

酸紫泥田连续 5 年单施碱性物料提升土壤有机碳活性

何雨茹¹, 张丽娜¹, 盛浩^{1*}, 李源钊¹, 满志勇¹, 肖华翠¹, 周萍²

(1. 湖南农业大学资源学院, 湖南 长沙 410128; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南 长沙 410125)

摘要: 碱性物料连续施用对土壤有机碳库活性的影响仍有较大不确定性。选取了湖南省东部双季稻传统产区典型的酸紫泥田, 应用大田成对比较试验, 研究了有机、无机碱性物料 (商品有机肥、生石灰、硅钙镁土壤调理剂) 连续单施 5 年后, 0 ~ 15 cm 表土活性有机碳组分含量、胞外酶活性及其与土壤养分的关系。与对照相比, 连续单施碱性物料处理, 土壤粗颗粒有机碳 (cPOC)、细颗粒有机碳 (fPOC) 和轻组有机碳 (LFOC) 含量分别提高 57% ~ 136%、27% ~ 77% 和 51% ~ 60%, 也提高了土壤活性有机碳组分占总有机碳的比例 ($P < 0.05$)。连续单施石灰、土壤调理剂, 土壤中较稳定的钙键合态有机碳含量分别显著提高 22% 和 34%, 但连续单施有机肥, 土壤 β -葡萄糖苷酶 (β G)、N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶 (NAG) 活性均显著降低约 20%。土壤活性有机碳含量与总有机碳、速效养分含量显著相关。碱性物料连年施用提高了酸性水稻土有机碳水平和活性, 有利于土壤碳吸存。水稻土 POC 和 LFOC 组分含量对碱性物料投入的响应敏感, 可有效地指示水稻土有机碳库的早期变化。

关键词: 活性有机碳组分; 胞外酶; 土壤改良; 碱性物料; 水稻土

亚热带区气候湿热, 耕地土体中盐基离子 (如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) 自然淋溶, 加上近 40 年来加剧的大气酸沉降、农业中氮肥过量施用, 一些耕地土壤呈酸化与功能退化趋势^[1], 培育健康土壤, 再生耕地功能成为健康农林业关注的焦点。有机、无机碱性物料 (如农用石灰、碱性有机肥和矿物源硅钙镁土壤调理剂) 连续施用是广泛应用的酸性土壤改良技术, 能有效提高酸性土壤 pH 值, 增加土壤交换性盐基离子浓度, 促进作物增产^[2-4]。然而, 有关酸性土壤有机碳库组分、活性和酶活性对碱性物料连续施用的响应规律、关键生态—土壤调控因子和潜在过程机理, 目前仍不十分清楚^[5-6]。

有机碳 (SOC) 是表征水稻土健康的核心指标。胞外酶在水稻土 SOC 微生物分解转化中扮演着“催化剂”的角色。普遍证实, 有机肥连续施用, 持续地增加水稻土碳吸存^[7], 但是水稻土有机碳库的组分、胞外酶活性与土壤理化性质的相互

关系仍有待深入探究。石灰连续施用对水稻土有机碳库贮量和活性的影响的同时具有正面、负面作用: (1) 提升酸性水稻土 pH 值和交换性 Ca 含量, 改善土壤结构和生产力, 增强土壤 SOC 的黏粒物理保护和钙键结合的化学保护, 增加作物残体归还量, 促进土壤碳库累积的正面作用; (2) 刺激土壤微生物和酶活性, 增加土壤 SOC 矿化损失, 减少土壤碳库累积的负面作用^[5, 8-9]。因此, 在特定的土壤类型、气候、土地利用和农业管理措施下, 石灰连续施用对土壤 SOC 组分及相关胞外酶活性的影响仍有较大不确定性。

鉴于此, 本研究选取湖南省东部地区双季稻酸紫泥田作为研究对象, 应用大田成对比较试验, 连续 5 年单施碱性物料 (有机肥、石灰和矿质调理剂), 研究土壤活性有机碳组分、胞外酶活性及其与土壤养分的关系, 以期为酸性水稻土改良、稻田固碳减排技术应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2014 年底设置大田成对比较试验样地。有关试验地的自然环境条件、试验设计和常规农艺管理措施的详细资料可参考李源钊等^[3]、Huang 等^[10]和 Yin 等^[11]。此处简述如下: 试验地位于中亚热

