

红黄壤团聚体-有机质-微生物互作与降酸培肥研究进展^①

赵学强^{1,2,3}, 李渝^{4,5}, 刘彦伶^{4,5}, 张雅蓉^{4,5}, 杨三维⁶, 何冠谛⁶, 柳开楼⁷, 李继文⁸, 沈仁芳^{1,2,3}

(1 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 2 中国科学院红壤生态实验站, 江西鹰潭 335211; 3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵阳 550006; 5 农业农村部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站, 贵阳 550006; 6 贵州大学农学院, 贵阳 550025; 7 江西省红壤及种质资源研究所/耕地改良与质量提升江西省重点实验室, 南昌 331717; 8 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 有机质是土壤肥力的核心, 具有抗酸化和培肥双重作用。酸和瘦是红黄壤区耕地的两大特征。针对红黄壤酸瘦问题, 以降酸和培肥的协同作用为中心, 综述了酸碱度对土壤有机质积累的影响、旱地和水田降酸培肥的有机无机肥配施技术、降酸培肥协同的团聚体-有机质-微生物耦合作用、铝和铁在团聚体形成和降酸培肥中的作用等方面内容。建议今后研究突出红黄壤低 pH 和铁铝富集特色, 研发酸瘦复合障碍消减新技术, 并综合运用多学科交叉知识和新技术, 加强降酸培肥合成菌群分离和定殖条件优化、团聚体-有机质-微生物相互作用等方面研究。

关键词: 有机质; 团聚体; 微生物; 铁; 铝

中图分类号: S158.5; S156.6; S153.4 **文献标志码:** A

Red-Yellow Soil Aggregates-Organic Matter-Microbes Interactions for Synergistic Acid Reduction and Fertility Improvement: A Review

ZHAO Xueqiang^{1,2,3}, LI Yu^{4,5}, LIU Yanling^{4,5}, ZHANG Yarong^{4,5}, YANG Sanwei⁶, HE Guandi⁶, LIU Kailou⁷, LI Jiwen⁸, SHEN Renfang^{1,2,3}

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China*; 2 *Ecological Experimental Station of Red Soil, Chinese Academy of Sciences, Yingtan, Jiangxi 335211, China*; 3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 4 *Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China*; 5 *Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation and Agricultural Environment (Guizhou), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guiyang 550006, China*; 6 *College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China*; 7 *Jiangxi Institute of Red Soil and Germplasm Resources/Jiangxi Province Key Laboratory of Arable Land Improvement and Quality Enhancement, Nanchang 331717, China*; 8 *Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

Abstract: Organic matter is the core of soil fertility and plays a dual role in both acidity mitigation and fertility improvement. Acidity and poor fertility are two fundamental characteristics of cultivated land in the red-yellow soil regions of south China. Focusing on the synergistic interaction between acid reduction and fertility improvement, this paper reviewed the impact of acidity on organic matter accumulation, the techniques of combining organic and inorganic fertilizers in both dryland and paddy fields, and the aggregates-organic matter-microbes coupling mechanism with the particular attention given to the roles of aluminum and iron. Future research should emphasize the characteristics of low pH and iron-aluminum enrichment in red-yellow soils, develop new measures for synergistic acid reduction and fertility improvement, isolate synthetic microbial communities and optimize their colonization conditions, and elucidate the aggregates-organic matter-microbes coupling mechanism using multidisciplinary knowledge and new techniques.

Key words: Organic matter; Aggregate; Microbe; Iron; Aluminum

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1901201-04、2023YFD1901504)资助。

作者简介: 赵学强(1977—), 男, 河南汤阴人, 博士, 研究员, 主要从事酸性土壤植物营养研究。E-mail: xqzhao@issas.ac.cn

我国南方红黄壤区地处热带、亚热带,北起长江沿岸,南至南海诸岛,东至台湾,西至云贵高原与横断山脉,包括福建、江西、湖南、广东、广西、贵州、海南、台湾等省(区)全部,浙江、云南、四川省的大部以及皖南、鄂南、藏东南和苏西南边缘小部,涉及 15 个省(区),总面积 218 万 km^2 ,约占全国土地总面积的 22.7%^[1]。该地区水热资源丰富,气候生产潜力巨大,但是土壤酸化严重。据统计,南方红黄壤区酸性土壤面积约 188 万 km^2 ,约占该地区土地总面积的 86%,而且酸化程度和面积仍在扩大,严重制约了生产潜力发挥^[2]。

近些年,高强度集约化土地利用、农用化学品过量投入和单一作物种植模式,使本已呈酸性的红黄壤“酸上加酸”。同时,高温多雨的气候,红黄壤有机质分解快、养分淋溶流失多,导致肥力低下,伴随板结、黏重、侵蚀、季节性干旱等复合障碍问题。系统解决红黄壤酸、瘦、板、黏、蚀、旱的复合障碍问题是发挥这些地区巨大气候生产潜力的前提。例如,贵州省水、热等气候条件虽在全国具有优势,作物气候生产潜力巨大,但黄壤酸、瘦、黏等问题突出,严重制约了贵州省耕地质量和产能提升,2022 年贵州粮食和油料作物单位面积产能分别较全国平均水平低 31.1% 和 14.9%。

