

四川紫色母岩发育土壤酸化防治与产能提升技术研究^①

周睿芃¹, 余昊浩森¹, 晏朝睿^{1,2}, 刘江^{1,2}, 李阳^{1,2}, 高雪松^{1,2*}

(1 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2 自然资源部耕地资源调查监测与保护利用重点实验室, 成都 610045)

摘要: 为改善四川酸性紫色土“酸、瘦”现状及解决其对作物生产能力的制约, 在四川省广安市广安区开展小区试验, 设置化肥减量 25%、有机肥替代 25% 化肥与常规化肥对照 3 种施肥措施, 分别与施加改良剂石灰、钙镁磷肥及不施加改良剂互配形成 9 种处理, 开展水稻-油菜轮作试验, 探究其对酸性紫色土土壤性质及作物产量的影响, 以期建立适用于四川的土壤酸化防治与产能提升技术。结果表明, 减量 25% 化肥配施钙镁磷肥处理抑制了交换性酸的上升趋势并提高了土壤 pH。同时, 有机肥替代化肥处理使土壤有机质、全氮、有效磷含量分别提高 9.59%~43.02%、11.34%~37.96% 和 103.90%~127.91%。各改良处理水稻产量均高于 9 800 kg/hm², 有机肥替代化肥处理水稻产量均高于 10 500 kg/hm²; 有机肥替代化肥处理下油菜相较于常规化肥处理增产 25.00%~55.08%。综上, 在本试验中, 钙镁磷肥配施处理抑酸潜力突出, 有机肥替代化肥可协同提升土壤肥力与作物产量; “有机肥替代+钙镁磷肥”作为土壤酸化防治与产能提升技术可以有效改善四川紫色母岩发育土壤“酸、瘦”状况, 为治理酸性土壤、抑制土壤酸化进程提供重要依据。

关键词: 紫色土; 土壤酸化; 酸化改良; 土壤肥力

中图分类号: S156.6; S158 文献标志码: A

Study on Acidification Control and Productivity Enhancement Technologies for Purple Parent Material-derived Soils in Sichuan

ZHOU Ruipeng¹, YU Wuhaomiao¹, YAN Chaorui^{1,2}, LIU Jiang^{1,2}, LI Yang^{1,2}, GAO Xuesong^{1,2*}

(1 College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 Key Laboratory of Investigation, Monitoring, Protection and Utilization for Cultivated Land Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610045, China)

Abstract: To mitigate the “acidic and infertile” conditions of purple soils in Sichuan and to overcome their constraints on crop productivity, a field plot experiment was conducted in Guang'an District, Guang'an City, Sichuan Province. Three fertilization regimes were designed: conventional chemical fertilizer, 25% reduction in chemical fertilizer, and substitution of 25% of chemical fertilizer with organic fertilizer. Each fertilization regime was further combined with either no amendment, lime, or calcium-magnesium phosphate (CMP) fertilizer, generating nine treatments in total. A rice–rapeseed rotation system was employed to investigate the effects of these nine treatments on soil properties and crop yields, with the aim of developing an acidification control and productivity enhancement technology applicable to purple soils in Sichuan. The results showed that the treatment with 25% reduced chemical fertilizer combined with CMP effectively suppressed the increase in exchangeable acidity and raised soil pH. Organic fertilizer substitution treatments increased soil organic matter, total nitrogen, and available phosphorus contents by 9.59%–43.02%, 11.34%–37.96%, and 103.90%–127.91%, respectively. After soil amelioration, rice yields across all treatments exceeded 9 800 kg/hm², with organic fertilizer substitution treatments consistently surpassing 10 500 kg/hm². Moreover, rapeseed yields under organic fertilizer substitution were 25.00%–55.08% higher than those under conventional fertilization. In conclusion, CMP application exhibited strong acid-suppressing potential, while organic fertilizer substitution effectively enhanced soil fertility and crop productivity, thus, the integrated approach of “organic fertilizer substitution + CMP application” provides a practical and effective technology for ameliorating the “acidic and infertile” condition of purple parent material-derived soils in Sichuan, offering a solid scientific basis for managing acidic soils and mitigating soil

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1901403)和国家自然科学基金项目(42207016)资助。

* 通信作者(xuesonggao@sicau.edu.cn)

作者简介: 周睿芃(2000—), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要研究方向为退化耕地治理。E-mail: zhouruipeng@stu.sicau.edu.cn

acidification processes.

