



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

有机肥与石灰配施对华南酸性土壤的改良效果

黄建凤, 吴腾飞, 叶芳, 张木, 逢玉万, 吴昭云, 肖勇, 吴永沛, 付弘婷, 李苹

引用本文:

黄建凤, 吴腾飞, 叶芳, 张木, 逢玉万, 吴昭云, 肖勇, 吴永沛, 付弘婷, 李苹. 有机肥与石灰配施对华南酸性土壤的改良效果[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(3): 606–613.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0473>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 810–819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>

3种改良剂对连作川党参生长及土壤生化性质的影响

周武先, 刘翠君, 何银生, 吴海棠, 段媛媛, 魏海英, 艾伦强, 张美德

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 43–52 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0201>

我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异

任科宇, 徐明岗, 张露, 段英华, 王伯仁

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 143–150 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0150>

长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响

吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 孙海岩, 汪景宽

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 1–10 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0199>

有机肥替代部分化肥结合外源硒对白术的促生作用

周武先, 张美德, 王华, 段媛媛, 艾伦强, 黄东海, 罗孝荣, 张宇

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 457–465 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0228>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄建凤, 吴腾飞, 叶芳, 等. 有机肥与石灰配施对华南酸性土壤的改良效果[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(3): 606–613.

HUANG J F, WU T F, YE F, et al. Effect of organic fertilizer and lime combination on ameliorating acid soil in south China [J]. *Journal of*

Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(3): 606–613.



开放科学 OSID

有机肥与石灰配施对华南酸性土壤的改良效果

黄建凤¹, 吴腾飞¹, 叶芳^{2*}, 张木^{1*}, 逢玉万¹, 吴昭云¹, 肖勇³, 吴永沛¹, 付弘婷¹, 李苹¹

(1. 广东省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部南方植物营养与肥料重点实验室/广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广州 510640; 2. 广东省农业环境与耕地质量保护中心, 广州 510500; 3. 广东省农业科学院植物保护研究所, 广州 510640)

摘要:为明确有机肥与石灰对华南酸性土壤的改良效果,采用田间小区试验,研究了有机肥、石灰分别单施与配施对双季稻区酸性土壤的酸化性质、水稻生长及产量的影响。试验包括5个处理:不施肥(CK)、单施控释肥(CF)、控释肥+石灰(LM)、控释肥+有机肥(OF)、控释肥+石灰与有机肥配施(CLO),除CK外,各处理养分保持一致,物料均在水稻移栽前一次性施入土壤。结果表明,CLO处理对土壤pH的改良效果最优,其pH提高了0.42个单位,而OF和LM处理的pH分别提升0.27、0.37个单位;OF处理土壤有机质含量最高,达44.46 g·kg⁻¹,其次为CLO处理,达37.76 g·kg⁻¹;LM、OF及CLO处理均显著降低了土壤交换性酸含量,降幅最高的处理为CLO,达71.4%。相关性分析表明,土壤交换性氢和交换性铝与pH的回归方程斜率绝对值分别为1.356 8和0.156 0,均呈显著负相关;LM处理的土壤交换性盐基离子总量达7.52 cmol·kg⁻¹,显著高于其他处理,其次为CLO处理,达6.92 cmol·kg⁻¹。配施处理能增加灌浆期水稻叶片叶绿素含量,显著高于CK,增产效果最优。研究表明,有机肥与石灰配施较单独施用对华南酸化土壤的改良效果更好。

关键词:华南;酸性土壤;有机肥;石灰;双季稻;酸化改良

中图分类号:S156

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2024)03-0606-08

doi: 10.13254/j.jare.2023.0473

Effect of organic fertilizer and lime combination on ameliorating acid soil in south China

HUANG Jianfeng¹, WU Tengfei¹, YE Fang^{2*}, ZHANG Mu^{1*}, PANG Yuwan¹, WU Zhaoyun¹, XIAO Yong³, WU Yongpei¹, FU Hongting¹, LI Ping¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region/Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China; 2. Protection Center of Agricultural Environment and Cultivated Land Quality of Guangdong Province, Guangzhou 510500, China; 3. Plant Protection Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to clarify the ameliorating effect of organic fertilizer and lime on acidic soil in south China, a field trial was conducted to study the effects of single and combined application of organic fertilizer and lime on the acidification properties, rice growth and yield of acidic soil in double cropping rice areas. The experiment included five treatments: no fertilization (CK), single application of controlled release fertilizer (CF), controlled release fertilizer+application of lime (LM), controlled release fertilizer+application of organic fertilizer (OF), and controlled release fertilizer+lime combined with organic fertilizer (CLO). Except for CK, the nutrients in each treatment remained consistent, and the materials were all applied to the soil before rice transplantation. The results showed that the combination treatment had the best improvement effect on soil pH, increasing by 0.42 units, while the OF and LM treatments were 0.27 and 0.37, respectively. The organic matter content in the soil treated with OF was the highest, reaching 44.46 g·kg⁻¹, followed by the combined application of CLO, reaching 37.76 g·kg⁻¹, CLO treatments significantly reduced soil exchangeable acid content by 71.4%. There is a

收稿日期:2023-07-21 录用日期:2023-09-28

作者简介:黄建凤(1986—),女,广西桂林人,副研究员,从事农业固体废弃物资源化利用研究。E-mail:hj20051675@126.com

*通信作者:叶芳 E-mail:joyce3054@163.com; 张木 E-mail:344387319@qq.com

基金项目:广东省农业科学院低碳农业与碳中和研究中心项目(XTXM202204)

Project supported: Research Center of Low-carbon Agriculture and Carbon Neutralization, Guangdong Academy of Agricultural Sciences(XTXM202204)

significant negative correlation between soil pH and exchangeable aluminum and hydrogen. The absolute slopes of the regression equations for exchangeable hydrogen and exchangeable aluminum with pH are 1.356 8 and 0.156 0, respectively. The total amount of exchangeable base ions in the soil treated with a single application of lime reached $7.52 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, significantly higher than other treatments, followed by the combined application of CLO, reaching $6.92 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$. The combination application treatment can increase the chlorophyll content in rice leaves during the filling period, resulting in the best yield increase effect. The comprehensive research results indicate that the combination of organic fertilizer and lime improves acidified soil more than a single application, which can provide data support for subsequent acidified farmland management.

