

万方, 明润廷, 那立苹, 顾雨雨, 王薇, 胡红青, 谭文峰, 伍玉鹏. 利用生态系统多功能性评估三种调理剂对酸性红壤的改良效果[J]. 土壤学报, 2026,

WAN Fang, MING Runtong, NA Liping, GU Yuyu, WANG Wei, HU Hongqing, TAN Wenfeng, WU Yupeng. Assessment of Three Amendments for Improving Acid-Red Soil Using Ecosystem Multifunctionality[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

## 利用生态系统多功能性评估三种调理剂对酸性红壤的改良效果\*

万方<sup>1</sup>, 明润廷<sup>2</sup>, 那立苹<sup>3</sup>, 顾雨雨<sup>1</sup>, 王薇<sup>1</sup>, 胡红青<sup>1</sup>, 谭文峰<sup>1</sup>, 伍玉鹏<sup>1†</sup>

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 咸宁市生态环境局崇阳县分局, 湖北咸宁 437500; 3. 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021)

**摘要:** 为全面评估调理剂施用对酸性红壤的改良效果, 本研究选取蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂(C)、高碱度生物炭调理剂(B)和硅钙钾镁调理剂(S)3种酸性土壤调理剂, 以不施用调理剂为对照(CK), 在浙江省诸暨市酸性红壤区开展大田试验, 通过测定土壤酸度、养分供给、微生物群落特性及植物生产力4大类指标, 从中筛选的共20个反映基本生态过程的具体指标, 解析其对生态系统多功能性(EMF)的影响。结果表明: 与CK相比, 3种调理剂均能有效降低土壤酸度, 其中B处理降酸效果最佳, 交换性Al<sup>3+</sup>和交换性酸总量降幅分别达61.81%和62.23%; 与CK相比, C处理显著提高土壤全量养分和有效磷含量, 增幅14.99%~22.43%; 与CK相比, 3种调理剂均显著提高细菌多样性和均匀度, C和S处理还增强了细菌群落稳定性; 植物生产力方面, B和C处理产量较CK提高了26.87%和25.47%, S处理地上生物量较CK提升27.30%。生态系统多功能性评价显示, C、B、S处理的EMF较CK分别提高112.38%、95.98%和129.71%。研究结果表明, 调理剂施用可显著提升酸性土壤的生态系统多功能性, 但对各具体生态指标的作用大小存在一定差异, 在实践应用中应依据酸性土壤特点及存在的复合障碍类型选择适宜的土壤调理剂进行施用。

**关键词:** 酸性红壤; 调理剂; 微生物群落; 植物生产力; 生态系统多功能性

中图分类号: S156.6 文献标志码: A

### Assessment of Three Amendments for Improving Acid-Red Soil Using Ecosystem Multifunctionality

WAN Fang<sup>1</sup>, MING Runtong<sup>2</sup>, NA Liping<sup>3</sup>, GU Yuyu<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, HU Hongqing<sup>1</sup>, TAN Wenfeng<sup>1</sup>, WU Yupeng<sup>1†</sup>

\*国家重点研发计划项目(2021YFD1901202)和湖北省重大科技专项(2023BBA003, 2025BBA003)资助 Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFD1901202) and the Major Science and Technology Project of Hubei Province (No. 2023BBA003, 2025BBA003)

†通信作者 Corresponding author, E-mail: wyp19851205@126.com

作者简介: 万方(2001—), 女, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要从事土壤改良研究。E-mail: 3055736010@qq.com

收稿日期: 2025-08-05; 收到修改稿日期: 2026-03-05; 网络首发日期(www.cnki.net)

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070; 2. Xianning Ecological and Environment Bureau, Chongyang Branch, Xianning, Hubei 437500; 3. Institute of Environmental Resources, Soil and Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021)

**Abstract:** 【Objective】 This study aimed to comprehensively evaluate the ameliorative effects of amendments application on acid-red soil. 【Method】 A field trial was conducted in an acid-red soil region of Zhuji City, Zhejiang Province. Three acid soil amendments were tested: a vermicompost-oyster shell powder-biochar composite amendment (C), a high-alkalinity biochar amendment (B), and a silicon-calcium-potassium-magnesium amendment (S), with an untreated control (CK). Through the measurement of twenty specific indicators selected from four major categories (soil acidity, nutrient supply, microbial community characteristics, and plant productivity) that reflect fundamental ecological processes, we analyzed the effects of different treatments on ecosystem multifunctionality (EMF). 【Result】 The results showed that compared with CK, three amendments significantly reduced soil acidity, with B treatment demonstrating the most pronounced acid-reducing effect (61.81% decrease in exchangeable  $Al^{3+}$  and 62.23% decrease in exchangeable acidity). C treatment elevated total nutrients and available phosphorus content by 14.99%-22.43% relative to CK. Compared with CK, all amendments significantly increased bacterial diversity and evenness, while C and S treatments further enhanced bacterial community stability. Regarding plant productivity, B and C treatments increased yields by 26.87% and 25.47%, respectively, compared with CK, while treatment S enhanced aboveground biomass by 27.30% relative to CK. Evaluation of ecosystem multifunctionality revealed that C, B, and S treatments improved EMF by 112.38%, 95.98%, and 129.71%, respectively, compared with CK. 【Conclusion】 These findings demonstrate that while amendments significantly enhanced EMF in acid soil, their effects on specific ecological indicators vary. Therefore, during practical implementation, suitable soil amendments should be selected and applied based on the characteristics and types of the acid soil.

**Key words:** Acid-red soil; Amendments; Microbial community; Plant productivity; Ecosystem multifunctionality

近几十年来,过量施用化肥等不合理的农业措施以及高强度人为活动加速我国土壤酸化进程,并使其日趋严重<sup>[1]</sup>。与第二次全国土壤普查相比,我国酸性土壤( $pH \leq 6.5$ )总面积增加了 64.5 万  $km^2$ ,东北地区、南方红黄壤地区及其他地区酸性土壤分别增加 23.0 万、19.6 万、21.9 万  $km^2$ <sup>[2]</sup>。土壤酸化引发土壤功能显著退化,一方面破坏土壤团粒结构,降低其通气性、保水能力以及土壤养分有效性<sup>[3]</sup>;另一方面改变土壤微生物群落结构和多样性,削弱微生物群落稳定性,对植物生长发育产生不利影响,极大地制约了耕地生产力<sup>[4]</sup>。施用土壤调理剂是改良酸性土壤的一种高效经济的技术手段,通过阻控土壤酸化、改善土壤酸度和肥力、提升作物生产力,在促进农业可持续发展中表现出极大的潜力<sup>[5]</sup>。

近年来,许多学者针对土壤调理剂施用下的酸性土壤改良效果开展了广泛研究,结果表明调理剂可通过提高土壤 pH、改善土壤结构、提高土壤肥力、优化土壤微生物群落结构等途径有效提高土壤质量和作物产量。吴宏涛等<sup>[6]</sup>发现添加白云石能提高酸性水稻土 pH 并增强有机碳库有效性,从而促进土壤有机碳矿化。施用秸秆生物炭则被证实可有效提升酸性土壤含水量并减少土壤开裂<sup>[7]</sup>。利用改性生物炭和腐殖质等制备复合调理剂可调节酸性土壤 pH,提高土壤肥力,改善微生物群落组成和结构并促进黑麦草的生长<sup>[8]</sup>。段媛媛等<sup>[9]</sup>研究发现有机肥、钙镁磷肥和生石灰能够有效改善土壤理化性质并促进植物生长,但在提高土壤 pH 方面,生石灰效果显著优于钙镁磷肥,而有机肥和钙镁磷肥在提升土壤养分含量方面则明显优于生石灰。此外,施用石灰、有机肥料和秸秆生物炭均可有效增加根际微生物多样性,显著提升植物根系抗病能力并提高作物产量,但不同调理剂对具体微生物类群的影响并不一致<sup>[10]</sup>。尽管已有的研究围绕调理剂施用后的多种土壤指标进行了分析,但如何综合利用这些多样化的指标反映酸性土壤生态功能的整体变化尚不清楚,这限制了对土壤调理剂改良效