Key words: Purple soil; Soil acidification; Acidic soil amelioration; Soil fertility

紫色土是由紫色母岩发育而来的一种幼年土壤，属于初育土土纲、石质初育土亚纲，作为我国重要的农业土壤资源，集中分布于四川盆地^[1-2]，其快速风化特性与高耕作强度使其成为土壤酸化敏感区^[3]。由于高强度人为活动以及较大降水量等因素的影响，国内土壤酸化进程大大加速。土壤酸化状况会对农业系统产生较强负面影响，导致土壤关键障碍特征凸显，盐基离子淋失加剧，养分库容缩小，作物产量降低^[4-5]。酸性紫色土主要通过盐基饱和紫色母岩在成土过程中因游离钙和盐基物质大量淋失等方式形成。近 40 年间，四川盆地耕层土壤 pH 已平均下降 0.7 个单位，强酸性耕地($\text{pH} < 5.5$)面积达 40 万 hm^2 ^[6]。土壤有机质对土壤碳循环和土壤健康有重要意义。然而，全球 1/3 的土壤正在迅速流失有机质，这不仅会降低土壤养分供应能力和作物生产力，还会导致土壤持水能力与抗旱性下降，发生土壤退化^[7-8]。总体来看，近 10 年，受人为干扰等因素影响，四川省紫色土有机质含量低于国内平均水平^[9]，且呈逐渐降低的动态退化趋势^[10]，土壤肥力受到较大影响。紫色土“酸、瘦”协同退化已成为制约四川省农业可持续发展的核心瓶颈。

为减缓土壤酸化进程，已有研究通过添加土壤改良剂来改善土壤酸化问题。农业生产中，施用石灰不仅可以显著降低土壤酸性，改善土壤结构，还可以降低土壤中重金属对作物的毒害，提高作物的品质和产量^[11]。钙镁磷肥属于枸溶性磷肥，肥效平缓，磷素利用率高，可以有效提高土壤 pH 和营养元素含量，有利于稳定微生物群落结构，提高作物生产力，具有较大的应用潜力^[12]。此外，研究发现，氮肥过量施用是土壤 pH 下降的主要人为驱动因素。化肥的施用量过大可能会导致作物无法完全吸收养分，使氮素滞留在土壤中，造成环境污染，土壤质量下降^[13]。施用有机肥替代化肥，从而实现化肥减量是实现土壤降酸控铝的另一有效途径^[14]。研究发现，有机肥替代化肥在作物产量、土壤环境可持续性和土壤肥力方面显示出协同效益，有利于农业的可持续发展^[15-16]。然而，有试验表明，土壤有机质含量与水稻土酸化速率呈负相关关系^[17]。前期研究主要集中在单独解决紫色土“酸”或“瘦”的现象，没有考虑如何形成针对紫色母岩发育土壤酸化防治与产能提升的技术，改善二者之间因协同关系所造成的问题。

综上，本研究选取四川紫色土作为研究对象，选择 9 种不同的抑酸施肥模式对其进行改良，考察不同改良模式对酸性紫色土性质的影响，并揭示其主要影响机制，从而提出酸化防治与产能提升技术模式，为四川酸化土壤治理与耕地质量保护提供理论和数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于四川省广安市广安区恒升镇潭龙村 $(106^{\circ}46' \text{E} \sim 106^{\circ}54' \text{E}, 30^{\circ}40' \text{N} \sim 30^{\circ}56' \text{N})$ 。气候类型为亚热带季风性湿润气候，年均气温 17.2 ℃，年均降水量 1 072.7 mm，年均日照时数 1 123.4 h。土壤类型为侏罗系沙溪庙组紫色母岩发育而成的水稻土。供试土壤(0~20 cm)基本性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤基本性质
Table 1 Basic properties of tested soil

指标	均值 ± 标准偏差
pH	5.28 ± 0.33
有机质(g/kg)	1.54 ± 0.39
全氮(g/kg)	0.86 ± 0.19
有效磷(mg/kg)	4.92 ± 2.81
速效钾(mg/kg)	94.50 ± 13.38

1.2 供试材料

供试水稻、油菜使用当地主推品种川优 670 和双籽油 11。

供试化肥为尿素(养分含量 46%)、过磷酸钙(P_2O_5 含量 12%)、氯化钾(K_2O 含量 60%)。供试有机肥来自四川眉山益稷农业科技有限公司，氮、磷、钾养分含量分别为 2%、1%、1%。供试土壤调理剂为钙镁磷肥和石灰。钙镁磷肥来自广西壮方利元生物科技有限公司，有效钙含量为 20.0%，有效镁含量为 4.0%，可溶性硅为 20.0%；石灰来自当地化工厂，pH 为 11.87。

1.3 试验设计与处理

试验小区种植模式为水稻–油菜轮作。由于过量施用化肥是导致本区域土壤酸化的重要因素之一，因此除有机肥替代化肥处理以外，还设计了化肥减量处理。试验采用单因素随机区组设计，共 9 组处理：常规化肥施用(CF)、常规化肥施用+钙镁磷肥(CFCMP)、

常规化肥施用+石灰(CFSL)、减量施用 25% 化肥(RCF)、减量施用 25% 化肥+钙镁磷肥(RCFCMP)、减量施用 25% 化肥+石灰(RCFSL)、有机肥替代 25% 化肥(OCF)、有机肥替代 25% 化肥+钙镁磷肥(OCFCMP)、有机肥替代 25% 化肥+石灰(OCFSL)。各处理中石灰、钙镁磷肥的添加量均为 1 125 kg/hm²。

