

薛雅, 张丛志, 马学伟, 赵占辉, 马志伟, 陈卓, 王娅茹, 张楠, 潘慧, 范贝贝, 牛小妮, 申卫收, 张佳宝. 有机物料与钙基材料配施对新垦红壤地力与作物生长协同提升效应[J]. 土壤学报, 2026,

XUE Ya, ZHANG Congzhi, MA Xuewei, ZHAO Zhanhui, MA Zhiwei, CHEN Zhuo, WANG Yaru, ZHANG Nan, PAN Hui, FAN Beibei, NIU Xiaoni, SHEN Weishou, ZHANG Jiabao. Synergistic Effects of Combined Application of Organic Materials and Calcium-Based Amendments on Soil Fertility and Crop Growth in Newly Reclaimed Red Soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

## 有机物料与钙基材料配施对新垦红壤地力与作物生长协同提升效应\*

薛雅<sup>1,2</sup>, 张丛志<sup>2</sup>, 马学伟<sup>3</sup>, 赵占辉<sup>4</sup>, 马志伟<sup>2</sup>, 陈卓<sup>2</sup>, 王娅茹<sup>2</sup>, 张楠<sup>2</sup>, 潘慧<sup>3</sup>, 范贝贝<sup>2</sup>, 牛小妮<sup>2</sup>, 申卫收<sup>1†</sup>, 张佳宝<sup>2†</sup>

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 211135; 3. 中向旭曜科技有限公司, 北京 100020; 4. 河南城建学院, 河南平顶山 467036)

**摘要:** 针对新垦红壤酸度高、有机质匮乏等障碍, 为探讨有机物料与钙基改良剂(石灰和钙盐)配施提升土壤地力及控酸的效果, 依托江西省吉安市新垦红壤田间定位试验(2023年至今), 借助物理分组、电子显微镜(电镜)等方法分析了单施化肥(CK)、CK+天然腐殖质材料(9 000 kg·hm<sup>-2</sup>)+生物激发剂(1 500 kg·hm<sup>-2</sup>)+有机肥(7 500 kg·hm<sup>-2</sup>)+1 500 kg·hm<sup>-2</sup>钙盐(T1)、CK+天然腐殖质材料(9 000 kg·hm<sup>-2</sup>)+生物激发剂(1 500 kg·hm<sup>-2</sup>)+有机肥(7 500 kg·hm<sup>-2</sup>)+3 000 kg·hm<sup>-2</sup>钙盐(T2)、CK+天然腐殖质材料(9 000 kg·hm<sup>-2</sup>)+生物激发剂(1 500 kg·hm<sup>-2</sup>)+有机肥(7 500 kg·hm<sup>-2</sup>)+1 500 kg·hm<sup>-2</sup>石灰(T3)、CK+天然腐殖质材料(9 000 kg·hm<sup>-2</sup>)+生物激发剂(1 500 kg·hm<sup>-2</sup>)+有机肥(7 500 kg·hm<sup>-2</sup>)+3 000 kg·hm<sup>-2</sup>石灰(T4)、CK+天然腐殖质材料(9 000 kg·hm<sup>-2</sup>)+生物激发剂(1 500 kg·hm<sup>-2</sup>)+有机肥(7 500 kg·hm<sup>-2</sup>)+7 500 kg·hm<sup>-2</sup>发酵渣(T5) 6个处理对红壤地力与作物生长的影响特征。结果表明: 石灰与钙盐添加处理显著调节土壤酸度(pH最高提升16.2%), 并高效提升土壤磷素有效性(有效磷增幅超6倍)。天然腐殖质添加可快速提升土壤碳库, 使总有机碳和颗粒有机碳增幅最高分别达84.0%与263.9%, 但单一施用发酵渣则加剧土壤酸化并导致碳稳定性下降。电镜与多变量分析结果表明, “天然腐殖质与低施用量石灰或钙盐配施”能协同构建多孔结构、提升微生物生物量碳与可溶性有机碳(最高分别为94.6%、122.7%), 并均衡促进油菜地上与地下生物量(增幅超7倍)。本研究揭示了有机物料与钙基材料配施对红壤酸化调控、碳稳定性方面的综合效应, 对快速提升新垦红壤综合地力具有显著作用, 为耕地质量提升提供了可靠的理论依据与技术参考。

**关键词:** 新垦红壤; 天然腐殖质; 有机质; 土壤有机碳组分; 土壤肥力

中图分类号: S156.6 文献标志码: A

### Synergistic Effects of Combined Application of Organic Materials and Calcium-Based Amendments on Soil Fertility and Crop Growth in Newly Reclaimed Red Soil

\*中国科学院战略性先导科技专项(XDA0440202)、井冈山农高区省级科技专项“揭榜挂帅”项目(20222-051261)和河南省科技攻关项目(252102110183)共同资助 Supported by the “Strategic Priority Research Program” of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA0440202), the Jinggang Shan Agricultural Hi-tech District Project of China (No. 20222-051261) and the Science and Technology Research Project of Henan Province, China (No. 252102110183)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: wsshshen@nuist.edu.cn; E-mail: jbzhang@issas.ac.cn

作者简介: 薛雅(2001—), 女, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 主要研究领域为土壤地力提升。E-mail:15155253663@qq.com

收稿日期: 2025-10-27; 收到修改稿日期: 2026-02-19; 网络首发日期(www.cnki.net):

XUE Ya<sup>1,2</sup>, ZHANG Congzhi<sup>2</sup>, MA Xuewei<sup>3</sup>, ZHAO Zhanhui<sup>4</sup>, MA Zhiwei<sup>2</sup>, CHEN Zhuo<sup>2</sup>, WANG Yaru<sup>2</sup>, ZHANG Nan<sup>2</sup>, PAN Hui<sup>3</sup>, FAN Beibei<sup>2</sup>, NIU Xiaoni<sup>2</sup>, SHEN Weishou<sup>1†</sup>, ZHANG Jiabao<sup>2†</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3. ZX Suntime Technology Co., Ltd, Beijing 100020, China; 4. Henan University of Urban Construction, Pingdingshan, Henan 467036, China)

**Abstract:** 【Objective】 Newly reclaimed red soils are generally characterized by high acidity and low organic matter content, which severely constrain soil fertility improvement and crop productivity. This study aimed to evaluate the effects of combined application of organic materials and calcium-based amendments (lime and calcium salts) on soil fertility enhancement and acidification control in newly reclaimed red soil. 【Method】 A field experiment was conducted in Ji'an, Jiangxi Province (since 2023) with six treatments: chemical fertilizer alone (CK); CK plus natural humic material (9 000 kg·hm<sup>-2</sup>), biostimulant (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>), organic fertilizer (7 500 kg·hm<sup>-2</sup>), and 1 500 kg·hm<sup>-2</sup> calcium salt (T1); CK plus the same organic materials combined with 3 000 kg·hm<sup>-2</sup> calcium salt (T2); CK plus the same organic materials combined with 1 500 kg·hm<sup>-2</sup> lime (T3); CK plus the same organic materials combined with 3 000 kg·hm<sup>-2</sup> lime (T4); and CK plus the same organic materials combined with 7 500 kg·hm<sup>-2</sup> fermented residue (T5). Soil physicochemical properties, carbon fractions, and crop growth were analyzed using physical fractionation, scanning electron microscopy, and multivariate statistical methods. 【Result】 The addition of lime and calcium salts significantly regulated soil acidity, with soil pH increasing by up to 16.2%, and markedly enhanced phosphorus availability, as available phosphorus increased by more than six fold. Application of natural humic materials rapidly increased soil carbon pools, with soil organic carbon and particulate organic carbon increasing by up to 84.0% and 263.9%, respectively. However, the sole application of fermented residue aggravated soil acidification and reduced carbon stability. Microscopic observations and multivariate analyses further demonstrated that the combined application of natural humic materials with low rates of lime or calcium salts synergistically improved soil pore structure, increased microbial biomass carbon and dissolved organic carbon (by up to 94.6% and 122.7%, respectively), and substantially promoted both aboveground and belowground biomass of rapeseed (increases exceeding 7-fold). 【Conclusion】 The combined application of organic materials and calcium-based amendments effectively regulates soil acidification, enhances carbon stability, and promotes coordinated improvement of soil fertility and crop growth in newly reclaimed red soil. This strategy provides a scientific basis and technical reference for the rapid improvement of soil quality in newly reclaimed farmland.

