



6种土壤调理剂对酸性水稻土改良效果的综合评价

杨右君, 冯浪佳, 任科润, 王进进, 张玉龙, 李文彦, 李永涛, 胡峥

引用本文:

杨右君, 冯浪佳, 任科润, 等. 6种土壤调理剂对酸性水稻土改良效果的综合评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2026, 43(1): 153–162.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0969>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同土层复配方案对土壤水稳性团聚体及有机质的影响

黄云鑫, 李裕瑞, 刘彦随, 张轩畅, 常贵蒋, 冯巍仑

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 894–903 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0455>

自然降雨条件下不同施肥模式和耕作方式对坡耕地紫色土肥力质量的影响

彭石磊, 何丙辉, 王润泽, 唐柄哲

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 318–326 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0045>

长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

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

油菜绿肥翻压还田对新疆盐碱土壤的改良效果研究

刘慧, 李子玉, 白志贵, 刘建国

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 914–923 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0566>

3种改良剂对连作川党参生长及土壤生化性质的影响

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

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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨右君, 冯浪佳, 任科润, 等. 6种土壤调理剂对酸性水稻土改良效果的综合评价[J]. 农业资源与环境学报, 2026, 43(1): 153-162.
YANG Y J, FENG L J, REN K R, et al. Comprehensive evaluation of the effects of six soil conditioners on the amelioration of acidic paddy soils[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2026, 43(1): 153-162.



开放科学 OSID

6种土壤调理剂对酸性水稻土改良效果的综合评价

杨右君^{1,2}, 冯浪佳^{1,2}, 任科润^{1,2}, 王进进^{1,2}, 张玉龙^{1,2}, 李文彦^{1,2}, 李永涛^{1,2}, 胡峥^{1,2*}

(1. 华南农业大学资源环境学院, 农业农村部华南耕地保育重点实验室, 广州 510642; 2. 华南农业大学资源环境学院, 广东省农业资源利用重点实验室, 广州 510642)

摘要:为评价6种碱性土壤调理剂对酸性土壤改良的影响,本研究以广东省韶关市水稻土为供试土壤,进行为期90 d的室内培养试验。试验选用6种经农业农村部登记的土壤调理剂并设置7个处理,分别为:CK(不施调理剂)、X1(燃煤烟气脱硫石膏)、X2(钼尾矿、白云石)、X3(硝酸磷肥副产品)、X4(牡蛎壳、石灰石、甜叶菊渣)、X5(牡蛎壳)、X6(白云石、钾长石、石灰石)。选择pH、有机质、速效钾、有效磷、碱解氮、水稳性土壤大团聚体、阳离子交换量(CEC)和土壤呼吸强度作为土壤质量评价指标,并通过主成分分析和土壤质量指数法(SQI)进行综合评价。结果表明:与CK相比,6种调理剂处理土壤pH值提升了1.09~1.66个单位,有机质和CEC分别增加3.62%~12.15%和7.50%~16.25%,但碱解氮下降4.24%~10.28%。其中,X1、X3和X5处理显著提高有效磷12.69%~40.10%;X1、X3、X5、X6处理导致速效钾下降5.61%~10.01%;X4处理含有机物质能显著提高土壤呼吸强度42.62%,其他处理则降低10.84%~54.95%;X1、X3、X4、X6处理土壤大团聚体的含量提高2.63%~7.89%。基于SQI评价,燃煤烟气脱硫石膏处理和白云石、钾长石、石灰石处理对酸性水稻土的改良效果最佳,土壤pH、有机质、有效磷和CEC对土壤质量提升的贡献率较大,是影响土壤质量改良的主要因素。

关键词:水稻土;土壤酸化;土壤调理剂;主成分分析;土壤质量指数;综合评价

doi: 10.13254/j.jare.2024.0969

Comprehensive evaluation of the effects of six soil conditioners on the amelioration of acidic paddy soils