常规化肥施用在水稻季, 水稻插秧前, 一次性均匀撒施氮肥 135 kg/hm²、磷肥 120 kg/hm²、钾肥 90 kg/hm² 作为底肥, 进行一次耙田, 将肥料均匀翻入土壤。在水稻分蘖期, 均匀撒施 45 kg/hm² 氮肥作为追肥。水稻拔节期, 按产品推荐用量喷施叶面中微量元素复合肥料一次。油菜季, 油菜移栽前, 将氮肥 180 kg/hm²、磷肥 97.5 kg/hm²、钾肥 75 kg/hm² 作为底肥一次性条施。以 CF 处理为参考, 根据测定的有机肥氮磷钾含量计算出有机肥的施用量, 即水稻插秧前撒施相应有机肥 1 687.5 kg/hm², 分蘖期撒施 562.5 kg/hm²; 油菜季施用 2 250 kg/hm²。试验每组处理设 3 个重复, 共设置 27 个小区, 每个小区长 6 m, 宽 5 m, 区组随机排列, 各小区相互独立, 并在四周垒高 30 cm、宽 30 cm 的田坎。水稻于每年 5 月初播种育苗, 6 月上旬移栽, 行距为 0.2 m, 株距为 0.25 m; 油菜则于每年 10 月中旬直播, 行距为 0.8 m, 株距为 0.3 m。根据当地水稻和油菜种植的田间管理措施对试验区进行统一的灌排、病虫鸟害及杂草防治管理。

1.4 作物产量测定

油菜和水稻成熟并收割后, 装入网袋进行悬挂晾晒, 待其自然风干后脱粒, 称量各试验小区的作物产量。

1.5 土壤样品采集与测定

于试验开始时以及各作物成熟后采集土壤样品, 用于理化性质的测定。样品采集时, 每个小区按五点采样法随机采集表层(0~20 cm)土样, 采用四分法取混合样品, 刨除杂质装入聚乙烯袋中, 带回实验室经自然风干、研磨后过 1 mm 及 0.15 mm 尼龙筛, 装袋保存用以试验分析。每次采样共收集 27 个混合土壤样品。

土壤 pH 采用酸度计测定, 水土质量比 1:2.5; 土壤有机质(SOM)采用重铬酸钾容量法测定; 土壤全氮(TN)采用凯氏定氮法测定^[18]; 有效磷(AP)采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定; 速效钾(AK)采用 NaOH 熔融-火焰光度计法测定; 土壤阳离子交换量(CEC)采用醋酸铵交换法测定; 交换性酸和交换性 H⁺ 采用 KCl 交换-中和滴定法测定^[19-20]。

1.6 数据处理

数据整理和图表制作使用 Excel 2021 软件完成; 利用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA)和显著性检验(Duncan)。