Keywords: south China; acid soil; organic fertilizer; lime; double-cropping rice; ameliorating acid soil

土壤酸化本是一个较为缓慢的自然过程,但近几十年来由于高强度人为活动的影响,土壤酸化的进程大大加速,对生态环境和农业生产的危害加重,在热带和亚热带地区情况尤为严重,近年来对酸化土壤的研究成为热点^[1]。水稻土是受人为因素干扰最严重的土壤类型,华南地区是典型的双季稻产区,该区域已出现不同程度的土壤pH降低现象,成为我国典型的酸化土壤区域^[2-3]。大量研究表明,pH对母岩的继承性较大,成土母质是引起土壤酸化的内因,且不同母质发育的酸化水稻土剖面特征各异;不合理施肥、氮肥利用率低、大气沉降等则是外因^[4-5]。酸化土壤中有有效磷和钙、镁、钾等阳离子含量降低,铝和锰活化造成铝毒危害,重金属有效性增强,不利于作物生长,甚至对人类健康造成威胁^[6-7]。因此,采取有效措施治理土壤酸化,将华南双季稻区土壤酸碱度维持在适宜范围,对于稳定粮食安全生产具有重要意义。

施用石灰被认为是改良土壤酸度的传统而有效的方法之一,尤其适用于 $\text{pH} < 5.0$ 的强酸性土壤^[8]。姜超强等^[9]的研究显示,不同来源的石灰均对烟草表现出增产效果。曾廷廷等^[10]通过数据整合分析,发现酸性土壤添加石灰对蔬菜和玉米的增产效果最好,石灰用量以 $3\,000 \sim 6\,000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为宜,在pH大于5.8时不宜施用,这表明石灰的酸性改良存在pH阈值。然而,也有研究指出^[11-12],石灰中含有大量的钙,会引起土壤镁、钾缺乏,并降低磷有效性,长期大量施用石灰将导致土壤板结和养分不平衡,最终导致作物减产。为缓解长期施用石灰的负效应,协同配施被认为是可行的方式,包括配施生物炭、牡蛎壳粉、秸秆还田等^[13-15]。近年来,有研究表明,有机肥因富含碱性物质也具有改善土壤酸度的潜力^[16-17]。Cai等^[18]发现,长期采用有机无机肥配施可有效防治红壤酸化,且能提高土壤养分和有机碳含量,从而促进作物增产。胡天睿等^[19]的研究表明,有机肥替代40%以上化学氮肥既能防治红壤酸化,又能提升红壤抗酸化能力,其改良

效果优于单施石灰。目前,关于有机肥与石灰配施的酸化土壤改良措施鲜见报道。本研究通过田间试验,研究了石灰与有机肥协同配施对华南双季稻区酸性土壤的改良效果,分析了配施条件下土壤酸度、酸碱缓冲力变化及其影响因素,为科学治理华南酸性土壤提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2022年4月至2022年11月在广东省江门市台山市都斛镇南村($112^{\circ}56'35''\text{E}$, $22^{\circ}02'29''\text{N}$)开展。试验区属亚热带海洋性季风气候,年平均气温 21.8°C ,年均降雨量 $1\,936 \text{ mm}$,种植制度为双季稻轮作。土壤类型为典型的红壤性水稻土,试验前土壤($0 \sim 20 \text{ cm}$)pH为4.58,有机质含量 $30.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $170.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $16.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $169.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,交换性氢 $0.47 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,交换性铝 $1.84 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,交换性盐基离子 $5.90 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,阳离子交换量 $11.00 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试有机肥(养分含量为2% N、1% P_2O_5 和2% K_2O)、控释肥(养分含量为23% N、7% P_2O_5 和20% K_2O)、钙镁磷肥(P_2O_5 14%)和氯化钾(K_2O 60%)由广州新农科肥业科技有限公司提供,生石灰为当地市售。

1.2 试验设计

试验采用田间小区试验,水稻采用秧田育苗、小区移栽的方式种植,株距和行距均为 20 cm 。选取土壤肥力水平均一且较为平整的田块开展试验,小区面积为 90 m^2 ,小区间田脊高约 30 cm 、宽 20 cm ,待新做田脊干燥固化后采用塑料薄膜进行覆盖以避免养分在小区间迁移,各小区均设有独立的排灌沟渠。

试验共5个处理:①不施肥(CK);②单施控释肥(CF):水稻移栽前一次性施入,施用量为 $652.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;③控释肥+生石灰(LM):水稻移栽前,控释肥和生石灰一次性施入,控释肥施用量为 $652.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,