YANG Youjun^{1,2}, FENG Langjia^{1,2}, REN Kerun^{1,2}, WANG Jinjin^{1,2}, ZHANG Yulong^{1,2}, LI Wenyan^{1,2}, LI Yongtao^{1,2}, HU Zheng^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Arable Land Conservation (South China), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Province Key Laboratory for Agricultural Resources Utilization, College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The aim of this study is to evaluate the effects of six alkaline soil conditioners on improving acidic soil quality. An indoor incubation experiment was conducted using paddy soil from Shaoguan City, Guangdong Province for 90 days. Six soil conditioners registered by the Ministry of Agriculture and Rural Affairs were used in the experiment and seven treatments were set up: CK (no conditioner), X1 (desulfurization gypsum from coal-fired flue gas), X2 (molybdenum tailings and dolomite), X3 (by-product of nitrophosphate fertilizer), X4 (oyster shells, limestone and stevia residue), X5 (oyster shells), and X6 (dolomite, potassium feldspar and limestone). Soil quality assessment indicators were selected as pH, organic matter, available potassium, available phosphorus, alkali-hydrolyzable nitrogen, water-stable soil macroaggregates, cation exchange capacity (CEC) and soil respiration. A comprehensive evaluation was conducted through principal component analysis and soil quality index (SQI) method. The results showed that compared with CK, the pH of the soil treated with the six conditioners increased by 1.06-1.09 units, organic matter and CEC increased by 3.62%-12.15% and 7.50%-16.25%, respectively, but the alkali-hydrolyzable nitrogen decreased by 4.24%-10.28%. Among them, treatments X1, X3 and X5 significantly increased available phosphorus by 12.69%-40.10%; X1, X3, X5 and X6 led to a decrease in available potassium by 5.61%-10.01%; treatment X4 containing organic matter significantly increased the soil respiration intensity by 42.62%, while the other five

收稿日期: 2024-12-09 录用日期: 2025-03-11

作者简介: 杨右君(1998—), 女, 江西赣州人, 硕士研究生, 研究方向为耕地质量。E-mail: 2901898771@qq.com

*通信作者: 胡峥 E-mail: z.hu@scau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1901301)

treatments decreased by 10.84%–54.95%; treatments X1, X3, X4 and X6 increased the content of soil macroaggregates by 2.63%–7.89%. Based on the *SQI* evaluation, desulfurization gypsum from coal-fired flue gas treatment and dolomite, potassium feldspar and limestone treatment had the best improvement effects on acidic paddy soil. Soil pH, organic matter, available phosphorus and CEC made significant contributions to the improvement of soil quality and were identified as the main factors influencing soil quality enhancement.

Keywords: paddy soil; soil acidification; soil conditioner; principal component analysis; soil quality index; comprehensive evaluation

土壤酸化是土壤退化的主要表现形式之一,已成为我国南方地区农业生产的重要限制因子^[1]。酸性土壤主要分布于我国南方红壤区,其中pH值低于6.5的土壤占全国土地总面积的32.4%,酸化率由2.6 keq·(hm²·a)⁻¹增长至7.6 keq·(hm²·a)⁻¹^[2-3]。土壤酸化过程主要源于土壤中氢离子与盐基离子的迁移和转化^[3]。这一过程不仅导致土壤肥力下降、耕层变薄及作物减产,还可能加剧重金属污染等环境问题。在自然因素和人类活动的共同作用下,我国土壤酸化趋势愈发严峻,对粮食安全与农业可持续发展构成了重大威胁。

近年来土壤酸化和重金属污染问题被广泛关注,添加土壤调理剂作为应对土壤酸化与重金属安全利用的共性技术被广泛推广应用。根据农业农村部种植业管理司肥料登记数据,截至2022年5月,用于酸性土壤改良的土壤调理剂数量占比达78%,是我国最主流的土壤调理剂产品,其主要原料为石灰石、白云石、钾长石、牡蛎壳等富含Si、Ca的物质,这些物质能溶解释放水溶性硅酸盐和碱基离子,与土壤溶液中的H⁺和Al³⁺发生置换反应,从而缓解土壤酸化^[3-4]。随着土壤调理剂产业进步,越来越多的废弃物资源也被作为土壤调理剂的主料或副料。废弃物类调理剂主要分为无机和有机两大类,无机废弃物(如燃煤烟气脱硫石膏、硝酸磷肥副产品)富含Ca、Mg等元素,可提高土壤pH并促进团聚体形成;有机废弃物(如甜叶菊渣)施入土壤能提升有机质含量,改善水分及养分状况,同时优化微生物群落结构,促进碳、氮循环^[5]。关于调理剂对酸性土壤改良效果的研究颇多,但大部分研究侧重于对土壤pH及单项指标改良成效的描述和分析^[6-10],而对施加调理剂后酸性土壤质量的综合评价研究仍较为有限。综合评估不同土壤调理剂的改良成效,是深入探究调理剂对土壤质量影响的重要途径。因各类指标单位不同难以直接比较调理剂改良效果的优劣,采用主成分分析与隶属函数分析相结合的方法进行综合评价更具实际意义。目前,已有将该方法应用于调理剂用量对土壤肥力影响评价的实例,并取得了科学合理的评价结果^[11]。

