

DOI: 10.11766/trxb202501080016

CSTR: 32215.14.trxb202501080016

王婷, 高磊, 魏馨冉, 刘亮, 王艳玲, 彭新华. 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.

WANG Ting, GAO Lei, WEI Xinran, LIU Liang, WANG Yanling, PENG Xinhua. Effects of Different Types of Organic Materials on Soil Quality and Peanut Yield in Red Soil Sloping Cropland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(6): 1624–1634.

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*

王婷^{1, 2}, 高磊^{2†}, 魏馨冉^{1, 2}, 刘亮¹, 王艳玲³, 彭新华⁴

(1. 南京林业大学水土保持学院, 南方现代林业协同创新中心, 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 南京 210037; 2. 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; 3. 南京信息工程大学生态与应用气象学院, 南京 210044; 4. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 为探讨植物源和动物源有机肥对红壤质量提升作用的差异, 依托江西鹰潭始于 2011 年的长期定位试验, 利用 CT 断层扫描、宏基因组测序和随机森林算法等技术手段, 分析了在施用化肥(NPK)的基础上, 等碳量投入植物源秸秆(NPKS)、生物质炭(NPKB)以及动物源猪粪(NPKM)等有机物料对红壤坡耕地土壤质量和产能的影响。结果表明, 配施 3 种有机物料对红壤质量的提升效果差异显著, 与 NPK 处理相比, 动物源有机肥(NPKM 处理)对红壤质量的提升效果优于植物源(NPKS 和 NPKB 处理); NPKM 显著改善了土壤孔隙结构, 使大孔隙度和连通性孔隙度分别提高了 53%和 60% ($P<0.05$), 而 NPKS 与 NPKB 处理无显著影响。NPKM 显著提高了土壤的化学性质, 与 NPK 处理相比, pH 提高了 0.9 个单位, 有机碳(SOC)和全氮(TN)分别提高了 89%和 63%; 植物源有机物料中, 仅 NPKB 显著提高了 SOC 含量 ($P<0.05$)。此外, NPKM 显著增加了土壤微生物的多样性, 香农指数由 1.8 提高至 2.0, 辛普森指数由 0.3 降低至 0.2; NPKB 仅显著提高了香农指数, 而 NPKS 显著降低了辛普森指数 ($P<0.05$)。配施不同有机物料改变了门水平优势菌群的群落结构分布, 减少了绿弯菌门(Chloroflexi)的相对丰度, 增加了变形菌门(Proteobacteria)的相对丰度, 其中 NPKM 处理的改变幅度最大。配施有机物料显著提高了花生产量, 其中配施猪粪的增产效果最显著, 达到了 104%。影响花生产量的主要因素为 TN、SOC、pH 和微生物丰度。相关研究结果为红壤坡耕地高效培肥提供了重要科学依据。

关键词: 红壤坡耕地; 有机培肥; 土壤质量; 微生物多样性; 产量提升

中图分类号: S156.6 文献标志码: A

Effects of Different Types of Organic Materials on Soil Quality and Peanut Yield in Red Soil Sloping Cropland

WANG Ting^{1, 2}, GAO Lei^{2†}, WEI Xinran^{1, 2}, LIU Liang¹, WANG Yanling³, PENG Xinhua⁴

* 中国科学院战略性先导科技专项(XDA0440202)和国家自然科学基金项目(42077012, 42477323)资助 Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No.XDA0440202) and the National Natural Science Foundation of China (Nos.42077012, 42477323)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lgao@issas.ac.cn

作者简介: 王婷(2000—), 女, 内蒙古阿拉善人, 硕士研究生, 主要从事土壤改良与产能提升研究。E-mail: wting@njfu.edu.cn

收稿日期: 2025-01-08; 收到修改稿日期: 2025-05-23; 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-06-24

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, College of Soil and Water Conservation, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3. College of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 4. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract: 【Objective】 Soil quality is a prerequisite for achieving sustainable crop production. However, due to its low pH and acid buffering capacity, the red soil is prone to losing its quality, thus, necessitating continuous research in quality management practices. Therefore, this study aimed to evaluate the quality enhancement potential of organic fertilizers of plant and animal sources when applied to red soil. 【Method】 Based on a long-term positioning experiment in Yingtan, Jiangxi Province that started in 2011, we analyzed the effects of equal carbon inputs of organic materials of plant sources such as straw (NPKS) and biomass charcoal (NPKB) on top of chemical fertilizers (NPK) and hog manure of animal sources (NPKM) on soil quality and productivity of red soil sloping cropland. The objective of this study was investigated by subjecting our samples and/or data to CT tomography, metagenome sequencing, and random forests. 【Result】 The results showed that the dosing of the three organic materials had significant differences in enhancing the quality of red soil, and the organic fertilizer of animal origin (NPKM) was better than that of plant origin (NPKS and NPKB) compared with the NPK treatment. Also, the NPKM significantly improved the soil pore structure, which led to an increase of 53% and 60% in macro-porosity and connected porosity, respectively ($P < 0.05$), whereas the NPKS and NPKB treatments had no significant effect. Moreover, NPKM significantly improved soil chemical properties including pH, soil organic carbon (SOC), and total nitrogen by 0.9 pH units, 89%, and 63%, respectively, compared to the NPK treatment. Of the plant-derived organic materials, only NPKB significantly increased SOC content ($P < 0.05$). In addition, the soil microbial diversity was significantly increased in the NPKM treatment, with Shannon's index increasing from 1.8 to 2.0 and Simpson's index decreasing from 0.3 to 0.2. Furthermore, NPKB only significantly increased Shannon's index, while NPKS significantly decreased Simpson's index ($P < 0.05$). The application of different organic materials changed the distribution of the community structure of the dominant flora at the phylum level, decreased the relative abundance of Chloroflexi, and increased the relative abundance of Proteobacteria, with the greatest change observed in the NPKM treatment. Dosing of organic materials significantly increased peanut yield, with the most significant increase of 104% in the dosing of pig manure. 【Conclusion】 The result of this study revealed that the main factors affecting peanut yield were TN, SOC, pH, and microbial abundance, thus, providing an important scientific reference for the efficient fertilization of red soil sloping cropland.

