤产生的质子随灌溉和降水迁移到深层(100—180 cm)土壤,加剧了 SIC 流失,pH 变化与深层 SIC 含量显著线性相关^[7]。一项农林业系统的试验也发现表层(0—30 cm)土壤中来自 SIC 的 CO_2 排放量只有 15%—30%,而亚表层和深层(30—180 cm)土壤的 CO_2 排放量达到 50%—70%^[29]。因此,土壤酸化过程中深层土壤的 SIC 损失速率更快。

2.2 土壤酸化对土壤有机碳(SOC)的影响

自 1980 年以来,中国多数农田表层土壤 pH 下降约 0.5,但 SOC 含量呈现增加趋势^[3]。土壤酸碱性控制着土壤有机质的稳定性和分解速率^[24],土壤酸化必然影响 SOC 的动态,但其关系复杂^[8-9,17,30-35]。最近研究表明中国农田氮含量与 SOC 含量呈现一致性^[9],随着各种有机质输入,大量施氮引起的土壤酸化有助于农田 SOC 封存^[3,9](图 3)。首先,施氮引起的土壤酸化增加了土壤有机组分。植物残体是颗粒有机碳(POC)和矿物结合有机碳(MAOC)的主要来源^[30],大量施氮促进了植物固碳和生长,植物残体和根系分泌物等有机组分输入促进了土壤团聚体形成。团聚体的闭蓄机制提高了 POC 和 MAOC 稳定性,并减少了可溶性有机碳(DOC)浸出^[8,31]。其次,土壤酸化降低了微生物对有机碳的可获取性。真菌对低 pH 和 Al^{3+} 耐受性高,土壤酸化后真菌群落逐渐占据主导地位,真菌生长效率高于细菌,其生长代谢产生较多微生物碳(MBC)。MBC 受化学键和小团聚体的保护而分解效率低,最终增加了稳定有机碳比例^[28,32]。且真菌主要以难降解碳化合物(如木质素)为碳源,碳周转速率慢,也有助于 SOC 封存^[33-34]。最后,酸化土壤中的质子(H^+ 、 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 等)活性增强,与土壤矿物形成一系列复杂的有机碳结合位点,金属氧化物表面携带的羟基随 pH 降低而质子化^[30],提高了矿物表面正电荷对有机质的吸附能力,进而降低了微生物对有机物的可及性,延缓了土壤有机

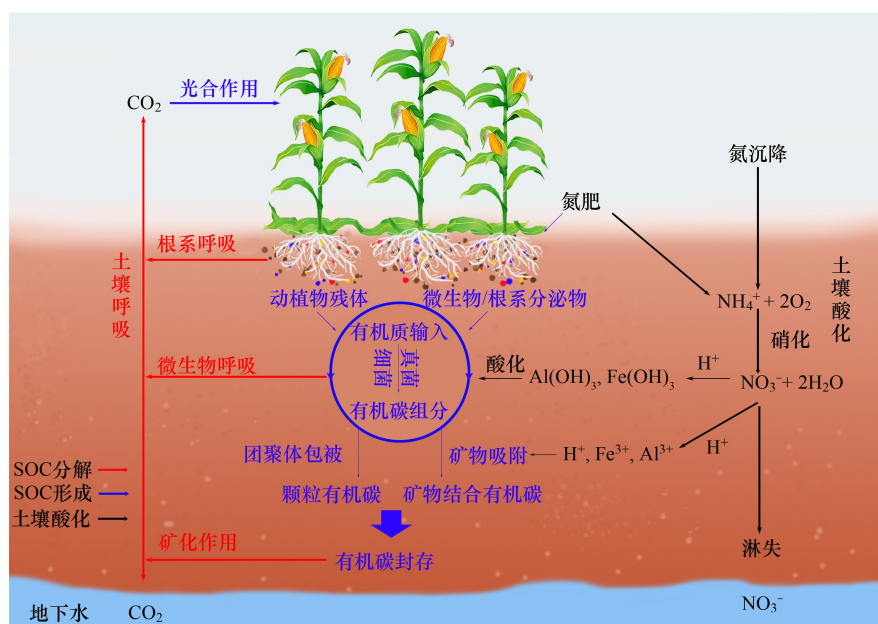


图 3 施用氮肥诱发土壤酸化影响 SOC 封存的概念图

Fig.3 Conceptual diagram of effect of soil acidification induced by N addition on SOC sequestration

基于 COMMISSION 模型绘制酸化条件下的 SOC 封存途径^[30, 37];SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon;POC: 颗粒有机碳 Particulate organic carbon;MAOC: 矿物结合有机碳 Mineral-associated organic carbon;MBC: 微生物生物量碳 Microbial biomass carbon;DOC: 可溶性有机碳 Dissolved organic carbon

质分解^[8,35]。然而,迄今为止还没有实验结果直接证明氮输入引起土壤酸化与 SOC 封存的关系,现有研究结果之间存在矛盾^[10];氮肥通过增强生产力来实现碳封存的可持续性存在不确定性,一方面土壤矿物有限的表面和物理化学性质决定了土壤碳库的最大存储容量,SOC 封存随时间推移而逐渐饱和,另一方面土壤 SOC 封存与作物产量间的因果关系存在争议,增加 SOC 含量不一定会增加作物产量^[36]。Zhao 等^[3]报道 SOC 含量与 SOC 初始含量、根系残留量、年平均温度和粘土含量显著相关性,温度影响微生物活动而调控 SOC 周转,粘土含量影响 SOC 矿化速率和含量,作物秸秆还田直接提高土壤碳输入。土壤 pH 虽然显著影响了土壤微生物群落及其碳、氮的利用效率,如微生物基础呼吸和微生物生物量,但土壤有机质输入和 CO₂ 输出之间保持平衡,pH 变化对 SOC 累积没有影响^[35]。

3 酸性土壤改良剂的种类及作用

3.1 无机改良剂

石灰是改良酸化土壤的传统措施之一,具有见效快、效果显著的优点,长期施用石灰会引发土壤板结、养分不平衡等问题,将石灰配合中微量元素、小分子聚合物和腐殖质有助于改善土壤团粒结构,增强土壤缓冲能力,提高土壤质量和作物产量,但其应用仍存在一些技术障碍^[38]。一些碱性工业废弃物如粉煤灰、碱渣、磷石膏等可用于酸性土壤改良,尤其是磷石膏^[25]。磷石膏溶解性高于石灰,能与土壤胶体反应置换出 OH⁻ 而中和土壤酸度,普遍用于改良热带和亚热带地区表下层土壤的酸度,但磷石膏会促进低毒铝向高毒铝转化,提高土壤可溶性铝浓度^[11,39]。

硅酸盐岩石如玄武岩在风化过程中产生碱性物质,减少因过度使用铵肥、单质硫肥、尿素和农作物重复收割引起的土壤酸化,并通过增加根系和菌根真菌的有机碳输入来改善 SOC 封存^[40],有助于恢复土壤健康。玄武岩对温带和热带农田土壤的改良效果显著,如施用玄武岩颗粒使甘蔗产量提高了 30%^[41];粗粒玄武岩改良微酸性粘土壤缓解了土壤酸化、铝毒,提高了作物硅含量而使高粱产量增加 21%^[42]。因此,硅酸盐岩石既能够改良土壤酸性又能够矫正土壤有效硅和作物硅缺乏。目前施用硅酸盐岩石对土壤生物多样性、作物性能等产生的长期反馈仍不确定^[40],需要进一步研究。