果的准确评价及其生产应用。

生态系统多功能性 (EMF) 指生态系统能够同时提供和维持多个功能的能力, 可作为评价土壤-植物系统整体生态功能的综合指标<sup>[11]</sup>。利用 EMF 系统评估不同土壤改良措施对农田生态系统综合功能的影响, 可为优化土壤管理策略提供科学依据<sup>[12]</sup>, 也有助于将农业生产由单一产量目标导向多功能协调目标, 增强农业生态系统的稳定性<sup>[13]</sup>。例如, Zhu 等<sup>[14]</sup>通过 EMF 系统评估了胡椒-番茄-菠菜轮作系统中作物生长和品质、土壤碳和养分循环、气候和水资源调节方面的功能, 从整体生态系统功能方面探究了调理剂的最适施用量。相较于传统单一指标评估难以全面反映生态系统整体性能<sup>[15]</sup>, 开展 EMF 评价有助于更好地理解 and 预测不同措施下农业生态系统服务功能的变化, 为农业可持续发展实践提供指导。

浙江全省耕地面积 129.49 万  $\text{hm}^2$ , 其中酸化土壤占全省耕地面积的 48.6%<sup>[16]</sup>。本研究针对浙江省诸暨市酸化红壤开展工作, 从土壤酸度变化、养分供给、微生物稳定性和作物生产力几个功能入手, 探究 3 种土壤调理剂 (蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂、高碱度生物炭调理剂和硅钙钾镁调理剂) 施用后对生态系统多功能性的影响。研究结果不仅能够为调理剂在浙江酸性土壤中的应用提供指导, 进一步完善土壤调理剂产品的功能评价, 也能够为我国酸性土壤资源的可持续利用提供理论指导。

## 1 材料与方方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于浙江省绍兴市诸暨市次坞镇溪埭村 (29°53'15"N, 120°12'6"E)。该区域为典型亚热带季风气候区, 年平均气温为 16.3 °C, 年平均降水量约 1373.6 mm。试验地土壤类型为红壤, 是浙江省分布面积最大的土壤类型, 也是我国南方最为重要的耕地资源之一<sup>[17]</sup>。试验地 0~20 cm 的土壤基础理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤基础理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of soil

土壤类型 Soil type	pH	全碳 TC/(g· kg <sup>-1</sup> )	全氮 TN/(g· kg <sup>-1</sup> )	全磷 TP/(g· kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 AN/(m g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 AP/(mg ·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 AK/(m g·kg <sup>-1</sup> )	交换性 H <sup>+</sup> Exchange- able H <sup>+</sup> /(cmol·kg <sup>-1</sup> )	交换性 Al <sup>3+</sup> Exchange- able Al <sup>3+</sup> /(cmol·kg <sup>-1</sup> )
红壤 Red soil	5.31	7.81	0.77	0.78	68.25	7.44	69.20	1.70	1.47

注: 全碳通过碳氮元素分析仪测定, 其余指标与 1.3 样品采集与测定中测定方法相同。Note: Total carbon was measured by a carbon-nitrogen element analyzer, and other indicators were measured in the same way as in 1.3 Sample Collection and Measurement.

### 1.2 试验设计

供试调理剂分别为蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂 (C)、高碱度生物炭调理剂 (B) 和硅钙钾镁调理剂 (S), 均购自浙江中地净土科技有限公司。其中蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂的主要原料包括蚯蚓粪、牡蛎壳粉和生物炭粉; 高碱度生物炭由水稻秸秆与  $\text{CaCO}_3$  低氧热解制备而成; 硅钙钾镁调理剂由钾长石、白云石、矿源腐植酸钾制备而成。调理剂具体理化性质如表 2 所示。

表 2 供试调理剂基础理化性质

Table 2 Basic physicochemical properties of the amendments

调理剂 Amendment	pH	碱度 Alkalinity /( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	全碳 TC /%	全氮 TN /( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	全磷 TP /( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	全钾 TK /( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
C	8.32	107.20	19.73	17.69	19.73	9.52
B	12.66	781.49	49.51	10.21	4.92	11.02
S	11.01	359.43	0.43	3.61	5.87	24.28

注: C: 蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂; B: 高碱度生物炭调理剂; S: 硅钙钾镁调理剂。pH 通过玻璃电极法(调理剂与水比为 1: 10)测定; 碱度通过酸碱滴定法测定; 全碳和全氮通过碳氮元素分析仪测定; 全磷通过硫酸-硝酸消煮-钒钼黄比色法测定; 全钾通过硫酸-硝酸消煮, 火焰光度法测定, 指标测定参照《GB/T 18877-2020》和《土壤农业化学分析方法》<sup>[18]</sup>。Note: C: vermicompost-oyster shell powder-biochar composite amendment; B: high-alkalinity biochar amendment; S: silicon-calcium-potassium-magnesium amendment. The pH was measured by the glass electrode method (amendment-to-water ratio of 1:10); alkalinity was determined via acid-base titration; total carbon and nitrogen were analyzed with a carbon-nitrogen element analyzer; total phosphorus was quantified by sulfuric acid-nitric acid digestion followed by vanadate-molybdate yellow colorimetry; total potassium was assessed through sulfuric acid-nitric acid digestion and flame photometry. All determinations were conducted in accordance with GB/T 18877-2020 and Analytical Methods for Soil and Agro-chemistry<sup>[18]</sup>.

于 2023 年 6 月布置大田试验, 采用随机区组设计, 共 4 个处理, 分别施入蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂 (C)、高碱度生物炭调理剂 (B) 和硅钙钾镁调理剂 (S), 同时包含不施用调理剂的对照 (CK)。每个处理 3 次重复, 总计 12 个小区, 每个小区面积为 20 m<sup>2</sup> (4 m×5 m), 不同小区间距为 1 m。调理剂施用量参考产品说明书进行, 具体为: 蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂 3000 kg·hm<sup>-2</sup>, 高碱度生物炭调理剂 3000 kg·hm<sup>-2</sup>, 硅钙钾镁调理剂 1800 kg·hm<sup>-2</sup>。供试作物为玉米济单 7 号和小麦扬麦 28。试验地种植制度为玉米-小麦轮作, 试验周期内共种植三季作物 (玉米-小麦-玉米), 但仅在玉米播种前施入调理剂 (试验期内共施用调理剂两次)。三季作物播种前均施入缓释型复合肥料 375kg·hm<sup>-2</sup> (N-P-K: 20%-10%-15%), 玉米季苗期追施硫酸钾型复合肥料 375 kg·hm<sup>-2</sup> (N-P-K: 22%-6%-12%), 大喇叭口期追施尿素 (N 46%) 225 kg·hm<sup>-2</sup>; 小麦季拔节期追施尿素 (N 46%) 150 kg·hm<sup>-2</sup>。各处理在种植期间灌溉、病虫害管理等农艺措施均保持一致。