Key words: Red soil slope cropland; Organic fertilization; Soil quality; Microbial diversity; Yield enhancement

红壤是我国重要的地带性土壤资源，红壤区占全国陆地面积的 22%。其中，坡耕地是红壤区重要的耕地类型，面积约 289 万 hm^2 。红壤区水热资源极为丰富，农业生产潜力大^[1-2]，然而，在自然和人为因素的共同作用下，红壤坡耕地普遍存在“黏、板、酸、蚀、瘦”等障碍问题，严重限制了其生产潜力的发挥。因此，提升红壤坡耕地土壤质量和产能对实现该区域农业可持续发展具有重要意义^[3]。

化学肥料在提高粮食产量方面发挥了重要作用，但长期过量施用会导致土壤退化、面源污染和作物品质下降等问题^[4]。有机培肥作为一种利用有机物质改良土壤的农业措施，能够有效提高土壤的综合质量和生产力^[5]。根据来源，有机物料可分为

动物源和植物源两大类，研究表明，两种来源的有机物料均可有效提高土壤的有机质含量，增加土壤生物多样性，并减少对化学肥料的依赖^[6-7]。

目前，有机物料施用对红壤质量和退化缓冲能力提升的研究已取得了较多进展。例如，Wang 等^[3]发现，施用有机肥可有效防止红壤酸化，长期有机无机混施能显著提高作物产量。司绍诚等^[8]也发现长期施用有机肥可以有效破解红壤酸度强、养分贫瘠等产能限制因子，提高土壤肥力健康水平及作物产量。然而，有研究也发现不同来源的有机物料对于土壤健康培育的效果存在显著差异。例如，Shi 等^[9]通过机器学习算法定量评估发现，动物源有机物料较植物源有机物料更能有效改善土壤质量。Li

等^[10]指出,动物源有机肥的效果优于植物源有机肥。但也有研究发现,长期添加动物源有机物料(马粪)虽能提高土壤细菌丰富度和多样性,却降低了土壤生物网络的复杂性^[11]。由于有机物料自身性质不同,其影响土壤质量和作物产量的机制也不相同^[12],特别是在不同环境和土壤类型下,有机物料改土增产的效果仍需进一步研究。

红壤坡耕地因其特殊的地形、气候条件和土壤特性,侵蚀问题尤为突出。降雨集中且强度大、地形起伏、土壤板结等因素共同导致红壤区水土流失问题,造成表土剥蚀、养分流失和土壤结构破坏。然而,目前关于侵蚀条件下不同来源有机肥对红壤坡耕地质量提升效果的比较研究仍较为欠缺。基于此,本研究依托红壤坡耕地有机培肥长期定位试验,系统比较秸秆(植物源)、生物质炭(植物源)和猪粪(动物源)三种常见来源有机物料在侵蚀背景下的改土培肥效果。通过分析这些有机物料对土壤物理结构、化学性质、微生物群落及作物产量的影响,旨在揭示不同来源有机物料在红壤坡耕地土壤质量提升中的作用机制,为红壤坡耕地的高效培肥提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

研究区位于鹰潭农田生态系统国家野外科学观测研究站(28°15'N, 116°55'E),地处江西省鹰潭市余江区,属亚热带湿润气候。基于1961—2021年国家气象中心的气象数据,红壤区年均气温17.6℃,年降水量1326 mm,相对湿度77.9%^[13]。花生测产年份(2023年),研究区年均气温19.0℃,年降水量1713 mm,相对湿度82.5%。

试验布设于2011年,共设置4个处理,即单施化肥(NPK)、化肥秸秆覆盖(NPKS)、化肥生物质炭配施(NPKB)和化肥猪粪配施(NPKM)。每个处理设置3个重复,共12个小区,采用随机区组设计。小区坡度约为10°,坡长为20 m,宽度为6 m。土壤类型为第四纪红黏土发育红壤,耕层初始有机碳含量为7.7 g·kg⁻¹,全氮含量为0.86 g·kg⁻¹,全磷含量为0.37 g·kg⁻¹,全钾含量为9.45 g·kg⁻¹,pH为5.0,砂粒、粉粒、黏粒含量分别为29%、34%和37%(美国制)。有机物料的基本性质见表1。

表1 3种有机物料的基本性质

有机物料	全碳 TC	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	pH
Organic materials	/(g·kg ⁻¹)				
秸秆 Straw	384	15.1	1.6	2.5	8.66
生物质炭 Biochar	454	8.9	2.1	163.0	9.85
猪粪 Pig manure	225	18.9	17.7	4.7	8.79

试验地的作物类型为花生,采用一年一熟的种植模式,4月初播种,8月初收获。翻耕深度15~20 cm,行距43 cm,花生采用顺坡垄作,株距20 cm。每年化肥施用量为N 172.5 kg·hm⁻²、P₂O₅ 90.0 kg·hm⁻²和K₂O 180 kg·hm⁻²;为促进花生对钙元素的吸收,以0.162 kg·hm⁻²的量施用硼肥。其中80%的氮肥与磷、钾、硼肥一起作基肥施用,剩余20%的氮肥在花生开花期以追肥形式施用。秸秆、生物质炭和猪粪的含碳量分别为38.4%、45.4%和22.5%,以2 t·hm⁻²的等碳量折算成秸秆、生物质炭和猪粪三种有机物料的实际用量后施于对应小区。其中,秸秆为水稻秸秆,切段至3~5 cm,生物质炭由水稻秸秆在400℃厌氧焚烧4 h制备,猪粪堆沤3个月,秸秆于花生播种后覆盖于地表,后两者与基肥一起施入。

1.2 土壤样品的采集与制备

于2023年9月花生收获后,在每个小区按“S”形五点混合采样法采集0~20 cm的土样。挑出其中的砾石、植物根系等杂物,混合均匀后将样品分成两份,一份放入无菌塑料袋中,低温保存用于宏基因组测序,一份风干、磨细过筛用于土壤理化性质测定。同时,每个小区在土壤表层(1.5~6.5 cm)用PVC环刀(高5 cm、内径5 cm)采集3个环刀样品,用保鲜膜裹严后带回实验室用于土壤孔隙等指标的测定。