耕地是粮食生产的命根子,提升红黄壤区耕地质量是落实国家“藏粮于地、藏粮于技”战略、保障国家粮食安全的重要一环。2021 年,科技部启动“十四五”国家重点研发计划“北方干旱半干旱与南方红黄壤等中低产田能力提升科技创新”重点专项。2023 年,农业农村部发布《农业农村部办公厅关于开展酸化耕地治理重点县建设的通知》,对全国南方酸化耕地面积较大的 15 个省份、20 个县开展酸化耕地治理。2024 年,中国科学院启动了“盐碱性土壤产能提升”前瞻战略科技先导专项。2025 年,国家酸化耕地治理科技创新联盟成立。克服红黄壤酸、瘦、黏等地力限制因子,提升红黄壤耕地质量和产能,是实现我国红黄壤区粮油作物高产稳产的重大需求。

酸碱度是土壤物理、化学和生物性质变化的主要驱动因子。土壤有机质是耕地质量的核心,决定着土壤的物理、化学和生物学性质,是实现粮食安全的基础与保障。团聚体是土壤结构的基本单元和有机质的储存场所,微生物是影响团聚体和有机质形成和稳定的主要因素。据此,本文以团聚体-有机质-微生物耦合作用为主线,综述了红黄壤降酸与培肥的协同作用,以期为我国红黄壤耕地质量和产能提升提供科技

支撑。

1 红黄壤降酸与培肥的协同作用

1.1 红黄壤降酸与培肥的协同原理

土壤酸化的机制之一是土壤养分离子的大量淋失,阳离子交换量和酸缓冲能力降低,相反, H^+ 和 Al^{3+} 大量释放,导致土壤贫瘠、酸害、铝毒、锰毒加重。酸性土壤改良利用的原则之一是降低酸度和提高肥力并重,但是土壤酸度改良和肥力提升经常被分离研究。土壤酸度和肥力二者之间存在明显的协同关系。降酸是培肥的前提和基础,而培肥是降酸的巩固和深化。发挥二者之间的协同作用,可共同创造一个适宜作物生长、养分高效的健康土壤环境。改良剂施用下土壤降酸培肥效果的 Meta 分析表明,在酸性土壤上施用有机肥类和生物质炭类改良剂可实现协同降酸、培肥、增产的目的^[3]。降酸与培肥相辅相成,共同构成了改良酸性土壤、提升地力的核心技术路径。

通过土壤培肥,提高了土壤养分和有机质含量,土壤盐基饱和度升高,而且有机质含有多种官能团,可增加土壤缓冲性能,建立对抗酸化的缓冲体系,可为降酸提供长期稳定的缓冲环境。另外,一些养分阴离子如磷酸根、有机阴离子官能团能够与 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 发生络合反应,形成稳定的、无毒性的络合物,降低酸害、铝毒和锰毒发生。因此,提升土壤有机质和养分等肥力指标,可实现土壤降酸和培肥的协同作用。

通过土壤降酸,可消除土壤中铝和锰的毒性,作物根系得以正常生长,从而能更有效地吸收土壤养分,实现“土壤有肥、作物能吸收”,培肥措施才能见效。同时,酸性土壤 pH 提高后,土壤中大多数养分(如磷)有效性和微生物活性升高,土壤中固持的养分得以释放,微生物对有机养分的分解周转加快,土壤肥力提高。因此,降酸也有利于土壤培肥。有机质是土壤肥力的核心指标,但是目前酸碱度对土壤有机质积累的作用方向还不清楚,以下对这方面已有研究加以详细阐述。

1.2 酸碱度对红黄壤肥力的影响

土壤肥力的高低主要体现在两个方面:养分有效性和有机质含量,二者之间密切联系。有机质含量高的土壤,一般大部分养分有效含量也较高,特别是氮和磷。大多数养分的有效性在中性和弱酸性土壤中较高。通过提高酸性土壤 pH 的方法,可以提高土壤大多数养分的有效性,但是酸碱度对土壤有机质的影响存在两种不同观点。