**Key words:** Newly reclaimed red soil; Natural humic material; Organic matter; Soil organic carbon fractions; Soil fertility

红壤是我国南方典型的地带性土壤类型, 广泛分布于长江以南的热湿地区, 涵盖华南、华中及西南等 16 个省(区), 总面积约 218 万 km<sup>2</sup>, 约占全国土地总面积的 23%。该区域雨热资源极为丰富, 农业生产潜力是三江平原的 2.6 倍、黄土高原的 2.7 倍、黄淮海平原的 1.3 倍, 在保障国家粮食安全中具有战略地位<sup>[1]</sup>。红壤地区以占全国 23% 的土地支撑着 40% 的人口, 随着耕地资源约束趋紧和粮食需求持续增长, 充分挖掘红壤区耕地生产潜力, 对缓解区域粮食供需不平衡、保障国家粮食安全具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。近年来, 在耕地占补平衡和后备耕地资源开发政策的推动下, 南方红壤区逐渐成为我国新增耕地的重要来源之一, 新垦红壤面积不断扩大。新垦红壤通常由林地、荒地或丘陵坡地经近期开发转化而来, 土壤发育程度低, 耕作层薄, 普遍存在结构松散、有机质与养分基础匮乏等问题。受不合理耕作、过度开发及土壤退化等因素影响, 新垦红壤易发生土壤板结和季节性干旱, 表现出改良难度大、效果稳定性差、耕作层培育周期长等特征, 严重制约其生产能力的发挥<sup>[3-4]</sup>。因此, 如何快速培育新垦红壤优质耕作层, 提升地力水平及其可持续性, 已成为农业与环境领域的研究热点<sup>[5-6]</sup>。有机物料还田是改善土壤结构、提升土壤有机质和养分含量的重要措施之一<sup>[7-8]</sup>。大量研究表明, 外源有机物的输入能够显著提高土壤团聚体稳定性和微生物活性, 增强养分有效性, 并改善作物生长状况<sup>[9]</sup>。然而, 不同类型有机物料的效应存在差异, 其单独施用在缓解新垦红壤酸化和提升地力稳定性方面的效果仍具有一定局限性。因此, 系统研究不同有机物料与改良剂配施对新垦红壤耕地肥力性状及作物生长的影响, 对红壤区耕地质量提升与农业可持续发展具有重要意义

本研究以天然腐殖质、有机肥等外源有机材料配施石灰和钙盐无机材料，系统分析不同处理对土壤 pH、氮磷钾养分、有机碳组分及油菜生物量的影响，旨在阐明有机材料与钙基材料配施对新垦红壤地力提升及作物生长的综合效应，以期为红壤障碍消减与地力提升提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

田间定位试验位于江西省吉安市中国科学院南京土壤研究所井冈山试验基地 (27.1064°N, 114.9707°E)，该地区气候属中亚热带湿润季风气候，雨热同季。多年平均气温约为 19.3 °C，年降水量约 1 409 mm，降水主要集中在 5—9 月。试验地为新近开发的红壤耕地。受耕地资源紧张和占补平衡需求的影响，该类土地被逐步开发利用。由于开垦时间短、土壤发育程度低，新垦红壤普遍存在耕作层浅薄、有机质和养分基础匮乏以及酸化程度较高等问题。土壤类型为红壤，在中国土壤系统分类中属铁铝土，试验开始前，土壤 (0~20 cm) 基础理化性质为：pH 5.09，土壤有机质 3.81 g·kg<sup>-1</sup>，全氮 (TN) 0.29 g·kg<sup>-1</sup>，全磷 (TP) 0.10 g·kg<sup>-1</sup>，全钾 (TK) 11.71 g·kg<sup>-1</sup>，碱解氮 (AN) 18.20 mg·kg<sup>-1</sup>，有效磷 (AP) 0.26 mg·kg<sup>-1</sup>，速效钾 (AK) 35.80 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 供试材料

天然腐殖质材料购自中向旭曜有限公司，由天然木本泥炭经物理剪切与化学活化处理制备而成。其有机质含量为 909.8 g·kg<sup>-1</sup>，腐殖酸含量为 453.5 g·kg<sup>-1</sup>，pH 为 5.41，全氮、全磷和全钾含量分别为 6.85、0.07 和 0.15 g·kg<sup>-1</sup>。生物激发剂为以天然木本泥炭为原料，经物理剪切与化学断链工艺制得的小分子腐殖酸类制剂，其有机质、腐殖酸、全氮、全磷和全钾含量分别为 287.0 g·kg<sup>-1</sup>、151.0 g·kg<sup>-1</sup>、4.6 g·kg<sup>-1</sup>、1.2 g·kg<sup>-1</sup>、8.8 g·kg<sup>-1</sup>。腐熟有机肥的有机质含量为 204.0 g·kg<sup>-1</sup>，全氮 3.47 g·kg<sup>-1</sup>，全磷 8.62 g·kg<sup>-1</sup>，全钾 14.54 g·kg<sup>-1</sup>。生物激发剂和腐熟有机肥从南京三美农业发展有限公司购得。石灰为农用钙质碱性改良材料，由商业渠道采购 (蓝鲸环保企业)，属于氧化钙型石灰，其氧化钙 (CaO) 含量大于 900 g·kg<sup>-1</sup>，酸中和容量为 32.32 mol·kg<sup>-1</sup>，呈碱性粉末状。钙盐改良剂由凯赛公司提供，为固体碱性复合钙盐材料，主要成分包括氢氧化钙 (100 g·kg<sup>-1</sup>)、碳酸钙 (200 g·kg<sup>-1</sup>)、硫酸钙 (500 g·kg<sup>-1</sup>) 及水分 (200 g·kg<sup>-1</sup>)，材料 pH 为 12.15，呈粉末状。

### 1.3 试验设计

试验布设于 2023 年 3 月，设置单施化肥对照处理 (CK)、化肥 + 天然腐殖质材料 (9 000 kg·hm<sup>-2</sup>) + 生物激发剂 (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 有机肥 (7 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 钙盐 1 500 kg·hm<sup>-2</sup> (T1)、化肥 + 天然腐殖质材料 (9 000 kg·hm<sup>-2</sup>) + 生物激发剂 (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 有机肥 (7 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 钙盐 3 000 kg·hm<sup>-2</sup> (T2)；化肥 + 天然腐殖质材料 (9 000 kg·hm<sup>-2</sup>) + 生物激发剂 (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 有机肥 (7 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 石灰 1 500 kg·hm<sup>-2</sup> (T3)；化肥 + 天然腐殖质材料 (9 000 kg·hm<sup>-2</sup>) + 生物激发剂 (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 有机肥 (7 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 石灰 3 000 kg·hm<sup>-2</sup> (T4)；化肥 + 发酵渣 7 500 kg·hm<sup>-2</sup> (T5) 共 6 个处理，3 次重复，18 个小区，每个小区 9 m<sup>2</sup>，不同处理之间采用水泥隔板隔离。将上述物料与 0~20 cm 土壤均匀混合，进行灌溉和播种，试验区周边设置保护行。基肥采用 15-15-15 复合肥料，于播种前施入氮、磷和钾养分，施用量分别为 N 90 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg·hm<sup>-2</sup> 和 K<sub>2</sub>O 90 kg·hm<sup>-2</sup>。油菜生长中后期统一追施氮肥，施用量为 150 kg·hm<sup>-2</sup>。在第一季播种前将外源有机与钙基材料一次性全部施入土壤，后续不再重复施用相关材料。试验采用冬季油菜、夏季大豆的模式轮作。

### 1.4 样品采集与指标测定

于种植第 3 季 (2024 年 3 月) 油菜成熟期测产并采集土样，采用土钻法在各处理小区按“S”形随机选取 3 个点进行 0~20 cm 土层取样，剔除植物根系与砾石后，在通风阴凉处自然风干备用。

测定 pH、全氮 (TN)、全磷 (TP)、全钾 (TK)、有机质、碱解氮 (AN)、有效磷 (AP)、速效钾 (AK) 等土壤理化性质<sup>[12]</sup>。土壤微生物生物量碳 (MBC) 采用氯仿熏蒸法测定<sup>[12]</sup>。水溶性有机碳 (DOC) 采用滤膜过滤测定，具体步骤为：称取 3 g 风干土于 50 mL 离心管中，加入超纯水 15 mL，以 250 r·min<sup>-1</sup> 振荡 1 h 后，在离心机上以 4 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 20 min，取上清液使用注射器过 0.45 μm 有机相滤膜，然后使用总有机碳分析仪 (TOC-VCPH, Shimadzu, 日本) 测定 DOC 含量<sup>[13]</sup>。颗粒有机碳 (POC) 和矿物结合态碳 (MAOC) 采用物理分组+重铬酸钾氧化法测定，具体步骤为：准确