收稿日期: 2023-06-19; 录用日期: 2023-07-28

基金项目: 科技基础资源调查专项课题 (2021FY100504); 国家重点研发计划部省联动项目课题 (2022YFD1700103-306); 2023 年湖南农业大学研究生科研创新项目 (2023XC115)。

作者简介: 何雨茹 (1999-), 在读硕士研究生, 研究方向为土壤健康。E-mail: 1999-0309@stu.hunau.edu.cn。

通讯作者: 盛浩, E-mail: shenghao82@hunau.edu.cn。



带湖南省东部的株洲市石板桥村 (113° 10.6' E, 27° 32.2' N); 地形为低丘, 地形部位为坡麓 (底部); 试验田属于高产水田, 耕作制度为双季稻-休闲, 土种为紫色页岩风化物发育的酸紫泥田; 耕作层浅薄 (12 cm), 0 ~ 15 cm 表土质地为黏壤土, pH 值 5.5, 容重 $1.03 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 土壤有机质含量 $33.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 阳离子交换量 (CEC) $12.6 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2015 年春耕前, 依据成对比较试验设计的原则, 随机选取 12 块面积约 0.2 hm^2 的规整水田。水

田中央修筑田埂, 将田块一分为二, 分别设置单施有机肥、石灰和 Si-Ca-Mg 土壤调理剂处理以及各自对照处理, 每个处理重复 4 次。早、晚稻品种分别为湘早籼 17 号和天优华占。有机肥、石灰和 Si-Ca-Mg 土壤调理剂的基本化学性质和商品信息参见表 1。早、晚稻翻耕时, 分别人工撒施有机肥、石灰和 Si-Ca-Mg 土壤调理剂, 每季施用量均为 $2.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 旋耕机混匀。常规施肥、耕作、除草、杀虫等农艺措施均按当地双季稻生产习惯进行。

表 1 供试碱性材料的基本化学性质和商品信息

投入品	生产公司	产地	原料	化学组成	pH 值
有机肥	绿丰源生物有机肥料有限公司	湖南长沙	鸡粪、少量草木灰	有机质含量 $\geq 45\%$; $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O} \geq 5\%$	8.4
石灰	老浦石灰公司	湖南宁乡	石灰石	CaO 含量约 76%	12.7
Si-Ca-Mg 土壤调理剂	万山土壤修复技术有限公司	广东梅州	钼尾矿、白云石和无烟煤	$\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O} = 8\%$; 有效态 Ca $\geq 20\%$; 有效态 Mg $\geq 12\%$	10 ~ 12

1.2 样品采集与分析

2019 年晚稻黄熟期, 在各小区内按蛇形法, 间隔 5 ~ 10 m, 布设 9 ~ 15 个采样点。采用竹制土钻, 采集 0 ~ 15 cm 表层土壤样品, 充分混匀, 采用“四分法”, 将样品分成两份。一份带回室内自然风干, 过筛。另一份鲜土剔除土壤异物后, 过筛, 置于 4℃ 冰箱保存, 供土壤溶解性有机碳 (DOC)、微生物生物量碳 (MBC) 含量分析。

土壤 SOC 详细分组流程和测定方法可参见 Sheng 等^[12]、Xu 等^[13] 的描述。SOC 含量采用重铬酸钾外加热法^[14]; 轻组有机碳 (LFOC) 采用 $1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ NaI 重液浸提—烧失法; 易氧化有机碳 (ROC) 采用 $333 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ KMnO_4 溶液浸提—比色法; 颗粒有机碳 (POC) 分为粗颗粒有机碳 (cPOC) 和细颗粒有机碳 (fPOC), 采用湿筛法提取, 重铬酸钾外加热法测定; MBC 采用氯仿熏蒸— $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ K_2SO_4 提取法, 测定对照滤液中的碳、氮浓度作为 DOC、溶解性有机氮 (DON); 钙键合碳 (Ca-SOC)、铁 (铝) 键合碳 [Fe (Al) -SOC] 分别采用 Na_2SO_4 、 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 溶解法; 滤液中碳、氮浓度分别采用总有机碳 (TOC) 仪 (Phoenix 8000 型号, Teledyne Tekmar 公司, 美国)、流动分析仪 (AutoAnalyser3-AA3 型号, Bran+Luebbe 公司, 德国) 测定。

β -葡萄糖苷酶 (βG) 和 N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶 (NAG) 活性采用酶联免疫吸附法