### 1.3 样品采集及测定

于 2024 年 10 月中旬玉米成熟期采集土壤和植物样品。五点法采集 0~20 cm 土壤, 混匀后分为两份, 一份放入-80 °C 冰箱冷冻, 用于微生物物种组成和多样性测定; 一份置于阴凉处自然风干后, 测定土壤化学性质。对每个小区玉米植株有效穗数进行统计, 随机选取 10 株长势均匀的植株样品于根部切断, 称量地上生物量, 收获该 10 株玉米上所有玉米穗进行后续指标测定。

参考前人构建的 EMF 体系<sup>[19-20]</sup>, 本研究从土壤酸度 (SA)、土壤碳库和养分固存 (CN)、微生物群落特性 (MC) 和植物生产力 (PP) 4 大类指标中筛选、精简, 形成共 20 个反映基本生态过程的具体指标, 构建生态系统多功能性评价体系。所选取的指标及测定方法如下<sup>[21]</sup>:

(1) 土壤酸度指标。土壤 pH 采用玻璃电极法 (土水比为 1: 2.5) 测定; 土壤交换性酸总量 (Exchangeable Acid)、交换性 H<sup>+</sup> (Exchangeable H<sup>+</sup>)、交换性 Al<sup>3+</sup> (Exchangeable Al<sup>3+</sup>) 通过氯化钾溶液淋洗, 氢氧化钠标准溶液滴定测定。

(2) 土壤碳库和养分固存指标。有机碳 (SOC) 采用重铬酸钾容量法测定; 全氮 (TN) 采用凯氏定氮法测定; 全磷 (TP) 采用氢氧化钠碱溶-钼锑抗比色法测定; 碱解氮 (AN) 采

用碱解扩散滴定法测定；有效磷（AP）采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定；速效钾（AK）采用乙酸铵浸提-火焰原子吸收光谱仪测定。

（3）土壤微生物指标。使用 CretMag™ Power Soil DNA Kit（白垩纪，中国）试剂盒进行微生物群落总 DNA 抽提，通过 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 的提取质量，NanoDrop2000 测定 DNA 浓度和纯度。细菌引物为 338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')，用于扩增 16S rRNA 的 V3~V4 可变区，真菌引物为 ITS1F (5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3') 和 ITS2R

(5'-GCTGCGTTCTTCATCGAT GC-3')，用于扩增真菌 ITS 可变区。扩增产物经纯化回收后，使用 NEXTflex™ Rapid DNA-Seq Kit（Bioo Scientific，美国）进行建库，利用 Illumina 公司的 NovaSeq PE250 平台进行测序。使用 fastp 软件对原始测序序列进行质控，采用 FLASH 软件拼接，根据 97% 的相似度对序列进行 OTU 聚类并剔除嵌合体。利用 RDP classifier 对每条序列进行物种分类注释。

土壤微生物群落多样性以丰富度（S）、Shannon-Wiener 多样性指数（H）、Pielou 均匀度指数（J）标准化后的平均值来表示<sup>[22-23]</sup>，各指数计算公式如下：

$$H = -\sum_{i=1}^S p_i \ln(p_i) \quad (1)$$

$$J = H / \ln S \quad (2)$$

式中， $p_i$  表示第  $i$  个物种的个体数比例； $S$  为物种数。

土壤微生物群落稳定性可通过平均变异度（AVD）进行量化评估<sup>[24]</sup>。该指数通过计算群落内各物种丰度变化的平均程度，反映群落的动态特征：AVD 值越高，表明微生物群落的物种丰度波动越显著，稳定性越低；反之，AVD 值越低则表征群落结构越稳定。因此，其倒数（1/AVD）常被用作群落稳定性的量化指标。

$$|a_i| = \frac{|x_i - \bar{x}_i|}{\delta_i} \quad (3)$$

$$AVD = \frac{\sum_{i=1}^n |a_i|}{k \times n} \quad (4)$$

式中， $a_i$  表示 OTU <sub>$i$</sub>  的变异度， $x_i$  为 OTU <sub>$i$</sub>  的丰度， $\bar{x}_i$ ， $\delta_i$  分别为所有样本中 OTU <sub>$i$</sub>  丰度的均值和标准差， $k$  为样本数， $n$  为 OTU 数。

（4）植物生产力指标。地上生物量（AGB）、产量（Yield）通过称重法测定；穗粒数（KRN）通过穗行数乘行粒数测得；将籽粒风干后磨粉，浓硫酸-双氧水消解，消解液采用 AA3 型连续流动分析仪测定籽粒全氮（Grain TN）、全磷（Grain TP）含量，火焰原子吸收光谱仪测定籽粒全钾（Grain TK）含量。

#### 1.4 生态系统多功能性的评估

首先对土壤和植物指标数据进行标准化处理，选取的 20 个评估 EMF 的指标中，交换性 H<sup>+</sup>、交换性 Al<sup>3+</sup> 和交换性酸含量越低，EMF 越高，采用公式（5）标准化，其余指标采用公式（6）标准化。EMF 的量化方法主要包括单功能法、平均值法和阈值法等，其中平均值法简单直观，具有良好的统计学特性并能够对同一系统多个功能进行可解释的定量描述，是目前使用频率最高的方法<sup>[25-26]</sup>。基于此，本研究采用平均法对 EMF 进行定量分析<sup>[27]</sup>，公式如（7）。

$$EF_i = (EF_{\max} - EF_j) / (EF_{\max} - EF_{\min}) \quad (5)$$

$$EF_i = (EF_j - EF_{\min}) / (EF_{\max} - EF_{\min}) \quad (6)$$

$$EMF = \sum_i^n EF_i / n \quad (7)$$

式中， $EF_i$  为标准化的土壤功能； $EF_j$  为各指标的观测值； $EF_{\max}$  和  $EF_{\min}$  分别表示该土壤指标中所有土壤样本的最大值和最小值；EMF 为生态系统多功能性指数； $n$  为指标个数。

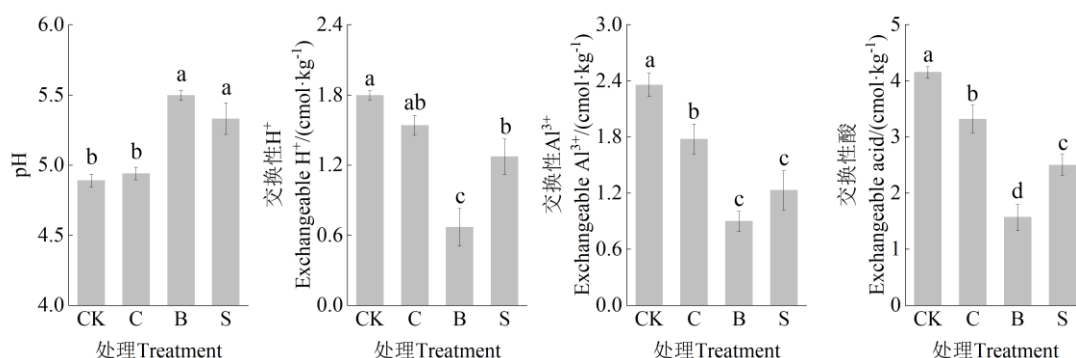
## 1.5 数据处理

采用 SPSS 25 进行统计分析, 利用 Origin 2022 软件进行数据可视化处理。采用单因素方差分析对不同处理的单个指标以及生态系统多功能性指数进行比较, 用 Duncan 多重比较分析组间差异。

## 2 结果

### 2.1 不同调理剂施用对红壤酸度的影响

调理剂的施用能够有效降低红壤酸度(图1)。与 CK 处理相比, 调理剂 B 和 S 能够显著提高土壤 pH(分别提高了 0.61 和 0.44 个单位), 并显著降低土壤交换性  $H^+$  含量(分别降低了 62.77%和 29.18%)。3 种调理剂均能显著降低土壤交换性  $Al^{3+}$  和交换性酸总量, 尤以施用高碱度生物炭的 B 处理的土壤降幅最大, 分别达 61.81%和 62.23%。



注: CK: 对照处理; C: 蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂处理; B: 高碱度生物炭调理剂处理; S: 硅钙钾镁调理剂处理。图上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。Note: CK: Control treatment; C: Vermicompost - oyster shell powder - biochar composite amendment treatment; B: High alkalinity biochar amendment treatment; S: Silicon-calcium - potassium-magnesium amendment treatment. Different lowercase letters on the graph indicate significant differences between different treatments ( $P < 0.05$ ). The same as below.