基于上述背景,本研究选用6种不同原料的土壤调理剂,以韶关市酸性农田水稻土为供试土壤进行条件培养试验,探究不同调理剂对土壤物理结构、化学养分和生物功能的影响及引发的变化规律。同时,借助主成分分析和隶属函数对不同调理剂改良酸性土壤的效果进行综合评价。在土壤质量评价研究中,选择土壤有机质、pH、CEC、氮磷钾含量及其速效养分、土壤结构以及微生物活性等使用频率较高的评价指标^[12-14],有助于更系统地了解土壤调理剂改良酸性土壤质量的作用,进而为酸性土壤的科学化改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究供试土壤采自广东省韶关市(113°35′20″E, 24°39′10″N)双季稻种植区的酸性水稻土,清除表层杂物后,采用五点法垂直采集0~20 cm耕层土壤,混合均匀并通过四分法保留约1.5 kg土样,带回实验室备用。供试土壤基本性质如下:土壤质地为壤质黏土,pH值为5.24,碱解氮含量为101.50 mg·kg⁻¹,有效磷含量为54.80 mg·kg⁻¹,速效钾含量为181.20 mg·kg⁻¹,有机质含量为28.34 g·kg⁻¹,全氮含量为1.38 g·kg⁻¹,全磷含量为0.48 g·kg⁻¹,全钾含量为7.72 g·kg⁻¹。

供试土壤调理剂:本研究选择以下6种农业农村部已登记的土壤调理剂产品作为研究对象,产品详细信息可通过农业农村部肥料登记管理系统(<http://www.fertilizer.org.cn/>)查询。X1~X5是以不同废弃物资源为主要原料生产的土壤调理剂,X6是以传统矿物源为主要原料生产的土壤调理剂的典型代表。调理剂概况如表1所示。

1.2 试验设计

条件培养试验采用直径为10 cm、高为15 cm的圆柱形塑料培养盒,培养盒配备有盖子和通气孔。供试土壤经自然风干后过2 mm筛去除石块和植物根系等杂物,每个培养盒装入1.2 kg过筛后的土壤,调理剂按土壤质量的0.5%进行施用。试验共设置7个处理,包括空白组CK以及编号为X1~X6的处理组,每

表1 供试土壤调理剂概况
Table 1 Overview of the tested soil conditioners

处理 Treatment	主要原材料 Main raw material	主要成分 Main ingredient	登记证号 Registration certificate number	pH
X1	燃煤烟气脱硫石膏	CaO≥25.0%, S: 12.0%~18.0%, 有机质≥5.0%, F≤0.05%, Cl≤0.5%, Na≤0.2%	农肥(2018)准字 10391 号	12.47
X2	钼尾矿、白云石	CaO≥20.0%, MgO≥12.0%, SiO ₂ ≥12.0%	农肥(2016)准字 5339 号	10.28
X3	硝酸磷肥副产品	CaO≥40.0%	农肥(2017)准字 6164 号	7.74
X4	牡蛎壳、石灰石、甜叶菊渣	CaO≥20.0%, SiO ₂ ≥10.0%, 有机质≥12.0%	农肥(2018)准字 9965 号	11.04
X5	牡蛎壳	CaO≥40.0%	农肥(2018)准字 9555 号	10.02
X6	白云石、钾长石、石灰石	CaO≥33.0%, MgO≥5.0%, SiO ₂ ≥28.0%	农肥(2018)准字 9667 号	10.04

个处理设置4个重复。将调理剂与土壤充分搅拌均匀后装入培养盒,随后转移至阴暗处,培养温度控制在(25±2)℃。每隔2 d采用称质量法补充去离子水,确保土壤含水量稳定在田间持水量的60%。培养周期为90 d,培养结束后采集第90天的土壤样品进行相关指标测定。

1.3 测定方法

土壤pH值采用电位法测定(土水比为1:2.5),有机质采用重铬酸钾容量法-外加加热法,CEC采用1.0 mol·L⁻¹醋酸铵交换法,碱解氮采用碱解氮扩散法,有效磷采用0.5 mol·L⁻¹碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,速效钾采用1.0 mol·L⁻¹乙酸铵浸提-火焰光度法,土壤呼吸强度和水稳性大团聚体分别采用氢氧化钠吸收法和湿筛法测定。指标检测参考标准如表2所示。