(ELISA), 酸性磷酸酶 (ACP) 活性采用磷酸苯二钠为基质测定。选取上海苗彩生物科技有限公司的试剂盒, 操作步骤遵循说明书流程。土壤 pH、碱解氮、有效磷、CEC 依据《土壤农化分析》方法^[14], 交换性钙采用中性乙酸铵交换—ICP 法测定。

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2010 计算变量的均值、标准差和响应比值 (RR)。

$$\text{RR} = (\text{处理} - \text{对照}) / \text{对照} \times 100\%^{[3]}$$

基于 SPSS (SPSS 13.0, SPSS 公司, 美国) 应用配对 t 检验, 对处理与对照的变量进行均值比较; 应用 Pearson 相关分析研究土壤有机碳组分含量、酶活性与土壤养分含量的关系; 显著水平设为 0.05, 极显著水平设为 0.01; 应用 Origin (OriginPro 9.8.0.200 版本, Origin Lab 公司, 美国) 制图; 图表中数据为平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳组分含量及其占总有机碳的比例

与各自对照相比, 连续单施有机肥和土壤调理剂处理田块 SOC 含量分别提高 12% 和 19% ($P < 0.05$; 图 1a)。连续单施碱性物料也显著提升 SOC 活性。土壤 cPOC、fPOC 和 LFOC 含量增幅分别为 57% ~ 136%、27% ~ 77% 和 51% ~ 60% (图 1b、c、d)。特别是连续单施石灰, cPOC 含量的

增幅高达 136%。连续单施碱性物料，在一定程度上提升了 DOC 和 MBC 含量，但未观察到 ROC 含量显著变化（图 1e、f、g）。此外，连续单施有机肥，Ca-SOC 含量显著降低 27%，Fe（Al）-SOC

含量显著升高 19%；连续单施石灰、土壤调理剂，Ca-SOC 含量分别显著提高 22%、34%；连续单施石灰，Fe（Al）-SOC 含量显著降低 13%（ $P < 0.05$ ）。