图1 不同调理剂施用对红壤酸度的影响

Fig.1 Effects of different amendments on red soil acidity

### 2.2 不同调理剂施用对红壤碳库和养分固存的影响

3 种调理剂对红壤有机碳含量均未产生显著影响, 但不同调理剂对红壤养分含量的影响差异较大(图2)。与 CK 处理相比, 调理剂 C 显著提高了土壤全量养分和有效磷含量, 增幅范围为 14.99%~22.43%; 而调理剂 B 则显著降低了土壤碱解氮和速效钾含量, 降幅分别为 17.84%和 20.39%; 调理剂 S 显著提高了土壤有效磷和速效钾含量, 增幅分别为 25.93%和 13.73%, 但同时显著降低了土壤碱解氮含量, 降幅达 16.24%。

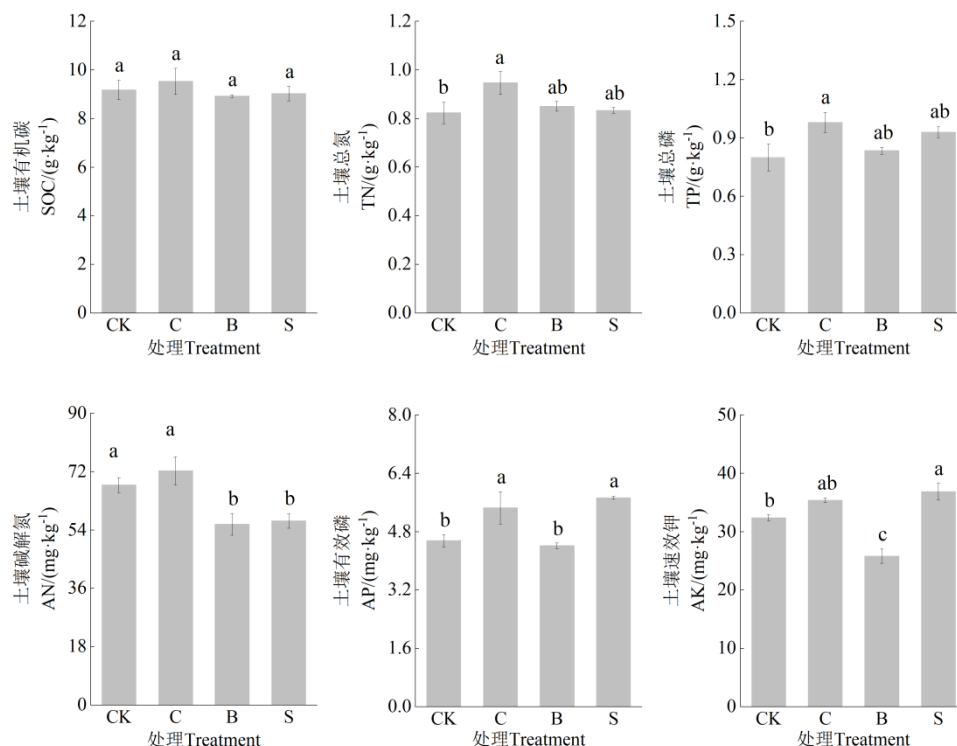


图 2 不同调理剂施用对红壤碳库和养分固存的影响

Fig.2 Effects of different amendments on red soil carbon pool and nutrient sequestration

### 2.3 不同调理剂施用对红壤微生物群落特性的影响

通过平均变异度的倒数 (1/AVD) 对红壤微生物群落稳定性进行量化评估 (图 3), 结果显示, 与 CK 处理相比, 调理剂 C 和调理剂 S 显著提高了细菌群落的稳定性, 而 3 种调理剂的施用对真菌群落的稳定性均未产生显著影响。

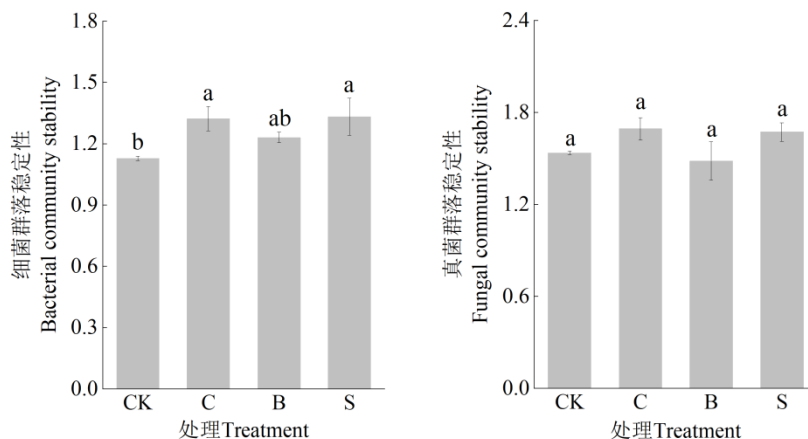


图 3 不同调理剂施用对红壤微生物群落稳定性的影响

Fig.3 Effects of different amendments on red soil microbial community stability

细菌和真菌韦恩图显示 (图 4a-图 4b), 在细菌群落中共得到 4264 个土壤细菌 OTU, CK、C、B、S 处理各自特有的 OTU 数量分别为 15、98、67、13 个, 占总 OTU 数量的 0.35%、2.30%、1.57%、0.30%。真菌群落中共得到 2241 个土壤真菌 OTU, CK、C、B、S 处理各自特有的 OTU 数量分别为 155、492、153、125 个, 占总 OTU 数量的 6.92%、21.95%、6.83%、5.58%。相比 CK, 调理剂 C 有效增加了土壤微生物的特有 OTU 数量; 调理剂 B 主要提升细菌群落特有的种比例; 而调理剂 S 则降低了细菌和真菌特有的种的丰度。

与 CK 处理相比, 3 种调理剂的施用能够显著提高土壤细菌香农指数和均匀度指数 (图 4c-图 4f,  $P<0.05$ ), 但真菌香农指数和均匀度指数均无显著差异。此外, C 处理的真菌香农指数显著高于 S 处理。