3.2 有机改良剂

3.2.1 植物残体类有机物

植物残体类有机物(作物秸秆、枯枝落叶、树皮和杂草绿肥等)主要通过地面覆盖、填埋等方式还田,影响了土壤的物理化学性质(温度、含水量、容重、孔隙度、pH、有机质和大中微量元素含量)和生物特性(微生物群落、土壤酶活等)。作物收割是导致农田土壤酸化的重要驱动因素^[24],秸秆还田可以提供大量 BCs 并缓解土壤酸化,但不足以完全抵消酸化^[4]。秸秆还田缓解土壤酸度的效果取决于秸秆的碱度和氮含量^[24,43],高碱而低氮作物(如花生、蚕豆)秸秆可大幅度提高土壤 pH,而高氮作物秸秆(如豌豆、大豆)几乎不增加土壤 pH;谷类秸秆有助于提高土壤 pH^[44],小麦秸秆是缓解硫酸盐土壤酸化的最佳改良剂,新鲜小麦秸秆在增加 pH 和降低氧化还原等方面优于粪肥^[45]。森林生态系统中,树木生长吸收了大量的 BCs,枯枝落叶腐解能有效缓解森林土壤酸化,土壤 pH 受到凋落物质量、数量和土壤特性三个因素的共同调控,凋落物养分含量与土壤理化性质、微生物群落密切相关^[46]。果树果实收获和枝条修剪引起的土壤酸化分别占 21.8% 和 25.3%,修剪枝条还田和平衡施肥是缓解果园土壤酸化的最佳策略^[47]。但也有研究表明这类有机物还田也会产生负面效果,如早期低温效应、高覆盖量导致苗黄现象、重金属富集、有机酸富集以及潜在的病虫害风险^[47-48],研发和推广植物残体类有机物炭化还田技术可以消除这些负面效果,未来应加强研发炭化还田一体化技术,降低炭化成本^[38]。

3.2.2 生物炭

生物炭是生物质在部分或完全没有氧气的情况下热解产生的固体材料,含有较大比表面积、丰富碱性物质和官能团,对 Al³⁺ 具有很强的吸附和固定能力,在土壤改良、生态修复和气体减排等方面中都有广泛的应

用^[49–50]。生物炭的性质(如芳香度、pH、总碳、灰分、可交换碱性阳离子、表面积、产率和阳离子交换量等)主要由热解温度和原料类型决定^[51],也影响其改良效果(表1)。不同生物质原料制备的生物炭性能效果大致为粪肥原料>木材纤维原料>草类原料,不同原料的最佳热解温度不同,热解温度越高,原料中的碳氮等物质易挥发,降低养分含量,破坏官能团结构,但能增强生物炭的稳定性^[52]。低温(350—450℃)热解是生产优质生物炭的关键^[53],最佳热解温度与原料质地的软硬程度相关。

表1 生物炭对土壤酸化的改良效果
Table 1 Improving effects of biochar on soil acidification

生物质原料 Biomass raw material	热解条件 Conditions of pyrolysis	研究结论 Conclusion of the study	参考文献 References
粪便和椰壳 Manure and coconut husk	最高温 378℃, 3 h	生物炭和厌氧产物联用提高了土壤 pH, 降低了土壤氨氧化古菌/细菌和甲烷氧化菌丰度而抑制硝化作用、减少硝酸盐淋溶	[54]
猪粪和水稻秸秆 Pig manure and rice straw	300—700℃, 2 h	700℃制备的生物炭显著提升土壤的 pH 和碳含量	[55]
花生壳和核桃壳等 6 种 Peanut and walnut shell, et al.	250—700℃	350℃制备的生物炭显著提高土壤 pH、SOC、阳离子交换量(CEC)和 P、K 含量	[56]
灌木木材 Bush wood	600—700℃, 2 h	生物炭(2%)改善了土壤理化性质, 提升了土壤 P、K 有效性和玉米产量	[57]
玉米和高粱秸秆 Corn and sorghum stalks	350℃	生物炭(2%)显著提升了酸性土壤 pH 和柑橘品质	[26]
小麦秸秆 Wheat straw	400℃	生物炭(10 kg/株)改善了柑橘果实品质和土壤理化性质, 增加土壤细菌和真菌多样性	[58]
花生壳 Peanut shell	400℃	生物炭(2%)提高了 SOC 和 CEC	[59]
芦苇、油菜和猪粪 Reed, rape and pig manure	500℃, 2 h	生物炭的碱度有助于增加土壤 pH, 3%猪粪生物炭显著提高了土壤 pH	[60]
花生和水稻秸秆 Peanuts and rice straw	400℃, 3 h	生物炭表面羧基的质子化提高了土壤 pH 缓冲能力	[61]
果树枝、花生壳和牛粪 Fruit tree branches, peanut shells and cow dung	300、450 和 600℃, 2 h	600℃制备的生物炭 pH 和碳含量最高; 生物炭提高了土壤 pH 和 BCs, 减轻了铝毒; 果树枝和牛粪生物炭对土壤酸化的缓解效果优于花生壳	[62]
牛粪和芦苇秸秆 Cow manure and reed straw	500℃, 4 h	牛粪生物炭效果优于芦苇, 提高了土壤有机质和 pH, 增强了微生物活性和有益菌的丰度	[63]

SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; CEC: 阳离子交换容量 Cation exchange capacity

生物炭通过自身理化性质影响土壤理化性质、重金属含量、作物生长发育和土壤微生物群落,其附带的有机阴离子脱羧消耗质子,也可与 H⁺发生缔合反应增加土壤 pH,能有效缓解土壤酸化,促进作物生长^[52–53]。但生物炭对土壤改良效果不因施用量增加而增加,过量反而会造成养分失衡和碱基阳离子过剩,降低蔬菜和谷物产量^[64]。农作物和柑橘土壤按 2%(w/w)生物炭可达最佳土壤改良效果^[18, 50];在酸化土壤施用 5 t/hm²的木材生物炭达到了最高 pH 和生物量^[53];酸化茶园土壤施用低温制备的生物炭显著降低了氮循环产生的酸度^[65];与免耕覆盖、施用有机肥相比,生物炭缓解土壤酸化效果最明显,在不施肥情况下也能达到良好的增产效果^[66]。此外,通过添加酸碱、金属和有机试剂等制备的改性生物炭进一步改善了官能团、比表面积等理化性质,在盐碱土改良中取得较好成果^[67],但在酸性土壤中的应用较少。

生物炭的施用也存在一些问题,比如生物炭与土壤养分发生沉淀和吸附反应,降低养分利用率^[68];提高土壤呼吸而促进土壤硝化作用和反硝化作用,导致硝酸盐随降水淋溶^[69]。此外,生物炭的制备成本偏高,现有研究多集中于短期试验田和室内实验,尚未开展大规模农业生产实践,导致生物炭的应用效果在不同地区差异较大,生物炭对环境产生的负面影响需要更深入研究^[70]。