生石灰施用量为 $1\ 125.0\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;④控释肥+有机肥(OF):水稻移栽前,控释肥和有机肥一次性施入,控释肥施用量为 $489.0\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,有机肥施用量为 $1\ 875.0\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;⑤控释肥+有机肥+生石灰(CLO):水稻移栽前,控释肥、有机肥和生石灰一次性施入,控释肥施用量为 $489.0\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,有机肥施用量为 $1\ 875.0\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,生石灰施用量为 $1\ 125.0\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。每个处理3个重复,共15个小区。除不施肥处理外,其他各处理保持施氮量一致,均为 $150.0\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;磷、钾不足的养分用钙镁磷肥和氯化钾补齐,与其他肥料混合后一次施入,保持各施肥处理养分一致。肥料在各小区内保证严格均匀撒施,且撒施后进行轻度耙田处理,各过程均精细化操作。在移栽秧苗时严格选取生长一致的秧苗,采用拉绳定苗的方式,确保各小区苗数相同,移栽后一周内根据苗情及时补苗。整个生育期内统一进行田间水分及病虫害管理。

早、晚稻处理一致,早稻试验于2022年3月31日施肥,4月1日插秧,7月10日收获;晚稻于同年8月15日施肥,8月16日插秧,12月3日收获。早稻品种为十九香,晚稻品种为台优811。早晚稻采收后记录产量,按照考种规范记录早晚稻的实粒数、秕粒数、实粒重和秕粒重,计算千粒重。

1.3 样品采集与测定

在晚稻生长的分蘖期、抽穗期、扬花期、灌浆期和成熟期采集土壤样品,随机选取4个点位,采用取土器采集0~15 cm土层样品。在晚稻灌浆期,每隔1周用叶绿素仪(TYS-A, SPAD-502)测定剑叶SPAD值,并采集植株样品,每个小区随机采集3株,共测定和采集5次;植株样品采集后,分别取剑叶和穗粒,先用自来水冲洗干净再用蒸馏水润洗,清洗干净的植株样品先在 $105\ ^\circ\text{C}$ 杀青30 min,降温至 $65\ ^\circ\text{C}$ 烘干至恒质

量,记录干物质质量后将样品粉碎,测定氮、磷、钾含量,均采用硫酸-双氧水消解,氮采用凯氏定氮法、磷采用钼黄比色法、钾采用火焰光度法测定。

土壤样品经风干、过2 mm筛后,采用常规土壤农化分析方法^[20]测定土壤pH值、有机质含量、交换性酸含量、交换性盐基离子。其中pH用2.5:1水土比浸提pH计法测定,土壤有机质用重铬酸钾容量法-外加热法测定,交换性酸(交换性铝和交换性氢)采用氯化钾交换-中和滴定法测定,交换性钙和镁采用乙酸铵溶液交换-原子吸收分光光度法测定,交换性钠和钾采用乙酸铵溶液交换-火焰光度法测定。

1.4 数据统计与分析

采用Microsoft Excel 2016进行图表制作。试验数据采用SPSS 12.0进行统计分析,各处理之间的多重比较采用LSD-test($P<0.05$)法分析,相关性统计采用回归方程分析。

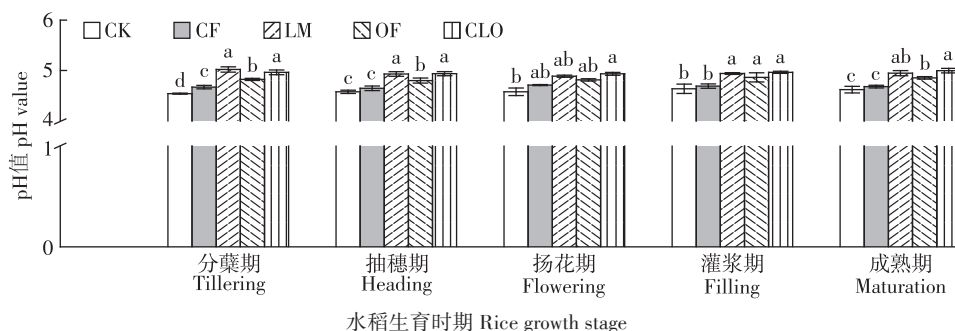
2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻生长时期土壤pH值的影响

在水稻生长的不同时期,单施石灰、有机肥及配施处理均对酸化土壤具有一定的改良效果(图1)。本试验初始土壤的pH值为4.58,至晚稻成熟时,各处理的土壤pH均有所提高,其中OF、LM和CLO处理的增幅分别为0.27、0.37、0.42个单位,表明配施处理对土壤pH的改良效果最优。单施石灰与配施处理之间土壤pH差异不显著,而单施有机肥处理的土壤pH在水稻分蘖期、抽穗期和成熟期显著低于配施处理,在扬花期和灌浆期则差异不显著。

2.2 不同处理对土壤有机质的影响

有机肥与石灰配施增加了土壤有机质含量(图2)。晚稻成熟期,各处理土壤有机质含量均显著高于



柱上误差线为标准误,柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

The error bars above the bars are standard error, and the different small letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

The same below.

图1 不同处理对水稻各生育时期土壤pH的影响

Figure 1 Effect of different treatments on the soil pH during the rice growth periods

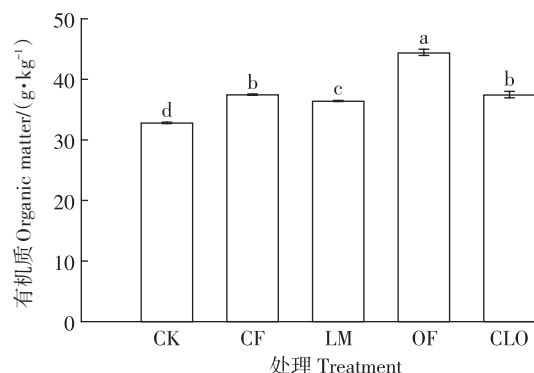


图2 不同处理对土壤有机质的影响

Figure 2 Effect of different treatments on the soil organic matter

CK ($P<0.05$)。OF处理的土壤有机质含量最高,达 $44.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于其他处理 ($P<0.05$),其次为配施处理CLO,达 $37.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,LM处理土壤有机质含量则显著低于OF、CLO和CF处理 ($P<0.05$),其有机质含量为 $36.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.3 不同处理对土壤交换性酸的影响