1.4 综合评价方法

本研究选取pH、有机质、速效钾、有效磷、碱解氮、水稳性土壤大团聚体、土壤呼吸强度和CEC作为土壤质量评价指标,借助主成分分析方法针对不同处理所测得的土壤评价指标进行降维操作,进而提取出特征值>1的主成分以及公因子方差,以分析各指标对原始信息解释程度的贡献率并计算各指标权重^[15]。

表2 指标测定参考标准

Table 2 Indicator measurement methods and reference standards

测定指标 Measurement indicator	参考标准 Reference standard
土壤pH值	NY/T 1121.2—2006
调理剂pH值	NY/T 1973—2010
土壤有机质	《土壤农化分析》(第三版)
土壤有效磷	NY/T 1121.7—2014
土壤速效钾	NY/T 889—2004
土壤碱解氮	《土壤农化分析》(第三版)
阳离子交换量	GB7863—1987
土壤呼吸强度	GB/T 32725—2016
水稳性大团聚体	NY/T 1121.18—2008

然后利用隶属函数计算各处理土壤指标的隶属度值,最后通过加权求和模型计算土壤质量指数(SQI)分析调理剂对土壤质量的改善情况。

(1)通过主成分分析提取的公因子方差能反映各指标对总体方差的贡献程度,其数值越大贡献越大。单个指标权重由其公因子方差占公因子方差总和的比例确定 $W_i^{[16]}$ 。

(2)隶属函数:为消除单位和量纲的影响,对数据进行标准化处理。根据指标与土壤质量之间的关系选择上升型隶属函数(越多越好)^[15,17],华南地区土壤普遍呈酸性(供试土壤pH<5.5)同样适用于该函数。如公式(1)所示:

$$S_i = \begin{cases} 1.0, X \geq X_2 \\ 0.1 + 0.9 \times \frac{X - X_1}{X_2 - X_1}, X_1 < X < X_2 \\ 0.1, X \leq X_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: X 为指标实测值; X_1 和 X_2 分别为指标实测值的最小值和最大值。

(3)土壤质量指数(SQI)是通过各指标权重和得分采用加权求和模型计算得出,能综合反映土壤功能;SQI取值范围在0~1之间,SQI值越接近1,表明土壤质量越好。SQI值可为土壤质量状况分析提供依据,其表达式^[16]如下:

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \times S_i \quad (2)$$

式中: W_i 为指标权重; S_i 为指标隶属度值; n 为评价指标数量。

1.5 数据处理

本研究借助Excel 2019和SPSS 26.0对数据集进行汇总和分析。首先,对数据集进行单因素方差分析(ANOVA),对每个检测指标进行Duncan多重比较检验,以评估显著性水平。实验数据以平均值±标准差表示。此外,还进行了主成分分析和相关性分析,以确定影响土壤质量的最敏感关键因素。制图利用