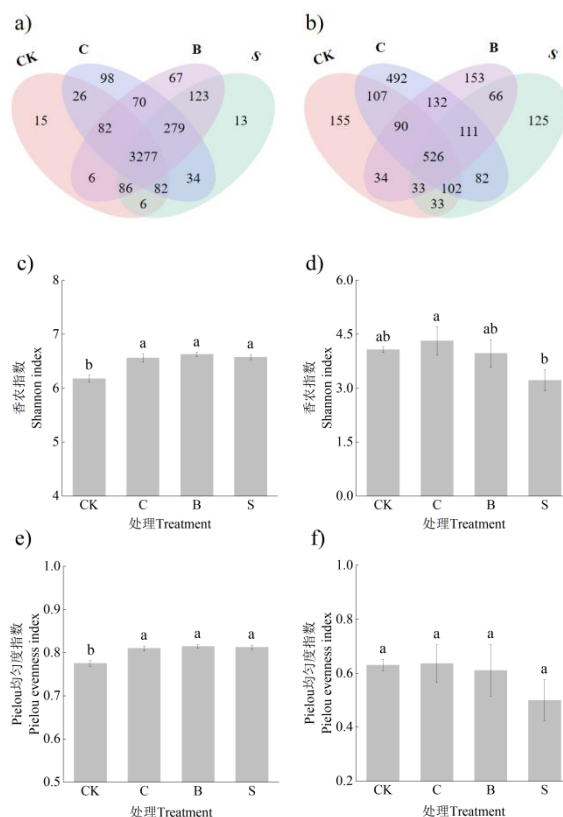


图 4 不同调理剂施用对红壤细菌 (a. OTU 数量; c. 香农指数; e. Pielou 均匀度指数) 和真菌 (b. OTU 数量; d. 香农指数; f. Pielou 均匀度指数) 群落多样性的影响

Fig.4 Effects of different amendments on red soil bacteria (a. OTU counts; c. Shannon index; e. Pielou evenness index) and fungi (b. OTU counts; d. Shannon index; f. Pielou evenness index) community diversity

## 2.4 不同调理剂施用对植物生产力的影响

调理剂施用可有效提高植物生产力 (图 5)。相比 CK, B 处理显著提升玉米穗粒数、产量和籽粒总磷含量, 分别提高了 18.43%、26.87%和 77.48%; S 处理显著提高植物地上生物量、籽粒总磷与总钾含量, 分别提高了 27.30%、129.29%和 15.83%; 而 C 处理则显著提高植物地上生物量和产量, 分别提高了 24.98%和 25.47%, 但降低了籽粒总磷含量。不同调理剂施用下的籽粒总氮含量之间无显著差异。

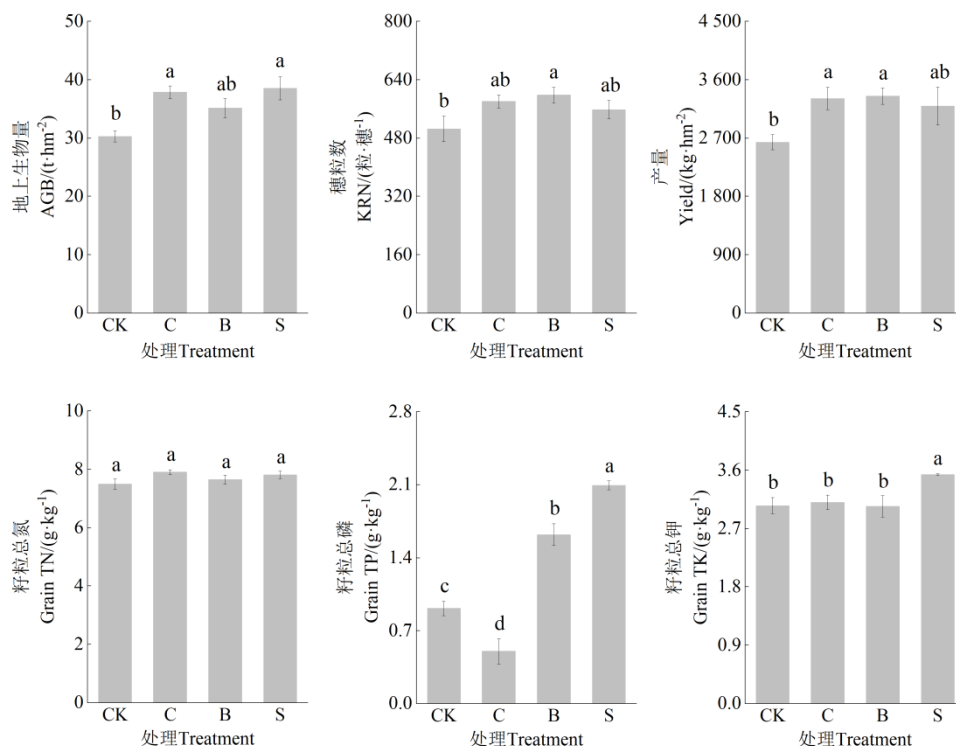
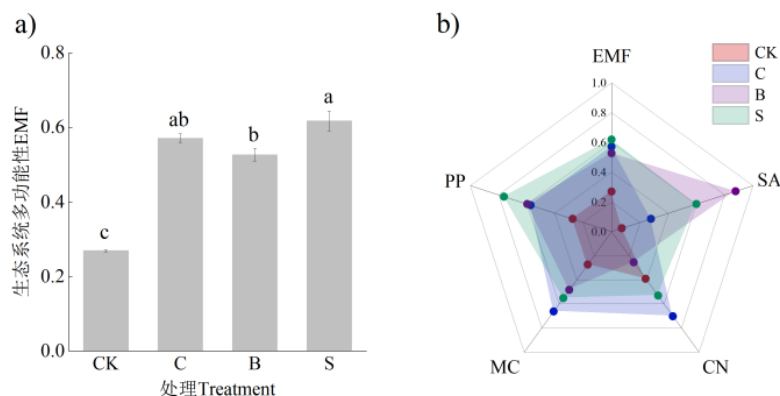


图 5 不同调理剂施用对植物生产力的影响

Fig.5 Effects of different amendments on plant productivity

## 2.5 不同调理剂施用下红壤生态系统多功能性评价

与 CK 相比, 蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂、高碱度生物炭调理剂和硅钙钾镁调理剂均能显著提高 EMF, 分别提高了 112.38%、95.98%和 129.71% (图 6a,  $P < 0.05$ )。进一步利用生态系统单功能指数及多功能指数的平均值绘制贡献度雷达图(图 6b), 结果显示, CK 和 C 处理中土壤碳及养分固存功能对 EMF 的贡献度最高, 而土壤降酸能力的贡献度最低; B 处理以土壤酸度调节功能为 EMF 的主导贡献因子, 但在土壤养分提升方面的贡献相对有限; 相比之下, S 处理则表现为植物生产力功能对 EMF 的贡献最大, 且各生态功能对 EMF 的贡献度相对均衡。



注: SA: 土壤酸度; CN: 土壤碳和养分固存; MC: 土壤微生物群落特性; PP: 植物生产力; EMF: 生态系统多功能性。Note: SA: Soil acidity; CN: Soil carbon and nutrient sequestration; MC: Characteristics of soil microbial community; PP: Plant productivity; EMF: Ecosystem multifunctionality.