1.3 土壤大孔隙度测定

采用德国Phoenix Nanotom显微CT系统对PVC环刀样品进行三维孔隙扫描测定。扫描参数设定为100 kV加速电压、90 μA电流及1.25 s单帧曝光时间,通过累积2304帧投影数据获取空间分辨率为25 μm的三维图像。原始数据经Datos|x2 Rec软件重构后,选取图像中心区域(1 600×1 600×1 200体素)作为标准化感兴趣区域(Region of interest, ROI),以消除边界伪影干扰。本研究中所采用设备

能准确识别的最小孔径为 50 μm , 因此, 大于该值的孔隙设定为大孔隙, 土壤大孔隙度是指由 CT 图像得到的大孔隙 (>50 μm) 体积占 ROI 总体积的百分比。基于 Image J (<https://imagej.nih.gov/ij/>) 平台, 参照 Ju 等^[14]所采用的方法, 采用 Volume Fraction、Bone-J 和 Thickness 插件分别计算大孔隙度、连通孔隙度及孔径分布。

1.4 土壤宏基因组测序

根据 E.Z.N.A.®soil DNA kit (Omega Bio-tek, Norcross, GA, 美国) 进行微生物群落总基因组 DNA 抽提。DNA 浓度和纯度检测通过后, 利用 1%琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 完整性。通过 Covaris M220 (基因公司, 中国) 将 DNA 片段化, 筛选约 350 bp 的片段, 使用 NEXTFLEX Rapid DNA-Seq (Bioo Scientific, 美国) 构建 PE 文库。最后采用 Illumina NovaSeq™ X Plus (Illumina, 美国) 测序平台进行宏基因组测序 (上海美吉生物医药科技有限公司)。本文以香农指数 (Shannon index) 和辛普森指数 (Simpson index) 作为微生物 α 多样性的评价指数, 香农指数越大, 辛普森指数越小, 表明微生物丰度越高^[15]。

1.5 土壤基本理化性质测定

土壤有机碳采用重铬酸钾容量法测定, 全氮采用凯氏定氮法测定, 土壤 pH 按照水土比 2.5:1 配制浸提液测定。

1.6 花生产量和生物量测定

花生成熟后, 在每个小区中部划定 1 m^2 标准样方, 分别采集花生籽粒与地上部秸秆, 样品自然晒干至恒重后称重记录, 计算对应小区花生产量 (籽粒干重) 和生物量 (秸秆干重)。每个处理设置 3 次独立重复, 以 3 次重复的算术平均值为该处理的最终产量和生物量。以 NPK 处理为对照, 计算有机肥

产量贡献率 (Contribution rate of fertilizer, FCR), 用于评估有机肥的增产效果^[16]; 通过变异系数 (Coefficient of variation, CV) 评估产量稳定性^[17], CV 值越大表明产量波动性越高。

$$\text{FCR}(\%) = \frac{\gamma_F - \gamma_{\text{NPK}}}{\gamma_F} \times 100 \quad (1)$$

式中, γ_F 为施用有机肥处理的产量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), γ_{NPK} 为单施化肥处理的产量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

$$\text{CV}(\%) = \frac{\sigma}{\bar{\gamma}} \times 100 \quad (2)$$

式中, σ 为标准差 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$), $\bar{\gamma}$ 为产量均值 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

1.7 数据处理与分析

采用 Excel 2021 对试验数据进行整理和初步统计; 利用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析 (One Way-ANOVA) 和 LSD 多重比较分析, 检验不同处理间土壤性质和产量的差异; 使用 R4.4.1 软件 randomForest 包和 rfPermute 包进行随机森林分析, 解析花生产量和土壤性质的关系。微生物数据分析在美吉生物云平台上完成。图形制作利用 Graphpad Prism 10.2.1 和 Origin 2022 软件完成。

2 结 果

2.1 有机物料添加对花生生物量和产量的影响

有机培肥措施显著提高了花生产量和地上生物量, 但其效果因有机肥来源不同而存在显著差异 (表 2)。与 NPK 处理相比, NPKS 和 NPKM 花生产量分别显著提高了 70% 和 104% ($P < 0.05$), 同时地

表 2 不同培肥处理下花生产量和地上生物量

Table 2 Indicators of peanut yield of different fertilization treatments

培肥处理	籽粒产量	产量变异系数	地上生物量	有机肥产量贡献率
Fertilization treatment	Grain yield/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	Coefficient of variation/%	Biomass/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	Contribution rate of fertilizer/%
NPK	2.3±1.4b	58.5	4.1±0.9b	—
NPKS	3.9±0.7a	18.5	5.8±0.2a	41.0
NPKB	3.4±1.0b	29.8	4.0±0.4b	32.4
NPKM	4.7±0.4a	8.5	6.3±1.2a	51.1

注: 不同小写字母表示不同处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$) .

上生物量显著增加了 41%和 54%; NPKB 处理花生产量增加了 48%, 差异未达显著水平, 地上生物量略有变化, 但差异也不显著 ($P>0.05$)。在等碳量投入条件下, 猪粪对产量的贡献率最高 (51.1%), 分别为秸秆和生物质炭的 1.2 倍和 1.6 倍。NPKM 处理的花生产量稳定性最优, 变异系数 (CV) 为 8.5%, 而 NPK 处理的稳定性最差 (CV=58.5%)。

2.2 有机物料添加对红壤化学性质的影响

不同类型的有机物料添加对土壤化学性质产生了不同影响 (表 3)。与初始值相比, NPK 和 NPKS 处理显著降低土壤 pH, NPKB 处理对 pH 无显著影响, 而 NPKM 处理显著提高 pH 0.6 个

单位。与 NPK 处理相比, NPKM 处理显著提高 pH 0.9 个单位 (由 4.8 提高至 5.7, $P<0.05$), 而 NPKB 和 NPKS 处理对 pH 的提升效果不显著 ($P>0.05$)。对于土壤 TN, NPK 和 NPKB 处理使 TN 略有降低, NPKS 处理略有提高, 而 NPKM 处理 TN 含量则提高约 44%; 与 NPK 处理相比, NPKM 处理 TN 显著提高 63% ($P<0.05$), 而 NPKB 和 NPKS 处理对 TN 的提升效果不显著 ($P>0.05$)。NPK 和 NPKS 处理降低了 SOC 含量, NPKB 和 NPKM 处理 SOC 分别提高约 21%和 35%; 与 NPK 处理相比, NPKB 和 NPKM 处理 SOC 分别显著提高了 69%和 89%。