称取 10.0 g 过 2 mm 筛的风干土样, 转移至 250 mL 离心瓶中, 加入六偏磷酸钠分散液。将悬浊液置于水平振荡器中连续振荡 18 h 以实现充分分散, 随后将悬液过 0.053 mm 标准筛, 采用去离子水反复冲洗筛面 3~4 次, 去除可溶盐及分散剂。筛上截留物转移至预先称重的玻璃烧杯, 置于 50 °C 鼓风干燥箱中烘干 24 h 至恒重, 记为颗粒土壤质量, 然后将颗粒土壤用研钵研磨过 0.25 mm 筛后备用。筛下悬液在相同温度条件下鼓风、干燥后, 测定细颗粒组分质量。采用重铬酸钾外加热法 (Walkley-Black 法) 测定有机碳含量<sup>[14]</sup>。称取 0.1 g 左右备用的土壤样品, 用重铬酸钾-硫酸溶液在外部油浴加热的条件下, 氧化土壤样品中的有机碳。冷却后, 用硫酸亚铁标准溶液滴定剩余的重铬酸钾, 计算 POC 和 MAOC 含量。同时测定油菜作物地上和地下部分干物质生物量<sup>[12]</sup>。扫描电镜 (SEM) 观察: 取少量样品固定于导电胶表面, 经溅射镀膜仪 (Quorum SC7620, 英国) 处理, 在 10 mA 电流条件下喷金 45 s。随后采用扫描电子显微镜 (ZEISS Sigma 300, 德国) 进行形貌观测与图像采集。观测过程中加速电压设定为 3 kV, 使用 SE2 二次电子探测器获取表面形貌信息。

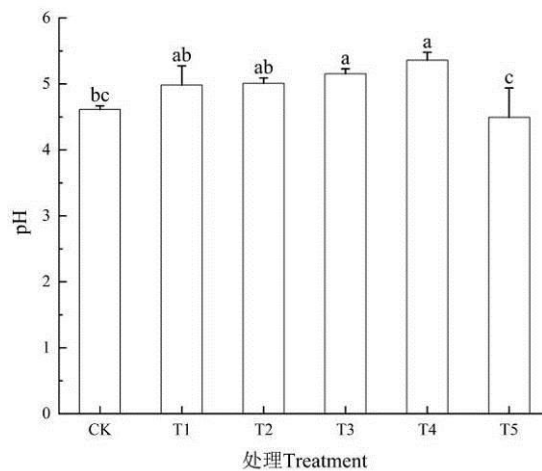
### 1.5 数据统计分析

试验数据采用 Excel 2021 进行整理, 采用 SPSS 27 对试验数据进行统计分析, 处理间差异通过单因素方差分析 (ANOVA) 进行检验, 并采用邓肯 (Duncan) 多重比较法进行显著性分析, 显著性水平设定为  $P < 0.05$ 。使用 Origin 2025、MetaboAnalyst、ChiPlot 进行绘图。

## 2 结果

### 2.1 不同处理对耕层土壤 pH 的影响

与 CK 处理相比, 施用不同比例的有机物料和石灰、钙盐后, T5 处理呈现加剧土壤酸化的趋势, T3 和 T4 处理显著提升了土壤 pH ( $P < 0.05$ ), 分别提升 11.7%、16.2%, 而添加钙盐处理 (T1、T2) 对土壤 pH 未产生显著影响 (图 1)。



注: 不同小写字母表示同一生长时期不同施肥处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。CK, 单施化肥; T1, CK+天然腐殖质材料 (9 000 kg·hm<sup>-2</sup>) + 生物激发剂 (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 有机肥 (7 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 1 500 kg·hm<sup>-2</sup> 钙盐; T2, CK+天然腐殖质材料 (9 000 kg·hm<sup>-2</sup>) + 生物激发剂 (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 有机肥 (7 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 3 000 kg·hm<sup>-2</sup> 钙盐; T3, CK+天然腐殖质材料 (9 000 kg·hm<sup>-2</sup>) + 生物激发剂 (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 有机肥 (7 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 1 500 kg·hm<sup>-2</sup> 石灰; T4, CK+天然腐殖质材料 (9 000 kg·hm<sup>-2</sup>) + 生物激发剂 (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 有机肥 (7 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 3 000 kg·hm<sup>-2</sup> 石灰; T5, CK+天然腐殖质材料 (9 000 kg·hm<sup>-2</sup>) + 生物激发剂 (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 有机肥 (7 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + 7 500 kg·hm<sup>-2</sup> 发酵渣。下同。Note: Different lowercase letters indicate significant differences among fertilization treatments within the same growth stage ( $P < 0.05$ ). CK, chemical fertilizer alone; T1, CK + natural humic material (9 000 kg·hm<sup>-2</sup>) + biostimulant (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + organic fertilizer (7 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + calcium salt (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>); T2, CK + natural humic material (9 000 kg·hm<sup>-2</sup>) + biostimulant (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + organic fertilizer (7 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + calcium salt (3 000 kg·hm<sup>-2</sup>); T3, CK + natural humic material (9 000 kg·hm<sup>-2</sup>) + biostimulant (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + organic fertilizer (7 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + lime (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>); T4, CK + natural humic material (9 000 kg·hm<sup>-2</sup>) + biostimulant (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + organic fertilizer (7 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + lime (3 000 kg·hm<sup>-2</sup>); T5, CK + natural humic material (9 000 kg·hm<sup>-2</sup>) + biostimulant (1 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + organic fertilizer (7 500 kg·hm<sup>-2</sup>) + fermented residue (7 500 kg·hm<sup>-2</sup>). The same below.

图 1 不同处理对土壤 pH 的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on soil pH

## 2.2 不同处理对土壤养分的影响

如图 2 所示, 不同物料配施处理对土壤氮、钾素含量的影响不显著。与 CK 处理相比, T1~T5 处理对土壤全氮 (TN)、全钾 (TK) 和速效钾 (AK) 含量均未产生显著影响 ( $P>0.05$ ), 但均显著降低了土壤碱解氮 (AN) 含量 ( $P<0.05$ ), 降幅分别为 61.4%、56.2%、67.2%、53.7% 和 55.9%, 其中 T3 处理的 AN 含量最低 (图 2b)。与氮素、钾素含量相比, 不同物料配施处理对土壤磷素含量产生显著影响 ( $P<0.05$ )。与 CK 相比, 其余处理均不同程度提高了土壤全磷 (TP) 和有效磷 (AP) 含量。其中, T1 和 T4 处理对 TP 的提升幅度较大, 分别为 76.6% 和 94.2%; 对 AP 的提升幅度分别为 668.2% 和 528.7%。T3 处理对 TP 含量影响不显著, 但显著提高了 AP 含量 (增幅为 469.3%)。T2 和 T5 处理对土壤磷素的影响相对较小, 仅显著提高了 AP 含量 (增幅分别为 231.6% 和 276.1%) (图 2d)。