有机肥与石灰配施有利于降低土壤交换性酸含量(图3)。供试土壤初始交换性酸含量为 $2.31 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,晚稻成熟期,CK和CF处理的土壤交换性酸含量均高于LM、OF和CLO处理。其中:CF处理交换性酸含量最高,达 $3.14 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,较初始含量增加35.9%;其次为CK处理,达 $2.66 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,较初始含量增加15.2%;最低为CLO处理,为 $0.66 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,较初始含量降低71.4%。LM、OF和CLO处理的土壤交换性氢和交换性铝含量均低于CK和CF处理,但各处理交换性氢含量无显著差异,而交换性铝则呈显著差异 ($P<0.05$)。相关性分析表明,土壤pH与交换性氢和交换性铝均呈显著负相关(图4),交换性氢和交换性铝与pH的回归方程斜率分别为-1.356 8和-0.156 0,表

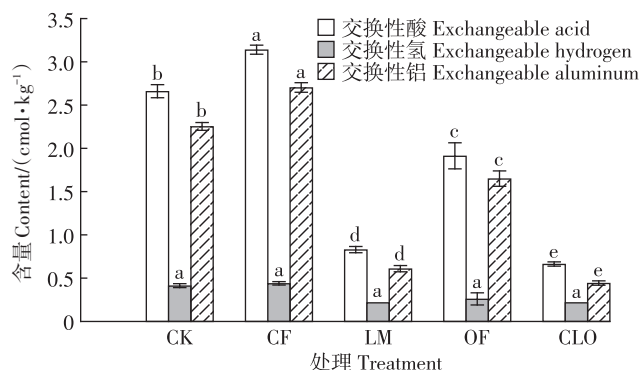


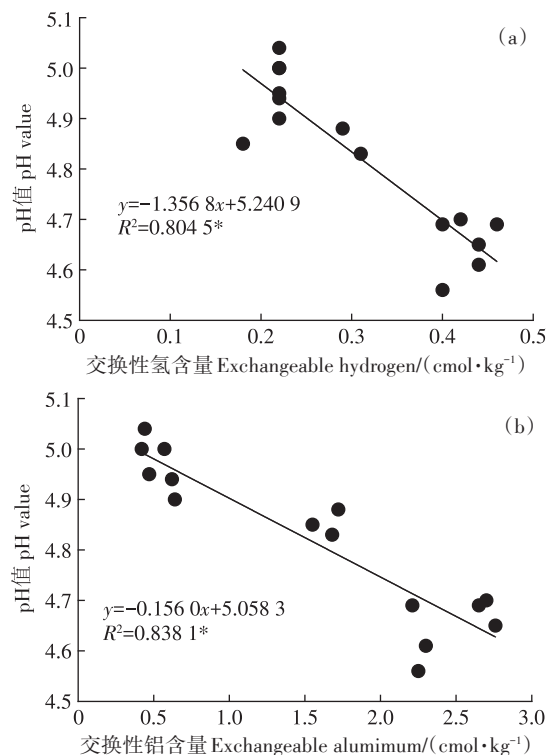
图3 不同处理对土壤交换性酸的影响

Figure 3 Effect of different treatments on the soil exchangeable acid

明土壤交换性氢和交换性铝的含量每升高 $1.00 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH分别降低1.356 8、0.156 0个单位。

2.4 不同处理对土壤交换性盐基离子的影响

有机肥与石灰配施可增加土壤交换性盐基离子含量(图5)。晚稻成熟期,LM处理的土壤交换性盐基离子总量最高,达 $7.52 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于其他处



*表示显著相关 ($P<0.05$)。

* means significant correlation ($P<0.05$).

图4 土壤pH与交换性酸的关系

Figure 4 Correlation analysis between soil pH and exchangeable acid

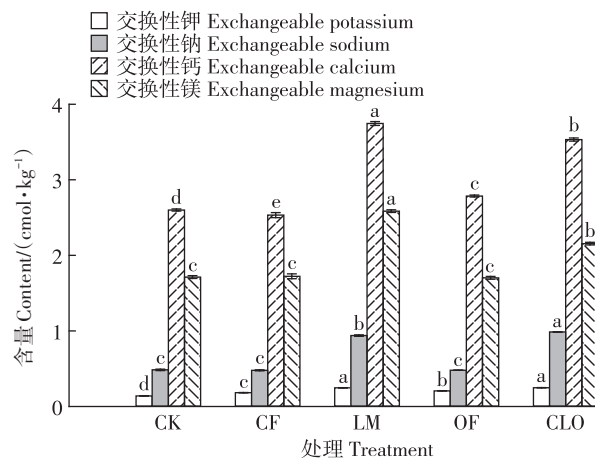


图5 不同处理对土壤交换性盐基离子的影响

Figure 5 Effect of different treatments on the soil exchangeable base cations

理($P<0.05$),差异主要体现在交换性钙和交换性镁含量,两者在交换性盐基离子总量中分别占49.9%和34.4%,均显著高于其他处理($P<0.05$)。CLO处理的土壤交换性盐基离子总量仅次于LM处理,达6.92 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在各处理中,交换性钾含量均占比最低,其中CK和CF处理含量分别为0.14 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和0.18 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,均显著低于LM、OF和CLO处理($P<0.05$),CK和CF处理的交换性钠含量均显著低于LM和CLO处理($P<0.05$)。