表 3 不同培肥处理下红壤坡耕地 0~20 cm 深度土壤化学性质

Table 3 Soil chemical properties at 0-20 cm depth of sloping cropland under different fertilization treatments

采样年份 Sampling year	培肥处理 Fertilization treatment	pH	全氮 TN / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	土壤有机碳 SOC / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
2011 年 (初始值) Initial values in year 2011	/	5.0±0.2	0.9±0.1	7.7±1.0
2023 年 Year 2023	NPK	4.8±0.0b	0.8±0.2b	5.5±0.7b
	NPKS	4.9±0.1b	0.9±0.0b	6.8±0.7b
	NPKB	5.0±0.1b	0.8±0.1b	9.3±1.4a
	NPKM	5.7±0.2a	1.3±0.2a	10.4±1.7a

注: 表中数据为均值±标准差, 同列不同小写字母表示不同处理间存在显著差异 ($P<0.05$)。Note: The data in the table are the mean ± standard deviation, and different lowercase letters after the data in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$) .

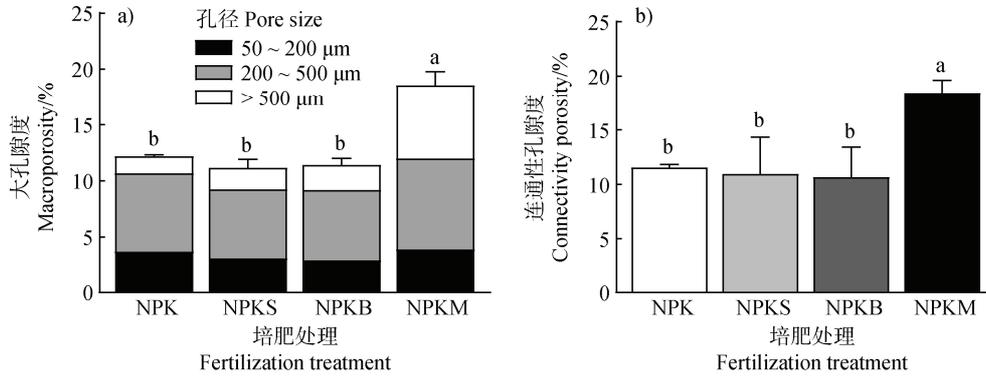
2.3 有机物料添加对红壤孔隙特征的影响

图 1a 展示了 4 种培肥处理下土壤大孔隙 (>50 μm) 的分布特征。结果显示, 与 NPK 处理相比, NPKM 处理显著增加了 53%的大孔隙度 ($P<0.05$), 而两种植物源的大孔隙度无显著变化 ($P>0.05$)。从土壤孔径的分布看, 植物源有机肥对不同孔径的大孔隙度均未产生积极影响 ($P>0.05$)。而 NPKM 处理对不同孔径大孔隙的作用不同, 与单施化肥处理相比, 猪粪添加增加了 6%的 50~200 μm 段的大孔隙, 16%的 200~500 μm 段的大孔隙, 336%的 500 μm 以上的大孔隙。可见, NPKM 处理能够改善不同孔径的大孔隙 (>50 μm), 并且对大孔径孔隙的影响更大。与 NPK 处理相比, NPKM 处理还显著增加了 60%的连通性孔隙度 (图 1b), 相比于两种植物源有机肥处理, NPKM 处理的连通性孔隙度分别增加了 68%和 73% ($P<0.05$)。

2.4 有机物料添加对红壤微生物丰度的影响

细菌群落 α 多样性在不同培肥处理之间存在明显差异 (图 2)。总体来看, NPKM 处理的细菌群落多样性最高, NPK 处理最低, 而 NPKS 和 NPKB 处理居中。具体而言, 香农指数显示, NPKM 处理的细菌群落多样性显著高于 NPK 和 NPKB 处理 ($P<0.05$, 图 2a), 其香农指数达到 2.02, 分别较 NPK 和 NPKB 处理高出 12%和 7%。然而, 辛普森指数的表现与香农指数有所不同, NPKS 处理的辛普森指数显著高于 NPKM 处理, 并显著低于 NPK 处理 ($P<0.05$, 图 2b)。NPKM 处理的辛普森指数为 0.18, 较 NPK 和 NPKS 处理分别降低了 32%和 17%。

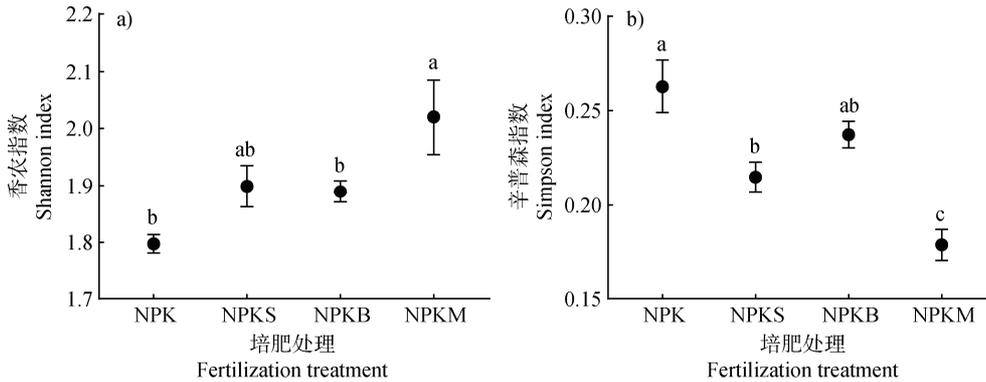
有机培肥显著影响了细菌门水平上的物种的相对丰度 (图 3)。在 4 个主要的优势菌群中, 绿弯菌门 (Chloroflexi)、放线菌门 (Actinobacteria)、酸杆菌门 (Acidobacteria)、变形菌门 (Proteobacteria) 占



注：不同小写字母表示处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$) .