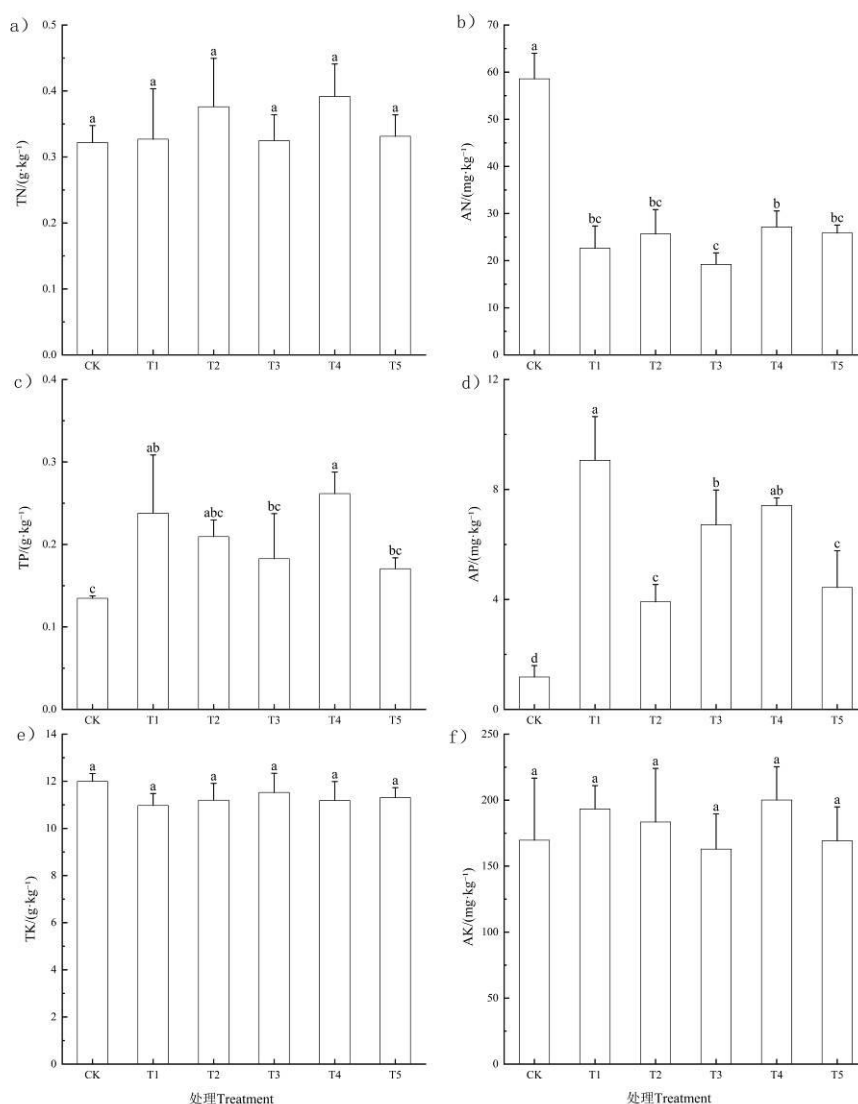
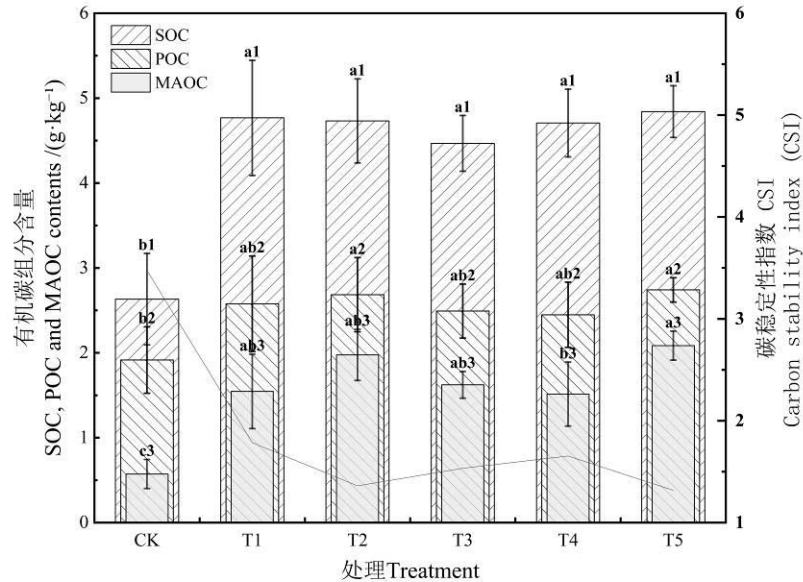


图 2 不同处理对土壤全氮 (TN, a)、碱解氮 (AN, b)、全磷 (TP, c)、有效磷 (AP, d)、全钾 (TK, e)、速效钾 (AK, f) 含量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on soil total nitrogen (TN, a), alkaline-hydrolyzable nitrogen (AN, b), total phosphorus (TP, c), available phosphorus (AP, d), total potassium (TK, e), and available potassium (AK, f) contents

### 2.3 不同处理对土壤矿物结合态有机碳、颗粒有机碳和有机碳含量的影响

如图 3 所示, 与 CK 相比, 所有物料配施处理 (T1~T5) 均提升了 SOC、MAOC 和 POC 含量, T1~T5 处理的 SOC 含量依次提升了 81.2%、79.8%、69.8%、78.9%、84.0%, 均达到显著水平 ( $P<0.05$ ), 但 T1~T5 处理组间无显著性差异。T2 和 T5 处理的 POC 含量最高, T1、T3、T4 处理次之, CK 处理 POC 含量最低 ( $P<0.05$ )。但对于 MAOC 含量, T5 最高, 其次为 T1、T2、T3 处理, T4 处理相对较低, CK 处理最低。



注: 小写字母后加 1、2、3 分别表示 SOC、POC 和 MAOC 在不同处理间的显著性比较。Note: The numbers 1, 2, and 3 following the lowercase letters represent the significance comparisons among treatments for SOC, POC, and MAOC, respectively.

图 3 不同处理对土壤矿物结合有机碳 (MAOC)、颗粒有机碳 (POC) 和有机碳 (SOC) 含量和碳库稳定性指数 (CSI) 的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on soil mineral-associated organic carbon (MAOC), particulate organic carbon (POC), organic carbon (SOC) contents, and carbon stability index (CSI)

### 2.4 不同处理对土壤微生物生物量碳和可溶性有机碳含量的影响

如图 4 所示, 与 CK 相比, T1、T2、T3 同时提升了 MBC (增幅分别为 94.6%、57.5%、85.6%) 和 DOC 含量 (增幅分别为 81.7%、122.7%和 107.4%) ( $P<0.05$ ), 而 T4 和 T5 处理对土壤 MBC 和 DOC 含量未产生显著影响 (图 4)。

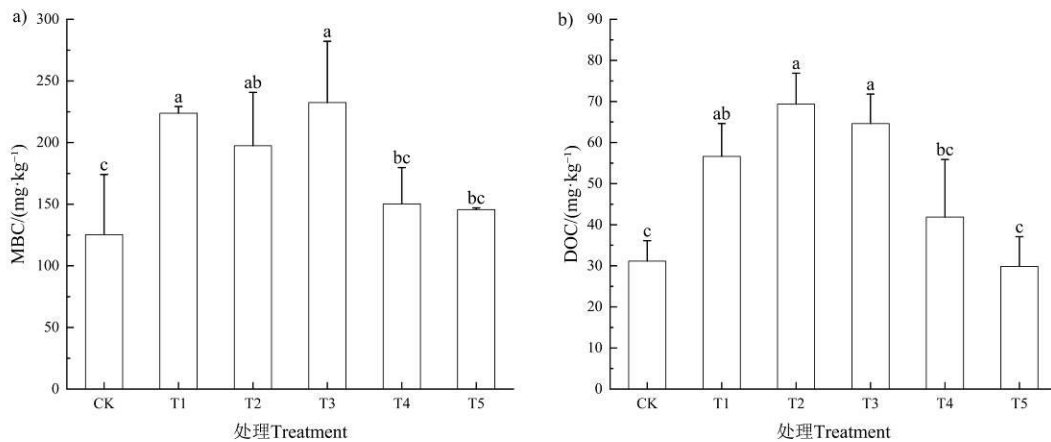


图 4 不同处理对土壤微生物生物量碳 (MBC) 和可溶性有机碳 (DOC) 含量的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on microbial biomass carbon (MBC) and dissolved organic carbon (DOC) content in soil

## 2.5 不同处理对油菜生物量的影响

不同物料配施处理对作物地上与地下生物量均产生了显著影响 ( $P<0.05$ ) (图 5)。与 CK 相比, 不同物料配施处理 (T1~T5) 的地上生物量最高为  $6\ 400\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 增幅为  $725.5\%\sim 776.0\%$ , 但 T1~T5 处理间无显著性差异。在地下生物量方面, 与地上生物量类似, 不同物料配施处理 (T1~T5) 较 CK 增幅为  $529.4\%\sim 819.1\%$ , 其中 T5 处理的地下生物量最高, 为  $1\ 123\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , T2 处理次之, T1、T3、T4 相对较低 ( $P<0.05$ ) (图 5)。整体上, 添加外源有机与钙基材料后油菜地上、地下生物量呈现大幅增加, 显著促进了油菜作物生长。