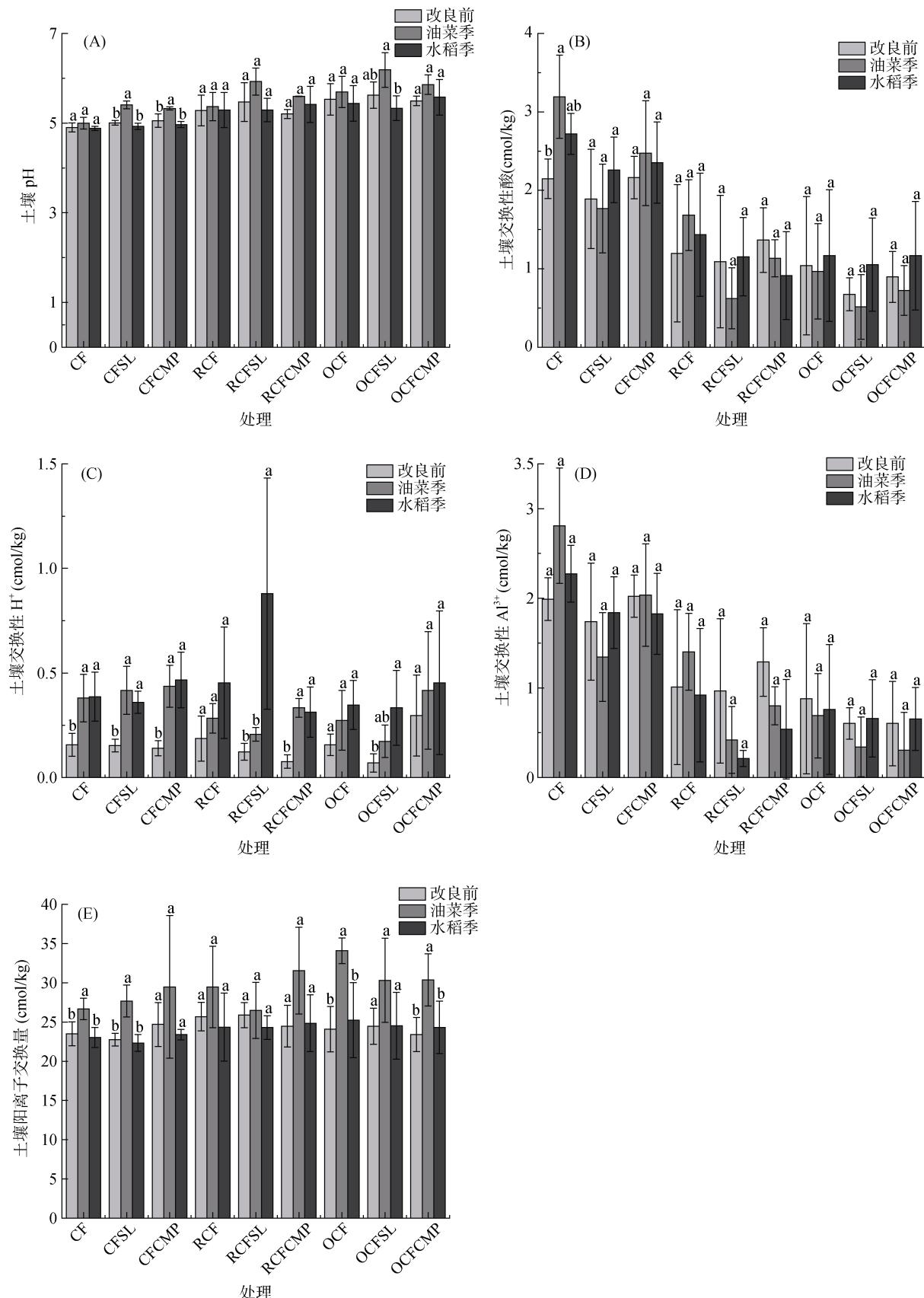
2 结果与分析

2.1 酸化土壤改良对土壤酸度及阳离子交换量的影响

本研究发现各处理的土壤 pH 均在油菜季提高, 在水稻季结束后降低, 且大部分处理降低到了低于或接近改良前的数值(图 1A)。9 组处理中, RCF、RCFCMP、OCFCMP 处理改良后最终的 pH 高于初始值, 但提升并不显著($P>0.05$)。相较于油菜季, CFSL、CFCMP 和 OCFSL 处理在水稻季结束后 pH 显著降低($P<0.05$)。常规的化肥施用处理(CF、CFSL、CFCMP)下, 土壤交换性酸含量高于其他处理(图 1B)。RCFCMP 处理 pH 在水稻季结束后增长 4.12%, 同时也抑制了土壤交换性酸含量的增加(降低了 33.17%)。其他处理的土壤交换性酸相较于改良前均有不同幅度的提高, CF 处理在油菜季显著提高($P<0.05$)。土壤交换性酸含量在改良后提升幅度最大的为 OCFSL 处理, 其增长率达到 56.44%。各处理的交换性 H⁺ 含量有上升趋势, 特别是常规化肥施用的 CF、CFSL、CFCMP 处理以及 RCFSL、RCFCMP、OCFSL 处理显著提高(图 1C)。改良后各处理交换性 Al³⁺ 与交换性酸呈现相似变化趋势, 增幅最大的为 CF, 提高了 14.30%, 降幅最大的为 RCFSL, 降低了 77.96%, 其余处理均呈现出下降或基本不变的趋势(图 1D)。由于试验中交换性 Al³⁺ 的变化均不显著, 且改良后基本趋于不变或下降, 因此土壤交换性酸的上升趋势可能与交换性 H⁺ 的变化有关。各处理的土壤阳离子交换量表现为先上升后下降, 且最终与改良前相比均未有显著变化(图 1E)。由此可见, 与常规化肥处理相比, 施加钙镁磷肥的处理抑酸潜力突出, 可以有效抑制土壤交换性酸和交换性 Al³⁺。

2.2 酸化土壤改良对土壤肥力的影响

施加改良剂并在油菜-水稻轮作后, 土壤有机质含量总体呈提高的趋势, 其中增幅最大的为 OCFSL 处理, 增长了 43.02%; 其次为 OCF 处理, 增幅为 34.81%(图 2A)。土壤速效钾含量均在改良后下降, 其中 CFSL、RCFSL、OCFSL 处理降幅较大, 分别为 33.54%、30.86%、23.75%, 降幅最小的为 OCFCMP 处理, 仅下降 6.35%(图 2B)。改良前后, 土壤有效磷变化幅度较大, CF 处理降低 21.44%; 其余处理则均



(图中小写字母不同表示同一处理不同时期差异达 $P < 0.05$ 显著水平)

图 1 不同处理对土壤酸度及阳离子交换量的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on soil acidity and cation exchange capacity