图 1 不同培肥处理下红壤的大孔隙度和连通性孔隙度

Fig. 1 Macroporosity and connectivity porosity of red soil under different fertilization treatments



注：不同小写字母表示不同处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$) .

图 2 不同培肥处理下土壤细菌的 α 多样性指数

Fig. 2 Soil bacterial alpha diversity indices of different fertilization treatments

据了前四位。在 NPK、NPKS、NPKB 和 NPKM 处理组,前 4 位菌群占总菌群的比例分别为 81%、81%、79%和 78%。与 NPK 处理相比, NPKS、NPKB 和 NPKM 处理均降低了绿弯菌门的相对丰度,降低幅度分别为 23%、10%和 64%; 其中, NPKM 处理降低幅度最大,为 NPKS 处理的 2.8 倍, NPKB 处理的 6.4 倍。相反,有机培肥增加了变形菌门的相对丰度,尤其是 NPKM 处理,增加比例高达 169%。此外,与 NPK 处理相比, NPKS 处理使奇古菌门的丰度增加了 40%,而 NPKM 处理则使芽单胞菌门的相对丰度由 0.6%提高至 5.2%。

2.5 花生产量与土壤属性的相关关系

花生产量与土壤属性的 Pearson 相关性表明(图 4),花生产量与土壤化学指标的相关性最强。SOC、

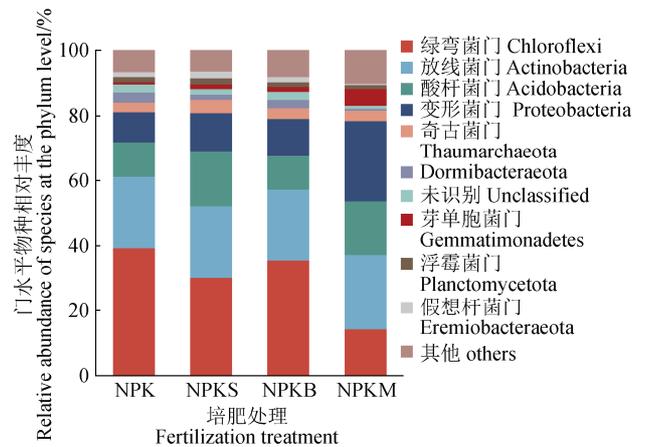
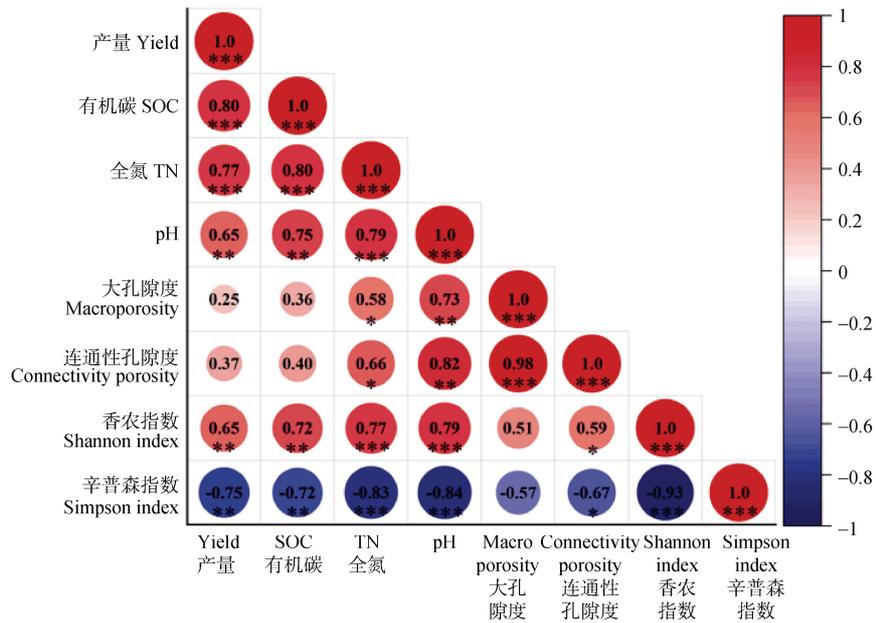


图 3 不同培肥处理下细菌门水平物种的相对丰度

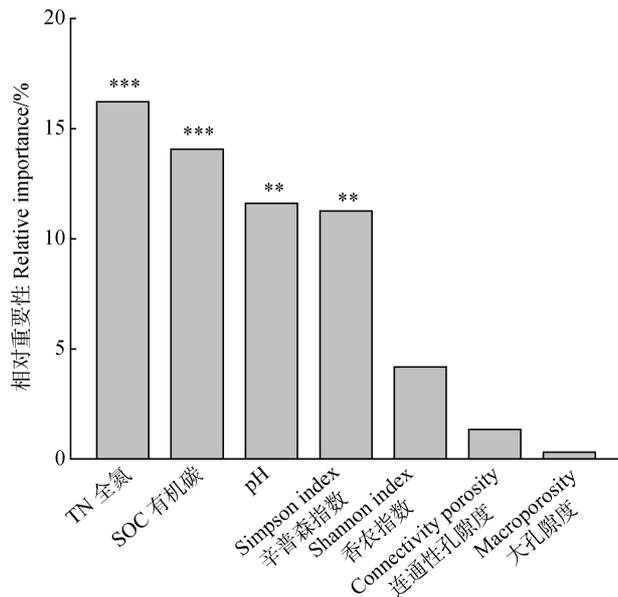
Fig. 3 Relative abundances of bacterial species at the phylum level under different fertilization treatments



注：“*”、“**”和“***”分别表示在 0.05、0.01、0.001 水平上显著相关。Note: “*”, “**” and “***” indicate significant correlation at the 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively.

图 4 花生产量与土壤指标的 Pearson 相关性

Fig. 4 Pearson correlations between peanut yield and soil indicators



注：“**”和“***”分别表示在 0.01 和 0.001 水平上显著。Note: “**” and “***” indicate significant correlation at the 0.01 and 0.001 levels, respectively.