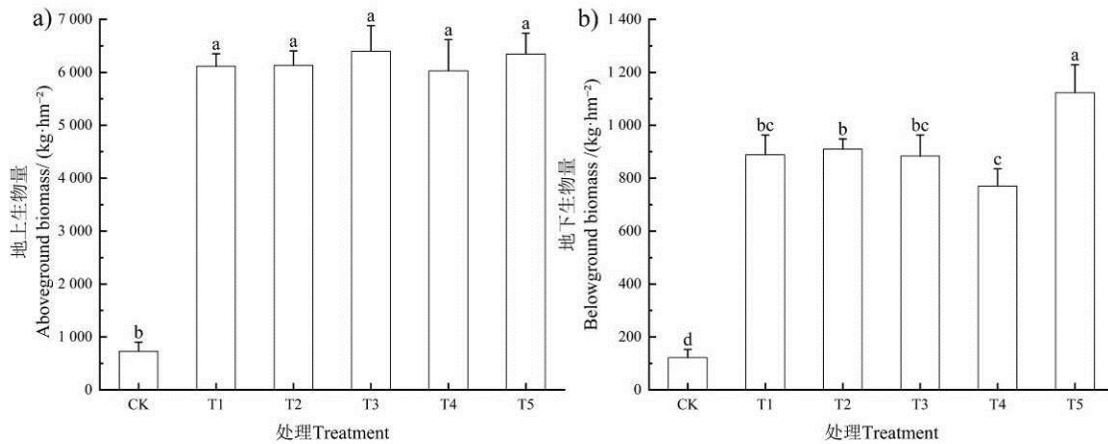


图 5 不同处理对油菜生物量的影响

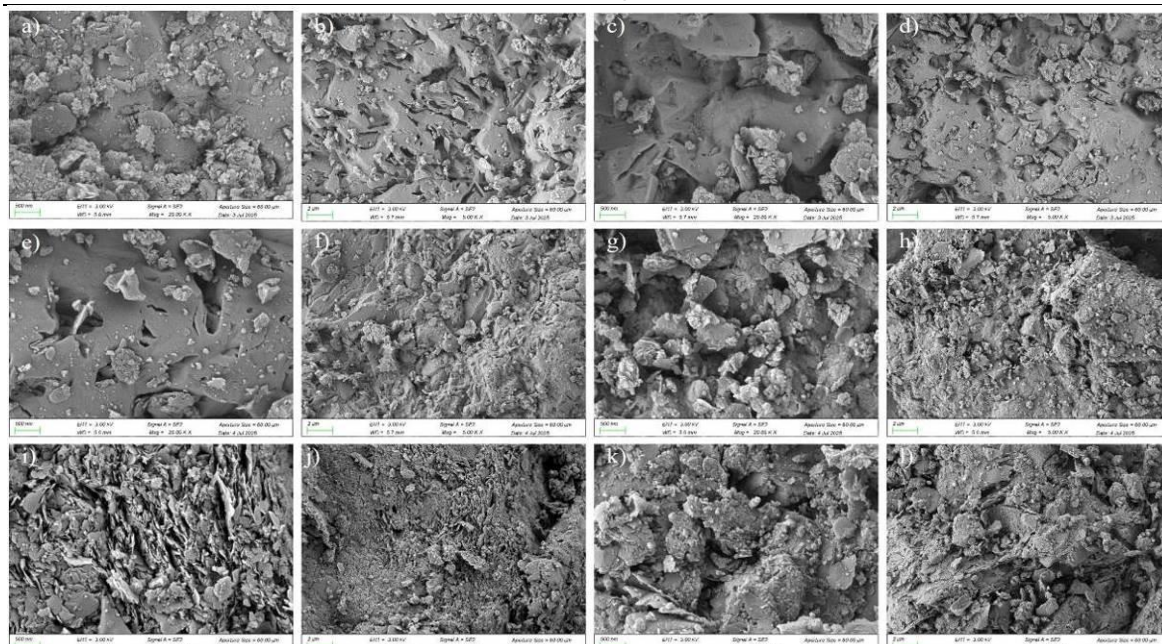
Fig. 5 Effects of different treatments on rapeseed biomass

## 2.6 不同处理对 POC、MAOC 结构形貌的影响

如图 6 所示, CK 处理组呈现出明显的片状或块状结构, 边缘清晰, 整体孔隙较少。T1 低量钙盐处理组中可见边缘模糊的有机组分, 表面覆盖有无定形物质, 呈现絮状或胶凝态表现形态; T2 高量钙盐处理组形成多孔蜂窝状结构, 孔径范围约  $10\sim 50\ \mu\text{m}$ , 部分区域呈现有机包裹态特征。T3 与 T4 石灰处理组中可见针状或短柱状析出物, 低量组中分布较为均匀, 高量组中出现局部致密层, 孔隙减少, 原有疏松多孔结构被压缩呈层状。T5 处理组结构中可见类菌丝状痕迹和部分未完全降解的植源性残屑。

图 7 结果显示, CK 处理组中矿物颗粒表面平整、边缘清晰, 未见明显覆盖层, 孔隙发育较弱, 局部可见微晶簇。T1 低量钙盐处理组中颗粒表面出现不连续絮状物质; T2 高量钙盐处理组中该类絮状覆盖层进一步增厚并连续成片, 表面呈现均匀蜂窝状孔隙, 孔径增大。T3 低量石灰处理组中矿物表面分布有细针状结晶, 晶间填充薄层物质, 仍保留一定孔隙; T4 高量石灰处理组中表层更为密实、平滑, 孔隙大幅减少。T5 发酵渣处理组中材料呈海绵状多孔构造, 孔壁质地粗糙。

综上所述, SEM 图像显示的结构特征表明, 高量石灰处理可能导致土壤孔隙结构致密化和钙化层形成, 而高量钙盐与发酵渣处理则倾向于形成发达的多孔结构。在同用量条件下, 钙盐处理表现出更优的孔隙形态, 而石灰处理随用量增加, 结构趋于密实。



注：图中字母标识对应各处理及放大倍数如下：a、b 为 CK 处理，c、d 为 T1 处理，e、f 为 T2 处理，g、h 为 T3 处理，i、j 为 T4 处理，k、l 为 T5 处理；同一处理组内，字母在前者（a、c、e、g、i、k）为 20 000 倍视野，字母在后者（b、d、f、h、j、l）为 5 000 倍视野，用以对比微结构细节与整体形貌特征。下同。Note: The letter labels in the figure correspond to the treatments and magnifications as follows: a, b represent the CK treatment; c, d represent T1; e, f represent T2; g, h represent T3; i, j represent T4; and k, l represent T5. Within each treatment group, the former letters (a, c, e, g, i, k) indicate images taken at 20 000× magnification, whereas the latter letters (b, d, f, h, j, l) indicate images taken at 5 000× magnification, allowing comparison of microstructural details and overall morphological features. The same below.

图 6 不同处理下的 POC 组分扫描电镜 (SEM) 图对比

Fig. 6 Comparative analysis of scanning electron microscopy(SEM) images of POC fractions under different treatments