图 6 不同调理剂对红壤生态功能及生态系统多功能性的影响

Fig.6 Effects of different amendments on red soil ecological function and ecosystem multifunctionality

### 3 讨论

酸度是酸性土壤中影响土壤质量、限制作物产量的重要因素<sup>[2]</sup>。本研究显示 3 种调理剂较 CK 均能有效降低红壤酸度, 表现为显著降低了土壤交换性  $\text{Al}^{3+}$  和交换性酸含量(图 1), 其降酸机制可能涉及碱性物质补充、吸附固定  $\text{Al}^{3+}$ 、促进盐基离子置换及酸碱中和反应等过程<sup>[28-29]</sup>。其中, 施用硅钙钾镁调理剂能够显著提高土壤 pH, 降低土壤交换性酸含量, 这主要是归因于该调理剂释放的交换性盐基离子 ( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{K}^{+}$ ) 置换土壤胶体上吸附的交换性  $\text{H}^{+}$  和  $\text{Al}^{3+}$ , 从而提高了土壤的盐基饱和度<sup>[28]</sup>, 与冀建华等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。高碱度生物炭在降低土壤酸度方面效果最佳, 这得益于自身含有丰富的碱性物质, 其 pH 高于蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂和硅钙钾镁调理剂。相比之下, 蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂对 pH 和交换性  $\text{H}^{+}$  无显著影响, 降酸效果在 3 种调理剂中最差, 这主要是因为该调理剂本身 pH 低于另外两种调理剂(表 2), 也可能是其主要成分蚯蚓粪在分解过程中产生了有机酸, 削弱了降酸效果<sup>[31]</sup>。

土壤养分是土壤生产力的基础, 通过供给植物必需元素、维持生物活性并调控物质循环, 驱动生态系统生产力的可持续性<sup>[32]</sup>。本研究中, 蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂可有效提高土壤速效养分含量, 一方面是因为蚯蚓粪富含有机质、腐殖质及氮磷钾等速效养分, 施入土壤可直接补充养分<sup>[33]</sup>; 另一方面是因为蚯蚓粪中由蚯蚓肠道引入的功能微生物活化了土壤中原存在但难以利用的养分<sup>[34]</sup>。硅钙钾镁调理剂也显著提高了土壤速效养分含量, 可能是因为其释放的硅元素在增强植物根系对养分吸收能力的同时, 促进土壤中难溶性磷和钾的溶解<sup>[35]</sup>。相比之下, 高碱度生物炭对土壤全量养分无显著影响, 但显著降低了土壤碱解氮含量, 这可能是因为生物炭的高碳含量会提高土壤 C/N 比, 引发氮限制, 增强了微生物的氮固持作用, 从而减少土壤可利用氮含量<sup>[36]</sup>。总体上, 蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂提升土壤养分的能力要优于硅钙钾镁调理剂和高碱度生物炭调理剂, 这主要是因为其自身养分含量高于后两者(表 2)。值得注意的是, 相较于试验开始前, 各处理土壤速效钾含量均降低了 46.78%~62.75%, 这可归因于钾元素被作物吸收后随籽粒移出土壤<sup>[37]</sup>, 但也暗示钾元素匮乏可能是除酸度外限制作物产量的另一因素。事实上, 酸性土壤很多情况下都存在复合障碍, 如酸-瘦、酸-旱、酸-蚀等。因此, 针对某单一的指标(如酸度)开展研究以评估酸性土壤改良效果可能存在较大的局限性, 这突出了通过 EMF 反映酸性土壤生态功能的整体变化的重要性。

土壤微生物群落通过驱动养分循环及形态转化过程, 为作物生长提供物质基础, 在农田生态系统中发挥关键作用<sup>[38]</sup>。与 CK 相比, 3 种调理剂均能显著提高细菌多样性(图 4), 这可能与土壤酸度的降低有关。已有研究指出, 细菌多样性与土壤 pH 呈显著正相关, 与土壤交换性  $\text{H}^{+}$ 、交换性  $\text{Al}^{3+}$  和交换性酸呈显著负相关<sup>[39-40]</sup>。然而, 3 种调理剂与 CK 相比对真菌丰富度, 香农指数和 Pielou 均匀度指数均无显著差异, 这可能是因为真菌群落组成与细菌群落相比具有更高的抗逆性, 在环境扰动下仍能维持群落结构的稳定<sup>[41-42]</sup>。图 3 显示调理剂施用并未显著改变真菌群落稳定性, 也支持了这一观点。而对于细菌群落, 3 种调理剂较 CK 能够有效增强其稳定性, 一方面是因为调理剂通过降低土壤酸度提升了细菌多样性, 增加了关键功能菌种的丰度<sup>[40]</sup>; 另一方面则是土壤养分的同步提升为细菌提供了更多的资源<sup>[43]</sup>。多样性与养分的协同作用增强了细菌群落的功能冗余性——多种细菌可执行相同生态功能, 当部分物种受干扰时, 群落整体功能仍能保持稳定<sup>[44]</sup>。3 种调理剂中蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂对土壤微生物多样性和群落稳定性提升效果最好, 这可能是因为蚯蚓粪中本身含有大量有益微生物, 施入后填补了土著微生物的功能空缺, 增强群落的功能冗余性<sup>[33]</sup>。

提高作物生产力是酸性土壤改良的最终目的。本研究中, 3种调理剂均能有效提升作物地上生物量、穗粒数和产量(图5)。生物炭和蚯蚓粪通过改善土壤理化环境及优化微生物群落结构, 强化根系养分获取能力, 从而系统性提升作物品质与生物量<sup>[45]</sup>; 硅钙钾镁调理剂则通过显著提升土壤速效钾含量及植物钾素分配效率, 直接驱动产量构成要素(穗数、粒数)的协同增长, 实现作物产量与养分吸收量的双重提升<sup>[46]</sup>。不同调理剂施用对籽粒总磷含量的影响存在差异: 高碱度生物炭与硅钙钾镁调理剂通过提高土壤有效磷含量并强化根系吸收效率, 显著提高作物总磷积累量<sup>[47-48]</sup>; 蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂虽同步增加土壤总磷与有效磷含量, 但蚯蚓粪的高比表面积可能增强了其对磷酸根的吸附能力, 削弱了磷素向根际迁移的速率<sup>[49]</sup>, 导致籽粒总磷含量降低。总的来看, 硅钙钾镁调理剂对植物生产力的提升效果最好, 这主要是因为硅钙钾镁调理剂可通过快速降低土壤酸度, 靶向补充硅、钙、镁等元素, 更直接高效地缓解铝毒胁迫和养分流失<sup>[28]</sup>。

在本研究中, 3种调理剂施用后, 均改善了土壤生态系统的多功能性, 但其对具体的生态功能作用大小存在差异: 高碱度生物炭在降低土壤酸度方面效果最优; 蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂在提升土壤养分含量与优化微生物群落结构的协同效应上表现最佳; 硅钙钾镁调理剂则在提高作物生产力方面效果最为显著。由此可见, 仅采用单一指标评价酸性土壤调理剂的效果存在一定的片面性。例如, 向强酸性土壤中施用石灰, 虽可短期内显著提高土壤酸度, 但其长期施用易引发土壤结构退化, 导致“复酸化”与土壤板结问题<sup>[5]</sup>。有机肥如蚯蚓粪等虽然养分含量高, 但其碱度较低, 在提高酸性土壤 pH 方面效果较差<sup>[50]</sup>。赵学强等<sup>[2]</sup>强调, 有效的酸性土壤改良需同步提升土壤 pH 与基础肥力, 还需协同优化土壤微生物群落功能, 方能实现酸性土壤生产力的可持续提升。EMF 的优势在于能够同时量化生态系统提供的多种功能或服务, 避免对单一优势指标的过度关注而忽略其他功能的短板<sup>[11]</sup>。本研究引入生态系统多功能性(EMF)对不同调理剂施用后的红壤生态系统功能进行综合评价, 可在一定程度上克服因评估维度单一带来的影响, 从而更全面地衡量不同调理剂的实际应用价值<sup>[51]</sup>。本研究中, 硅钙钾镁调理剂和蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂对 EMF 的提升效果最好, 或许与该区域土壤养分含量偏低且并非强酸性土壤有关。具体而言, 以钾长石、白云石和矿源腐植酸钾为主要成分的硅钙钾镁调理剂, 为土壤提供了丰富的钙、镁、钾、硅等关键元素; 而蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂则提供了充足的氮、磷、钾养分, 有效弥补了该区域的养分亏缺。相比之下, 高碱度生物炭因自身养分含量偏低, 在土壤肥力提升方面表现欠佳。本研究说明硅钙钾镁调理剂和蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂可作为诸暨市酸性红壤改良实践的优选。但在不同地区, 酸性土壤酸度并不一致, 同时可能复合其他障碍因子形成多种复合障碍类型。针对不同区域的主要障碍因子, 有必要依据改良剂的特点进行匹配, 形成分区、分类、分级的酸性土壤精准改良策略。