2.5 不同处理对水稻产量的影响

有机肥与石灰配施可显著提高水稻产量(表1)。CLO、LM和OF处理的早稻产量均显著高于CK,三者产量分别为5 470.5、5 389.5 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和5 328.0 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,CF与CK之间则无显著差异。早稻千粒重最高的处理为CLO,达21.5 g,最低的则为OF处理,为20.5 g,两者之间呈显著差异,CF、LM的千粒重则与CK差异不显著。各处理晚稻产量均显著高于CK($P<0.05$),最高的处理为CLO,达5 772.0 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。OF和LM处理的产量均高于CF,但差异不显著;CLO、LM、OF处理的晚稻千粒重均显著高于对照CK($P<0.05$),但三者之间差异不显著,由高到低依次为OF(27.0 g)>LM(26.7 g)>CLO(26.6 g)。

2.6 不同处理对水稻灌浆期氮、磷、钾养分及剑叶SPAD值的影响

不同处理影响晚稻灌浆期叶片和穗粒中氮磷钾养分的分布(图6、图7)。在晚稻灌浆期,各处理水稻剑叶的氮、磷、钾含量均呈下降趋势(图6),其中CK氮素含量始终低于其他各处理,至第101天时,OF处理氮素和磷素含量最高,分别达14.33 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和1.51 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,而钾素含量最高的处理为CF,达14.43 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

表1 不同处理对早稻及晚稻产量的影响
Table 1 Effects of different treatments on the early and late rice yields

处理 Treatment	早稻 Early rice		晚稻 Late rice	
	产量 Yield/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	千粒重 1000-grain weight/g	产量 Yield/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	千粒重 1000-grain weight/g
CK	4 788.0±3.28b	20.6±0.14ab	4 731.0±4.56c	25.1±0.38b
CF	4 981.5±8.38b	20.7±0.34ab	5 469.0±2.77b	26.5±0.29ab
LM	5 389.5±7.19a	21.0±0.47ab	5 584.5±7.98ab	26.7±0.02a
OF	5 328.0±8.17a	20.5±0.33b	5 670.0±7.86ab	27.0±0.02a
CLO	5 470.5±7.57a	21.5±0.32a	5 772.0±10.18a	26.6±0.16a

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different small letters indicate significant difference among treatments($P<0.05$).

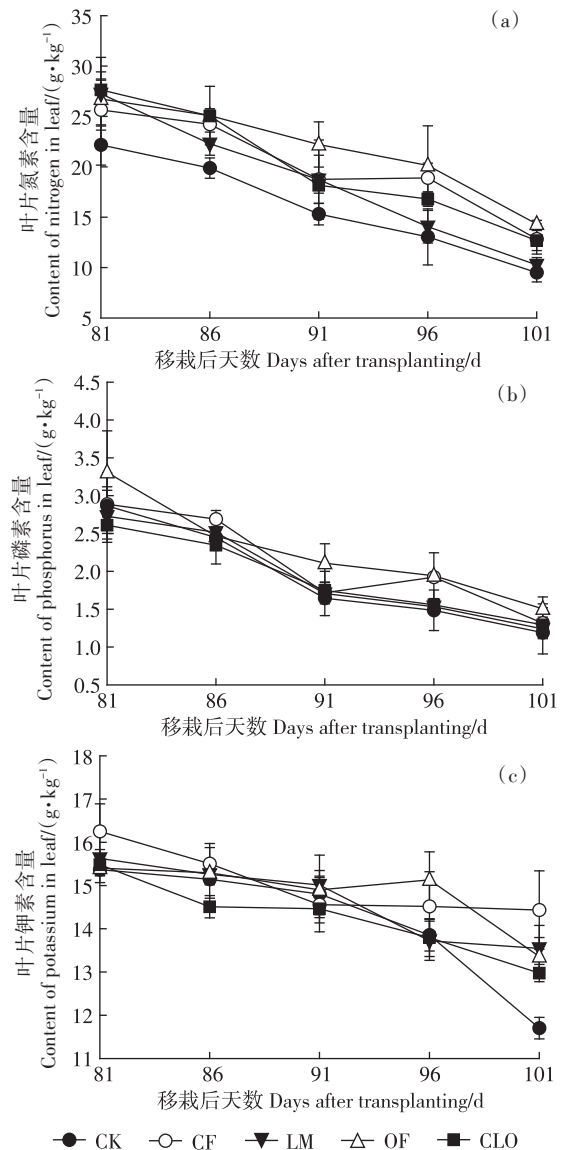


图6 水稻灌浆期剑叶氮磷钾含量变化

Figure 6 Dynamic change of flag leaf nitrogen, phosphorus, and potassium content during filling stage

不同处理晚稻灌浆期穗粒的氮、磷、钾含量变化与剑叶存在差异,其中氮和钾含量呈下降趋势,而磷含量呈先上升后下降趋势(图7),灌浆初期,CF处理穗粒氮素含量最高,达12.16 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,至第101天时,CF处理氮素降至11.18 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,仍然高于其他各处理,此时CLO处理的氮素含量为9.37 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。对于磷素含量而言,在灌浆初期,OF处理穗粒磷素含量最高,达2.67 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;在第91天时,各处理磷素含量均升高,其中LM处理穗粒磷素含量最高,达3.13 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,第101天时,CF处理磷含量最高,达2.98 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,CLO处理磷含量最低,为2.53 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。各处理灌浆期穗粒钾素含量持续下降,灌浆初期,CK处理穗粒钾素含量最高,达