3.2.3 堆肥

堆肥是既传统又广泛使用的土壤改良剂,具有调节土壤 pH 和增加养分供给两方面优势:(1)堆肥含有大

量碱性物质和有机质,可促进土壤颗粒微观和宏观团聚,提高土壤缓冲能力^[14],其腐殖质的主要成分腐植酸和富里酸含有丰富官能团,如羧基、醇羟基、酚羟基和羰基,对金属离子具有非常活跃的吸附位点和很强的络合能力,通过形成稳定的铝铁金属螯合物而降低金属溶解度,提高土壤 CEC 而增加 pH^[71],Hashemimajd^[72]和 Liu 等^[73]都证明了堆肥调节酸性土壤 pH 的潜力。(2)堆肥含有的 C、N、P 和 K 等元素和大量微生物能促进土壤微生物群落组装,刺激土壤酶和有益微生物活性^[11,14],提高养分循环和利用率。

将生物炭和堆肥原料进行共堆肥可以获得高附加值的堆肥产品,堆肥可以促进生物炭表面羧基和酚羟基形成,提高生物炭的反应性;生物炭能加速原料腐殖化,提高堆肥质量^[74]。堆肥中添加生物炭提高了最终产物 pH、总氮和全钾含量,降低了堆肥对环境的生态风险^[75]。最近的一项 Meta 分析表明经生物炭改良的堆肥改良剂有效提高了植物生产力和土壤质量^[76]。生物炭与堆肥的协同效应提高了土壤改良效率,通过降低土壤有机质高矿化率而促进土壤碳封存^[14]。

3.3 生物改良剂

生物改良是利用植物、土壤动物和微生物改良土壤,微生物改良剂(微生物菌肥/菌剂)是最常用的生物改良剂,主要通过微生物分泌与植物细胞生长和根系发育相关激素和有机化合物,刺激土壤生物活动活化土壤养分,提高作物抗逆性。

土壤酸化通过生态过滤降低微生物丰度,导致微生物多样性丧失^[77]而富集酸依赖性微生物,如放线菌类、嗜酸性硫杆菌、幽门螺杆菌、大肠杆菌和链球菌等,存活在酸性土壤的微生物进化出独特的机制来响应极端 H⁺ 压力,如微生物应对土壤酸化的潜在脱氢途径^[6],这些微生物制备菌剂能有效降低土壤酸度,如山东农业大学公开了一株具有改良酸性土壤和解钾功能的短小芽孢杆菌(CN201910929968.5)^[49];Liu 等^[78]从酸性土壤中筛选耐铝细菌制备的合成菌群通过质子化作用有效延缓表层土壤酸化,降低 Al³⁺ 含量,提高碱性磷酸酶活性并促进植物生长。

微生物菌剂中的活性微生物可以增加土壤有益微生物数量和多样性,促进土壤物质转化和养分吸收,提高酸性土壤 pH^[78]。微生物菌剂也能通过招募有益微生物、调控微生物群落组成和抑制病原菌等改良土壤^[79]。施用芽孢杆菌菌肥提高了桃园土壤 pH、有机质含量,以及青霉菌、毛壳菌等有益真菌的相对丰度和脲酶、过氧化氢酶活性,明显改善了土壤微环境^[80];微生物菌剂(芽孢杆菌和木霉菌)优化了严重酸化茶园中土壤微生物群落结构,使土壤 pH 增加了约 0.4 及土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾等含量显著提升^[81];土壤接种枯草芽孢杆菌和淀粉芽孢杆菌可以有效防治病原菌,降低作物病害感染率^[82]。此外,通过种植喜硝植物也能修复酸性土壤,它们吸收硝态氮时会释放 OH⁻ 以保持电荷平衡,比如在酸化土壤中种植西红柿、玉米和小麦可以缓解土壤酸化,提高土壤生产能力和作物产量^[49]。

3.4 复合改良剂

单一改良剂在降低土壤酸度的同时,对土壤和环境也会产生一些负面影响(表 2),多种改良剂配合(如无机-有机改良剂、有机-生物改良剂等)是最具有前途的酸性土壤改良方法^[19,49]。石灰或碱渣与花生秸秆配施比单施显著提升土壤 pH,促进土壤溶液 Al³⁺ 向 Al-络合物转化而降低铝对植物的毒害作用,并提高作物养分吸收量和产量;植物秸秆等和碱渣配施实现了表层与表下层土壤酸度的同步改良^[38];生物炭、骨粉和碱渣联用比单独施用显著增加土壤交换性 K、Ca、Mg 和 P 含量,使土壤 pH 升高 0.63—1.37^[83];生物炭、牛粪、粉煤灰和白云石复合改良剂对土壤 pH、作物产量、根际微生物数量等都产生积极影响^[84];堆肥可以作为生物炭的营养补充,生物炭可以提高堆肥在土壤中的稳定性和持久性,二者混施还能降低单独施用引起的土壤氧化亚氮排放^[71];有机-生物改良剂配施效果显著,微生物加速了有机物腐解速率、养分释放,有机物为微生物提供充足碳源而提高菌种的存活率^[85];有机肥配施生物炭通过调控根际土壤 pH、总氮和 N/P 影响反硝化过程,显著增加反硝化势^[86];硅钙钾镁肥配施生物炭在缓解植烟土壤酸化、提高土壤细菌群落丰度和多样性、促进烟株生长发育等方面效果优于单独施用^[87];氮肥配施生物炭提高了酸性土壤氮素有效性,显著缓解了酸性土壤的铝毒和酸毒^[62]。改良剂种类、配比和土壤特性等因素都影响土壤改良效果,应当根据土壤 pH 制订酸性土

壤的分类调控方案,建立改良剂用量估算方法,实现精准施用。比如通过 pH、CEC 和有机质含量估算改良剂用量;在强酸性 (pH<5.0) 土壤施用石灰等碱性改良剂的同时配施有机肥、堆肥等提高土壤肥力,在弱酸性 (pH 为 5.0—5.5) 土壤施用生物炭、有机肥等温和改良剂^[38]。