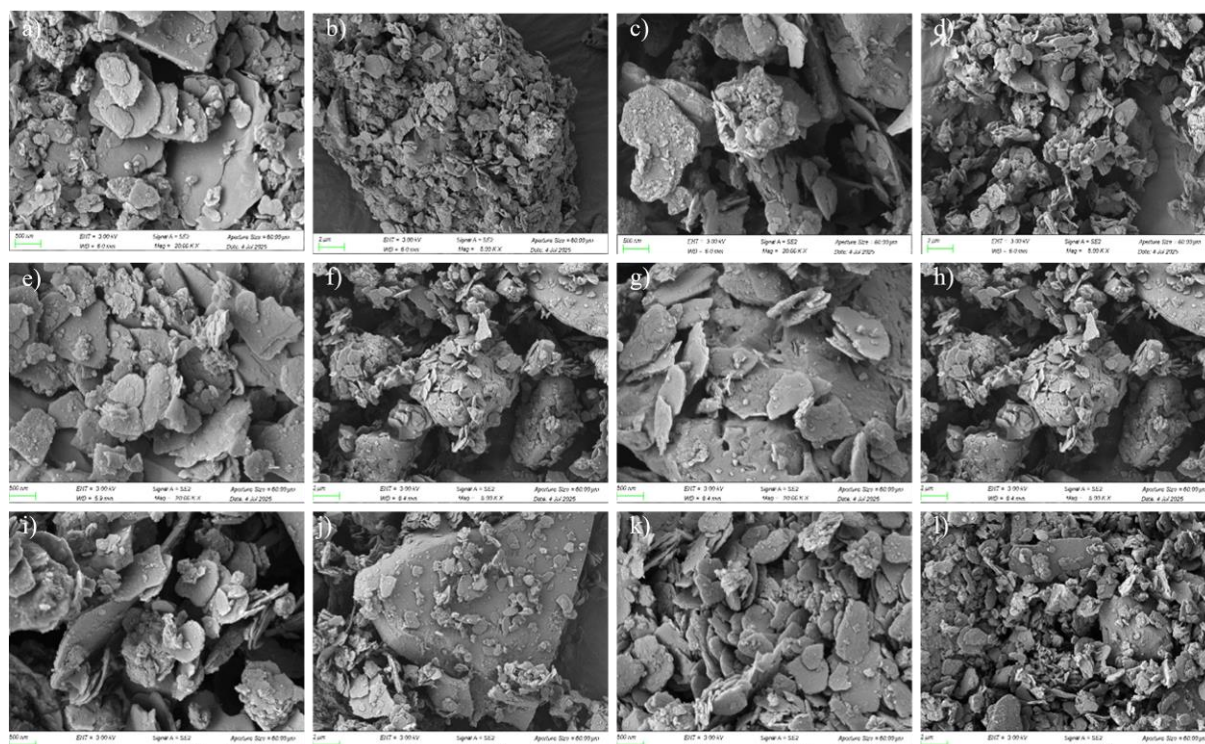


图 7 不同处理下的 MAOC 组分的电镜扫描图对比

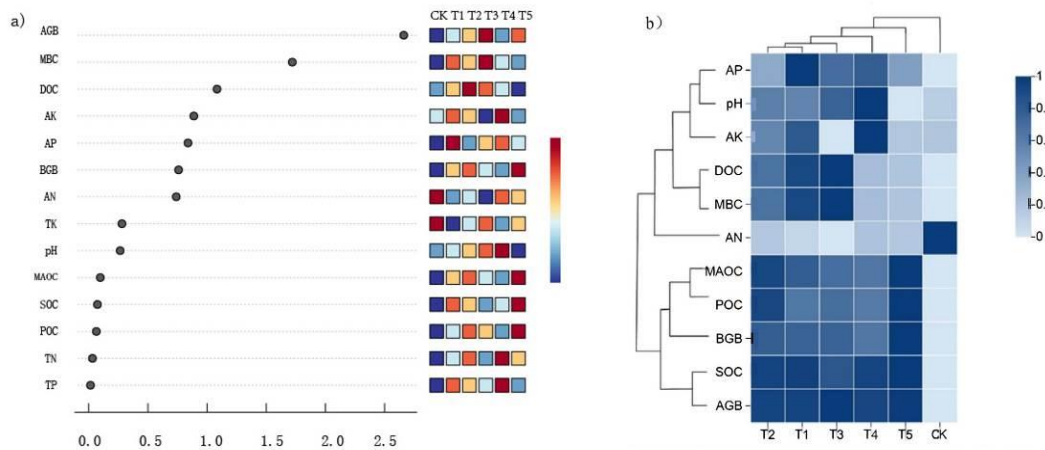
Fig. 7 Comparative analysis of scanning electron microscopy (SEM) images of MAOC fractions under different treatments

## 2.7 不同处理下红壤肥力关键因子识别及其多指标响应模式

由图 8a 变量重要性投影 (VIP) 分析可知, 地上生物量 (AGB)、微生物生物量碳 (MBC)、可溶性有机碳(DOC)是区分不同处理效果的最关键变量 (VIP > 1), 对于区分不同处理 (T1~T5) 之间差异的贡献最大, 是评价改良措施成效的核心依据。速效钾(AK)、有效磷(AP)、地下生物量 (BGB)、碱解氮(AN)的贡献次之。

基于 VIP 分析结果, 选取包括关键指标在内的 11 个肥力参数进行多指标聚类分析, 结果以聚类热图 (8b) 表示。所有改良处理 (T1~T5) 在绝大多数土壤肥力和作物生长指标上均表现为正向效应 (以暖色调表示)。变量维度上除 AN 单独一类外, “AGB 与 SOC” “POC 与 MAOC” “DOC 与 MBC”、“AP 与 pH” 分别聚为一类, BGB 又与 POC、MAOC 距离最近, 表明作物的地下生物量与 MAOC 和 POC 具有协同变化特征, 植物根系是土壤有机碳库形成与稳定的主要驱动者。AK 与 AP、pH 距离最近, 表明 AK 与 AP 及其土壤酸碱环境的变化具有高度协同性。

在处理维度上, T1 处理与 T2 处理聚为一类, 表明两者在多数指标上的变化轨迹相似, 且表现出均衡又优异的综合改良效果。其在 VIP 得分图中得到的 AGB、MBC 及 DOC 等关键指标上均呈现出广泛的暖色调, 表明钙盐处理在促生、保钾、活磷和增强微生物活性方面具有综合优势。T3 处理随后与 T1、T2 聚为一类, 未与同为石灰处理的 T4 优先聚类, 说明 T3 处理在多个指标的变化趋势上与低量钙盐和高量钙盐处理更为相似, 而与 T4 处理 (高量石灰) 在作用机制或响应强度上存在分异。相比之下, T5 处理 (发酵渣) 表现出明显的不均衡特征, 虽然在 MAOC、POC、BGB、SOC 和 AGB 等相关指标上表现突出, 但在其他土壤指标上表现一般, 在养分全面调控及微生物功能方面仍存在局限。综上所述, 尽管对 VIP 得分最高的 AGB、MBC 和 DOC 等指标而言, T3 处理的表现最优, 但聚类结果反映出其整体响应模式仍与 T1、T2 高度一致, 说明三者的改良路径较为接近。



注: 图 a 的横坐标表示变量重要性投影值 (VIP score), VIP > 1 表示重要变量。AGB, 地上生物量; BGB, 地下生物量。Note: Figure a, The horizontal axis represents the variable importance in projection (VIP) score, and VIP > 1 indicates important variables. AGB, above-ground biomass; BGB, below-ground biomass.

图 8 不同处理下变量投影重要性得分 (a) 和聚类分析图 (b)

Fig. 8 Variable importance in projection scores (a) and cluster analysis diagram (b) under different treatments

## 3 讨论

### 3.1 不同有机物料与钙基材料配施对土壤化学性质及养分有效性的影响

本试验分析了不同有机物料与改良剂配施对新垦红壤化学性质的影响, 在土壤酸度方面, 除 T5 处理因有机物料分解可能产生有机酸导致 pH 降低外, 石灰与钙盐处理均有效提升了土壤 pH, 其中, 石灰处理组效果最为显著 (图 1), 可能由于通过释放  $\text{Ca}^{2+}$  及其碱性水解产物, 中和了土壤中  $\text{H}^+$  和交换性  $\text{Al}^{3+}$ , 对缓解红壤酸化具有一定的阻控作用<sup>[15]</sup>。与已有针对长期耕作红壤的研究相比, 本

研究中新垦红壤对石灰和钙盐处理在土壤酸度调节和磷素有效性提升方面表现出更为显著的响应(图8)。这可能与新垦红壤耕作历史短、缓冲能力弱、初始有机质和养分基础低有关,使其对外源碱性物质和钙质输入更为敏感。因此,在新垦红壤开发利用初期,通过合理施用石灰或钙盐可在较短时间内实现土壤化学性质的快速改善。

在养分有效性方面,不同有机物料与钙基材料配施主要降低了 AN 并大幅提升了 TP 和 AP 含量(图2,图3),可能是由于石灰与钙盐富含钙质成分,这对激发磷素活化具有重要作用<sup>[15-16]</sup>。但本研究显示,钙盐与石灰材料对 TP 和 AP 的影响规律不同,随着钙盐用量增加,AP 的含量显著降低,可能由于高量钙盐引入的过量  $\text{Ca}^{2+}$  在土壤 pH 提升至一定范围后,与磷酸根离子 ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) 形成难溶性的磷酸钙盐(如羟基磷灰石),从而暂时降低了磷的有效性<sup>[16]</sup>。相比之下,随石灰用量增加,TP 和 AP 呈现同步增加趋势,存在这种差异的原因可能在于,石灰处理对土壤 pH 的调节更为缓和持久,不仅促进了土壤原生闭蓄态磷的释放,而且石灰水解产生的  $\text{Ca}^{2+}$  更易于与土壤有机质和无机胶体形成有机-矿物复合体,这些新形成的表面可能对磷素产生了吸附固持(表现为 TP 增加),同时又因其较高的 pH 环境抑制了磷素的再固定,共同维持了较高的 AP 水平<sup>[16]</sup>。此外,  $\text{Ca}^{2+}$  的离子交换作用及其伴生阴离子(如  $\text{SO}_4^{2-}$ ) 对吸附位点的竞争进一步减少了磷的固定,凸显了钙盐在磷素活化方面的独特优势<sup>[17]</sup>。此外,外源有机物料的添加也引发了显著的微生物响应,天然腐殖质材料等高 C/N 比物料的输入为微生物生长提供了碳源物质,刺激了微生物活性,同时促进作物生长,致使土壤生物和作物根系优先利用有效氮素,短期内 AN 含量显著下降<sup>[18]</sup>。对于钾素而言,各处理对 TK 和 AK 含量均无显著影响,表明红壤钾素供应在短期内可能主要受原生矿物风化控制,可见,外源有机物料与钙基材料添加对短期内调控土壤钾素效果有限<sup>[19]</sup>。