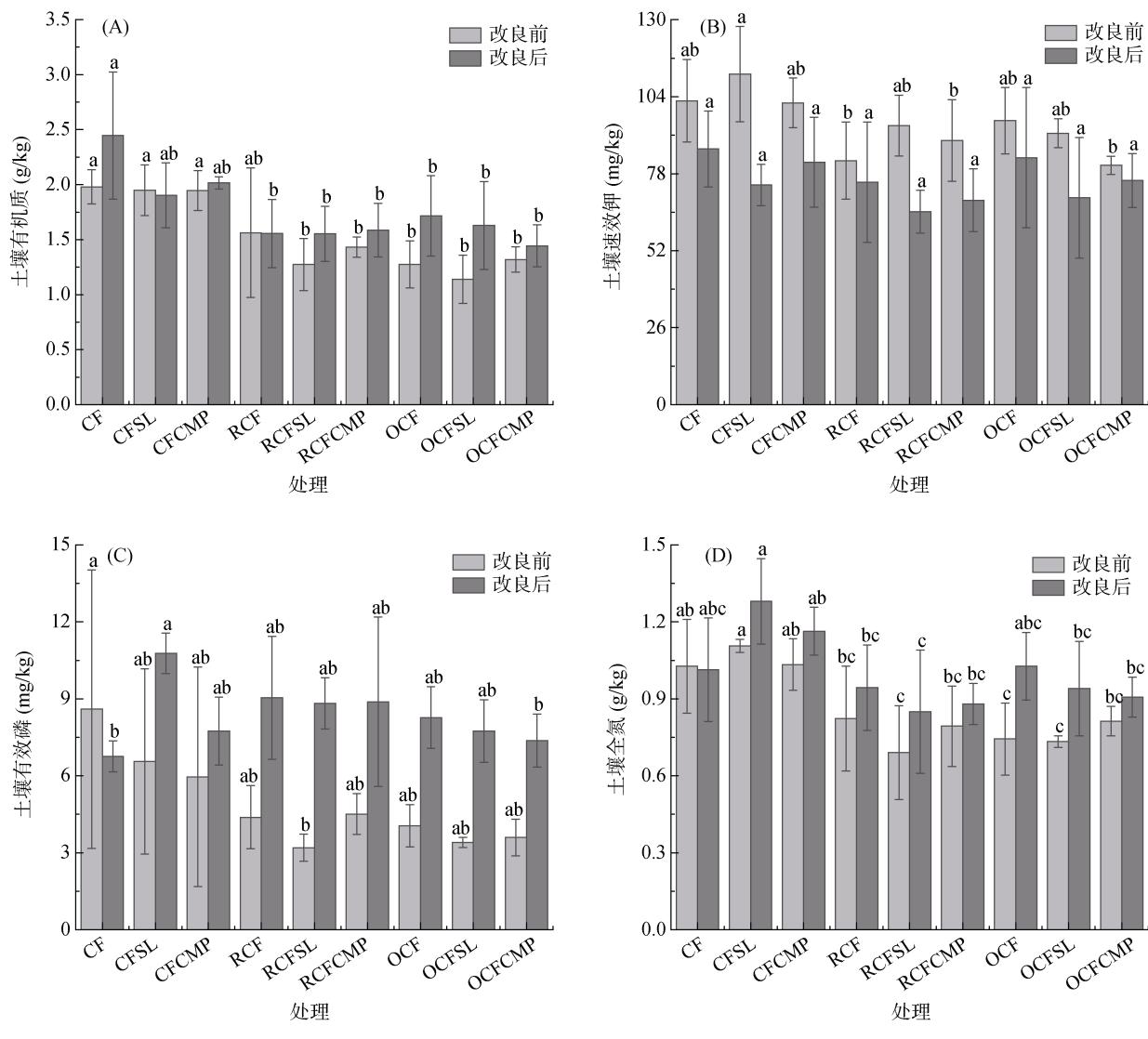
(图中小写字母不同表示改良前或改良后处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平)

图 2 不同处理对土壤肥力的影响
Fig. 2 Effects of different treatments on soil fertility

表现为提高，其中有 5 组的增幅达到一倍以上，增幅最大的为 RCFSL 处理，达 175.58%；另外两组施加石灰的处理 CFSL、OCFSL 增幅分别为 64.25% 和 127.90%，其均值比不施加改良剂的处理和施加钙镁磷肥处理的增幅更高(图 2C)。由图 2D 可知，各处理改良前后的土壤全氮含量总体趋势相似，除 CF 处理略下降以外，其他处理都有不同程度的提高。其中 OCF、OCFSL 和 RCFSL 处理提高幅度最大，分别为 37.96%、28.46%、22.87%。相比于改良前或 CF 处理，有机肥替代化肥的改良措施(OCF、OCFSL、OCFCMP)均有提高土壤有机质、全氮和有效磷含量的趋势。总体来看，有机肥替代化肥比常规化肥施用、减量化肥施用更有利于土壤肥力的提高。

2.3 酸化土壤改良对作物产量的影响

改良措施对油菜产量影响显著(图 3A)。在化肥施加条件相同时，施加钙镁磷肥的处理油菜产量更高，在各处理中增产效果最好，单独化肥处理油菜产量最低。所有处理中，OCFCMP 处理油菜产量最高，为 $1\ 831.5\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。有机肥替代化肥处理下，油菜产量相较于常规化肥处理增产 $25.00\% \sim 55.08\%$ 。各改良处理下水稻产量差异不显著，均达到 $9\ 800\text{ kg}/\text{hm}^2$ ，其中有机肥替代化肥的 3 个处理水稻产量总体更高，均超过 $10\ 500\text{ kg}/\text{hm}^2$ (图 3B)。