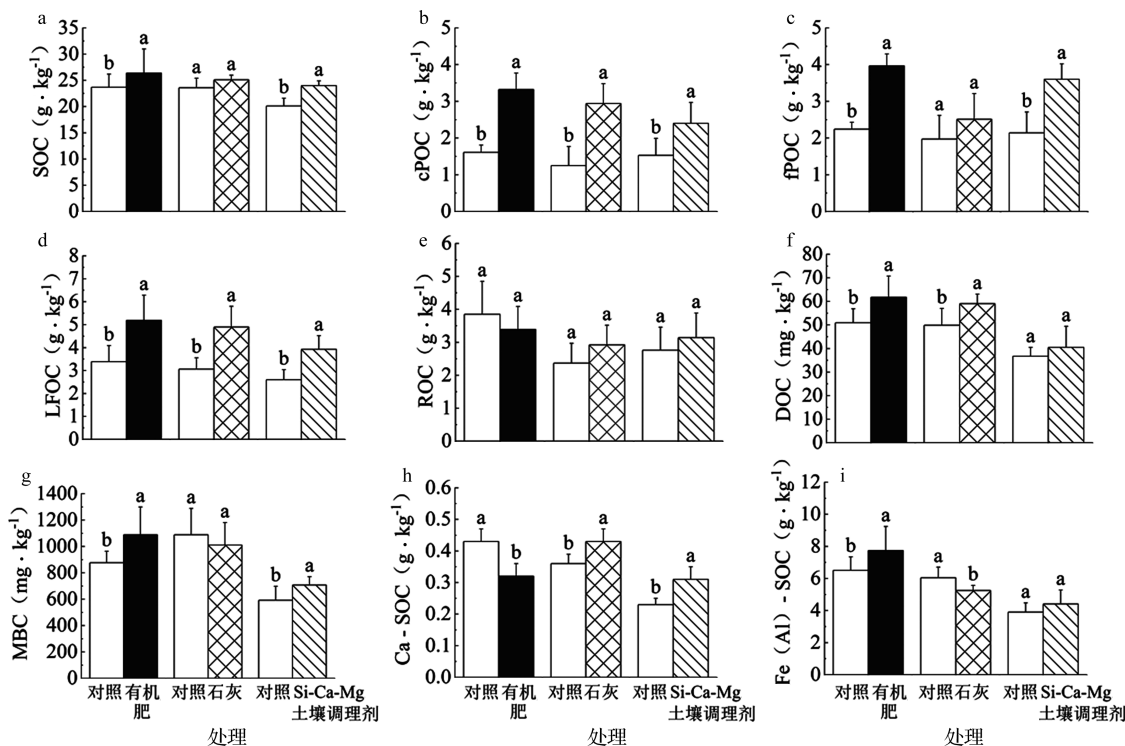


图 1 连续单施不同碱性物料处理与各自对照田块土壤有机碳及其组分的含量

注：不同小写字母表示处理与各自对照之间差异显著（ $P < 0.05$ ）。下同。SOC 为土壤有机碳，cPOC 为粗颗粒有机碳，fPOC 为细颗粒有机碳，LFOC 为轻组有机碳，ROC 为易氧化有机碳，DOC 为溶解性有机碳，MBC 为微生物生物量碳，Ca-SOC 为钙键合碳，Fe（Al）-SOC 为铁（铝）键合碳。图 3 同。

土壤 SOC 组分含量占 TOC 含量的比例为 0.2% ~ 29%，以 Fe（Al）-SOC/SOC 最高，DOC/SOC 最低（表 2）。与对照相比，连续单施有机肥，cPOC/SOC 和 fPOC/SOC 显著提高 59% ~ 85%；但

Ca-SOC/SOC、ROC/SOC 显著降低 21% ~ 35%。连续单施石灰，cPOC/SOC 和 LFOC/SOC 显著提高 51% ~ 123%。连续单施土壤调理剂，仅 cPOC/SOC 显著提高 32%。

表 2 土壤有机碳组分含量占土壤有机碳含量的比例 (%)

比例	处理					
	对照	有机肥	对照	石灰	对照	Si-Ca-Mg 土壤调理剂
cPOC/SOC	7 ± 2b	13 ± 4a	5 ± 2b	12 ± 3a	8 ± 2b	10 ± 2a
fPOC/SOC	10 ± 3b	16 ± 4a	8 ± 1a	6 ± 3a	12 ± 3a	15 ± 2a
LFOC/SOC	16 ± 3a	19 ± 4a	11 ± 4b	19 ± 5a	12 ± 3a	16 ± 3a
Ca-SOC/SOC	1.8 ± 0.4a	1.2 ± 0.2b	1.5 ± 0.4a	1.7 ± 0.2a	1.1 ± 0.1a	1.3 ± 0.2a
Fe（Al）-SOC/SOC	28 ± 2a	29 ± 5a	26 ± 5a	21 ± 5a	19 ± 2a	18 ± 4a
ROC/SOC	20 ± 5a	14 ± 4b	10 ± 4a	14 ± 3a	12 ± 4a	11 ± 4a
DOC/SOC	0.2 ± 0.1a	0.2 ± 0.1a	0.2 ± 0.1a	0.2 ± 0.1a	0.2 ± 0.1a	0.2 ± 0.1a
MBC/SOC	4 ± 1a	4 ± 0.2a	4 ± 1a	4 ± 1a	3 ± 1a	3.0 ± 0.2a

注：不同小写字母表示处理与各自对照之间差异显著（ $P < 0.05$ ）。下同。SOC 为土壤有机碳，cPOC 为粗颗粒有机碳，fPOC 为细颗粒有机碳，LFOC 为轻组有机碳，Ca-SOC 为钙键合碳，Fe（Al）-SOC 为铁（铝）键合碳，ROC 为易氧化有机碳，DOC 为溶解性有机碳，MBC 为微生物生物量碳。表 3 同。

2.2 土壤胞外酶活性

土壤 βG 、NAG 和 ACP 活性分别为 $14 \sim 20 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $84 \sim 116 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $38 \sim 45 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。与各自对照相比，连续单施有机肥，