### 3.2 不同处理对新垦红壤有机碳组分及其微观结构的影响

土壤有机碳形态、微生物活性与作物生长响应共同构成评价改良措施效果的重要依据。就土壤有机碳组分而言,所有处理均提高了 SOC、POC 和 MAOC 含量,其中 T5 处理在 SOC 和 POC 提升方面表现最为突出,分别提升 84.0% 和 263.9% (图4),可见外源活性有机碳的输入能迅速扩充碳库,其新碳以易分解的颗粒态为主,周转速率快,稳定性较差<sup>[20]</sup>。对于新垦红壤而言,由于有机碳积累时间短、稳定性基础薄弱,其有机碳库更易受到外源物料类型和配施方式的影响。本研究中,不同处理在 POC、MAOC 及其稳定性上的显著差异(图3),反映了相较于成熟红壤耕地,新垦红壤在培肥初期更需要通过有机物料与钙基改良剂的配施来促进有机碳的稳定积累和结构优化。

外源有机物料配施钙盐和石灰材料,一方面增加了外源有机物输入,为有机碳积累提供了碳源物质;另一方面,钙盐或石灰材料为土壤有机-矿物复合体的形成提供了关键  $\text{Ca}^{2+}$ , 通过阳离子桥键 ( $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{RCOO}^-$ -矿物) 与电荷中和作用,促进有机质与黏粒矿物间的团聚,增强有机碳的化学保护与物理包被<sup>[21]</sup>。因此,有机物料与钙基材料配施在提升有机碳含量的同时增强了有机碳的稳定性(图4),这与  $\text{Ca}^{2+}$  促进有机-矿物复合体形成密切相关<sup>[21]</sup>。扫描电镜结果证实,POC、MAOC 的微观结构在不同处理下呈现显著差异:T2 处理(高量钙盐)形成多孔蜂窝状结构,有利于有机质与矿物颗粒的接触与团聚体形成;T4 处理(高量石灰)则出现局部致密层,孔隙减少,原有疏松多孔结构被压缩呈层状(图7),虽然可能增强物理保护,但会限制微生物活动和碳周转<sup>[22]</sup>。而 T5 处理(发酵渣)虽形成海绵状多孔构造,但结构中可见类菌丝状痕迹和部分未完全降解的植源性残屑(图6),这与其高 POC 含量和低碳稳定性相一致<sup>[23]</sup>。这些结构特征的差异直接影响有机碳的储存形式与稳定性<sup>[24]</sup>。

MBC 和 DOC 含量的变化(图4)进一步反映了不同处理下微生物活性的差异,T1 和 T3 处理显著提高了 MBC 含量(分别提升 94.6% 和 85.6%),表明这两种处理在有效调节土壤酸度的同时,营造了适宜的微生态环境,促进了微生物增殖<sup>[25]</sup>。T2 处理显著提升了 DOC 含量(提升 122.7%),可能与高量钙盐促进团聚体形成并加速内部有机质溶出有关。相比之下,T4 和 T5 处理对 MBC 和 DOC 的提升有限(图4),前者或因结构致密限制了微生物的可利用性,后者则与发酵渣分解产生的酸性环境抑制了微生物活性有关。最终,作物生物量的响应是上述土壤理化性质与生物学过程综合作用的集中体现,所有处理均显著提高了油菜地上与地下生物量 ( $P < 0.05$ , 图5),但其驱动机制不同。T3(低量石灰)处理的地上生物量最高,这与 pH 提升促进磷活化(AP 提升 469.3%) 直接相

关<sup>[26]</sup>；T5 处理（发酵渣）的地下生物量显著高于其他所有处理（图 5），与其输入的活性有机碳刺激根系发育有关<sup>[27]</sup>。钙盐处理（T1, T2）在二者间取得了较好平衡，表明其通过改善土壤结构、pH 环境和养分有效性，实现了作物生长的协同促进。

综上，不同处理通过影响土壤结构、碳组分分布和微生物活性，进而调控作物生长。发酵渣输入虽能快速提升碳库，但需注意其可能引起的酸化和碳稳定性降低问题；钙盐和石灰处理通过  $\text{Ca}^{2+}$  桥接和 pH 调节作用，在提高碳稳定性和养分有效性方面具有综合优势。本研究结果发现，各处理通过改变土壤有机碳组成与酸碱环境，驱动有机碳组分转化与微生物活动，最终调控作物生长。

### 3.3 有机与钙基外源物料配施对红壤综合地力提升及协同效应

基于变量重要性投影（VIP）与聚类分析，本研究进一步揭示了不同处理下影响红壤肥力的关键驱动因子及其内在联系。VIP 分析（图 8a）表明，地上生物量（AGB）、微生物生物量碳（MBC）和可溶性有机碳（DOC）是区分处理效果的核心指标（VIP > 1）。这表明，作物生产力、微生物活性与碳周转能力是评价改良措施成败的最敏感维度<sup>[28]</sup>。聚类热图（图 8b）显示，除碱解氮（AN）外，其余指标可聚合为若干功能群：“AGB 与 SOC”“POC 与 MAOC”“DOC 与 MBC”“AP 与 pH”分别聚为一类，而地下生物量（BGB）与 POC、MAOC 关系紧密。这种聚合关系揭示了红壤改良中的核心耦合机制：有机碳库的积累与稳定性（SOC、POC、MAOC）是微生物活性（MBC、DOC）的基础<sup>[29-30]</sup>，二者共同驱动了作物生长（AGB、BGB），而养分有效性（AP）则与土壤 pH 环境密切协同<sup>[31]</sup>。

就处理聚类模式而言，T1、T2 和 T3 处理聚为一类，表明低量和高量钙盐与低量石灰处理在多数指标上表现出协同且均衡的改良效果（图 8b）。其在关键指标（AGB、MBC、DOC、AP、pH）上的优异表现，说明其通过钙素驱动的团聚体形成、pH 调节与磷活化这一核心路径<sup>[32]</sup>，同步改善了土壤物理、化学和生物学性质。T4 处理（高量石灰）未能与之聚类，说明过量石灰虽强化了 pH 提升和磷固定减少效应，但由电镜结果（图 6，图 7）可知，其导致的土壤结构致密化会抑制微生物功能和碳周转<sup>[33]</sup>，体现了改良剂用量与效应间的非线性关系。T5 处理（发酵渣）单独成一类，表现不均衡，其在碳积累（SOC、POC）和根系促生（BGB）方面表现突出，但在 pH 调控、养分平衡（AN）及微生物功能（MBC）方面存在短板，表明单一有机物料输入在红壤快速培肥中存在局限性<sup>[34-35]</sup>。综上，就新垦红壤开发利用的角度而言，本研究结果表明，单一物料投入难以同步破解酸化、低碳和养分失衡等多重障碍。可采用钙盐（T1、T2）或低量石灰（T3）与有机物料配施的复合模式，既可通过钙素作用优化土壤结构、调酸活磷，又可通过有机物输入将补充碳源（提升 POC、MAOC）和促生（提升 AGB、BGB）相结合，实现红壤肥力各个维度的同步提升，避免了单一物料（如 T5）或高量石灰（T4）导致的效应不均衡或结构退化问题。

## 4 结论

本研究分析了有机物料与钙基材料配施对新垦红壤理化性质的影响，得出以下结论：（1）石灰与钙盐施用显著提高了新垦红壤 pH 和磷素有效性，并促进了土壤有机碳的积累与稳定性。天然腐殖质配合钙盐/石灰在改善土壤结构、提升有机碳组分（如 POC、MAOC）和增强微生物活性方面作用显著，单一发酵渣添加能显著提升 SOC 含量和作物生物量，但在控制土壤酸化、碳稳定性方面效果有限，其过程机理仍需进一步研究。（2）有机改良剂材料配施钙盐或低量石灰在阻控新垦红壤酸化、活磷、固碳与促生方面效果显著，且对土壤理化指标整体表现均衡，能有效提升土壤肥力（如 pH、有效磷、有机碳组分和微生物生物量碳），促进作物地上与地下生物量协同增长，优化土壤微结构、增强养分有效性与微生物功能，这对快速提升新垦红壤地力具有显著作用。未来可结合不同新垦红壤类型和利用年限，进一步优化有机物料与钙基材料的配施策略，以支撑新垦红壤的长期可持续利用。

### 参考文献（References）

- [1] Chen L J, Jiang Y J, Wang H T, et al. Effects of long-term application of organic materials on phosphorus fractions and availability in red soil[J]. *Soils*, 2020, 52(3): 451-457. [陈利军, 蒋瑀霁, 王浩田, 等. 长期施用有机物料对旱地红壤磷组分及磷素有效性的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(3): 451-457.]