图 5 基于随机森林方法的土壤指标对花生产量的相对重要性

Fig. 5 Relative importance of soil indicators to peanut yield based on random forest model

TN 和 pH 均与花生产量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), Pearson 系数分别为 0.80、0.77 和 0.65。土壤生物多样性与花生产量也呈极显著的正相关关系 ($P < 0.01$), 辛普森指数对产量的指示效果优于香农指数, Pearson 系数分别为 -0.75 和 0.65。本研究中, 土壤物理指标与花生产量均无直接相关性 ($P > 0.05$)。基于随机森林方法的土壤指标对花生产量的相对重要性表明(图 5), TN、SOC、pH、Simpson 指数对花生产量最为重要, 分别在 0.001、0.001、0.01 和 0.01 水平上显著。

3 讨论

3.1 动物源有机物料对红壤坡耕地土壤质量的改良效果优于植物源

本研究结果表明, 秸秆、生物质炭和猪粪 3 种有机肥对红壤坡耕地土壤质量和花生产量均有积极影响。长期施用有机肥能够显著改善土壤质量并提升作物产量, 这一结果与前人研究一致^[18-19]。然而, 本研究也发现 3 种有机肥的改良效果存在显著差异, 总体来看, 动物源有机肥 (NPKM) 的改良效果显著优于植物源有机肥 (NPKB 和 NPKS)。

在化学性质改良方面，动物源有机物料优于植物源。以 SOC 为例，3 种有机物料的碳输入量相当，且猪粪的碳含量最低（表 1）。然而，配施猪粪处理对 SOC 的提升效果显著，达到 89%，而配施生物质炭为 69%，秸秆覆盖则未显著提高 SOC 含量（表 3）。这一差异可能与猪粪在减少土壤侵蚀方面的作用密切相关。在相同的试验地，范亚琳等^[20]的研究表明，猪粪处理的土壤侵蚀强度仅为生物质炭处理的 37%。土壤侵蚀是 SOC 流失的重要因素^[21]，土壤侵蚀不仅导致肥沃表土中 SOC 的流失，也会导致尚未转化的有机物料随径流流失，从而影响 SOC 的积累。此外，猪粪中的氮源和低碳氮比有助于养分转化^[22]，并能持续提供碳源，促进 SOC 的积累^[19]。

在酸化抑制方面，动物源有机肥具有明显优势^[23-24]。与 NPK 处理相比，配施猪粪处理显著提高土壤 pH 0.9 个单位（表 3），而植物源有机肥未能显著抑制酸化。不同的抑酸作用除了可能与试验地侵蚀情况密切相关外，动物源有机肥中较高的 Na^+ 和 K^+ 含量在一定程度上会改善酸化问题，但高含盐量动物源有机肥在存在盐渍化风险的旱区土壤上施用需谨慎^[24]，易造成土壤 pH 升高，加剧盐碱障碍危害。

在物理性质方面，动物源有机物料有助于培育红壤的大孔隙。红壤的板结问题是红壤结构性障碍的重要体现，本研究发现，配施猪粪处理显著增加了红壤的大孔隙数量（图 1）。尽管动物源有机肥对土壤物理结构的影响存在一定争议，但 Wang 等^[25]认为动物源有机肥（牛粪）能促进土壤颗粒团聚，改善土壤结构；而 Guo 等^[26]指出北方地区动物源有机肥因含盐量较高，造成土壤分散，不利于土壤团聚过程，对土壤团聚体的稳定性产生负面影响。猪粪相较于秸秆和生物质炭，含有较高的氮和磷，有助于作物根系发育，并进一步改善土壤物理结构。也有较多研究表明，秸秆覆盖还田能有效改善土壤孔隙结构^[27]，但是在土壤侵蚀、高温多雨等自然和人为因素的共同影响下，植物源有机物料对土壤物理结构的改良效果存在较大不确定性^[28]。

在微生物多样性方面，动物源有机物料显著提高了土壤微生物菌群的多样性。相较于植物源有机物料，猪粪提供了丰富的碳源、氮源和其他营养元素，有利于微生物的生长和繁殖，增加土壤细菌群落的多样性（图 2）。尽管不同处理并未显著改变优

势菌门的种类，但配施有机物料显著改变了各菌群的相对丰度（图 3）。尤其是在施用动物源有机物料后，绿弯菌门的相对丰度降低，这可能与其在低肥力土壤中的竞争力较强有关^[29]，而随着土壤质量的改善，变形菌门、芽单胞菌门的丰度增加^[30]，表明土壤有机质、碱解氮、有效磷的增加为异养微生物提供了丰富的能量来源，促进了相关微生物的生长和繁殖^[31]。

3.2 土壤碳氮水平是评价红壤培肥效果的关键指标

作物高产和稳产是土壤改良的主要目标。本研究表明，长期施用猪粪显著提高了红壤的花生产量及其稳定性（表 2），这一结果与 Wang 等^[32]的长期定位试验结果一致。猪粪富含氮、磷、钾等养分，长期施用能为作物提供全面的营养。与植物源有机肥相比，猪粪中的养分形态更易被微生物和植物吸收利用，从而增加活性养分，快速提升红壤肥力^[8]。然而，植物源有机物料添加也能显著提高土壤质量和作物产量。例如，殷浩凯等^[33]发现长期秸秆还田可提高土壤肥力，促进土壤改良；马林杰等^[34]则指出，生物质炭添加对水稻产量的提升效果优于秸秆，而本研究发现秸秆对产量的提升效果优于生物质炭（表 2）。这一差异可能与试验区坡耕地的地形特征有关，生物质炭的疏水性会加剧径流和土壤侵蚀的发生，从而削弱了其对红壤坡耕地的改良效果。

土壤的物理、化学和生物指标均影响土壤质量，并构成土壤质量指数的重要组成部分^[35]。本研究发现，花生产量主要与土壤的化学指标有关，其次是生物指标，而物理指标对花生产量的直接影响较小（图 4—图 5）。不同有机物料输入带来的碳氮磷钾等多样化养分对作物具有重要意义^[36]，其中，土壤碳氮水平决定作物生长所需养分的供给能力，并通过影响土壤微生物种类和功能，间接作用于土壤养分的周转^[37-38]。土壤物理结构与土壤碳氮循环及微生物活动密切相关，尽管其与产量的直接相关性较低，但对土壤质量和作物产量提升的作用，已被广泛发现与证实^[39-40]。