βG 、NAG 活性显著降低约 20% ($P < 0.05$ ；图 2)。连续单施石灰、土壤调理剂， βG 、NAG 和 ACP 活性无显著变化。

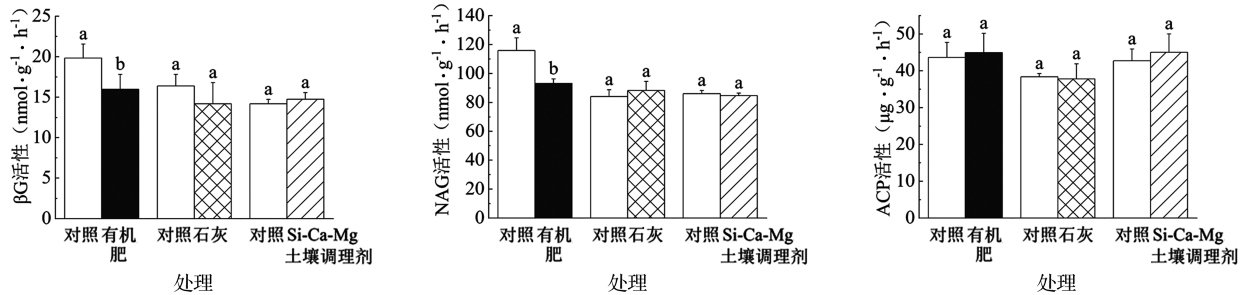


图 2 连续单施不同碱性物料处理与各自对照田块的土壤胞外酶活性

注： βG 为 β -葡萄糖苷酶，NAG 为 N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶，ACP 为磷酸酶。图 3 同。

2.3 土壤活性有机碳组分、胞外酶活性与土壤理化性质的相关性

土壤有机碳组分 [LFOC、DOC、MBC、Ca-SOC 和 $\text{Fe}(\text{Al})\text{-SOC}$] 含量与 SOC 含量呈显著、极显著正相关 ($r = 0.488 \sim 0.643$ ，表 3)。土壤 cPOC、MBC 含量与有效磷含量、Ca-SOC 与 DON 含量、DOC 含量与 CEC 均呈显著正相关 ($r = 0.597 \sim 0.628$ ；表 4)；但是，fPOC、 $\text{Fe}(\text{Al})\text{-SOC}$ 含量与碱解氮、DON、有效态钙含量均呈显著负相关 ($r = -0.590 \sim -0.823$)。

表 3 土壤有机碳与有机碳组分含量的 Pearson 相关系数

指标		SOC
LFOC		0.488*
DOC		0.602*
MBC		0.555*
Ca-SOC		0.604*
$\text{Fe}(\text{Al})\text{-SOC}$		0.643**

注：* 和 ** 分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 显著水平； $n = 12$ 。下同。

表 4 土壤有机碳组分含量、胞外酶活性与土壤 pH、养分的 Pearson 相关系数

指标	相关系数	指标	相关系数
cPOC	有效磷 0.610*	$\text{Fe}(\text{Al})\text{-pH}$	-0.545*
fPOC	碱解氮 -0.650*	-SOC	交换 -0.823*
			性钙
		Ca-SOC	DON 0.597**
DOC	CEC 0.607*	βG	pH -0.499*
MBC	有效磷 0.628**	NAG	pH -0.572*

注：cPOC 为粗颗粒有机碳，fPOC 为细颗粒有机碳，CEC 为阳离子交换量， βG 为 β -葡萄糖苷酶，NAG 为 N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶。

2.4 土壤有机碳组分、胞外酶活性对单施碱性物料的响应比值

土壤有机碳及组分、胞外酶活性对碱性物料连续单施响应的 RR 值分别为 7% ~ 20%、-26% ~ 202% 和 -19% ~ 5%，但是 cPOC、fPOC 和 LFOC 以及 cPOC/SOC、fPOC/SOC 和 LFOC/SOC 的 RR 值相对更高 (-20% ~ 202%)，其中以 cPOC 的 RR 值相对最高 (图 3)。