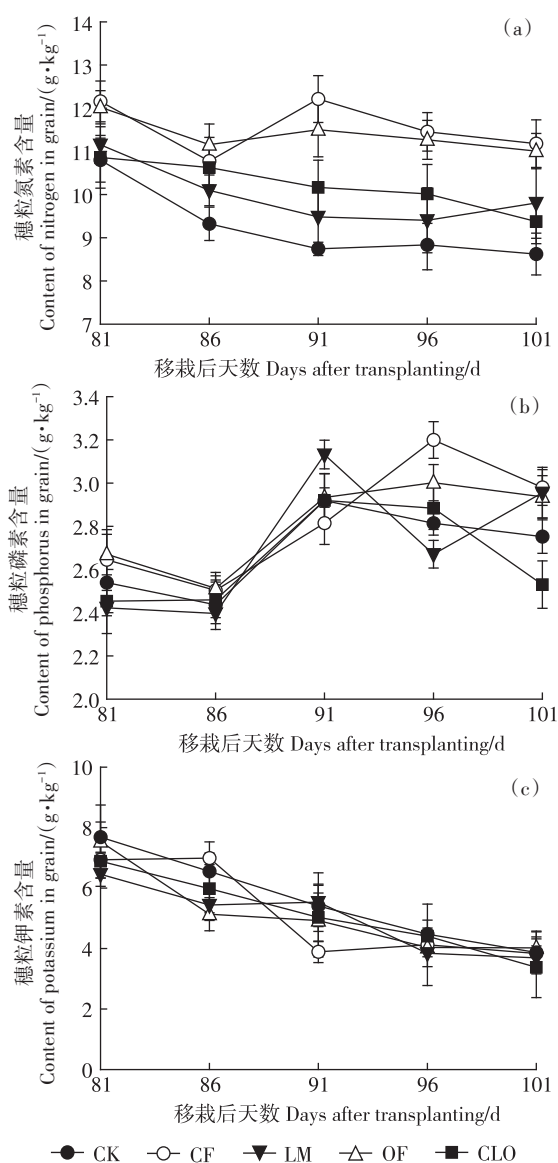


图7 水稻灌浆期穗粒氮磷钾含量变化

Figure 7 Dynamic change of grain nitrogen, phosphorus, and potassium content during filling stage

7.69 g·kg⁻¹,第101天时,OF处理钾含量最高,达4.02 g·kg⁻¹,CLO处理钾含量最低,为3.38 g·kg⁻¹。

不同处理有利于提高晚稻叶片叶绿素含量(图8)。随着移栽天数增加,各处理水稻叶片叶绿素含量呈下降趋势,但始终高于CK处理。灌浆初期,CLO处理的叶绿素含量最高,SPAD达37.1,至第101天时,CLO处理的叶绿素含量SPAD降至27.6,但仍高于其他各处理。

3 讨论

施石灰是改良酸性土壤的有效措施之一,但长期单一施用,会造成土壤板结等不良后果,将其与有机

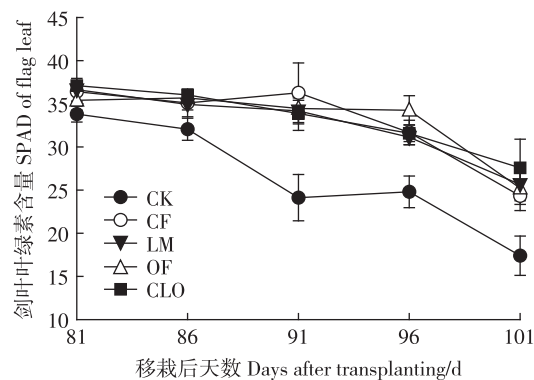


图8 水稻灌浆期剑叶叶绿素含量(SPAD值)变化

Figure 8 Dynamic change of rice SPAD value in flag leaf during filling stage

肥配施,既可快速提高土壤pH,又能培肥土壤,是可持续利用的改良模式。

3.1 有机肥与石灰配施对酸化土壤酸化性质的影响

本研究试验区土壤初始pH值为4.58,属于强酸性土壤,施用石灰、有机肥及两者配施均提高了土壤pH,且配施效果最优,pH提高至5.00。有研究表明,强酸性土壤中,土壤活性酸主要来自交换性铝,而交换性铝与pH呈极显著负相关^[21],本研究结果显示,单施石灰、有机肥和配施处理均显著降低了土壤交换性铝含量,与pH呈显著负相关,研究结果与前人一致。石灰与有机肥均为碱性物质,其改良酸化土壤的共同机制为:释放的盐基离子与土壤表面的交换性酸发生离子交换反应,使土壤胶体颗粒上的可交换性氢离子和铝离子释放到溶液中,并与有机肥/石灰释放的碱性物质发生中和反应,形成氢氧化铝沉淀,降低土壤酸度;此外,有机肥的施用可替代部分化肥尤其是氮肥的投入,有利于减少硝态氮的累积和淋溶损失,从而削弱氮肥的致酸作用^[22-24]。本研究发现,单施石灰和配施有机肥处理可显著提高土壤交换性盐基离子含量,尤其是交换性钙和交换性镁含量,该结果与前人研究一致。孟赐福等^[25]对定位10年的石灰改良红壤的田间试验进行检测分析发现,施用石灰可提高土壤中交换性钙、镁含量,降低土壤酸度,且土壤酸度随时间推移和石灰用量增加而降低。胡天睿等^[19]的研究结果也显示,施用石灰和有机肥均能显著提高土壤交换性钙和交换性镁含量,且随着有机肥施用量增加而增加。