4 结 论

在侵蚀严重的红壤坡耕地，施用猪粪显著改善了红壤的孔隙结构、碳氮水平和微生物多样性，其改良效果显著优于秸秆和生物质炭。土壤的化学和

生物指标对有机物料添加的响应较土壤物理指标更为敏感,红壤坡耕地土壤物理结构的改善较为困难。有机物料的施用显著提高了花生的产量,其中配施猪粪的效果最为显著,其次是秸秆覆盖,而生物炭在红壤坡耕地产能提升方面的表现较差。土壤的总氮、有机碳、pH和微生物多样性对花生产量具有显著的指示作用。

参考文献 (References)

- [1] Zhao Q G, Huang G Q, Ma Y Q. The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (24): 7615—7622. [赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. *生态学报*, 2013, 33 (24): 7615—7622.]
- [2] Cheng P, Liao C L, Xiao Q L, et al. Effects of cross slope ridge cultivation and straw mulching on nitrogen and phosphorus loss in red soil slope farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41 (5): 1036—1046. [程鹏, 廖超林, 肖其亮, 等. 横坡垄作和秸秆覆盖对红壤坡耕地氮磷流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41 (5): 1036—1046.]
- [3] Wang H X, Xu J L, Liu X J, et al. Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 195: 104382.
- [4] Roussis I, Kakabouki I. Sustainable soil management and crop production research[J]. *Sustainability*, 2024, 16 (20): 8830.
- [5] Zhang Q, Zhang Z H, Chen Y L, et al. Research progress on effects of application of bio-organic fertilizer on soil characteristics, crop quality and yield[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48 (15): 71—76. [张奇, 张振华, 陈雅玲, 等. 施用生物有机肥对土壤特性、作物品质及产量影响的研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48 (15): 71—76.]
- [6] Dhaliwal S S, Sharma V, Verma V, et al. Impact of manures and fertilizers on yield and soil properties in a rice-wheat cropping system[J]. *PLoS One*, 2023, 18(11): e0292602.
- [7] Ma Q, Liu M, Zhou Y L, et al. The effect of biochar combined with organic and inorganic fertilizers on soil biological characteristics and quality[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2024, 46 (7): 115—126. [马群, 刘铭, 周玉玲, 等. 生物炭与有机无机肥配施对土壤质量的影响[J]. *西南大学学报 (自然科学版)*, 2024, 46 (7): 115—126.]
- [8] Si S C, Tu C, Wu Y C, et al. Soil fertility health and peanut yield in upland red soils under long-term continuous application of pig manure[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(4): 480—487. [司绍诚, 涂晨, 吴宇澄, 等. 长期连续施用猪粪的旱地红壤肥力健康与花生产量研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, 39 (4): 480—487.]
- [9] Shi C, Zhang Q W, Yu B W. Higher improvement in soil health by animal-sourced than plant-sourced organic materials through optimized substitution[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 363: 108875.
- [10] Li P, Wu M C, Kang G D, et al. Soil quality response to organic amendments on dryland red soil in subtropical China[J]. *Geoderma*, 2020, 373: 114416.
- [11] Fang H R, Liu J J, Chen X L, et al. Effects of long-term combined application of organic and chemical fertilizers on bacterial community characteristics and soybean yields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32 (5): 804—815. [方海瑞, 刘俊杰, 陈雪丽, 等. 长期有机肥和化肥配施对黑土细菌群落特征和大豆产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2024, 32 (5): 804—815.]
- [12] Guo W, Li D D, Xu J S, et al. Effects of application of straw and organic-inorganic fertilizers on soil quality and wheat yield in different texture fluvo-aquic soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61 (5): 1360—1373. [郭伟, 李丹丹, 徐基胜, 等. 秸秆与有机无机肥配施对不同质地潮土土壤质量和小麦产量的影响[J]. *土壤学报*, 2024, 61 (5): 1360—1373.]
- [13] Zhong Y, Gao L, Peng X H, et al. Spatiotemporal differentiation and evolution trend of critical climatic variables in different ecological regions of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36 (1): 249—258. [钟湧, 高磊, 彭新华, 等. 中国不同生态区关键气候变量的时空分异与演变趋势[J]. *应用生态学报*, 2025, 36 (1): 249—258.]
- [14] Ju X N, Gao L, She D L, et al. Impacts of the soil pore structure on infiltration characteristics at the profile scale in the red soil region[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 236: 105922.
- [15] Sun Y Z, Cai S S, Chen X L, et al. Effects of different amendments on bacterial communities and soil nutrients of soybean continuous cropping in black soil area[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42 (4): 127—135. [孙义卓, 蔡姗姗, 陈雪丽, 等. 不同改良剂对黑土区大豆连作土壤养分平衡及细菌群落的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42 (4): 127—135.]
- [16] Yu W T, Jiang Z S, Zhou H, et al. Crop yield and fertilizer contribution under different fertilization systems[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15 (6): 54—58. [宇万太, 姜子绍, 周桦, 等. 不同施肥制度对作物产量及肥料贡献率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15 (6): 54—58.]
- [17] Han S, Wu J, Zhang X M, et al. Effects of increasing application of organic fertilizer on subsoil fertility betterment in paddy field[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35 (4): 334—341.