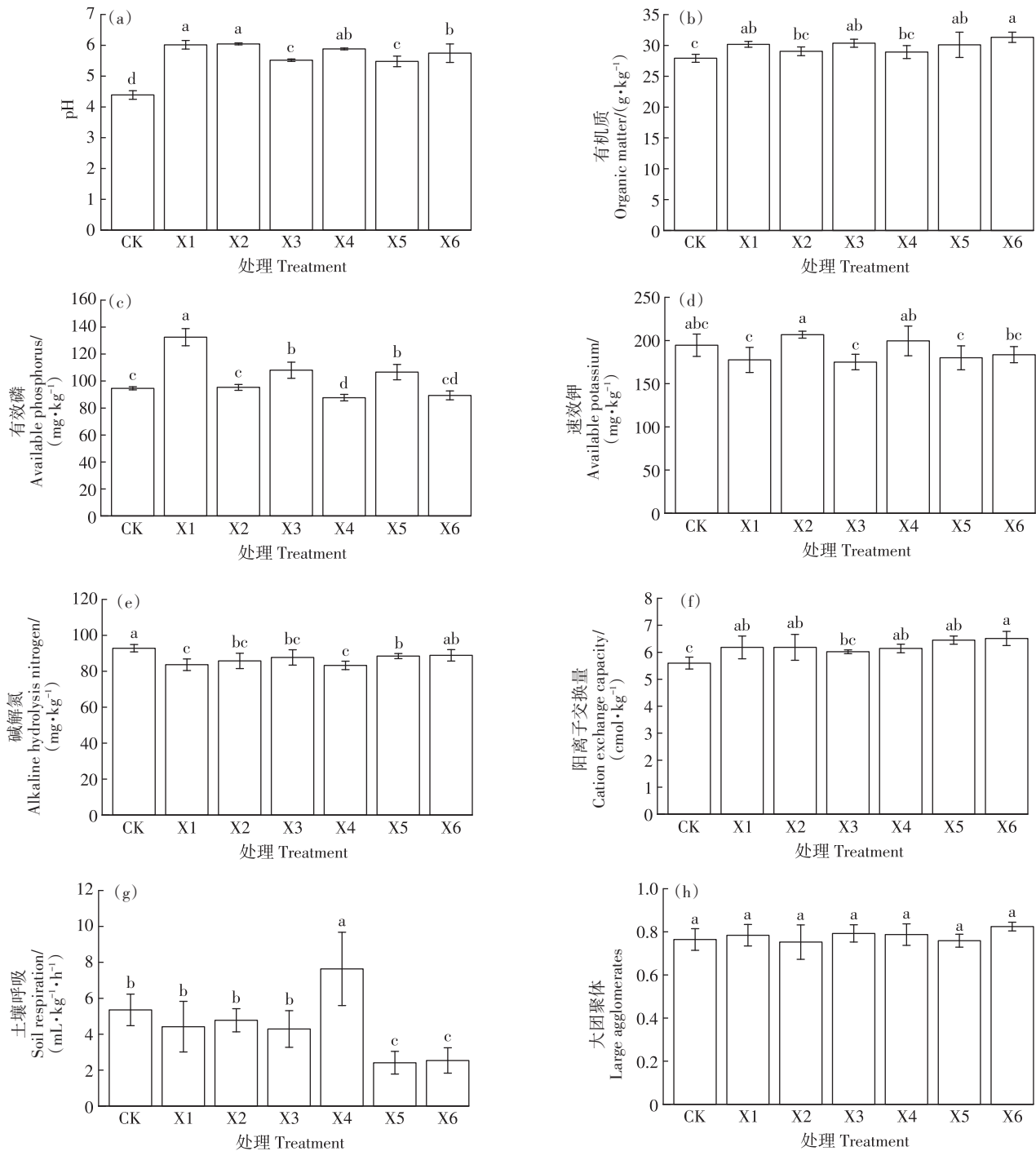
Origin 2024b 完成。

2 结果与分析

2.1 不同土壤调理剂对供试土壤性质的影响

如图 1a 所示,添加调理剂后,土壤 pH 值均显著

提升($P<0.05$)。与 CK 相比,经 6 种调理剂处理后的土壤 pH 值提升 1.09~1.66 个单位。其中, X1 和 X2 处理土壤 pH 值的提升效果最佳,其 pH 值分别提高了 1.63 个和 1.66 个单位;其次是 X4 和 X6 处理分别提高了 1.39 个和 1.36 个单位;提升效果相对较弱的是 X3



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

图 1 添加调理剂对供试土壤性质的影响

Figure 1 Effects of addition of conditioners on the properties of test soils

和X5处理,分别提升了1.13个和1.09个单位。

如图1b所示,经调理剂处理后有机质含量出现不同程度的提高,6种调理剂处理下有机质增加了3.62%~12.15%。相较于CK,X1、X3、X5和X6处理下有机质含量均显著增加($P<0.05$),且4个处理之间没有显著差异。其中X6处理后有机质含量最高,达到了 $31.30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;而X2和X4处理与CK相比无显著差异($P>0.05$)。

由图1c所示,相较于CK,经X1、X3、X5处理土壤有效磷含量显著增加($P<0.05$),增幅为12.69%~40.10%,其中,以X1处理效果最佳,有效磷含量提高了40.10%,其他两组差异不大。X2处理与CK相比差异不显著($P>0.05$)。由图1d所示,经X2处理速效钾含量最高,达 $206.71\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,X3处理最低,为 $175.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。各处理与CK之间差异不显著($P>0.05$),但X2处理速效钾含量显著高于除X4以外的其他处理($P<0.05$),X1、X3、X5和X6 4个处理组速效钾含量降低10.91~19.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,降幅为5.61%~10.01%。经调理剂处理后,土壤碱解氮含量均呈现不同程度的下降,降幅范围为4.24%~10.28%。除X6处理与CK相比没有显著下降外,其他5个处理均显著降低了4.38~9.54 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 碱解氮含量($P<0.05$)。