3.2 有机肥与石灰配施对酸化土壤有机质的影响

有机肥单施及其与石灰配施后,土壤有机质显著增加,这一结果有利于提高土壤的酸碱缓冲能力。大量研究表明,有机质对土壤交换性铝含量具有重要影

响,Wang等^[26]研究发现,长期施用有机肥可促进土壤交换性铝向有机络合态铝转化,通过冗余分析发现土壤pH和有机质含量共同解释了各处理土壤铝形态变异性的84%。胡天睿等^[19]也发现,土壤有机质含量变化可显著影响交换性铝对pH的响应,有机质含量高的土壤pH值降低时,土壤交换性铝含量增幅低于有机质含量低处理,表明土壤对pH的缓冲性能增强。其原因可能在于土壤有机质中含有大量的酚羟基、醇羟基、羧基等官能团,有利于质子化消耗氢离子,同时释放大量盐基阳离子,且有机质比表面积大,对阳离子具有强吸附作用,从而提高阳离子交换量和交换性盐基离子含量^[27-28];同时,有机肥中的有机官能团可促进土壤中交换性铝和活性铝向有机络合态铝转化,从而缓解土壤酸化、降低铝毒害^[29]。

3.3 有机肥与石灰配施对水稻产量的影响

有机肥与石灰配施对水稻增产效果优于单施有机肥或石灰处理,但三者差异不显著,这一结果与有机肥培肥作用和石灰的调酸效果相关。已有研究表明,石灰的添加有利于降低交换性铝含量、减轻铝的毒害,还能提高土壤微生物活性,从而加快土壤有机氮向无机态氮的转化,速效氮的增加为作物生物量提高和产量增加奠定基础^[30]。也有研究发现,过量连续施用石灰会降低磷、钾养分和铁、锰、锌、铜等微量元素的吸收^[31]。因此,本研究将石灰与有机肥配施,可降低石灰用量,而有机肥的施用伴随着大量有机碳源和养分的投入,这些碳源是最具生物有效性的活性碳来源,有利于提高土壤可溶性有机碳含量,并推动土壤微生物群落结构、数量及酶活性发生显著变化,最终实现农田土壤固碳,提升土壤有机碳储量^[32-33]。此外,水稻灌浆过程中,剑叶和穗粒氮、磷、钾含量变化显示,剑叶中氮、磷、钾含量均呈下降趋势,而穗粒中磷含量呈先上升后下降趋势,过程出现累积表明灌浆过程中碳水化合物转运的同时还伴随着矿质养分的迁移,这一迁移有助于推动灌浆过程的完成^[34]。同时,水稻灌浆期内剑叶的叶绿素含量呈下降趋势,表明随着水稻逐渐成熟,其叶片逐渐发黄,与水稻生长规律一致,施用改良剂的3个处理叶绿素含量始终高于对照,表明其光合作用能力高于对照,有利于增加水稻产量^[35]。

4 结论

有机肥与石灰配施对华南双季稻区酸性土壤改良效果优于单施处理,且能实现水稻增产,为华南酸

性土壤改良奠定科学基础,但本研究仅开展了2季水稻种植试验,长期的改良效应仍有待进一步验证。

参考文献:

- [1] 袁浩亮,龙泽东,孙梅,等. 国际土壤酸化研究知识图谱分析[J]. 土壤通报, 2022, 53(04): 989-997. YUAN H L, LONG Z D, SUN M, et al. Knowledge map of international research on soil acidification[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(4): 989-997.
- [2] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [3] 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. ZHOU X Y, ZHOU S W, XU M G, et al. Evolution characteristics and influence factors of acidification in paddy soil of southern China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4811-4817.
- [4] 周峻宇,李明德,周旋,等. 南方典型母质发育水稻土剖面酸化特征研究[J]. 中国土壤与肥料, 2022(3): 7-13. ZHOU J Y, LI M D, ZHOU X, et al. Study on acidification characteristics of paddy soils profiles developed from typical parent materials in south China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(3): 7-13.
- [5] 曾招兵,曾思坚,刘一锋,等. 1984年以来广东水稻土pH变化趋势及影响因素[J]. 土壤, 2014, 46(4): 732-736. ZENG Z B, ZENG S J, LIU Y F, et al. Change tendency of paddy soil pH in Guangdong Province since 1984 and influential factors[J]. *Soils*, 2014, 46(4): 732-736.
- [6] ZHU Q C, WIM V, 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.
- [7] ZHANG Y, HE X, LIANG H, et al. Long-term tobacco plantation induces soil acidification and soil base cation loss[J]. *Environmental Science Pollution Research*, 2016, 23: 5442-5450.
- [8] CHAPLAIN V, DEFOSSEZ P, DELARUE G, et al. Impact of lime and mineral fertilizers on mechanical strength for various soil pHs[J]. *Geoderma*, 2011, 167/168(8): 360-368.
- [9] 姜超强,董建江,徐经年,等. 改良剂对土壤酸碱度和烤烟生长及烟叶中重金属含量的影响[J]. 土壤, 2015, 47(1): 171-176. JIANG C Q, DONG J J, XU J N, et al. Effects of soil amendment on soil pH, plant growth and heavy metal accumulation of flue-cured tobacco in acid soil[J]. *Soils*, 2015, 47(1): 171-176.
- [10] 曾廷廷,蔡泽江,王小利,等. 酸性土壤施用石灰提高作物产量的整合分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50: 2519-2527. ZENG T T, CAI Z J, WANG X L, et al. Integrated analysis of liming for increasing crop yield in acidic soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50: 2519-2527.
- [11] 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.
- [12] 闫志浩,胡志华,王士超,等. 石灰用量对水稻油菜轮作区土壤酸度、土壤养分及作物生长的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(23): 4285-4295. YAN Z H, HU Z H, WANG S C, et al. Effects of lime