## 4 结论

调理剂(蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂、高碱度生物炭调理剂及硅钙钾镁调理剂)的施用能够协同增强生态系统多种功能, 使 EMF 较 CK 处理分别提高了 112.38%、95.98% 和 129.71%。但不同调理剂对具体生态功能的影响有所差异: 蚯蚓粪-牡蛎壳粉-生物炭复合调理剂在协同提升土壤养分含量与优化微生物群落结构方面效果最佳; 高碱度生物炭调理剂表现出最优的快速降酸能力; 硅钙钾镁调理剂则对作物生产力的提升效果最好。在实际应用中, 建议依据具体酸性土壤特点及其复合障碍类型(如酸瘦、酸旱、酸蚀等)选择具有针对性的调理剂进行施用, 以实现土壤生态功能协同优化与农业生产综合效益的最大化。

参考文献 (References)

- [1] Xu R K, Li J Y, Zhou S W, et al. Scientific issues and controlling strategies of soil acidification of croplands in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 160-167. [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.]
- [2] Zhao X Q, Pan X Z, Ma H Y, et al. Scientific issues and strategies of acid soil use in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1248-1263. [赵学强, 潘贤章, 马海艺, 等. 中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1248-1263.]
- [3] Du L X, Zhang Z Y, Chen Y Q, et al. Heterogeneous impact of soil acidification on crop yield reduction and its regulatory variables: A global meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2024, 319: 109643.
- [4] Duan Y L, Zhang J B, Petropoulos E, et al. Soil acidification destabilizes terrestrial ecosystems *via* decoupling soil microbiome[J]. Global Change Biology, 2025, 31(4): e70174.
- [5] Li J Y, Cheng H, Liang X M, et al. Research progress of acidified soil amelioration and carbon sequestration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7871-7884. [李金业, 程昊, 梁晓敏, 等. 酸化土壤改良与固碳研究进展[J]. 生态学报, 2024, 44(17): 7871-7884.]
- [6] Wu H T, Hu J L, Xu P, et al. Effects of dolomite addition on organic carbon mineralization in acidic paddy soils under different moisture contents[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 148-157. [吴宏涛, 胡金丽, 徐鹏, 等. 不同水分条件下添加白云石对酸性水稻土有机碳矿化的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 148-157.]
- [7] Huang C S, Chen Y, Jin L C, et al. Properties of biochars derived from different straw at 500°C pyrolytic temperature: Implications for their use to improving acidic soil water retention[J]. Agricultural Water Management, 2024, 301: 108953.
- [8] Liu M, Tan X, Zheng M X, et al. Modified biochar/humic substance/fertiliser compound soil conditioner for highly efficient improvement of soil fertility and heavy metals remediation in acidic soils[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 325: 116614.
- [9] Duan Y Y, Wu J Q, Zhou W X, et al. Effects of different amendments on the yield of *Rheum officinale* Baill. and rhizospheric soil fertility under continuous cropping system[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(3): 753-761. [段媛媛, 吴佳奇, 周武先, 等. 不同改良剂对连作大黄产量及其土壤肥力的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(3): 753-761.]
- [10] Chen D L, Wang X X, Carrión V J, et al. Acidic amelioration of soil amendments improves soil health by impacting rhizosphere microbial assemblies[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2022, 167: 108599.
- [11] Garland G, Banerjee S, Edlinger A, et al. A closer look at the functions behind ecosystem multifunctionality: A review[J]. Journal of Ecology, 2021, 109(2): 600-613.
- [12] Long X W, Li J N, Liao X H, et al. Stable soil biota network enhances soil multifunctionality in agroecosystems[J]. Global Change Biology, 2025, 31(1): e70041.
- [13] Bin Z Q, van der Putten W H, Wang G Z, et al. Effects of crop species on soil functions and soil multifunctionality are species-specific[J]. Functional Ecology, 2025, 39(9): 2354-2369.
- [14] Zhu B J, Whalen J K, Wu J T, et al. Soil food web structure coordinated by soil omnivores sustains soil multifunctionality in moderate vermicompost amended fields[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2024, 192: 109391.
- [15] Wang K, Wang C, Feng X M, et al. Research progress on the relationship between biodiversity and ecosystem multifunctionality[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 11-23. [王凯, 王聪, 冯晓明, 等. 生物多样性与生态系统多功能性的关系研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 11-23.]
- [16] Ji W Y, Wang J, Huang S Q, et al. Status, remediation outcomes, and countermeasures for acidified cropland in Zhejiang Province[J]. Agricultural Comprehensive Development in China, 2023(9): 29-31. [季卫英, 汪洁, 黄苏庆, 等. 浙江省酸化耕地现状、治理成效及对策建议[J]. 中国农业综合开发, 2023(9): 29-31.]