- [2] Jiang M B, Zhang M K, Yan J L, et al. Soil fertility of red soil reclamation land in low hilly area: Evolution and maturity criteria[J]. *Journal of Agriculture*, 2021, 11(7): 32-36, 55. [姜铭北, 章明奎, 严建立, 等. 低丘红壤垦造耕地土壤肥力演变及其熟化标准探讨[J]. *农学学报*, 2021, 11(7): 32-36, 55.]
- [3] Jiang F H, Gao L, Wei B H, et al. Impact of fenlong tillage on soil physiochemical properties and sweet potato yield in dryland red soil[J]. *Soils*, 2020, 52(3): 588-596. [蒋发辉, 高磊, 韦本辉, 等. 粉垄耕作对红壤理化性质及红薯产量的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(3): 588-596.]
- [4] Sun B, Zhu A N, Yao R J, et al. Research progress on barrier remediation technology and productivity enhancement model for fluvo-aquic soil, red soil, and saline-alkali soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1231-1247. [孙波, 朱安宁, 姚荣江, 等. 潮土、红壤和盐碱地障碍消减技术与产能提升模式研究进展[J]. *土壤学报*, 2023, 60(5): 1231-1247.]
- [5] Liu Z, Cao S L, Sun Z H, et al. Tillage effects on soil properties and crop yield after land reclamation[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 4611.
- [6] Jin H F, Shi D M, Song G, et al. Cultivated-layer quality characteristics and obstacle types division of red soil sloping farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(12): 313-321, 340. [金慧芳, 史东梅, 宋鸽, 等. 红壤坡耕地耕层质量特征与障碍类型划分[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(12): 313-321, 340.]
- [7] Huang Z C, Yu Q G, Ye J, et al. Effects of long-term application of organic materials on soil nutrients in paddy fields[J]. *Soils*, 2023, 55(2): 272-279. [黄郑宸, 俞巧钢, 叶静, 等. 有机物料长期施用对稻田土壤养分的影响[J]. *土壤*, 2023, 55(2): 272-279.]
- [8] Gao J S, Huang J, Yang Z C, et al. Improving organic matter content and nitrogen supply stability of double cropping rice field through co-incorporation of green manure and rice straw[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(3): 472-480. [高菊生, 黄晶, 杨志长, 等. 绿肥和稻草联合还田提高土壤有机质含量并稳定氮素供应[J]. *植物营养与肥科学报*, 2020, 26(3): 472-480.]
- [9] Ma Z, Bi L D, Guo P, et al. Effect of exogenous additives on the stability of soil aggregates[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(6): 1585-1592. [马泽, 毕利东, 郭澎, 等. 外源添加剂对土壤团聚体稳定性的影响[J]. *土壤通报*, 2024, 55(6): 1585-1592.]
- [10] Duan J K, Ren C C, Wang S T, et al. Consolidation of agricultural land can contribute to agricultural sustainability in China[J]. *Nature Food*, 2021, 2(12): 1014-1022.
- [11] Tong W B, Jiang J F, Yang H J, et al. Research progress on improving the quality of newly reclaimed farmland in subtropic hilly region[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2023, 64(12): 3005-3011. [童文彬, 江建锋, 杨海峻, 等. 亚热带丘陵区新垦耕地质量提升研究进展[J]. *浙江农业科学*, 2023, 64(12): 3005-3011.]
- [12] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.]
- [13] Tao S, Lin B. Water soluble organic carbon and its measurement in soil and sediment[J]. *Water Research*, 2000, 34(5): 1751-1755.
- [14] Walkley A, Black I A. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method[J]. *Soil Science*, 1934, 37(1): 29-38.
- [15] Yang Y, Sun K, Liu J, et al. Changes in soil properties and CO<sub>2</sub> emissions after biochar addition: Role of pyrolysis temperature and aging[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 839: 156333.
- [16] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(11/12): 1485-1498.
- [17] Liu K L, Huang J, Zhang H M, et al. Effect of long-term fertilization on aggregation characteristics and distribution of potassium fractions in red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(2): 443-454. [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.]
- [18] Yan Y, Wu L, Wang X, et al. Organic manure-induced soil acidification: A complex process mitigated by coupling chemical amendments[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 295: 106917.
- [19] Han T F, Liu K L, Huang J, et al. Temporal and spatial characteristics of paddy soil potassium in China and its response to organic amendments: A systematic analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 235: 105894.
- [20] Cotrufo M F, Ranalli M G, Haddix M L, et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(12): 989-994.

- [21] Tao L, Ma D H, Zhang C Z, et al. Distribution characteristics of calcium forms and their relations with organic carbon content in calcareous soil aggregates[J]. *Soils*, 2021, 53(4): 715-722. [陶澹, 马东豪, 张丛志, 等. 石灰性土壤团聚体中钙形态特征及其与有机碳含量的关系[J]. *土壤*, 2021, 53(4): 715-722.]
- [22] Zhang W J, Li S Y, Xu Y D, et al. Advances in research on relationships between soil pore structure and soil microenvironment and organic carbon turnover[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4): 1-9. [张维俊, 李双异, 徐英德, 等. 土壤孔隙结构与土壤微环境和有机碳周转关系的研究进展[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 1-9.]
- [23] Ding T Y, Guo Z C, Qian Y Q, et al. Effects of straw return methods on the soil organic carbon fractions and pore structure characteristics of Shajiang black soil(Vertisol)[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(16): 71-78. [丁天宇, 郭自春, 钱泳其, 等. 秸秆还田方式对砂姜黑土有机碳组分和孔隙结构的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(16): 71-78.]
- [24] Kleber M, Eusterhues K, Keiluweit M, et al. Chapter One - Mineral-organic associations: Formation, properties, and relevance in soil environments[M]//Sparks D L. *Advances in Agronomy: Vol. 130*. Academic Press, 2015: 1-140.
- [25] Mason A R G, Salomon M J, Lowe A J, et al. Microbial solutions to soil carbon sequestration[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 417: 137993.
- [26] Liu D L, Yin G C, Chen Z L, et al. Effect of calcium silicate-biological humus fertilizer composite on uptake of Cd by shallots from contaminated agricultural soil[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2927-2935. [刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 等. 硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(6): 2927-2935.]
- [27] Tang Q, Xia Y Q, Ti C P, et al. Partial organic fertilizer substitution promotes soil multifunctionality by increasing microbial community diversity and complexity[J]. *Pedosphere*, 2023, 33(3): 407-420.
- [28] Zhou J X, Zhang H, Yang J, et al. Effects of continuous application of soil amendments on fluvo-aquic soil fertility and active organic carbon components[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(16): 3307-3318. [周吉祥, 张贺, 杨静, 等. 连续施用土壤改良剂对沙质潮土肥力及活性有机碳组分的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(16): 3307-3318.]
- [29] Xin J J, Yan L, Cai H G. Response of soil organic carbon to straw return in farmland soil in China: A meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 359: 121051.
- [30] Zhang X F, Zheng S M, Xia Y H, et al. Responses of soil organic carbon fractions to land use types in hilly red soil regions, China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1466-1473. [章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 等. 红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征[J]. *环境科学*, 2020, 41(3): 1466-1473.]
- [31] Kaur M, Dheri G S, Walia S S, et al. Impact of 38-year integrated nutrient management on soil carbon sequestration and greenhouse gas emissions of a rice-wheat cropping system[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2025, 363: 110415.
- [32] Audette Y, Smith D S, Parsons C T, et al. Phosphorus binding to soil organic matter via ternary complexes with calcium[J]. *Chemosphere*, 2020, 260: 127624.
- [33] Yang G W, Ryo M, Roy J, et al. Multiple anthropogenic pressures eliminate the effects of soil microbial diversity on ecosystem functions in experimental microcosms[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 4260.
- [34] Zhang Z Y, Zhang Y, Wen J, et al. Effectiveness of organic materials on acidification control and organic matter enhancement of red soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2025, 56(4): 1162-1168. [张子怡, 张洋, 文炯, 等. 有机物料对红壤酸化阻控及有机质提升效果研究[J]. *土壤通报*, 2025, 56(4): 1162-1168.]
- [35] Lan X J, Liu Y R, Hou H Q, et al. Effect of long-term organic manure application combined with chemical fertilizers on soil microbial biomass and organic matter structure in red paddy[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5): 810-819. [蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 等. 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[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(5): 810-819.]

(责任编辑: 陈荣府)