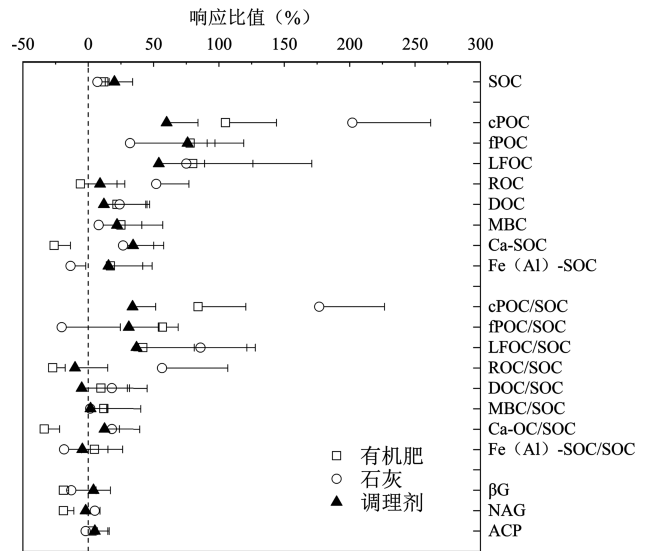


图 3 土壤有机碳及其组分含量、胞外酶活性对碱性物料连续单施的响应比值

3 讨论

酸性水稻土连续施用适宜量的有机、无机碱性物料可以不同程度提高土壤 pH 值，刺激土壤生物活性，提高土壤中大多数养分元素的生物有效性，



并有益于稻谷增产^[15-16]。尽管广泛研究证实,双季稻田有机肥连续施用能显著增加水稻土碳吸存和有机碳库活性^[7](图1),但是无机碱性物料(如石灰、矿物源土壤调理剂)连续施用对酸性水稻土有机碳及其活性组分的影响仍有很大不确定性。

与对照相比,酸紫泥田连续5年单施石灰后,水稻土SOC含量无显著差异(图1a),这与Li等^[17]的报道基本类似。石灰施用促进水稻土由酸性向中性转化^[3],可能增加土壤中作物残体的碳归还量,同时也可能提高土壤微生物活性和矿化损失量;这二者微妙的平衡可能导致连续单施石灰处理对SOC含量无显著影响。在广东省双季稻田,早稻秸秆还田配施熟石灰可有效提高晚稻生育期SOC和活性有机碳组分含量,推测可能与石灰溶解释放大量 Ca^{2+} 促进形成稳定性较高的Ca-SOC组分有关^[8]。也有报道,酸性土壤连续施用石灰显著降低SOC含量,可能与施石灰刺激土壤微生物群落、加速SOC分解矿化速率有关^[18]。有关石灰施用对酸性水稻土SOC含量、组成及矿化速率的影响及作用机理仍有待在不同土壤类型、种植制度下开展不同石灰类型(生石灰、熟石灰和石灰石粉)、配施方式的深入研究。

然而,连续单施无机碱性物料(石灰、Si-Ca-Mg土壤调理剂)显著增加了水稻土活性有机碳组分含量,以土壤cPOC增幅最大(图1b)。水田连续施用石灰,为土壤不断补充 Ca^{2+} ,促进形成较稳定的Ca-SOC组分(图1h),可能有利于cPOC累积。水田连续施用Si-Ca-Mg土壤调理剂,除了直接为水稻土不断补充 Ca^{2+} 外,还额外持续地补充 Mg^{2+} 和溶解态Si(主要是单硅酸),增加水稻土Ca、Mg和Si的生物有效性,直接促进水稻生长和土壤SOC归还^[19-20];此外,水田连续施用Si-Ca-Mg土壤调理剂可能促进稳定的、驻留时间长的水稻植硅体碳的累积,提高SOC稳定性^[21-22]。连续施用无机碱性物料提高了土壤Ca-SOC含量,但也降低了土壤Fe(Al)-SOC含量(图1i)。这表明碱性物料连续施用显著改变了SOC组成和结合形态。也有报道,随着土壤pH值升高,土壤铁氧化物吸附SOC能力降低^[23]。水稻土中相对稳定的Fe(Al)-SOC与土壤pH值、交换性钙含量呈显著负相关(表4)。

水田施入鸡粪发酵的碱性商品有机肥直接增加土壤外源SOC输入,提高土壤pH值和SOC水平,增加土壤微生物和根系的养料供给,都有利于土壤活性有机碳累积^[7](图1)。水稻土活性有机碳含量与SOC含量呈显著正相关(表3)。这反映土壤活性有机碳含量在很大程度上取决于SOC含量。水田有机肥连续单施后,土壤fPOC含量增幅最大。可能是水田有机肥连续施入,增强土壤团聚体中有机物的胶结作用,促进土壤fPOC累积。应用温和的物理分组技术,提取的土壤POC和LFOC组分含量对碱性物料连续单施的响应最为敏感(图3)。土壤POC和LFOC组分也许可以敏感地指示水稻土有机碳库的早期变化。这对于水稻土有机碳库的管理和持续利用具有重要意义。水田有机肥连续施用也显著降低了土壤Ca-SOC含量,可能与有机肥施用后水稻土溶液中 Ca^{2+} 浓度低有关^[24]。