表 2 不同酸性土壤改良剂类型、物料的优缺点

Table 2 Advantage and disadvantage of acid soil amendments

类型 Type	物料 Material	优点 Advantage	缺点 Disadvantage
无机改良剂 Inorganic amendments	石灰类(生/熟石灰、白云石等)	土壤改良见效快、效果好;增加土壤 Ca、Mg 浓度	亚表层酸度改良不佳,易复酸;降低微生物活性;释放 CO ₂ 气体 ^[39]
	磷石膏	对表下层土壤改良效果好	增加土壤铝毒害
	硅酸盐岩石	为作物提供硅元素;促进 SOC 封存;增强植物抗病虫害能力	开采和施用过程产生颗粒物,对人体和生态环境产生负面影响 ^[40]
有机改良剂 Organic amendments	作物秸秆、枯枝落叶和杂草绿肥等	增加土壤持水能力,降低容重;增加土壤微生物和酶活性	加剧 CO ₂ 排放;诱发土传病害;低温效应;苗黄现象;重金属、有机酸富集 ^[49—50]
	生物炭	改善土壤物理和化学特性;吸附重金属,修复污染土壤;增加微生物多样性和酶活性;增强土壤碳汇 ^[52]	制备成本高,改良效果受热解条件限制;排放 N ₂ O 和 CO ₂ 温室气体;释放有毒物质的潜在风险
	堆肥	改善土壤的物理和化学特性;增加营养元素含量,促进养分循环;吸附重金属;引入新微生物,刺激酶活;增加 SOM 含量,提高碳封存效率 ^[14,74]	堆肥过程中释放 N ₂ O 和硫化氢 (H ₂ S) 等气体,污染空气;堆肥产品可能含有致病菌
生物改良剂 Biological amendments	微生物菌剂/菌肥	增加或招募土壤有益菌,增加有益菌丰度、多样性;活化土壤养分,提高养分利用率	土壤质量影响菌种存活率;见效慢;田间实验研究不足
复合改良剂 Compound amendments	两种或多种改良剂配施	弥补单一改良剂的缺点,同时解决酸性土壤肥力低和养分缺乏等问题	改良效果受物料比例的调控;亟需大面积示范和推广应用

3.5 新型改良剂

改性生物炭、生物炭基肥、功能性肥料(腐殖酸、海藻酸和甲壳素)、高分子聚合物(聚丙烯酰胺:PAM)和复合纤维土等是一些新型改良产品,改土增产效果更好。生物炭制备过程中引入壳聚糖、海藻酸钠等物质能够放大生物炭的官能团,提高酸缓冲能力^[88];生物炭基肥克服了单一改良剂的缺点,兼具生物炭和缓释肥料的双重优势,可以显著提高土壤有机质和作物产量,有效减少温室气体排放;水稻、小麦和玉米增产 10%需要 15—30 t/hm²生物炭,而炭基肥仅需 0.9 t/hm²^[89];腐植酸复合肥施用效果优于堆肥和有机肥,其含氧官能团(如酚羟基和羧基)能形成更稳定的铝络合物,显著增强土壤微观结构稳定性,减轻铝毒性^[90];PAM 因其独特的分子结构、丰富的活性基团和良好的黏结性,具备较强的保肥持水性能,可以提高土壤 pH 且对环境无毒无害^[91]。目前,酸性土壤改良剂种类繁多,选择合适的改良剂需要考虑土壤初始 pH、改良剂成本、气候条件和作物种类习性等多种因素的交互影响^[12]。

4 土壤改良剂对 SOC 封存的影响

净 SOC 封存量是指土壤碳的输入量与释放量(土壤异养生物分解有机质以 CO₂或甲烷的形式释放到大气)之间的差值,通过增加土壤碳投入或减少碳损失可以增加 SOC 封存^[36]。施用酸性土壤改良剂不仅能够调节土壤 pH,促进土壤团聚体形成,减少有机碳矿化量^[72],而且影响微生物丰度和多样性。微生物通过两个截然不同的途径调控土壤碳封存,一是通过微生物自身对土壤和植物有机质的分解代谢活动(异养呼吸、产甲烷等过程)将碳释放到大气中,二是通过同化作用以微生物残体形式向土壤输入有机质而增加碳固定,以及为植物提供大量养分(N、P 和 K 等)而增加植物和土壤碳储量^[92—93]。土壤微生物碳泵证明了微生物残体和代谢物可成为持久性土壤碳的前体,凸显了微生物合成代谢在土壤碳储存中的重要性,土壤微生物合成与代谢活动间的平衡成为预测 SOC 变化的关键^[93]。

土壤改良剂增加 SOC 封存的途径有以下 4 方面(图 4):(1)作物秸秆、生物炭和堆肥等改良剂直接增加土壤碳输入^[15]。秸秆覆盖和粉碎还田可增加 TOC、MBC 和 DOC 含量^[94];粪肥和堆肥提高外源碳进入土壤的速率^[95];生物炭中部分碳不能被生物利用,但可以形成高稳定性和持久性碳池,有效减缓 SOC 分解速率^[96]。此外,生物炭通过直接固定 CO_2 和间接促进植物生长去除 CO_2 ,减排潜力为 $3.4\text{—}6.3 \text{ Pg CO}_2\text{-eq/a}$ ^[97]。(2)土壤改良剂通过提高土壤功能调控微生物过程间接促进碳封存^[98]。多数研究证明了生物炭、堆肥等改良剂对土壤理化性质的正向影响,如增加土壤有机质的分子多样性和孔隙的空间异质性而提高土壤功能^[78];为土壤微生物提供有利的生存环境,提高微生物活性和多样性,微生物分解有机物质并将一部分碳固定于土壤,对碳循环产生积极影响^[96]。(3)土壤改良剂增加 SOC 中稳定碳的比例。粪肥使 MBC 和微生物生物量氮(MBN)分别增加 40% 和 55%^[99],是维持 SOC 库稳定的重要途径^[92];堆肥的化学稳定性是增加土壤碳储量、降低碳矿化的关键^[100],我国农业全面施用堆肥可使农田表土 SOC 封存量达 85 Tg C/a ^[13];Razza 等^[101]估计施用堆肥可使土壤有机质含量每年增加 0.4%,22 年内 TOC 封存量达到 6.2 t/hm^2 。(4)土壤改良剂通过改善植物生长条件促进碳封存。土壤改良剂提高土壤 N、P、K 养分有效性而促进植物根系发育、生长固碳,如生物炭吸附并缓慢释放营养元素,对土壤植物生长产生积极影响^[96]。

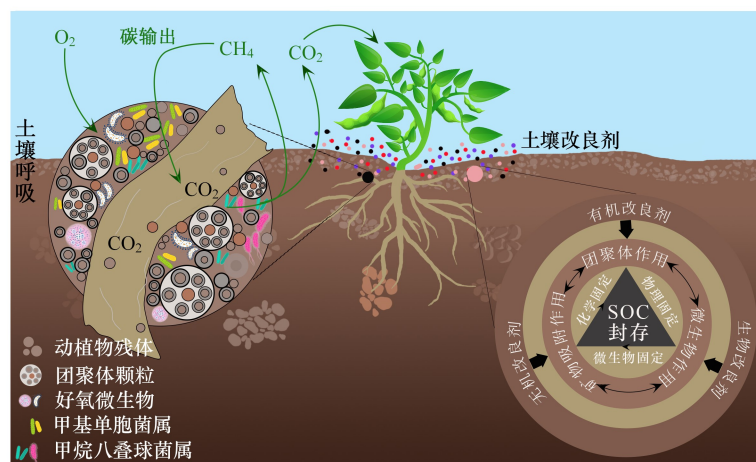


图 4 土壤改良剂调控 SOC

Fig.4 Regulating SOC by soil amendments

土壤改良剂也可能造成碳损失。利用石灰改良酸性土壤时,碳酸盐溶解加速了 CO_2 排放,石灰也会调节土壤微生物数量和活性,促进土壤有机质分解和矿化,导致土壤碳损失^[102]。作物残茬^[11]、堆肥^[14]、秸秆^[94]和动物粪便^[103]等土壤改良剂虽然为微生物代谢活动提供底物,但也提高了微生物呼吸速率和土壤矿化速度,进而增加 CO_2 排放通量。此外,生物炭能提高氨氧化古菌丰度,导致土壤硝化速率超过反硝化速率,增加 N_2O 净排放量^[104];粪肥直接施用会引发土壤健康安全问题^[11];不科学的作物残体填埋和覆盖还田等会减少 SOC 储量,降低土壤固碳潜力^[105]。因此,土壤改良剂的施用需要考虑气候条件、土壤初始有机碳含量和土壤类型等多种因素的综合影响,通过科学管理实践才能实现 SOC 封存。