澳大利亚 34 年酸性土壤改良试验结果表明,施用石灰提高了农田土壤 pH,但是降低了有机质含量和大团聚体稳定性^[4]。我国农田土壤大数据 Meta 分析表明,氮肥诱导的土壤酸化驱动了有机质积累^[5]。我国陆地生态系统 Meta 分析结果也表明,外源氮输入诱导土壤酸化,促进了土壤团聚体特别是大团聚体的形成和有机质的积累^[6]。对我国东南地区土壤 pH 和有机质数据分析表明,土壤 pH 降低量和有机质增加量呈显著正相关,氮肥诱导土壤酸化,同时提高有机质积累^[7]。氮肥诱导土壤酸化,也改善作物生长,提高作物根系生物量和根系碳沉淀,增加土壤碳输入量。那么,氮肥提高土壤有机质积累的原因是土壤酸化,还是根系碳输入量增加?研究表明,氮肥促进土壤有机质积累的主要原因是土壤酸化,而不是根系外源碳输入的增加^[8]。土壤酸化通过以下两个机制促进有机质积累:一是土壤酸化降低微生物活性,从而降低有机质矿化分解;二是土壤酸化提高土壤矿物表面正电荷,加强对带负电有机官能团的吸附,降低可溶性有机碳淋溶,起到物理和化学保护作用^[5]。上述分析表明,土壤酸化或低 pH 有利于有机质积累;而长期施用石灰虽然提高了土壤 pH,但会降低土壤有机质积累,并且碳酸钙和酸反应产生大量二氧化碳,还会增加碳排放。

一些学者对“土壤酸化有利于有机质积累”的观点提出了质疑。Kuz'yakov 等^[9]认为,不合理的统计分析方法造成了“氮肥诱导的土壤酸化可增加农田土壤有机质积累”的结论,并认为这一结论会误导氮肥的过量施用。他们强调在石灰性土壤上,土壤酸化会引起碳酸钙的酸解,增加二氧化碳的排放,造成土壤无机碳的大量损失。氮肥诱导的土壤酸化导致土壤碳酸钙中无机碳的巨大损失,对土壤酸缓冲能力、团聚体形成、土壤有机碳稳定性、微生物和酶活性、养分循环和有效性、透水性、作物生产力等造成负面影响^[10]。施用等量有机肥,对碱性土壤的固碳量要高于中性和酸性土壤^[11],暗示酸性土壤固碳能力低。实验室模拟试验结果表明,土壤酸化增加了有机碳淋溶和锰损失,而锰对于土壤有机碳固存有重要作用^[12]。培养试验也表明,添加外源碳酸钙可提高土壤 pH、可溶性有机碳和微生物生物量碳含量^[13]。这些结果又表明,土壤酸化或者低 pH 不利于有机质积累,还会导致无机碳损失。

酸碱度对土壤有机质积累的影响存在上述两种相反的观点,究竟低 pH 还是高 pH 更有利于土壤有机质积累?碳酸钙对土壤有机碳矿化的影响可能依

赖于碳酸钙添加量,低量碳酸钙促进土壤团聚体形成,抑制土壤有机质矿化分解,而高量碳酸钙则显著提高土壤 pH,增强微生物活性,促进有机质矿化分解^[14]。因此,推测土壤酸碱度对有机质积累的影响可能因土壤初始 pH 和 pH 变化量而异,pH 效应大小取决于有机质分解量、合成量和固持量的综合结果。考虑到全国范围内土壤 pH 范围介于 3.0~9.0,变化幅度很大,对于不同土壤类型,即使土壤 pH 降幅一致,对有机质积累的影响可能也不同。土壤酸化促进或者抑制土壤有机质积累两种观点均有合理性,尚需进一步设计精细 pH 梯度试验,研究酸碱度对土壤有机质积累的影响及其相关机制。目前的观点大都是基于大数据分析,根据相关性分析得出的结论,缺少试验佐证。另外,氮肥导致的农田土壤酸化对有机质积累的影响,有可能是氮肥本身效应,也有可能是土壤酸化效应,之前研究很少区分氮肥和土壤酸化的独立效应。

2 红黄壤降酸与培肥协同的有机无机肥配施模式

2.1 有机肥在红黄壤降酸与培肥协同中的重要作用

提高酸性土壤 pH 最传统有效的方式是施用石灰,但由于石灰具有粉尘污染、深层改良不足、易造成土壤板结和返酸等问题,农民不愿意使用石灰改良酸性土壤。在酸性土壤上施用石灰类物质,其中的碳酸钙会与 H^+ 反应,释放大量的二氧化碳,造成无机碳损失和温室气体排放。生物质炭在酸性土壤改良和产能提升上效果明显,但连年施用用量大、成本高,在农业生产应用中也受到限制。其他工业废弃物如粉煤灰、碱渣、磷石膏、造纸废渣等也可用于酸性土壤改良,但由于担心负面环境效应,也未能有效推广。上述酸性改良剂大都侧重于土壤酸度改良,在提高肥力和改善土壤结构方面效果不佳,不能协同解决红黄壤酸、瘦、黏等复合障碍问题,限制了它们的应用。在中性和碱性土壤上,化肥和有机肥常表现出相似的肥效,有时化肥的肥效甚至优于有机肥;但在酸性土壤上,有机肥表现出更好的肥效,不仅能提高土壤肥力,而且能提高土壤 pH 和酸缓冲能力,减缓土壤酸化,降低毒性铝浓度,还有改善土壤结构的效果^[2]。因此,施用有机肥是土壤降酸与培肥协同的一条有效途径。