经调理剂处理后,土壤CEC呈现不同程度的提高。其中,X6处理CEC含量最高,达 $6.51\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,X3处理CEC含量最低,为 $6.02\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,且X6处理显著($P<0.05$)高于X3处理。与CK相比,X1、X2、X4、

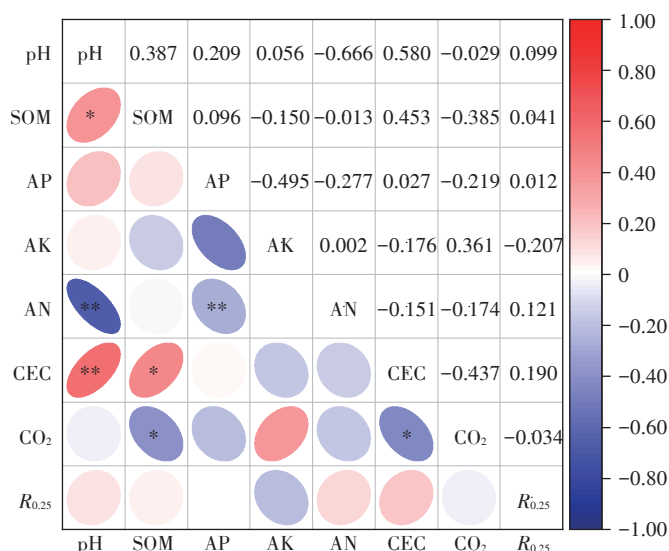
X5、X6处理下土壤CEC含量显著($P<0.05$)提高了9.96%~16.25%,且各处理间没有显著差异;而X3处理的土壤CEC含量仅提高7.50%,未达显著水平。

与CK相比,添加调理剂后X4处理的土壤呼吸强度显著提高42.62%($P<0.05$);X5和X6处理的土壤呼吸强度显著降低了54.95%和52.52%($P<0.05$);其余处理与CK没有明显差异($P>0.05$),分别降低10.84%~19.81%。

与CK相比,添加调理剂对土壤大团聚体的形成没有显著影响($P>0.05$)。其中X1、X3、X4和X6处理增加了2.63%~7.89%的土壤大团聚体含量,促进了大团聚体的形成;而X2导致土壤大团聚体含量下降了1.32%。

2.2 调理剂处理下各指标的相关性分析

如图2所示,pH与碱解氮之间的相关系数为-0.666,二者呈显著负相关($P<0.01$),而与有机质、CEC、其他可利用养分和大团聚体呈正相关,这表明调理剂在提高土壤pH与其他养分元素的同时可能导致碱解氮含量下降。土壤CEC与pH、有机质呈显著正相关,表明调理剂在提升土壤pH值和有机质含量的同时,能协同增强土壤阳离子交换能力。有效磷与速效钾呈极显著负相关($P<0.01$),相关系数为-0.495,表明调理剂在提高有效磷含量同时会降低速效钾含量。土壤呼吸与速效钾之外的其他指标均呈负相关,其中负影响较显著的指标有土壤有机质和CEC,这可能是调理剂通过直接影响pH和速效养分,从而间接影响了



SOM:土壤有机质;AP:有效磷;AK:速效钾;AN:碱解氮;CEC:阳离子交换量;CO₂:土壤呼吸;R_{0.25}:水稳性大团聚体。
* $P<0.05$;** $P<0.01$ 。下同。

图2 土壤质量指标间 Pearson 相关性分析热图

Figure 2 Pearson correlation analysis between soil quality indicators

微生物活动,导致土壤呼吸速率下降。

2.3 主成分分析

由表3可知,有4个特征值 ≥ 1 的主成分,累计贡献率达到81.59%,这意味着这4个主成分涵盖了土壤质量指标的主要信息。PC1贡献率为31.09%,其中土壤pH、有机质、CEC的贡献较大,分别表征土壤的酸碱特性、肥力基础与保肥能力,反映土壤维持良好生态环境与稳定肥力供应的综合特质。PC2贡献率为20.94%,其中速效钾、碱解氮和土壤呼吸强度贡献较大,表征土壤的速效养分供应能力以及土壤中微生物的活性与通气性状况。PC3贡献率为16.74%,贡献最大的是有效磷,表征土壤对植物可直接吸收利用磷素的供应状况。PC4贡献率为12.83%,水稳性大团聚体的贡献最大,表征土壤结构的稳定性与通气性状况,是评估土壤质量和土壤生态系统健康状况的重要指标。权重系数从大到小依次为水稳性大团聚体>pH>碱解氮>有效磷>速效钾>CEC>土壤呼吸速率>有机质。