5 结论与展望

党的二十大报告提出“协同推进降碳、减污、扩绿、增长”。面对我国土壤酸化的严峻形势和农业绿色低碳发展的迫切需要,协同推进酸化土壤改良、培肥、固碳是当务之急。本文分析说明,土壤酸化的核心是土壤缓冲能力的退化,突出表现为碱性阳离子(BCs)流失与酸性阳离子、阴离子增加的矛盾,深刻地影响农业生态系统碳、氮、硫等元素循环和生物多样性、功能稳定性。自然驱动土壤酸化过程非常缓慢,人为驱动的土壤酸化主要是酸沉降和施用氮肥,其中施用氮肥引起的硝化作用对农田土壤酸化的贡献远高于酸沉降;也有学

者认为作物生长和收获消耗了土壤大量 BCs,即土壤-作物系统 BCs 输入输出不平衡对土壤酸化的贡献可能高于酸沉降和施肥。土壤酸化加剧 SIC 损失;施用氮肥既诱发土壤酸化,也能增加 SOC,但受土壤特性、SOC 含量和封存潜力等多因素交互影响。不同类型物料改良剂在改良土壤酸性、提升基础地力、增加有机碳库、提高产量品质等方面各有优缺点,其中作物秸秆、生物质炭、堆肥和微生物菌剂等酸性土壤改良剂是有效的 SOC 封存技术。

综上所述,改良土壤酸性的关键是碱性与酸性离子间缓解矛盾和平衡关系,协同推进土壤酸性改良、基础肥力培育、有机碳库提升是农业绿色低碳发展所亟需。为此建议:(1)深入研究明确土壤酸性与碱性、酸性离子组成的关系,建立量化模型,揭示“土壤酸化”机制,形成以“离子平衡”改良酸性土壤的理论框架;深入研究明确土壤酸性与基础肥力、有机碳库的关系,构建机制模型,揭示“功能退化”机制,形成“多功能协同”改良酸性土壤的理论框架。(2)深入研究提出基于酸碱离子平衡的土壤酸性分级指标,建立土壤-作物系统酸碱离子平衡计量方法,提出化肥配合无机改良剂的离子平衡精准改良土壤酸性技术体系;深入研究明确土壤酸碱离子平衡、养分离活化、含碳组分稳固的协同路径,提出酸化土壤降酸、培肥、固碳、减污协同提升土壤功能技术,构建有机-无机-生物联合的多功能协同提升酸性土壤绿色改良技术体系。

参考文献(References):

- [1] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Goulding K W T, Vitousek P M, Zhang F S. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [2] Wang Y, Yao Z S, Zhan Y, Zheng X H, Zhou M H, Yan G X, Wang L, Werner C, Butterbach-Bahl K. Potential benefits of liming to acid soils on climate change mitigation and food security. *Global Change Biology*, 2021, 27(12): 2807-2821.
- [3] Zhao Y C, Wang M Y, Hu S J, Zhang X D, Ouyang Z, Zhang G L, Huang B, Zhao S W, Wu J S, Xie D T, Zhu B, Yu D S, Pan X Z, Xu S X, Shi X Z. Economics-and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4045-4050.
- [4] Zhu Q C, Liu X J, Hao T X, Zeng M F, Shen J B, Zhang F S, de Vries W. Cropland acidification increases risk of yield losses and food insecurity in China. *Environmental Pollution*, 2020, 256: 113145.
- [5] Xing W, Lu X M, Ying J Y, Lan Z C, Chen D M, Bai Y F. Disentangling the effects of nitrogen availability and soil acidification on microbial taxa and soil carbon dynamics in natural grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 164: 108495.
- [6] Shen J, Luo Y L, Tao Q, White P J, Sun G, Li M, Luo J P, He Y T, Li B, Li Q Q, Xu Q, Cai Y, Li H X, Wang C Q. The exacerbation of soil acidification correlates with structural and functional succession of the soil microbiome upon agricultural intensification. *Science of the Total Environment*, 2022, 828: 154524.
- [7] Raza S, Zamanian K, Ullah S, Kuzyakov Y, Virto I, Zhou J B. Inorganic carbon losses by soil acidification jeopardize global efforts on carbon sequestration and climate change mitigation. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 315: 128036.
- [8] Zhang X M, Guo J H, Vogt R D, Mulder J, Wang Y J, Qian C, Wang J G, Zhang X S. Soil acidification as an additional driver to organic carbon accumulation in major Chinese croplands. *Geoderma*, 2020, 366: 114234.
- [9] Sun X L, Minasny B, Wu Y J, Wang H L, Fan X H, Zhang G L. Soil organic carbon content increase in the east and south of China is accompanied by soil acidification. *Science of the Total Environment*, 2023, 857(1): 159253.
- [10] Kuzyakov Y, Kuzyakova I, Raza S, Zhou J B, Zamanian K. Letter-to-the-Editor: Does acidification really increase soil carbon in croplands? How statistical analyses of large datasets might mislead the conclusions. *Geoderma*, 2021, 384: 114806.
- [11] 刘娇娟, 崔骏, 刘洪宝, 潘琦, 何小松. 土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展. *环境工程技术学报*, 2022, 12(1): 173-184.
- [12] Zhang S W, Zhu Q C, de Vries W, Ros G H, Chen X H, Muneer M A, Zhang F S, Wu L. Effects of soil amendments on soil acidity and crop yields in acidic soils: A world-wide meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118531.
- [13] Chen Z X, Wei Y Q, Zhang Z Y, Wang G A, Li J. Organic carbon sequestration in Chinese croplands under compost application and its contribution to carbon neutrality. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(4): 9022-9035.
- [14] Qian S X, Zhou X R, Fu Y K, Song B, Yan H C, Chen Z X, Sun Q, Ye H Y, Qin L, Lai C. Biochar-compost as a new option for soil improvement: application in various problem soils. *Science of the Total Environment*, 2023, 870: 162024.
- [15] Tian Y F, Wang Q Q, Gao W, Luo Y, Wu L, Rui Y C, Huang Y P, Xiao Q, Li X, Zhang W J. Organic amendments facilitate soil carbon sequestration via organic carbon accumulation and mitigation of inorganic carbon loss. *Land Degradation and Development*, 2022, 33(9):