3 讨论

尽管石灰、有机肥和钙镁磷肥等改良剂被证实可提升酸性土壤 pH^[21]，本研究中各处理对土壤 pH 均

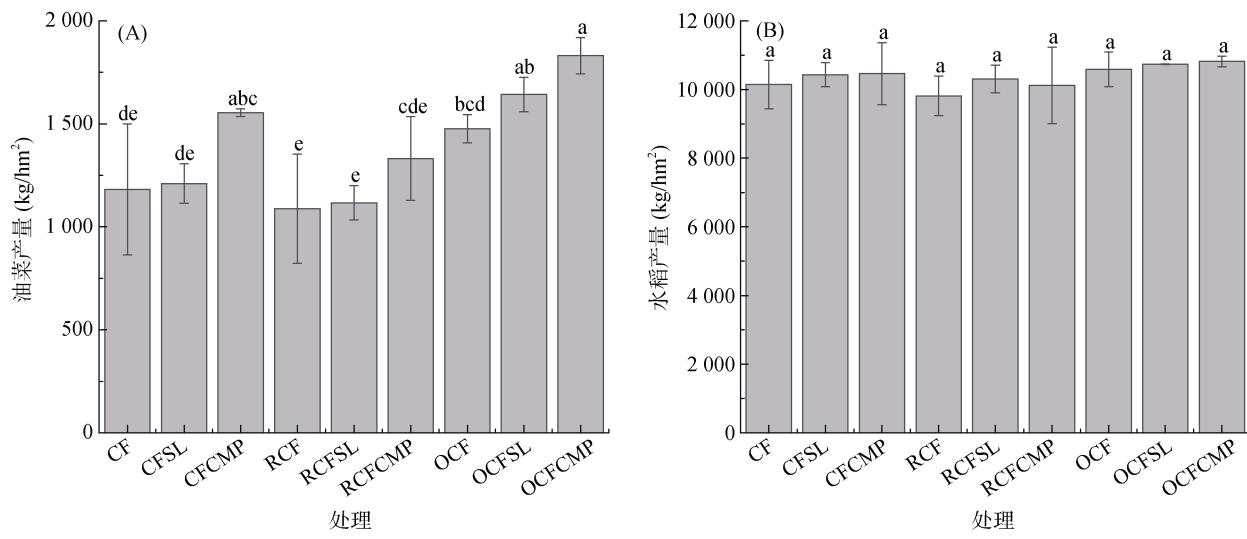
(图中小写字母不同表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平)

图 3 不同改良处理下油菜(A)与水稻(B)的产量

Fig. 3 Yields of rape (A) and rice (B) under different treatments

未有显著影响。这一结果可能与交换性 H^+ 未能被有效中和有关。值得注意的是, 本试验中, 季节性水分管理可能是关键影响因素: 油菜季土壤 pH 和 CEC 均呈现短暂上升, 而水稻季淹水环境则导致多数处理 pH 显著降低。这表明石灰和钙镁磷肥的抑酸效应在淹水条件下易被削弱, 其缓释特性不足以维持长期的酸度调控。除此以外, 有学者认为, 改良剂的性质、时间尺度、土壤缓冲能力等因素也会影响对 pH 的改良效果^[22]。本研究中, 所施加的改良剂碱度较低, 针对试验田的改良时间较短, 可能也是 pH 变化不大的原因。唯一提升 pH 并降低交换性酸的处理是化肥减量配施钙镁磷肥(RCFCMP), 表明该措施在紫色土区具有相对稳定的抑酸潜力。CEC 作为表征土壤保肥与缓冲能力的关键指标^[23], 前人研究发现^[24], 施用有机肥可有效改善土壤结构, 使土壤中形成有机–无机复合胶体, 增加土壤胶体表面阳离子吸附位点, 从而提高土壤阳离子交换量。本研究未观察到其显著变化, 与 Tazebew 等^[25]的研究中有机肥显著提升土壤 CEC 的结论存在差异。根本原因可能在于土壤酸化改良的阶段性特征限制了土壤电荷系统的根本性转变。不同种植时期 CEC 的动态变化趋势与 pH 相似(油菜季上升, 改良后的水稻季下降)支持了这一推测。

有机肥替代化肥增加了土壤不稳定性氮素, 是提高土壤氮肥力的策略, 被作为水稻种植中化肥和有机肥施用的有效措施。本研究中, 有机肥替代化肥(OCF) 处理显著提升土壤有机质和全氮含量, 其机制在于有机物料输入一方面经过微生物分解, 转化为腐殖质,