提取前两个主成分绘制主成分分析图(图3),PC1和PC2累计方差贡献率为52.03%。CK和调理剂处理下土壤质量有较好的区分度,即两组之间存在明显差异,表明调理剂能显著增强土壤质量;组内各样点相对聚集表明重复性较好,即组内差异较小。土壤pH、有机质、CEC对PC1的贡献最大,且三者呈正相关;土壤速效钾、碱解氮和土壤呼吸对PC2的贡献最大,且碱解氮与土壤呼吸呈负相关。

2.4 6种土壤调理剂对供试土壤的综合评价

土壤质量指数是对土壤综合特性的量化表征,可反映添加土壤调理剂对酸性土壤质量的改良效果。图4呈现了不同处理下的土壤质量指数以及各评价指

标的贡献率。*SQI*按大小排序为: $X1(0.597)=X6(0.597)>X2(0.552)>X4(0.548)>X3(0.537)>X5(0.526)>CK(0.428)$ 。与CK相比,除X5处理外,其余处理均能显著提高土壤质量。CK的*SQI*为 0.428 ± 0.009 ,其中土壤pH、有机质、有效磷和CEC的贡献率均低于10%。添加调理剂处理后,各指标贡献率发生显著变化:pH贡献率提升至18.4%~24.4%,有机质提升至7.4%~14.1%;X1、X3和X5处理有效磷贡献率分别提高了18.8%、11.4%和11.1%;CEC贡献率提升至11.5%~17.9%。由此表明,上述4个指标的改善程度是影响土壤质量的主要因素。其中,X1和X6处理提升效果最佳;另外,X1处理可显著提高pH和有效磷含量,而X6处理能显著提高有机质和CEC含量,并且这四个指标也是提升土壤质量的关键指标。

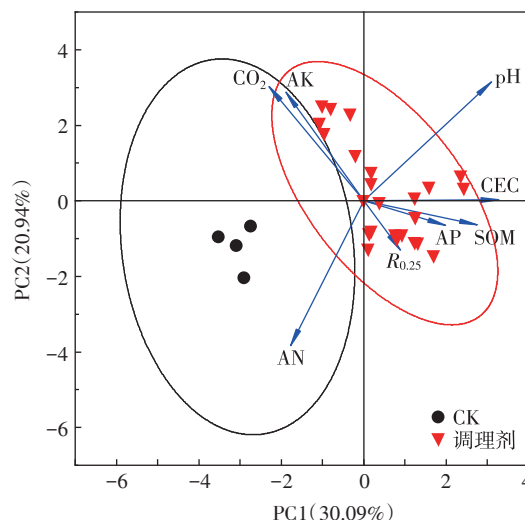


图3 主成分分析图

Figure 3 Principal component analysis

表3 各评价指标主成分分析结果和Norm值

Table 3 Results of principal component analysis and Norm value of each evaluation index

指标 Index	PC1	PC2	PC3	PC4	Norm	公因子方差 Common factor variance	权重 Weight
pH	0.731	0.613	0.088	0.083	1.406	0.925	0.142
SOM	0.651	-0.128	0.371	-0.260	1.155	0.646	0.099
AP	0.464	-0.125	-0.763	-0.049	1.159	0.815	0.125
AK	-0.445	0.554	0.514	-0.128	1.174	0.786	0.120
AN	-0.416	-0.745	0.369	0.004	1.242	0.865	0.132
CEC	0.775	0.003	0.417	0.051	1.315	0.778	0.119
CO ₂	-0.542	0.590	-0.132	0.322	1.201	0.763	0.117
R _{0.25}	0.234	-0.228	0.152	0.906	1.047	0.951	0.146
特征值	2.487	1.675	1.339	1.026			
总方差/%	31.092	20.938	16.735	12.829			
累积方差/%	31.092	52.030	68.766	81.594			