- 1423-1433.
- [16] Li A W, Li C J, Zhang Y Y, Deng Q, Fang H Y, Zhao B, Ran M, Song L Y, Xue J L, Tao Q, Huang R, Li Y D, Zhou W, Wang J T, Wilson J P, Li Q Q. The driving factors and buffering mechanism regulating cropland soil acidification across the Sichuan Basin of China. *CATENA*, 2023, 220: 106688.
- [17] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展. *土壤*, 2015, 47(2): 238-244.
- [18] Yu Z P, Chen H Y H, Searle E B, Sardans J, Ciais P, Peñuelas J, Huang Z Q. Whole soil acidification and base cation reduction across subtropical China. *Geoderma*, 2020, 361: 114107.
- [19] 倪秀雅, 冯永霞, 李如华, 尚鹤, 陈展. 重庆酸雨区不同林型对土壤酸化和真菌群落的影响. *生态学报*, 2023, 43(17): 7203-7215.
- [20] Ozlu E, Kumar S. Response of soil organic carbon, pH, electrical conductivity, and water stable aggregates to long-term annual manure and inorganic fertilizer. *Soil Science Society of America Journal*, 2018, 82(5): 1243-1251.
- [21] Tian D S, Niu S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2): 024019.
- [22] Raza S, Miao N, Wang P Z, Ju X T, Chen Z J, Zhou J B, Kuzyakov Y. Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands. *Global Change Biology*, 2020, 26(6): 3738-3751.
- [23] Raut N, Dörsch P, Sitaula B K, Bakken L R. Soil acidification by intensified crop production in South Asia results in higher $N_2O/(N_2+N_2O)$ product ratios of denitrification. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 55: 104-112.
- [24] Hao T X, Liu X J, Zhu Q C, Zeng M F, Chen X J, Yang L S, Shen J B, Shi X J, Zhang F S, de Vries W. Quantifying drivers of soil acidification in three Chinese cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 2022, 215: 105230.
- [25] Zhu Q C, de Vries W, Liu X J, Zeng M F, Hao T X, Du E Z, Zhang F S, Shen J B. The contribution of atmospheric deposition and forest harvesting to forest soil acidification in China since 1980. *Atmospheric Environment*, 2016, 146: 215-222.
- [26] Wu S W, Zhang Y, Tan Q L, Sun X C, Wei W H, Hu C X. Biochar is superior to lime in improving acidic soil properties and fruit quality of Satsuma mandarin. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136722.
- [27] Poulton P R. Management and modification procedures for long-term field experiments. *Canadian Journal of Plant Science*, 1996, 76(4): 587-594.
- [28] Li T P, Wang R Z, Cai J P, Meng Y N, Wang Z R, Xue F, Liu H Y, Turco R F, Jiang Y. Enhanced carbon acquisition and use efficiency alleviate microbial carbon relative to nitrogen limitation under soil acidification. *Ecological Processes*, 2021, 10(1): 32.
- [29] Cardinael R, Chevallier T, Guenet B, Girardin C, Cozzi T, Pouteau V, Chenu C. Organic carbon decomposition rates with depth and contribution of inorganic carbon to CO_2 emissions under a Mediterranean agroforestry system. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71(5): 909-923.
- [30] 周正虎, 刘琳, 侯磊. 土壤有机碳的稳定和形成: 机制和模型. *北京林业大学学报*, 2022, 44(10): 11-22.
- [31] Chuman T, Oulehle F, Zajíčková K, Hruška J. The legacy of acidic deposition controls soil organic carbon pools in temperate forests across the Czech Republic. *European Journal of Soil Science*, 2021, 72(4): 1780-1801.
- [32] Li F, Chen L, Zhao Z H, Li Y, Yu H Y, Wang Y, Zhang J B, Han Y L. The changes of chemical molecular components in soil organic matter are associated with fungus *Mortierella capitata* K. *Soil and Tillage Research*, 2023, 227: 105598.
- [33] Six J, Frey S D, Thiet R K, Batten K M. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(2): 555-569.
- [34] 杨阳, 窦艳星, 王宝荣, 薛志婧, 朱兆龙, 黄懿梅, 王云强, 安韶山. 黄土高原土壤有机碳固存机制研究进展. *第四纪研究*, 2023, 43(2): 509-522.
- [35] Kemmitt S, Wright D, Goulding K, Jones D. pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(5): 898-911.
- [36] Moinet G Y K, Hijbeek R, van Vuuren D P, Giller K E. Carbon for soils, not soils for carbon. *Global Change Biology*, 2023, 29(9): 2384-2398.
- [37] Ahrens B, Braakhekke M C, Guggenberger G, Schrumpf M, Reichstein M. Contribution of sorption, DOC transport and microbial interactions to the ^{14}C age of a soil organic carbon profile: insights from a calibrated process model. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 390-402.
- [38] 徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 徐明岗, 沈仁芳. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 160-167.
- [39] Illera Munoz V, Garrido F, Vizcayno C, García-González M T. Field application of industrial by-products as Al toxicity amendments: chemical and mineralogical implications. *European Journal of Soil Science*, 2004, 55(4): 681-692.
- [40] Beerling D J, Leake J R, Long S P, Scholes J D, Ton J, Nelson P N, Bird M, Kantzas E, Taylor L L, Sarkar B, Kelland M, DeLucia E, Kantola I, Müller C, Rau G, Hansen J. Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. *Nature Plants*, 2018, 4(3): 138-147.
- [41] Gillman G P, Burkett D C, Coventry R J. A laboratory study of application of basalt dust to highly weathered soils: effect on soil cation chemistry. *Soil Research*, 2001, 39(4): 799.
- [42] Kelland M E, Wade P W, Lewis A L, Taylor L L, Sarkar B, Andrews M G, Lomas M R, Anne Cotton T E, Kemp S J, James R H, Pearce C R,