增加了碳氮库容; 另一方面, 又通过形成大量有机胶体和有机–无机复合胶体, 促进养分转化的效率, 提高养分含量^[15, 26–27], 这与丁馨茹等^[28]、Hou 等^[29]的研究一致。在土壤速效肥力上, 石灰施用呈现双重效应, 一方面, 所有配施石灰处理均导致速效钾含量显著下降, 这可能与 Ca^{2+} 和 K^+ 的拮抗作用减少了钾的可利用性有关^[30]; 另一方面, 石灰处理同步推动有效磷增长, 其机制可能是石灰与土壤中活性铝、铁反应产生沉淀, 减少了紫色土对磷元素的吸附与固定, 从而提高了土壤中有效磷含量。值得注意的是, 钙镁磷肥由于富含磷、钙、镁、硅等营养元素, 其磷素利用率高, 能有效补充植物所需的微量元素^[31]。本试验中, 钙镁磷肥处理表现出养分协同增益, 在维持速效钾稳定的同时, 有效磷显著提升, 说明其缓释特性可平衡钾磷供给, 避免石灰的负面效应。

降低土壤酸度、减轻铝毒作用和增加土壤肥力被认为是实现酸性土壤作物增产的有效改良途径。而本研究表明, 各改良处理对酸性紫色土水稻产量均无显著影响。作物产量与土壤碳、氮、磷元素密切相关, 三者协同互促, 共同维系作物的生长发育进程, 土壤有机碳、全氮、有效磷等相关指标对作物产量存在重要影响^[32–34]。而本试验中各改良处理土壤全氮、有效磷含量整体差异不显著, 这可能是导致处理间水稻产量差异不明显的原因之一。此外, 氮素流失可能引起植株缺氮, 进而抑制光合作用与养分吸收, 最终影响水稻产量^[35–36]。对于油菜产量而言, 有机肥替代化肥处理最高, 其次为常规化肥与改良剂配施处理。相关研究表明, 有机肥施用能直接补充土壤有机质及多种

养分, 有效增强作物对土壤养分的吸收利用, 从而促进油菜生长并实现增产^[37]。而适量的化肥可以作为土壤改良剂, 有效改善土壤理化性质的同时提升作物品质和产量^[38]。在相同化肥用量与用法下, 配施钙镁磷肥改良可显著提升油菜产量, 此结果与王雅洁等^[39]的研究一致。由于钙镁磷肥是枸溶性磷肥, 磷元素利用率高, 具体体现在其能缓慢溶解并释放磷元素, 与此同时提供钙、镁、硅等其他养分元素, 故钙镁磷肥对于土壤改良效果较好, 能有效提升作物产量。

4 结论

1) 减量 25% 化肥配施钙镁磷肥处理抑制了交换性酸的上升趋势, 且提高了土壤 pH。

2) 有机肥替代 25% 化肥及配施改良剂处理提升了土壤有机质、全氮和有效磷含量, 改良效果强于常规化肥施用与减量化肥施用及配施改良剂处理。

3) 有机肥替代 25% 化肥处理下作物平均产量较高, 油菜季中钙镁磷肥处理增产效果显著。

综上, 有机肥替代化肥以及配施钙镁磷肥对土壤酸化防治与产能提升有明显的效果。

参考文献:

- [1] Zhong S Q, Han Z, Du J, et al. Relationships between the lithology of purple rocks and the pedogenesis of purple soils in the Sichuan Basin, China[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 13272.
- [2] 陈晶晶, 郭心怡, 李忠意, 等. 钙质紫色泥岩对酸性紫色土的改良效果研究[J]. *土壤学报*, 2025, 62(3): 766–778.
- [3] 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.
- [4] 邓茜, 方红艳, 张元媛, 等. 四川盆地耕地土壤 pH 空间变异特征及影响因素[J]. *土壤*, 2022, 54(6): 1283–1290.
- [5] Wu Z F, Sun X M, Sun Y Q, et al. Soil acidification and factors controlling topsoil pH shift of cropland in Central China from 2008 to 2018[J]. *Geoderma*, 2022, 408: 115586.
- [6] Li Q Q, Li A W, Yu X L, et al. Soil acidification of the soil profile across Chengdu Plain of China from the 1980s to 2010s[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 698: 134320.
- [7] 张维理, Kolbe H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(2): 317–331.
- [8] Feeney C J, Bentley L, De Rosa D, et al. Benchmarking soil organic carbon (SOC) concentration provides more robust soil health assessment than the SOC/clay ratio at European scale[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 951: 175642.
- [9] 杨帆, 徐洋, 崔勇, 等. 近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1047–1056.
- [10] 刘雅璇, 于慧, 罗勇. 基于辅助变量的紫色土耕地土壤有机质空间预测[J]. *土壤*, 2024, 56(4): 857–865.
- [11] 张思文, 陈晓辉, 蔡远扬, 等. 酸性红壤添加石灰对甜玉米幼苗生长、养分累积和土壤理化性质的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(3): 41–52.
- [12] 邱全敏, 王伟, 吴雪华, 等. 施用不同 pH 改良剂对荔枝园酸性土壤性质及荔枝生长的影响[J]. *热带作物学报*, 2020, 41(2): 217–224.
- [13] Zhang Y J, Ye C, Su Y W, et al. Soil Acidification caused by excessive application of nitrogen fertilizer aggravates soil-borne diseases: Evidence from literature review and field trials[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 340: 108176.
- [14] Zou H Y, Li W F, Guo X, et al. Spatial heterogeneity of soil acidification driven by cropping patterns and soil types in red soil dryland of Southern China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2025, 170: 127783.
- [15] Wang Y J, Xu Y, Jiang L H, et al. Effect of mild organic substitution on soil quality and microbial community[J]. *Agronomy*, 2024, 14(5): 888.
- [16] 唐奇志, 汪帆, 时金泽, 等. 有机肥部分替代氮肥的盐碱土壤改良与水稻增产效应研究[J]. *土壤*, 2024, 56(1): 97–102.
- [17] 叶英聪, 孙波, 刘绍贵, 等. 中国水稻土酸化时空变化特征及其对氮素盈余的响应[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(2): 246–256.
- [18] 王婷, 高磊, 魏馨冉, 等. 不同类型有机物料添加对红壤坡耕地土壤质量和花生产量的影响[J]. *土壤学报*, 2025, 62(6): 1624–1634.
- [19] 鲍士旦. *土壤农化分析*[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 丁武汉, 曾科, 吴腾飞, 等. 镁硼锌配施石灰对华南双季稻产量、品质及酸化土壤改良的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2025, 33(6): 1146–1156.
- [21] He X L, Wu Y, Liu K L, et al. The combined application of inorganic and organic materials over two years improves soil pH, slightly increases soil organic carbon, and enhances crop yields in severely acidic red soil[J]. *Agronomy*, 2025, 15(2): 498.
- [22] Zhang S W, Zhu Q C, de Vries W, et al. Effects of soil amendments on soil acidity and crop yields in acidic soils: A world-wide meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118531.
- [23] Khaledian Y, Brevik E C, Pereira P, et al. Modeling soil cation exchange capacity in multiple countries[J]. *Catena*, 2017, 158: 194–200.
- [24] 罗玲, 潘宏兵, 钟奇, 等. 石灰和有机肥对芒果园酸性土壤的改良效果及对芒果品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(3): 169–177.
- [25] Tazebew E, Addisu S, Bekele E, et al. Sustainable soil health and agricultural productivity with biochar-based indigenous organic fertilizers in acidic soils: Insights from Northwestern Highlands of Ethiopia[J]. *Discover Sustainability*, 2024, 5(1): 205.

- [26] Tang B, Rocci K S, Lehmann A, et al. Nitrogen increases soil organic carbon accrual and alters its functionality[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(7): 1971–1983.
- [27] 王冰, 张宇辰, 王昕悦, 等. 持续低量有机肥与化肥配施对绿洲农田土壤肥力和多功能性的影响[J]. *土壤学报*, 2025, 62(4): 1059–1071.
- [28] 丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 等. 4 种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45(3): 1655–1664.
- [29] Hou Q, Ni Y M, Huang S, et al. Effects of substituting chemical fertilizers with manure on rice yield and soil labile nitrogen in paddy fields of China: A meta-analysis[J]. *Pedosphere*, 2023, 33(1): 172–184.
- [30] Han T F, Li D C, Liu K L, et al. Soil potassium regulation by initial K level and acidification degree when subjected to liming: A meta-analysis and long-term field experiment[J]. *Catena*, 2023, 232: 107408.
- [31] Qin P F, Hui H L, Song W L, et al. Characteristics of fused calcium magnesium phosphate fertilizer (FCMP) made from municipal sewage sludge and its properties[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(6): 108563.
- [32] 刘宁, 杨滨娟, 胡启良, 等. 稻田不同种植模式对作物产量和土壤碳、氮的影响[J]. *生态科学*, 2025, 44(1): 212–220.
- [33] Gao P, Zhang T, Cui X W, et al. Evolution of red soil fertility and response of rice yield under long-term fertilization[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(2): 2924–2933.
- [34] Wang Y, Tang G, Fu W T, et al. Rice yield and nitrogen use efficiency: Different responses to soil organic matter between early and late rice[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(3): 5120–5129.
- [35] 张立进, 巢思琴, 许彬, 等. 肥料综合优化对油菜-水稻复种田土壤养分及作物产量的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2025, 33(6): 1128–1137.
- [36] 耿锦沼, 李振轮, 张敏, 等. 酸性菜地土壤性质及生产力对施用碳酸钙和有机物的响应[J/OL]. *土壤学报*, 2025: 1–12. (2025–08–29). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=TRXB20250828003&dbname=CJFD&dbco.de=CJFQ>.
- [37] 唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 等. 基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应[J]. *环境科学*, 2024, 45(1): 429–438.
- [38] 陈永友, 樊海, 杨成, 等. 化肥减施对小麦生长、产量及土壤氮、磷污染控制效果的影响[J]. *西南农业学报*, 2025, 38(5): 1096–1104.
- [39] 王雅洁, 张兵兵, 袁盼, 等. 黄棕壤和酸紫砂土施用不同磷肥对油菜产量的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2022, 44(1): 147–157.