2.2 红黄壤旱地有机无机肥配施的降酸培肥效果

在红黄壤旱地上的许多研究表明,化肥和有机肥配合施用具有增产、培肥、降酸和改善土壤结构的效

果^[15-19]。但有机肥施用量不可过高,以 25% 有机肥配施 75% 氮磷钾化肥效果最佳。在过高有机肥投入水平下,土壤有机碳的固持接近饱和,当有机碳投入超过分解拐点后,黄壤固碳效率大幅降低^[15-16]。在提高酸性黄壤 pH、有机碳、全氮、玉米和大豆产量效果上,50% 有机肥替代化学氮肥效果最佳^[20]。100% 有机肥替代化肥显著促进黄壤有机碳矿化,降低有机碳的稳定性,而 50% 有机肥替代化肥则抑制有机碳矿化,有利于有机质积累^[21]。因此,合适的有机肥和化肥配比及用量对红黄壤旱地降酸、培肥和结构改良非常关键。

2.3 红黄壤水田有机无机肥配施的降酸培肥效果

红壤性水稻土长期定位试验结果表明,与单施化肥相比,化肥和有机肥平衡施用改善土壤养分状况,提高水稻产量^[22]。黄壤性水稻土长期施肥定位试验结果也表明,相对于化肥,有机肥的添加显著提高黄壤有机质含量,其中 25%~50% 有机肥氮替代化肥氮能显著提升有机碳稳定性,增加土壤碳储量,减少碳损失,提高土壤 pH,降低土壤容重,提高土壤孔隙度,增加氮磷的供应^[23-26]。虽然长期施用有机肥可提高黄壤性水稻土有机碳净积累量,但是施有机肥处理的土壤有机碳矿化速率高于施化肥处理,所以降低有机肥施用条件下有机碳矿化速率对于黄壤培肥至关重要^[27]。总之,不管是旱地还是水田,适宜的有机肥/化肥比例和用量对于红黄壤降酸、培肥和作物增产非常关键,而用量和比例取决于土壤 pH、土地利用类型(旱地或水田)、作物种类、化肥和有机肥种类等因素。

3 红黄壤团聚体-有机质-微生物耦合作用与降酸培肥

3.1 有机无机肥配施对红黄壤团聚体-有机质-微生物相互作用的影响

团聚体是土壤结构的基本单元,是有机质的“储存器”、微生物的“孵化器”;有机质是团聚体形成和稳定的胶结剂,是微生物生长的营养来源;微生物是土壤有机质合成和分解的主要驱动者,是影响团聚体组成和稳定性的关键因素。团聚体-有机质-微生物相互作用与土壤固碳培肥关系密切。长期有机培肥加快团聚体形成周期,增强团聚体稳定性,增加团聚体养分赋存的总量,提高养分有效性^[28]。粪肥施用影响土壤团聚体的形成和稳定性,大部分研究认为粪肥施用促进土壤大粒径团聚体的形成^[29]。有机无机肥配施可能通过影响团聚体-有机质-微生物相互作用,实

现红黄壤的降酸、培肥、结构改良。与单施化肥相比,施用有机肥提高红壤性水稻土轻组有机碳、颗粒有机碳、易氧化有机碳含量^[30]。长期有机无机肥配施改善红壤团聚体结构,增加大团聚体比例,降低微团聚体比例,提高土壤团聚体各组分有机碳含量^[31-33]。长期施用有机肥可以降低黄壤容重,改善团聚体结构,增强物理结构的稳定性,对于黄壤有机碳和有机氮的保护具有重要作用^[17, 34]。因此,加强大团聚体中微生物群落的调控是红黄壤固碳管理的重要策略。

有机无机肥配施不仅可直接影响土壤团聚体的组成和稳定性及有机质积累,还可通过改变微生物影响团聚体和有机质积累。土壤微生物主要通过分解周围的有机物,并释放代谢产物,从而影响土壤颗粒在团聚体中的胶结程度^[35]。土壤有机碳含量的升高可提高微生物活性,微生物调控植物源有机物在土壤矿物表面固持,从而影响有机质积累和团聚体的形成^[36]。不合理施肥导致微生物群落单一、丰度较低,而有机无机肥配施则可显著优化微生物群落组成。长期有机无机肥配施通过维持红壤微生物结构稳定性,促进碳氮代谢相关微生物关键种功能发挥,提高土壤 pH 和综合肥力^[18-19, 22]。长期施用有机肥能够提高黄壤稻田土壤肥力,改变细菌生长环境,进而改变细菌群落结构组成,提高细菌群落多样性^[37-38]。