- content on soil acidity, soil nutrients and crop growth in rice-rape rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(23): 4285-4295.
- [13] 索炎炎, 张翔, 司贤宗, 等. 施用石灰与生物炭对酸性土壤花生氮素吸收及产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2023, 45(1): 148-154. SUO Y Y, ZHANG X, SI X Z, et al. Effects of lime and biochar application on nitrogen uptake and yield of peanut in acid soil[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2023, 45(1): 148-154.
- [14] 赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 等. 牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5224-5233. ZHAO L F, HUANG P W, YANG C D, et al. Effects of oyster shell powder and lime on availability and forms of phosphorus and enzyme activity in acidic paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(11): 5224-5233.
- [15] 肖小军, 余跑兰, 郑伟, 等. 油菜秸秆还田配施石灰对红壤稻田早稻产量及土壤特性的影响[J]. 作物研究, 2021, 35(1): 8-13. XIAO X J, YU P L, ZHENG W, et al. Effects of rapeseed straw returning and lime application early rice yield and soil properties in red soil paddy field[J]. *Crop Research*, 2021, 35(1): 8-13.
- [16] SHI R Y, LIU Z D, LI Y, et al. Mechanisms for increasing soil resistance to acidification by long-term manure application[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 185: 77-84.
- [17] 周海燕, 徐明岗, 蔡泽江, 等. 湖南祁阳县土壤酸化主要驱动因素贡献解析[J]. 中国农业科学, 2019, 52(8): 1400-1412. ZHOU H Y, XU M G, CAI Z J, et al. Quantitative analysis of driving factors of soil acidification in Qiyang County, Hunan Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(8): 1400-1412.
- [18] CAI Z J, WANG B R, ZHANG L, et al. Striking a balance between N sources: mitigating soil acidification and accumulation of phosphorous and heavy metals from manure[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754(5): 142189.
- [19] 胡天睿, 蔡泽江, 王伯仁, 等. 有机肥替代化学氮肥提升红壤抗酸化能力[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(11): 2052-2059. HU T R, CAI Z J, WANG B R, et al. Swine manure as part of the total N source improves red soil resistance to acidification[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(11): 2052-2059.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. *Agrochemical soil analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [21] 侯慧芝, 张绪成, 尹嘉德, 等. 秸秆还田量对旱地全膜覆土穴播春小麦水分利用及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(4): 457-464. HOU H Z, ZHANG X C, YIN J D, et al. Effects of straw returning amount on water use and yield of spring wheat under soil-plastic mulching and hole sowing in dry land[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(4): 457-464.
- [22] 孟红旗, 吕家珑, 徐明岗, 等. 有机肥的碱度及其减缓土壤酸化的机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1153-1160. MENG H Q, LÜ J L, XU M G, et al. Alkalinity of organic manure and its mechanism for mitigating soil acidification[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(5): 1153-1160.
- [23] CAI Z J, XU M G, ZHANG L, et al. Decarboxylation of organic anions to alleviate acidification of red soils from urea application[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(8): 3124-3135.
- [24] 蔡泽江, 孙楠, 王伯仁, 等. 几种施肥模式对红壤氮素形态转化和pH的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(14): 2877-2885. CAI Z J, SUN N, WANG B R, et al. Experimental research on effect of different fertilization on nitrogen transformation and pH of red soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(14): 2877-2885.
- [25] 孟赐福, 傅庆林. 施石灰石粉后红壤化学性质的变化[J]. 土壤学报, 1995, 32: 300-307. MENG C F, FU Q L. Changes in chemical properties of red soil after surface application of powdered limestone[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32: 300-307.
- [26] WANG L, BUTTERLY R C, TIAN W, et al. Effects of fertilization practices on aluminum fractions and species in a wheat soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16: 1933-1943.
- [27] 刘莉, 谢德体, 李忠意, 等. 酸性紫色土的阳离子交换特征及其对酸缓冲容量的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 887-897. LIU L, XIE D T, LI Z Y, et al. Cation exchange and its effect on acid buffering capacity of acid purple soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4): 887-897.
- [28] 唐贤, 蔡泽江, 徐明岗, 等. 余江县水稻土剖面酸缓冲性能与酸化速率[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(6): 774-782. TANG X, CAI Z J, XU M G, et al. Research on buffering capacity and acidification rate of paddy soil profiles in Yujiang County[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(6): 774-782.
- [29] CAI A D, XU M G, WANG B R, et al. Manure acts as a better fertilizer for increasing crop yields than synthetic fertilizer does by improving soil fertility[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 189(5): 168-175.
- [30] SHAABAN M, PENG Q, HU R G, et al. Dolomite application to acidic soils: a promising option for mitigating N₂O emissions[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(24): 19961-19970.
- [31] FAGERIA N K, ZIMMERMANN F J P, BALIGAR V C. Lime and phosphorus interactions on growth and nutrient uptake by upland rice, wheat, common bean and corn in an Oxisol[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1995, 18(11): 2519-2532.
- [32] 张雅蓉, 李渝, 刘彦伶, 等. 长期施肥对黔中黄壤碳氮活性的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(2): 325-333. ZHANG Y R, LI Y, LIU Y L, et al. Effect of long-term fertilization on carbon and nitrogen activity in yellow soil in central Guizhou[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(2): 325-333.
- [33] 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. ZHANG Y R, LIU Y L, HUANG X C, et al. Organic carbon mineralization characteristics in rhizosphere and bulk soil of rice under organic fertilization modes in yellow paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2023, 29(3): 449-458.
- [34] 薛欣欣, 李岚涛, 鲁剑巍, 等. 利用功能叶片钾含量作为水稻钾营养诊断指标的可行性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 492-499. XUE X X, LI L T, LU J W, et al. Feasibility study of using potassium content of functional leaves of rice as potassium diagnostic index[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2): 492-499.
- [35] SAGE T L, SAGE R F, TANAKA A, et al. The functional anatomy of rice leaves: implications for refixation of photo respiratory CO₂ and efforts to engineer C4 photosynthesis into rice[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2009, 50(4): 756-772.