- [韩上, 武际, 张祥明, 等. 增施有机肥对稻田亚耕层土壤的培肥效应[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35 (4): 334—341.]
- [18] Jia R, Zhou J, Chu J C, et al. Insights into the associations between soil quality and ecosystem multifunctionality driven by fertilization management: A case study from the North China Plain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 362: 132265.
- [19] Xu J Z, Han K F, Wu L H. Effects of exogenous organic materials on the yield of double cropping rice, soil fertility and soil quality[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29 (12): 23—32. [徐洁章, 韩科峰, 吴良欢. 长期外源有机物料添加对双季稻产量、土壤肥力及土壤质量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29 (12): 23—32.]
- [20] Fan Y L, Liu X Z, Gao L, et al. Effects of fertility-building practices on soil organic carbon loss with sediment in sloping cropland of red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (3): 638—649. [范亚琳, 刘贤赵, 高磊, 等. 不同培肥措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56 (3): 638—649.]
- [21] Wang J X, Gao L, Qian R, et al. Erosion characteristics of sloping croplands in typical black soil region and its effects on nitrogen migration[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44 (6): 1590—1599. doi: 10.11654/jaes.2024-0596 [王建茜, 高磊, 钱芮, 等. 典型黑土区坡耕地侵蚀特征及其对氮素迁移的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44 (6): 1590—1599.]
- [22] Lu T W, Cai A D, Xu M G, et al. Variation in sequestration of organic carbon associated with differently sized aggregates after organic manure application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37 (10): 2183—2193. [陆太伟, 蔡岸冬, 徐明岗, 等. 施用有机肥提升不同土壤团聚体有机碳含量的差异性[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (10): 2183—2193.]
- [23] Shi R Y, Liu Z D, Li Y, et al. Mechanisms for increasing soil resistance to acidification by long-term manure application[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 185: 77—84.
- [24] Liu R, Jin Y X, Wang H Y, et al. Effect of different amendments on ameliorating acidity of red soil and improving maize growth[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023 (1): 199—205. [刘锐, 金玉霞, 王好圆, 等. 不同改良材料对红壤酸度的改良作用及玉米生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023 (1): 199—205.]
- [25] Wang X L, Ren Y Y, Zhang S Q, et al. Applications of organic manure increased maize (*Zea mays* L.) yield and water productivity in a semi-arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 187: 88—98.
- [26] Guo Z C, Zhang J B, Fan J, et al. Does animal manure application improve soil aggregation? Insights from nine long-term fertilization experiments[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 1029—1037.
- [27] Wen Y J, Zhang J C, Yang N, et al. Effects of the long-term application of organic fertilization and straw returning on the components of soil organic carbon and pores[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40 (21): 74—81. [温云杰, 张建诚, 杨娜, 等. 长期秸秆还田配施有机肥对土壤有机碳组分和孔隙结构的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40 (21): 74—81.]
- [28] Liu H, Zhou Q M, Li J. Effect of straw returning on soil improvement and crop growth: Research progress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33 (32): 53—57. [刘卉, 周清明, 黎娟. 秸秆还田对土壤改良及作物生长影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2017, 33 (32): 53—57.]
- [29] Ai C, Zhang S Q, Zhang X, et al. Distinct responses of soil bacterial and fungal communities to changes in fertilization regime and crop rotation[J]. *Geoderma*, 2018, 319: 156—166.
- [30] Sivojiene D, Kacergius A, Baksiene E, et al. The influence of organic fertilizers on the abundance of soil microorganism communities, agrochemical indicators, and yield in east Lithuanian light soils[J]. *Plants*, 2021, 10 (12): 2648.
- [31] Liu Z, Guo Q, Feng Z Y, et al. Long-term organic fertilization improves the productivity of kiwifruit (*Actinidia chinensis* Planch.) through increasing rhizosphere microbial diversity and network complexity[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 147: 103426.
- [32] Wang X B, Liu W X, Li Z G, et al. Effects of long-term fertilizer applications on peanut yield and quality and plant and soil heavy metal accumulation[J]. *Pedosphere*, 2020, 30 (4): 555—562.
- [33] Yin H K, Zhao Y Y, Xie W Y, et al. Effects of long-term corn stover return on fungal communities and enzyme activities in brown soil[J]. *Environmental Science*, 2025, 46 (7): 4699—4709. [殷浩凯, 赵宇航, 解文艳, 等. 长期玉米秸秆还田对褐土真菌群落和玉米产量的影响[J]. 环境科学, 2025, 46 (7): 4699—4709.]
- [34] Ma L J, Zhang C X, Qin B L, et al. Effects of straw and biochar returning on rice yield, nitrogen use efficiency and soil fertility in a rice-crayfish integrated system[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 40 (9): 1623—1632. [马林杰, 张诚信, 覃宝利, 等. 秸秆及生物炭还田对稻虾共作模式水稻产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40 (9): 1623—1632.]
- [35] Wang Z Q, Li Y Y, Zhang X P. Impacts of simulated erosion and fertilization on soil quality and corn yield in northeastern black soil region[J]. *Acta Pedologica*

- Sinica, 2025, 62 (3): 640—652. [王志强, 李秧秧, 张晓萍. 模拟侵蚀与施肥对东北黑土土壤质量和玉米产量的影响[J]. 土壤学报, 2025, 62 (3): 640—652.]
- [36] Guo H, Li C Y, Kou Z Y, et al. Effects of potassium and trace elements on soil ecological functions and health status in Loess Plateau dryland farmland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(4): 984—994. [郭欢, 李春越, 寇钊阳, 等. 钾和微量元素对黄土旱塬农田土壤生态功能及健康状况的影响[J]. 应用生态学报, 2025, 36 (4): 984—994.]
- [37] Fang W, Zhong X M, Peng X H, et al. Soil quality mediates the corn yield in a thin-layer mollisol in Northeast China[J]. Land, 2023, 12 (6): 1187.
- [38] Jiang X T, Huang L H, Liu B S, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial quantity and community structure in saline-sodic paddy fields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43 (8): 1786—1795. [蒋小瞳, 黄立华, 刘伯顺, 等. 长期不同施肥措施对盐碱地稻田土壤微生物数量和群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43 (8): 1786—1795.]
- [39] Wang Y, Kuang F H, Ma S L, et al. Effects of shredded straw and burned straw returning to the field on soil porosity and organic carbon in cultivated layer of calcareous purple soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41 (3): 526—536, 693. [王越, 况福虹, 马胜兰, 等. 秸秆粉碎和焚烧还田对石灰性紫色土耕层土壤孔隙和有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41 (3): 526—536, 693.]
- [40] Hu W, Cichota R, Beare M, et al. Soil structural vulnerability: Critical review and conceptual development[J]. Geoderma, 2023, 430: 116346.

(责任编辑: 檀满枝)