3.2 铝和铁在红黄壤团聚体形成和降酸培肥中的作用

红黄壤最明显特征是脱硅富铁铝化。有机-金属矿物结合对于土壤有机质积累具有重要作用^[39]。钙、铝、铁能够通过钙桥、铝桥、铁桥的方式促进土壤团聚体形成。有机颗粒表面的阴离子基团可通过多价阳离子(Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Fe^{3+})吸附在黏土矿物表面,形成黏粒-多价阳离子-有机质微结构,是形成土壤微团聚体的主要胶结机制,其键合力的顺序为: $\text{Al}^{3+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+}$ ^[40]。红黄壤团聚体的形成可能与铝、铁关系密切。铁铝氧化物具有较大的表面积,能够和黏土颗粒反应,是形成土壤团聚体的重要因子,铝和铁在土壤有机质固持中的作用受到越来越多关注^[41-46]。通过美拉德反应(Maillard reaction, 一种非酶催化的反应),铝和铁显著促进土壤中有有机小分子聚合化,形成稳定有机质^[45]。Wagai 等^[42]用有机物-金属之间的“胶束理论”解释土壤有机碳固存机理:首先,植物源有机物质微生物分解,土壤金属如铁和铝溶解;然后,合成有机物-金属相;最后,与黏土形成中等密度小团聚体。因此,铝和铁在土壤团聚体形成和有机质积累中具有重要作用。由于土壤中有有机物质和金属

氧化物种类繁多,不同种类和含量对团聚体形成和稳定的贡献不同,且容易受到外界环境影响。因此,彻底厘清有机质和金属氧化物对土壤团聚体形成的作用是解开土壤结构和有机质形成的关键^[35]。

土壤团聚体稳定性与铁、铝的形态有关^[47-48]。草酸提取态和DCB(dithionite-citrate-bicarbonate)提取态的铝与土壤有机质含量具有显著相关性,可很好预测土壤有机质含量,而草酸提取态铁与有机质相关性较差^[49-51]。对自然林地的研究表明,土壤酸化提高了各种形态铁氧化物含量和团聚体稳定性,但是降低了铝和锰氧化物含量,认为氧化铁是团聚体形成的主要因子,而铝和锰在土壤酸化条件下淋失^[52]。相对于铝,三价铁还可促进土壤有机质氧化分解,释放二氧化碳和甲烷^[53]。长期秸秆还田试验结果表明,土壤中的铁铝氧化物与秸秆中的有机碳发生反应,通过吸附和共沉淀的方式促进土壤对有机碳的固定和保持,从而提高土壤有机质含量^[54]。有机肥部分替代化肥显著提高红壤团聚体稳定性、大团聚体数量和提取态铁铝氧化物含量^[55]。有机-无机肥配施可能通过改变红黄壤中铝和铁的形态、含量,促进团聚体形成和有机质积累,这仍需更多试验数据来支撑。

酸化可通过改变土壤铝和铁的形态和含量,影响团聚体形成和有机质积累。土壤酸化提高了水稳性团聚体的比例、铁氧化物和有机碳含量^[56]。土壤酸化促进土壤铁铝氧化物的溶解,导致土壤溶液 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 的浓度显著增加,这两种离子会在黏土矿物和有机分子之间形成桥键,促进团聚体形成^[35]。土壤胶体都带有不同程度的电荷,红黄壤电荷特性与活性铁铝氧化物密切相关^[57]。土壤颗粒表面电荷性质受 pH 影响,黄壤胶体颗粒凝聚与否强烈依赖于 pH^[58],这必将影响黄壤团聚体的形成。pH 在团聚体形成和有机质固持中具有多方面作用:①随着 pH 的降低,腐殖酸对铁氧化物和黏土矿物的吸附增加,这意味着低 pH 提高矿物表面对腐殖酸的吸附量;②随着 pH 的降低,带负电荷土壤胶体颗粒之间的静电斥力会降低,促进了有机物和矿物颗粒间的胶结;③pH 降低还会影响土壤中很多阳离子的有效性,间接影响团聚体的形成^[35]。这些理论分析可用来解释前面 1.2 讨论的“pH 对土壤有机质影响”的可能机制。有意思的是,铝能够与腐殖质形成复合体,铝-腐殖质复合体的形成对土壤有机质积累具有重要意义,并减少铝对植物的毒害^[59]。通过铝、铁与有机物质形成复合体,不仅可以促进团聚体形成和有机质提升,还可以降低酸性土壤中这些金属元素对植物的毒害。理解不同施

肥模式下红黄壤铁铝形态和含量与团聚体、有机质的相互作用机制,不仅有助于提高土壤肥力和抗酸化能力,而且能降低铝的生物毒性,具有多重意义。

4 研究展望

4.1 研发红黄壤酸、瘦复合障碍协同消减新技术

土壤肥力是多个指标的综合表征,包括物理、化学、生物等指标。不同类型土壤肥力的限制因子不一样。酸和瘦是红黄壤地力低下的两个主要因素。我国南方红黄壤坡耕地酸瘦程度在土地利用类型间和田块间存在很大差异,有的土壤是强酸低肥力类型,有的是中等酸性低肥力类型,有的是中等酸性高肥力类型,等等,不同类型酸瘦程度土壤的改良技术存在差异。前面的分析表明,降酸与培肥之间存在协同作用,但是目前尚缺乏施用简单、经济有效的不同类型酸瘦程度红黄壤障碍协同消减的针对性技术,特别是现有技术的落地性和区域推广性较弱,限制了这些技术的大面积应用推广。因此,需进一步研发可落地、可推广、农民可接受的红黄壤酸瘦复合障碍协同消减新技术。