土壤活性有机碳含量与胞外酶活性关系紧密。水田连续单施碱性物料降低了土壤 βG 、NAG活性,NAG、 βG 活性与土壤pH值呈显著负相关(表4)。随着水稻土由酸性向中性发展,土壤微生物易利用的DOC、LFOC含量以及占SOC比例升高(图1和表2),微生物底物有效性增加。这可能抑制土壤微生物分泌与SOC、氮循环相关的 βG 、NAG^[25]。在长期施肥的河砂泥田,随着水稻土微生物可利用底物(DOC和铵态氮)浓度的升高,土壤 βG 、NAG活性呈稳定或下降趋势^[26]。然而,在长期施肥的红黄泥田,水稻土 βG 、NAG和ACP活性均与易矿化态有机C、N含量呈显著正相关,推测可能与连续施肥引起水稻土酸化有关^[27]。土壤pH通过影响微生物底物有效性(有机碳活性、有效养分)调控胞外酶活性的作用机理仍有待深入探究。

土壤活性有机碳含量与土壤SOC、速效养分含量紧密相关。土壤LFOC、DOC和MBC含量与SOC含量均呈显著正相关(表4)。不同水稻土剖面研究表明,土壤SOC含量是DOC、MBC含量的主要决定因素^[28-29]。土壤cPOC、MBC含量与有效磷含量、DOC含量与CEC均呈显著正相关,反映出土壤活性有机碳含量与磷有效性、养分水平的关系紧密。酸性水稻土碱性物料适量施用提高土壤SOC活性和养分(N、P)有效性,这对于水稻土健康保育具有特殊意义。



4 结论

长期种植双季稻的酸紫泥田,连续5年单施有机、无机碱性物料(有机肥、石灰、矿物源土壤调理剂)后,显著提升土壤SOC活性。土壤POC和LFOC组分含量对外源碱性物料投入的响应最为敏感,可考虑作为水稻土SOC早期变化的指示指标。连续无机碱性物料投入也显著提高了水稻土中相对较稳定的Ca-SOC水平。水稻土活性有机碳组分含量与SOC、速效养分含量紧密相关,而ACP、NAG活性与土壤pH显著相关。双季稻田碱性物料连续投入提高了水稻土SOC活性和磷有效性,有利于土壤碳吸存。

参考文献:

- [1] 周晓阳,周世伟,徐明岗,等.中国南方水稻土酸化演变特征及影响因素[J].中国农业科学,2015,48(23):4811-4817.
- [2] 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.
- [3] 李源钊,盛浩,尹泽润,等.双季稻田土壤微生物群落对连续5年施有机肥和石灰的响应差异[J].土壤通报,2022,53(2):482-491.
- [4] 李菊,杨永志,甘良,等.土壤改良剂和有机肥对旱改水砖红壤稻田的改良效果[J].中国土壤与肥料,2022(4):91-98.
- [5] Paradelo R, Virto I, Chenu C. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: a review [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2015, 202: 98-107.
- [6] 吴彬,徐晶晶,成艳红,等.石灰施用对酸性土壤矿物结合有机碳形成的影响[J].中国农学通报,2021,37(21):98-105.
- [7] Zhou P, Sheng H, Li Y, et al. Lower C sequestration and N use efficiency by straw incorporation than manure amendment on paddy soils [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 219: 93-100.
- [8] 黄巧义,林碧珊,饶国良,等.秸秆还田配施石灰对酸性水稻土有机碳及碳库管理指数的影响[J].环境科学,2023,44(10):5813-5822.
- [9] 曹彬彬,朱熠辉,姜禹含,等.添加石灰和秸秆垡土有机碳固持的影响[J].中国农业科学,2020,53(20):4215-4225.
- [10] Huang Y, Sheng H, Zhou P, et al. Remediation of Cd-contaminated acidic paddy fields with four-year consecutive liming [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 188: 109903.
- [11] Yin Z R, Sheng H, Xiao H C, et al. Inter-annual reduction in rice Cd and its eco-environmental controls in 6-year biannual mineral amendment in subtropical double-rice cropping ecosystems [J]. Environmental Pollution, 2022, 293: 118566.
- [12] Sheng H, Zhou P, Zhang Y Z, et al. Loss of labile organic carbon from subsoil due to land-use changes in subtropical China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 88: 148-157.
- [13] Xu J M, Yuan K N. Dissolution and fractionation of calcium-bound and iron-and aluminum-bound humus in soils [J]. Pedosphere, 1993, 3(1): 75-80.
- [14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [15] Liao P, Huang S, Zeng Y J, et al. Liming increases yield and reduces grain cadmium concentration in rice paddies: a meta-analysis [J]. Plant and Soil, 2021, 465: 157-169.
- [16] 徐仁扣,李九玉,周世伟,等.我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J].中国科学院院刊,2018,33(2):160-167.
- [17] 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.
- [18] Ahmad W, Singh B, Dijkstra F A, et al. Temperature sensitivity and carbon release in an acidic soil amended with lime and mulch [J]. Geoderma, 2014, 214-215: 168-176.
- [19] Chang C S, Sung J M. Nutrient uptake and yield responses of peanuts and rice to lime and fused magnesium phosphate in an acid soil [J]. Field Crops Research, 2004, 89: 319-325.
- [20] 张万洋,李小坤.水稻硅营养及硅肥高效施用技术研究进展[J].中国土壤与肥料,2020(4):231-239.
- [21] Song Z, Liu C, Müller K, et al. Silicon regulation of soil organic carbon stabilization and its potential to mitigate climate change [J]. Earth-Science Reviews, 2018, 185: 463-475.
- [22] Song Z, McGrouther K, Wang H. Occurrence, turnover and carbon sequestration potential of phytoliths in terrestrial ecosystems [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 158: 19-30.
- [23] Porras R C, Hicks P C E, McFarlane K J, et al. Association with pedogenic iron and aluminum: effects on soil organic carbon storage and stability in four temperate forest soils [J]. Biogeochemistry, 2017, 133: 333-345.
- [24] 雷敏,周萍,黄道友,等.长期施肥对水稻土有机碳分布及化学结合形态的影响[J].生态学杂志,2012,31(4):967-974.
- [25] 周璞,魏亮,魏晓梦,等.稻田土壤 β -1,4-葡萄糖苷酶活性对温度变化的响应特征[J].环境科学研究,2018,31(7):1282-1288.
- [26] 宁玉菲,魏亮,魏晓梦,等.长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征[J].环境科学,2020,41(6):2852-2860.
- [27] Ashraf M N, Gao J, Wu L, et al. Soil microbial biomass and extracellular enzyme-mediated mineralization potentials of carbon and nitrogen under long-term fertilization (> 30 years) in a