- Hartley S E, Hodson M E, Leake J R, Banwart S A, Beerling D J. Increased yield and CO₂ sequestration potential with the C₄ cereal Sorghum bicolor cultivated in basaltic rock dust-amended agricultural soil. *Global Change Biology*, 2020, 26(6): 3658-3676.
- [43] Pan X Y, Li J Y, Deng K Y, Xu R, Shen R. Four-year effects of soil acidity amelioration on the yields of canola seeds and sweet potato and N fertilizer efficiency in an ultisol. *Field Crops Research*, 2019, 237: 1-11.
- [44] Wang N, Xu R K, Li J Y. Amelioration of an acid ultisol by agricultural by-products. *Land Degradation and Development*, 2011, 22(6): 513-518.
- [45] Jayalath N, Fitzpatrick R, Mosley L M, Marschner P. Addition of wheat straw to acid sulfate soils with different clay contents reduces acidification in two consecutive submerged-moist cycles. *Geoderma*, 2021, 385: 114892.
- [46] Desie E, Vancampenhout K, Nyssen B, van den Berg L, Weijters M, van Duinen G J, den Ouden J, Van Meerbeek K, Muys B. Litter quality and the law of the most limiting: opportunities for restoring nutrient cycles in acidified forest soils. *Science of the Total Environment*, 2020, 699: 134383.
- [47] Chen X H, Yu W H, Cai Y Y, Zhang S H, Muneer M, Zhu Q C, Xu D X, Ma C C, Yan X J, Li Y, Huang S, Wu L Q, Zhou S G, Zhang F S. How to identify and adopt cleaner strategies to improve the continuous acidification in orchard soils? *Journal of Cleaner Production*, 2022, 330: 129826.
- [48] 张俊, 刘娟, 臧秀旺, 郝西, 汤丰收, 董文召, 齐飞艳, 刘华. 麦秸覆盖对土壤理化性质及夏花生生长发育的影响. *土壤通报*, 2019, 50(3): 609-616.
- [49] 陈香, 梁林洲, 董晓英, 李九玉, 王超, 沈仁芳. 酸性土壤改良技术领域专利情报分析. *中国土壤与肥料*, 2023, (5): 174-182.
- [50] Das S K, Ghosh G K, Avasthe R. Valorizing biomass to engineered biochar and its impact on soil, plant, water, and microbial dynamics: a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022, 12(9): 4183-4199.
- [51] Dai Z M, Zhang X J, Tang C, Muhammad N, Wu J J, Brookes P C, Xu J M. Potential role of biochars in decreasing soil acidification-A critical review. *Science of the Total Environment*, 2017, 581-582: 601-611.
- [52] 夏浩. 生物炭与氮肥配施提升酸性土壤肥力和氮素利用率的效应及其微生物学机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [53] Kannan P, Paramasivan M, Marimuthu S, Swaminathan C, Bose J. Applying both biochar and phosphobacteria enhances *Vigna mungo L.* growth and yield in acid soils by increasing soil pH, moisture content, microbial growth and P availability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 308: 107258.
- [54] Plaimart J, Acharya K, Mrozik W, Davenport R J, Vinitnantharat S, Werner D. Coconut husk biochar amendment enhances nutrient retention by suppressing nitrification in agricultural soil following anaerobic digestate application. *Environmental Pollution*, 2021, 268: 115684.
- [55] Dai Z M, Brookes P C, He Y, Xu J M. Increased agronomic and environmental value provided by biochars with varied physiochemical properties derived from swine manure blended with rice straw. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(44): 10623-10631.
- [56] Novak J M, Cantrell K B, Watts D W, Busscher W J, Johnson M G. Designing relevant biochars as soil amendments using lignocellulosic-based and manure-based feedstocks. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(2): 330-343.
- [57] Pandit N R, Mulder J, Hale S E, Martinsen V, Schmidt H P, Cornelissen G. Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress in a moderately acidic low-input Nepalese soil. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 1380-1389.
- [58] Zhang M Y, Zhang L, Riaz M, Xia H, Jiang C C. Biochar amendment improved fruit quality and soil properties and microbial communities at different depths in citrus production. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 292: 126062.
- [59] Zhang M Y, Riaz M, Xia H, Li Y X, Wang X L, Jiang C C. Four-year biochar study: positive response of acidic soil microenvironment and citrus growth to biochar under potassium deficiency conditions. *Science of the Total Environment*, 2022, 813: 152515.
- [60] Dai Z M, Wang Y N, Muhammad N, Yu X S, Xiao K C, Meng J, Liu X M, Xu J M, Brookes P C. The effects and mechanisms of soil acidity changes, following incorporation of biochars in three soils differing in initial pH. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(5): 1606-1614.
- [61] Shi R Y, Ni N, Nkoh J N, Li J Y, Xu R K, Qian W. Beneficial dual role of biochars in inhibiting soil acidification resulting from nitrification. *Chemosphere*, 2019, 234: 43-51.
- [62] Geng N, Kang X R, Yan X X, Yin N, Wang H, Pan H, Yang Q G, Lou Y H, Zhuge Y P. Biochar mitigation of soil acidification and carbon sequestration is influenced by materials and temperature. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 232: 113241.
- [63] Yin S J, Zhang X, Suo F Y, You X W, Yuan Y, Cheng Y D, Zhang C S, Li Y Q. Effect of biochar and hydrochar from cow manure and reed straw on lettuce growth in an acidified soil. *Chemosphere*, 2022, 298: 134191.
- [64] Mukherjee A, Lal R. The biochar dilemma. *Soil Research*, 2014, 52(3): 217.
- [65] Wang L, Butterly C R, Wang Y, Herath H M S K, Xi Y G, Xiao X J. Effect of crop residue biochar on soil acidity amelioration in strongly acidic tea garden soils. *Soil Use and Management*, 2014, 30(1): 119-128.
- [66] 金桂梅, 李昱航, 郑向群, 梁涛, 毛妍婷, 陈安强, 续勇波, 玉总, 平凤超, 雷宝坤. 不同土壤管理与施肥模式对茶园土壤环境及茶叶产