- [17] Liu J, Liu M, Wu M, et al. Soil pH rather than nutrients drive changes in microbial community following long-term fertilization in acidic Ultisols of Southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(5): 1853-1864.
- [18] 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.]
- [19] Hu W, Zhang Y P, Rong X M, et al. Biochar and organic fertilizer applications enhance soil functional microbial abundance and agroecosystem multifunctionality[J]. *Biochar*, 2024, 6(1): 3.
- [20] Yang Y, Guo Z Y, Pan K, et al. Farmland soil health assessment based on ecosystem multi-functionality[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(2): 461-475. [杨颖, 郭志英, 潘恺, 等. 基于生态系统多功能性的农田土壤健康评价[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 461-475.]
- [21] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [22] Allan E, Bossdorf O, Dormann C F, et al. Interannual variation in land-use intensity enhances grassland multidiversity[J]. *PNAS*, 2014, 111(1): 308-313.
- [23] Wang J, Zhao W W, Zhang X, et al. Effects of reforestation on plant species diversity on the Loess Plateau of China: A case study in Danangou catchment[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 979-989.
- [24] Xun W B, Liu Y P, Li W, et al. Specialized metabolic functions of keystone taxa sustain soil microbiome stability[J]. *Microbiome*, 2021, 9(1): 35.
- [25] Zhang S Q, Gong L X, Fan P, et al. Research progress on the multifunctionality of terrestrial ecosystems: Based on trends, methods and influencing factors[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(5): 1004-1012. [张思琪, 龚玲玄, 樊平, 等. 陆地生态系统多功能性的研究进展: 基于趋势、方法和影响因素的探讨[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(5): 1004-1012.]
- [26] Zhao H Y, Wang H Y. Soil multifunctionality and its driving factors: A review[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2024, 30(3): 615-622. [赵慧英, 王海燕. 土壤多功能性及其驱动因素研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(3): 615-622.]
- [27] Wan B B, Liu T, Gong X, et al. Energy flux across multitrophic levels drives ecosystem multifunctionality: Evidence from nematode food webs[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2022, 169: 108656.
- [28] Zhou W X, Liu C J, He Y S, et al. Effects of three amendments on the growth of *Codonopsis tangshen* and soil biochemical properties in a continuous cropping system[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1): 43-52. [周武先, 刘翠君, 何银生, 等. 3种改良剂对连作川党参生长及土壤生化性质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 43-52.]
- [29] Ibrahim M, Li G, Tang Y T. Biochar effects acidic soil remediation and *Brassica oleracea* L. toxicity—A case study in subtropical area of China[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 23: 101588.
- [30] Ji J H, Li X H, Liu X M, et al. Effects of fertilizer of calcium silicon magnesium potassium on the dynamics of soil acidity and exchangeable base cation in paddy field of Southern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 583-592. [冀建华, 李絮花, 刘秀梅, 等. 硅钙钾镁肥对南方稻田土壤酸性和盐基离子动态变化的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 583-592.]
- [31] Lim S L, Wu T Y, Lim P N, et al. The use of vermicompost in organic farming: Overview, effects on soil and economics[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(6): 1143-1156.
- [32] Jiang J, Song M H. Review of the roles of plants and soil microorganisms in regulating ecosystem nutrient cycling[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(8): 979-988. [蒋婧, 宋明华. 植物与土壤微生物在调控生态系统养分循环中的作用[J]. 植物生态学报, 2010, 34(8): 979-988.]
- [33] Zhao M Y, Liu P, Yao M Z, et al. Progress on the effects of vermicompost on soil environment and crop growth[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2023, 54(7): 91-98. [赵明雨, 刘派, 姚名泽, 等. 蚯蚓粪

- 肥对土壤环境及作物生长影响的研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(7): 91-98.]
- [34] Wang B, Zhang Y C, Wang X Y, et al. Effects of sustained low level organic fertiliser and chemical fertiliser blending on soil fertility and multifunctionality in oasis farmland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(4): 1059-1071. [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.]
- [35] Sun X W, Peng F T, Xiao Y S, et al. Effects of silicon, calcium, potassium and magnesium fertilizer combined with fulvic acid potassium on soil enzyme activity and the growth of young peach trees[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(4): 870-877. [孙希武, 彭福田, 肖元松, 等. 硅钙钾镁肥配施黄腐酸钾对土壤酶活性及桃幼树生长的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(4): 870-877.]
- [36] Li K Y, Song L H, Zhang Y, et al. Effects of biochar application amount and frequency on yellow soil nutrients and key enzyme activities[J]. Environmental Science, 2025, 46(2): 1065-1075. [李开钰, 宋理洪, 张龔, 等. 生物质炭施用量与频率对黄壤养分和关键酶活性的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(2): 1065-1075.]
- [37] Yue L K, Cai Z J, Xu M G, et al. Potassium availability in red soil under long-term fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(6): 1543-1550. [岳龙凯, 蔡泽江, 徐明岗, 等. 长期施肥红壤钾有效性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1543-1550.]
- [38] Wang Q M, Chai Q, Dou X C, et al. Soil microorganisms in agricultural fields and agronomic regulation pathways[J]. Agronomy, 2024, 14(4): 669.
- [39] Huang P W, Wu Q Q, Zhao L F, et al. Long-term effects of inorganic conditioner combined with organic manure in ameliorating acidified soil[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2025, 37(4): 858-868. [黄鹏武, 吴倩倩, 赵丽芳, 等. 无机调理剂配施有机肥治理酸化土壤的长效性研究[J]. 浙江农业学报, 2025, 37(4): 858-868.]
- [40] Chen H, Ren H Y, Liu J J, et al. Soil acidification induced decline disease of *Myrica rubra*: Aluminum toxicity and bacterial community response analyses[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(30): 45435-45448.
- [41] Zhang W, Wang R Z, Li T T, et al. Responses of bacterial and fungal community to long-term nitrogen application in Loess Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(2): 232-241. [张薇, 王润泽, 李彤彤, 等. 黄土区农田土壤细菌和真菌群落对长期施氮的响应特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(2): 232-241.]
- [42] Gao X Y, Li D D, Li Z X, et al. Communities diversity differences and community reconstruction of bacteria and fungi under soil acidification stress[J/OL]. Environmental Science, 1-22, <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202503077>, 2025-08-04. [高欣雨, 李丹丹, 李子旭, 等. 土壤酸化胁迫下细菌和真菌的多样性差异与群落重构[J/OL]. 环境科学, 1-22, <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202503077>, 2025-08-04.]
- [43] Li G L, Li P F, Wu M, et al. Effects of chemical fertilizer combined with organic manure on peanut rhizosphere bacterial community structure and co-occurrence network[J]. Soils, 2022, 54(3): 498-507. [李桂龙, 李朋发, 吴萌, 等. 化肥配施有机肥对花生根际细菌群落结构及共存网络的影响[J]. 土壤, 2022, 54(3): 498-507.]
- [44] Wagg C, Hautier Y, Pellkofer S, et al. Diversity and asynchrony in soil microbial communities stabilizes ecosystem functioning[J]. eLife, 2021, 10: e62813.
- [45] Wang F L, Wang X X, Song N N. Biochar and vermicompost improve the soil properties and the yield and quality of cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in plastic shed soil continuously cropped for different years[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 315: 107425.
- [46] Zhang Z T, Fan Z B, Leng W F, et al. Effects of silicon-calcium-potassium-magnesium fertilizer on wheat soil, yield and nutrient utilization[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2025(5): 141-153. [张占田, 樊兆博, 冷伟锋, 等. 硅钙钾镁肥对小麦土壤、产量、养分利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2025(5): 141-153.]
- [47] Yuan Z W, He D Y, Tang M T, et al. Effects of biochar amendment with phosphorus fertilizer on organic

phosphorus transformation and soybean phosphorus uptake in red soil[J]. Journal of South China Agricultural University, 2025, 46(1): 53-61. [袁紫微, 何丹钰, 唐梦天, 等. 生物炭配施磷肥对红壤有机磷周转与大豆磷吸收的影响[J]. 华南农业大学学报, 2025, 46(1): 53-61.]

[48] Zhang M L. Effects of applying calcium-magnesium soil conditioner on acidic red soil in Fujian[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021, 58(2): 283-288. [张明来. 福建酸性红壤施用钙镁型土壤调理剂的效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2021, 58(2): 283-288.]

[49] Vos H M J. Earthworm-enhanced phosphorus availability in soil: From unravelling the mechanisms to assessing its significance[D]. Wageningen University and Research, 2022. DOI:10.18174/567878

[50] Ming R T, Wan F, Na L P, et al. Effect of soil acid reduction and fertilizer cultivation under conditioner application: Meta-analysis based on acid soil improvement studies in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(2): 400-410. [明润廷, 万方, 那立苹, 等. 改良剂施用下的土壤降酸培肥效果——基于中国酸性土壤改良研究的Meta分析[J]. 土壤学报, 2025, 62(2): 400-410.]

[51] Sun L, Yue Y, Hu T X. Research progress on the effects of disturbance on ecosystem multifunctionality[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(15): 6066-6075. [孙龙, 岳阳, 胡同欣. 干扰对生态系统多功能性的影响研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42(15): 6066-6075.]

(责任编辑: 檀满枝)