rice-rice cropping system [J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21 (12): 3789-3800.

[28] 盛浩, 周萍, 袁红, 等. 亚热带不同稻田土壤微生物生物量碳的剖面分布特征 [J]. 环境科学, 2013, 34 (4): 1576-1582.

[29] 盛浩, 周萍, 袁红, 等. 亚热带不同稻田土壤溶解性有机碳的剖面分布特征 [J]. 生态学杂志, 2013, 32 (7): 1698-1702.

Elevated soil organic carbon lability by continuous singly amending alkaline materials in an acidic purple paddy
HE Yu-ru¹, ZHANG Li-na¹, SHENG Hao^{1*}, LI Yuan-zhao¹, MAN Zhi-yong¹, XIAO Hua-cui¹, ZHOU Ping²
(1. College of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha Hunan 410128; 2. Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha Hunan 410125)

Abstract: The impact of continuous amending of alkaline materials on soil organic carbon (C) lability remains unknown. The typical acidic purple paddy of double-cropped rice in eastern Hunan province was selected. A paired field experiment was applied to study the labile organic C fractions and extracellular enzyme activities in topsoil at 0-15 cm depth in response to 5 years continuous singly amending alkaline commercial organic fertilizer, quicklime, and Si-Ca-Mg soil conditioner. Comparing to the CK, the content of coarse particulate organic C (cPOC), fine particulate organic C (fPOC), and light fraction organic C (LFOC) in soil increased by 57%-136%, 27%-77% and 51%-60% ($P<0.05$), respectively, after continuous amending alkaline materials. The ratios of soil labile organic C fractions to total organic C were increased. The content of Ca-SOC raised by 22% and 34%, respectively, after continuous amending lime and soil conditioner. The enzyme activities of β -glucosidase (β G) and N-acetyl- β -D-glucosaminidase (NAG) in soil were significantly reduced by 20% after continuous amending organic fertilizer. The soil labile organic C fractions contents were significantly correlated with soil organic C and available nutrient contents. Continuous input of alkaline materials in paddy enhanced the soil organic C level and lability, which was beneficial to soil C sequestration. The POC and LFOC fractions in soil were sensitive to the alkaline materials input, which could effectively indicate the early change in paddy soil organic C.

Key words: soil labile organic C; extracellular enzyme; soil improvement; alkaline materials; paddy soil