- 量的影响. 土壤通报, 2020, 51(1): 152-158.
- [67] 夏晓阳, 王响玲, 夏浩, 李宇轩, 王吉元, 姜存仓. 改性生物炭特征及其对盐碱化土壤改良的研究进展. 华中农业大学学报, 2023, 42(5): 12-19.
- [68] Xu G, Zhang Y, Sun J N, Shao H B. Negative interactive effects between biochar and phosphorus fertilization on phosphorus availability and plant yield in saline sodic soil. *Science of the Total Environment*, 2016, 568: 910-915.
- [69] He L L, Shan J, Zhao X, Wang S Q, Yan X Y. Variable responses of nitrification and denitrification in a paddy soil to long-term biochar amendment and short-term biochar addition. *Chemosphere*, 2019, 234: 558-567.
- [70] 岳美如, 胡佳俊, 高旻天, 李继香, 刘楠. 生物炭释出物的效应及其缓解策略与应用. 上海大学学报: 自然科学版, 2023, 29(6): 1003-1021.
- [71] Ho T T K, Tra V T, Le T H, Nguyen N K Q, Tran C S, Nguyen P T, Vo T D H, Thai V N, Bui X T. Compost to improve sustainable soil cultivation and crop productivity. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2022, 6: 100211.
- [72] Hashemimajd K. Effect of elemental sulphur and compost on pH, electrical conductivity and phosphorus availability of one clay soil. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11(6): 1425-1432.
- [73] Liu X Y, Rezaei Rashti M, Dougall A, Esfandbod M, Van Zwieten L, Chen C R. Subsoil application of compost improved sugarcane yield through enhanced supply and cycling of soil labile organic carbon and nitrogen in an acidic soil at tropical Australia. *Soil and Tillage Research*, 2018, 180: 73-81.
- [74] Guo X X, Liu H T, Zhang J. The role of biochar in organic waste composting and soil improvement: a review. *Waste Management*, 2020, 102: 884-899.
- [75] Zhou S X, Kong F L, Lu L, Wang P, Jiang Z X. Biochar-An effective additive for improving quality and reducing ecological risk of compost: A global meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 151439.
- [76] Zhou S X, Jiang Z X, Shen J F, Yao Q X, Yang X, Li X B, Awasthi M K, Zhang Z Q. Biochar-amended compost as a promising soil amendment for enhancing plant productivity: a meta-analysis study. *Science of the Total Environment*, 2023, 879: 163067.
- [77] Zhang X M, Liu W, Zhang G M, Jiang L, Han X G. Mechanisms of soil acidification reducing bacterial diversity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 81: 275-281.
- [78] Liu C Y, Jiang M T, Yuan M M, Wang E T, Bai Y, Crowther T W, Zhou J Z, Ma Z Y, Zhang L, Wang Y, Ding J X, Liu W X, Sun B, Shen R F, Zhang J B, Liang Y T. Root microbiota confers rice resistance to aluminium toxicity and phosphorus deficiency in acidic soils. *Nature Food*, 2023, 4: 912-924.
- [79] Chen D L, Wang X X, Carrión V J, Yin S, Yue Z F, Liao Y, Dong Y H, Li X G. Acidic amelioration of soil amendments improves soil health by impacting rhizosphere microbial assemblies. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 167: 108599.
- [80] 杨淑娜, 高志远, 奚昕琰, 王莉, 殷益明, 姚莹, 贾惠娟. 芽孢杆菌菌肥和菌剂对连作条件下桃幼树生长和土壤环境的影响. 应用生态学报, 2022, 33(2): 423-430.
- [81] 吴林土, 徐火忠, 李贵松, 唐仕琴, 王勇军. 微生物菌剂对松阳茶园土壤酸化改良及肥力提升的效果分析. 浙江农业科学, 2022, 63(6): 1245-1249.
- [82] Taba S, Miyahira N, Nakazato M, Suzuki M, Suwa R, Sekine K T. Ecology of pitaya stem rot caused by *Gilbertella persicaria* and its biological control by phyllosphere bacteria. *Plant Pathology*, 2022, 71(2): 426-436.
- [83] Shi R Y, Li J Y, Xu R K, Qian W. Ameliorating effects of individual and combined application of biomass ash, bone meal and alkaline slag on acid soils. *Soil and Tillage Research*, 2016, 162: 41-45.
- [84] 王鹏飞. 复配改良剂对设施番茄根际酸化土壤的影响研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2022.
- [85] Wu L P, Zheng H N, Wang X J. Effects of soil amendments on fractions and stability of soil organic matter in saline-alkaline paddy. *Journal of Environmental Management*, 2021, 294: 112993.
- [86] 谢军, 王子芳, 王莹燕, 熊子怡, 高明. 化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响. 环境科学, 2023, 44(8): 4565-4574.
- [87] 谭智勇, 王喜英, 赵辉, 刘杰, 艾永峰, 刘国权. 改良剂对酸性植烟土壤化学性质、细菌群落结构和丰度的影响. 江苏农业科学, 2023, 51(16): 240-246.
- [88] He X, Nkoh J N, Shi R Y, Xu R K. Application of chitosan-and alginate-modified biochars in promoting the resistance to paddy soil acidification and immobilization of soil cadmium. *Environmental Pollution*, 2022, 313: 120175.
- [89] 张继宁, 张鲜鲜, 孙会峰, 王从, 刘善良, 蒲加军, 周胜. “双碳”背景下生物炭基肥的研究现状及展望. 浙江农业科学, 2023, 64(12): 2825-2830.
- [90] Deng A N, Wu X F, Su C L, Zhao M, Wu B, Luo J H. Enhancement of soil microstructural stability and alleviation of aluminium toxicity in acidic

- latosols via alkaline humic acid fertilizer amendment. *Chemical Geology*, 2021, 583: 120473.
- [91] 徐火忠, 吴林土, 李贵松, 洪海清, 王允祥, 潘瑛洁. 茶园土壤酸化修复技术研究进展. *中国茶叶*, 2023, 45(1): 12-17.
- [92] Liang C, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology*, 2017, 2: 17105.
- [93] 张彬, 陈奇, 丁雪丽, 何红波, 张旭东. 微生物残体在土壤中的积累转化过程与稳定机理研究进展. *土壤学报*, 2022, 59(6): 1479-1491.
- [94] Zheng J, Fan J L, Zhang F C, Guo J J, Yan S C, Zhuang Q L, Cui N B, Guo L. Interactive effects of mulching practice and nitrogen rate on grain yield, water productivity, fertilizer use efficiency and greenhouse gas emissions of rainfed summer maize in Northwest China. *Agricultural Water Management*, 2021, 248: 106778.
- [95] Xiao Q, Huang Y P, Wu L, Tian Y F, Wang Q Q, Wang B R, Xu M G, Zhang W J. Long-term manuring increases microbial carbon use efficiency and mitigates priming effect via alleviated soil acidification and resource limitation. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(7): 925-934.
- [96] 郑庆福. 生物炭对土壤碳库含量和碳封存稳定性的研究进展//中国环境科学学会, 同济大学, 清华大学. 2023 年有机固废处理与资源化利用大会论文集. 内蒙古民族大学, 化学与材料学院, 有机废弃物处理与土壤修复研究中心, 碳纳米重点实验室, 2023: 211-223.
- [97] Lehmann J, Cowie A, Masiello C A, Kammann C, Woolf D, Amonette J E, Cayuela M L, Camps-Arbestain M, Whitman T. Biochar in climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 2021, 14: 883-892.
- [98] Lehmann J, Hansel C M, Kaiser C, Kleber M, Maher K, Manzoni S, Nunan N, Reichstein M, Schimel J P, Torn M S, Wieder W R, Kögel-Knabner I. Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. *Nature Geoscience*, 2020, 13: 529-534.
- [99] Ren F L, Sun N, Xu M, Zhang X B, Wu L H, Xu M G. Changes in soil microbial biomass with manure application in cropping systems: a meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 2019, 194: 104291.
- [100] Aranda V, Macci C, Peruzzi E, Masciandaro G. Biochemical activity and chemical-structural properties of soil organic matter after 17 years of amendments with olive-mill pomace co-compost. *Journal of Environmental Management*, 2015, 147: 278-285.
- [101] Razza F, D'Avino L, L'Abate G, Lazzeri L. The role of compost in bio-waste management and circular economy. *Designing Sustainable Technologies, Products and Policies*, 2018: 133-143.
- [102] Grover S P, Butterly C R, Wang X, Tang C. The short-term effects of liming on organic carbon mineralisation in two acidic soils as affected by different rates and application depths of lime. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53(4): 431-443.
- [103] Jiang Q J, Qi Z M, Xue L L, Bukovsky M, Madramootoo C A, Smith W. Assessing climate change impacts on greenhouse gas emissions, N losses in drainage and crop production in a subsurface drained field. *Science of the Total Environment*, 2020, 705: 135969.
- [104] Zhang L Y, Jing Y M, Chen C R, Xiang Y Z, Rashti M R, Li Y T, Deng Q, Zhang R D. Effects of biochar application on soil nitrogen transformation, microbial functional genes, enzyme activity, and plant nitrogen uptake: A meta-analysis of field studies. *GCB Bioenergy*, 2021, 13(12): 1859-1873.
- [105] Gaudaré U, Kuhnert M, Smith P, Martin M, Barbieri P, Pellerin S, Nesme T. Soil organic carbon stocks potentially at risk of decline with organic farming expansion. *Nature Climate Change*, 2023, 13(7): 719-725.