4.2 综合运用多学科交叉知识是团聚体-有机质-微生物耦合机制创新的关键

目前土壤学面临的重要挑战是与其他学科交叉研究,提升耕地质量需要土壤学与生物、物理、化学、地理、矿物等多学科知识交叉融合。土壤是一个有生命的复杂体系,单一学科知识很难充分理解这一复杂体系中存在的科学问题,多学科知识交叉能加强对问题的理解。红黄壤团聚体-有机质-微生物间作用机制研究需要多学科知识,包括土壤矿物学、土壤物理学、土壤化学、微生物学、植物营养学等。近年来,土壤肥力研究越来越重视学科交叉,但仍不够深入。例如,土壤颗粒表面经常带有电荷,不同土壤表面电荷的性质和量都不一样,南方红黄壤是一种可变电荷载土壤,土壤表面的电荷性质对于土壤团聚体形成,养分离子和有机阴离子的吸附、解吸具有很大影响,但是土壤电化学的知识较少应用在团聚体-有机质-微生物相互作用研究中。另外,植物营养学特别是根际营养知识在团聚体-有机质-微生物相互作用研究中应用较少,而根系大小和根际分泌物对团聚体形成、碳源输入、微生物生长均具有重要作用。

4.3 加强新技术在红黄壤降酸和培肥协同作用微观机制研究中的应用

近年来土壤和生物检测技术发展迅速,土壤学研究已进入一个新时代。X 射线计算机断层扫描可在不破坏样品完整性的前提下,观察样品三维外观形态和

内部结构,分辨率可达微米级,精确量化孔隙网络、根系生长、土壤动物通道、团聚体分布等,并实现观察结果的三维可视化呈现。同步辐射技术能以极高的分辨率(可达纳米级),分析土壤中的元素分布、化学形态和微观结构,可清晰地看到碳、铁、磷等元素在土壤微域中的具体分布及其与矿物表面的结合状态,用以研究元素生物地球化学循环、污染物迁移固定、土壤有机质稳定化机理等。土壤微生物检测的宏基因组学与宏转录组学、代谢组学与脂类组学等技术发展也很快,可快速和全面地研究土壤微生物组成、结构、功能。充分利用这些新技术,将加快红黄壤降酸培肥协同作用的微观机制研究。

4.4 突出具有红黄壤特色降酸培肥的分子机制研究

红黄壤的成土条件和过程明显不同于其他类型土壤,铁铝含量高,可能蕴含有独特的团聚体-有机质-微生物耦合机制。例如黄壤,分布于高海拔地区,土壤湿润,温度较低,这种特殊的气候和土壤条件有利于有机质积累。目前,关于土壤团聚体-有机质-微生物相互作用的研究报道很多,但红黄壤相关研究相对较少,缺乏对红黄壤酸化、团聚和稳定过程及有机质积累的深入研究和理论认识,特别是铁和铝在红黄壤有机质积累中的分子机制研究明显不足。另外,黄壤 pH 和有机质一般高于红壤,二者成土过程有明显差异,因此红壤与黄壤降酸及相关培肥机制可能也不一样,二者可能蕴含有不同的团聚体-有机质-微生物耦合机制。

4.5 分离红黄壤降酸培肥协同的合成菌群

目前,大多数农田土壤微生物报道都是研究施肥、耕作、栽培、环境等因子对土壤整体微生物群落或者单一功能微生物的丰度、多样性和群落结构的影响,并依据这种变化与土壤理化指标、作物养分吸收和产量之间进行相关性分析,反推微生物可能具有的功能。这种群落水平的微生物研究主要反映了微生物对环境的响应,在一定程度上暗示它们可能具有某一功能,但是不能直接确定这些微生物的作用。基于微生物基因高通量测序的结果,很难直接分离这些微生物,用于农田土壤改良和利用。近年来,微生物培养和分离技术快速发展,研究证明了微生物合成菌群在农业上的应用价值,一些微生物合成菌群能够帮助作物抵抗酸铝胁迫^[60]。因此,尝试从红黄壤中分离降酸培肥功能微生物,合成微生物菌群,并优化这些合成菌群在田间定殖和发挥功能的条件,有望逐渐从微生物理论研究走向田间应用。

参考文献:

- [1] 红黄壤利用改良区化协作组. 中国红黄壤地区土壤利用改良区划[M]. 北京: 农业出版社, 1985.
- [2] 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.
- [3] 明润廷, 万方, 那立苹, 等. 改良剂施用下的土壤降酸培肥效果——基于中国酸性土壤改良研究的 Meta 分析[J]. 土壤学报, 2025, 62(2): 400–410.
- [4] Aye N S, Sale P W G, Tang C X. The impact of long-term liming on soil organic carbon and aggregate stability in low-input acid soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(5): 697–709.
- [5] Zhang X M, Guo J H, Vogt R D, et al. Soil acidification as an additional driver to organic carbon accumulation in major Chinese croplands[J]. *Geoderma*, 2020, 366: 114234.
- [6] Lu X F, Hou E Q, Guo J Y, et al. Nitrogen addition stimulates soil aggregation and enhances carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(12): 2780–2792.
- [7] Sun X L, Minasny B, Wu Y J, et al. Soil organic carbon content increase in the east and south of China is accompanied by soil acidification[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 857: 159253.
- [8] Lu X F, Gilliam F S, Guo J Y, et al. Decrease in soil pH has greater effects than increase in above-ground carbon inputs on soil organic carbon in terrestrial ecosystems of China under nitrogen enrichment[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2022, 59(3): 768–778.
- [9] Kuzyakov Y, Kuzyakova I, Raza S, et al. Letter-to-the-Editor: Does acidification really increase soil carbon in croplands How statistical analyses of large datasets might mislead the conclusions[J]. *Geoderma*, 2021, 384: 114806.
- [10] 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.
- [11] Li B Z, Song H, Cao W C, et al. Responses of soil organic carbon stock to animal manure application: A new global synthesis integrating the impacts of agricultural managements and environmental conditions[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(20): 5356–5367.
- [12] Zhou S W, Kong J M, Song Z Z, et al. Manganese reduction regulates soil organic carbon loss from an acidified Cambisol[J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(6): e13333.
- [13] 赵娜, 李瑞东, 王小利, 等. 外源碳酸钙和温度对黄壤活性有机碳组分及微生物群落组成的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6): 238–245.
- [14] 李瑞东, 王小利, 段建军, 等. 碳酸钙对黄壤有机碳矿化及其温度敏感性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1): 115–122.
- [15] 张雅蓉, 李渝, 刘彦伶, 等. 长期施肥对黄壤有机碳平衡及玉米产量的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1275–1285.

- [16] 张雅蓉, 李渝, 刘彦伶, 等. 长期施肥下黄壤有机碳库演变及固存特征[J]. 西南农业学报, 2018, 31(4): 770–778.
- [17] 张艳, 刘彦伶, 李渝, 等. 长期施用化肥与有机肥对黄壤物理特性的影响[J]. 贵州农业科学, 2021, 49(2): 34–40.
- [18] Wang J L, Liu K L, Zhao X Q, et al. Microbial keystone taxa drive crop productivity through shifting aboveground-belowground mineral element flows[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 811: 152342.
- [19] Wang J L, Liu K L, Xu Q F, et al. Organic fertilization sustains high maize yields in acid soils through the cooperation of rhizosphere microbes and plants[J]. *Plant and Soil*, 2025, 514(2): 2443–2460.
- [20] 赵娜, 王小利, 何进, 等. 有机肥替代化学氮肥对黄壤活性有机碳组分、酶活性及作物产量的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 4196–4205.
- [21] 林仕芳, 王小利, 段建军, 等. 有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2219–2225.
- [22] Wang J L, Liu K L, Zhao X Q, et al. Balanced fertilization over four decades has sustained soil microbial communities and improved soil fertility and rice productivity in red paddy soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 793: 148664.
- [23] 张丽敏, 徐明岗, 娄翼来, 等. 长期施肥下黄壤性水稻土有机碳组分变化特征[J]. 中国农业科学, 2014, 47(19): 3817–3825.
- [24] 王小利, 郭振, 段建军, 等. 黄壤性水稻土有机碳及其组分对长期施肥的响应及其演变[J]. 中国农业科学, 2017, 50(23): 4593–4601.
- [25] 李渝, 刘彦伶, 白怡婧, 等. 黄壤稻田土壤微生物生物量碳磷对长期不同施肥的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1327–1334.
- [26] 张雅蓉, 刘彦伶, 黄兴成, 等. 不同有机肥施用模式下黄壤稻田根际和非根际土壤有机碳的矿化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(3): 449–458.
- [27] 郭振, 王小利, 段建军, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 225–235.
- [28] 冯浩亮, 韩晓增, 陆欣春, 等. 有机培肥影响土壤团聚体形成与稳定的研究进展[J]. 土壤与作物, 2023, 12(4): 393–400.
- [29] 张广立, 岑柏霆, 龙新宪, 等. 粪肥施用对土壤团聚体的影响——Meta分析[J]. 土壤, 2024, 56(3): 610–622.
- [30] 邹炎, 廖超林, 杨振宇, 等. 地下水位及有机肥对红壤性水稻土有机碳活性组分的影响[J]. 土壤, 2022, 54(2): 338–343.
- [31] Huang S, Peng X X, Huang Q R, et al. Soil aggregation and organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a red soil of subtropical China[J]. *Geoderma*, 2010, 154(3/4): 364–369.
- [32] 柳开楼, 黄晶, 张会民, 等. 长期施肥对红壤旱地团聚体特性及不同组分钾素分配的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 443–454.
- [33] Liu K L, Han T F, Huang J, et al. Links between potassium of soil aggregates and pH levels in acidic soils under long-term fertilization regimes[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 197: 104480.
- [34] 张丽敏, 徐明岗, 娄翼来, 等. 长期有机无机肥配施增强黄壤性水稻土有机氮的物理保护作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1481–1486.
- [35] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 627–643.
- [36] Vidal A, Klöföfel T, Guigue J, et al. Visualizing the transfer of organic matter from decaying plant residues to soil mineral surfaces controlled by microorganisms[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 160: 108347.
- [37] 杨叶华, 黄兴成, 朱华清, 等. 长期有机与无机肥配施的黄壤稻田土壤细菌群落结构特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(6): 984–992.
- [38] 熊涵, 刘彦伶, 李渝, 等. 长期不同施肥模式对黄壤旱地土壤细菌群落结构和土壤养分的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(7): 1949–1956.
- [39] Kang J, Qu C C, Chen W L, et al. Organo-organic interactions dominantly drive soil organic carbon accrual[J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(1): e17147.
- [40] 谭文峰, 许运, 史志华, 等. 胶结物质驱动的土壤团聚体形成过程与稳定机制[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1297–1308.
- [41] He Y, Gu F, Xu C, et al. Influence of iron/aluminum oxides and aggregates on plant available water with different amendments in red soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 74(2): 145–159.
- [42] Wagai R, Kajiura M, Asano M. Iron and aluminum association with microbially processed organic matter via meso-density aggregate formation across soils: Organo-metallic glue hypothesis[J]. *Soil*, 2020, 6(2): 597–627.
- [43] Ye C L, Huang W J, Hall S J, et al. Association of organic carbon with reactive iron oxides driven by soil pH at the global scale[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2022, 36(1): e2021GB007128.
- [44] 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.
- [45] Moore O W, Curti L, Woulds C, et al. Long-term organic carbon preservation enhanced by iron and manganese[J]. *Nature*, 2023, 621(7978): 312–317.
- [46] Li Q, Hu W F, Li L F, et al. Interactions between organic matter and Fe oxides at soil micro-interfaces: Quantification, associations, and influencing factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 855: 158710.
- [47] 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.

- [48] Zhu F, Huang N, Xue S G, et al. Effects of binding materials on microaggregate size distribution in bauxite residues[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(23): 23867–23875.
- [49] Ibrahim S M, Inoue Y, Shindo H. Role of active aluminum in the formation of water-stable macroaggregates[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1998, 44(4): 685–689.
- [50] Fukumasu J, Poeplau C, Coucheney E, et al. Oxalate-extractable aluminum alongside carbon inputs may be a major determinant for organic carbon content in agricultural topsoils in humid continental climate[J]. *Geoderma*, 2021, 402: 115345.
- [51] Hall S J, Thompson A. What do relationships between extractable metals and soil organic carbon concentrations mean [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2022, 86(2): 195–208.
- [52] Rampazzo N, Schwertmann U, Blum W, et al. Effect of soil acidification on the formation of Fe-, Al-, and Mn-oxides and the stability of soil aggregates[J]. *International Agrophysics*, 1999, 13: 283–291.
- [53] Dong H L, Zeng Q, Sheng Y Z, et al. Coupled iron cycling and organic matter transformation across redox interfaces[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(9): 659–673.
- [54] Dong L L, Wang H H, Shen Y, et al. Straw type and returning amount affects SOC fractions and Fe/Al oxides in a rice-wheat rotation system[J]. *Applied Soil Ecology*, 2023, 183: 104736.
- [55] Anthonio C K, Huang J, Han T F, et al. Fertilizer combination effects on aggregate stability and distribution of aluminum and iron oxides[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2022, 185(2): 251–263.
- [56] Regelink I C, Stoof C R, Rousseva S, et al. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties[J]. *Geoderma*, 2015, 247/248: 24–37.
- [57] 章明奎. 浙江红壤和黄壤的电荷特性[J]. *热带亚热带土壤科学*, 1994, 3(3): 153–156.
- [58] 李兵, 李航, 朱华玲, 等. 不同 pH 条件下黄壤胶体凝聚的动态光散射研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(1): 89–95.
- [59] Takahashi T, Dahlgren R A. Nature, properties and function of aluminum–humus complexes in volcanic soils[J]. *Geoderma*, 2016, 263: 110–121.
- [60] 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.