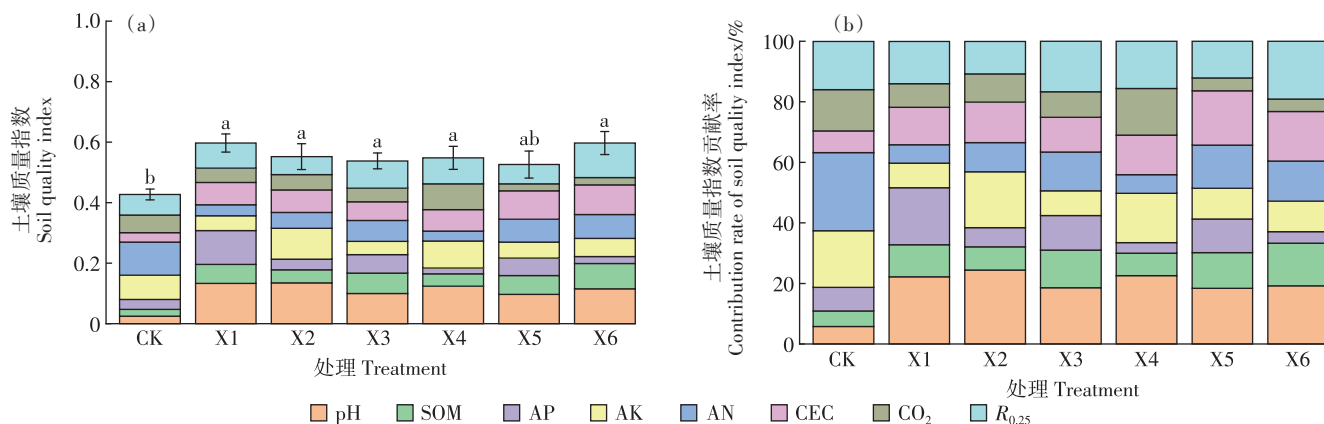


图4 不同处理土壤质量指数及各评价指标贡献率

Figure 4 Soil quality indices of different treatments and the contribution rate of each evaluation index

3 讨论

3.1 添加调理剂对土壤质量指标的影响

土壤调理剂是改善耕地质量的重要手段之一。从试验结果来看,土壤质量在施用调理剂后均有所提升,且6种调理剂均能显著提高土壤pH。本试验使用的均为碱性调理剂,pH在7.74~12.47之间。碱性调理剂一般含CaO和MgO,可与土壤中的 Al^{3+} 、 H^+ 反应达到降酸目的,同时向土壤补充钙、镁等盐基离子,提高土壤CEC^[11]。其中,X1和X2提升效果最佳,X1原料燃煤烟气脱硫石膏含 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 等成分,能交换土壤中的 H^+ 和 OH^- ,调土壤酸碱缓冲能力,且该调理剂pH值最高。X2的原料钼尾矿含有丰富的矿产资源,可回收白云石、长石等在内的多种矿物,而白云石可以中和土壤溶液中的酸性,形成镁盐和钙盐提高pH^[18]。田中学等^[19]的研究表明,施用1%白云石、牡蛎壳和钾长石pH分别提高了42.3%、45.3%和42.3%,CEC分别提高了15.0%、60.0%和26.3%。

6种调理剂均能提高有机质含量,以X1、X3、X5、X6提升效果最显著($P<0.05$)。试验发现,X4处理(牡蛎壳、石灰石、甜叶菊渣)有机质含量 $\geq 12\%$,X1(燃煤烟气脱硫石膏)有机质含量 $\geq 5\%$,但X4对有机质的影响不如X1显著。这可能与牡蛎壳和石灰石的主要成分是碳酸钙有关,对土壤化学性质的改变相对较为单一,而甜叶菊渣中的有机成分(如木质素、纤维素等)相对较难分解,对有机质的直接和间接影响途径不如脱硫石膏丰富;另外,白云石会促进土壤有机碳的矿化,造成有机质含量略有下降^[18,20-21]。pH提高有利于微生物生长和繁殖,提高生物活性和微生物量,以此提高有机质。调理剂通过改善土壤结构也会促进有

机质的分解。X1、X3、X5对有效磷含量的提高较为显著。主要原因在于调理剂能改善土壤理化性质,提升土壤渗透性与保水性,有助于促进土壤微生物的生长和繁殖,进而推动土壤中有机磷与无机磷的矿化及溶解^[22]。而X2处理(硝酸磷肥副产品)本就含磷元素,磷矿中的 P_2O_5 通过硝酸分解转化为可被植物吸收的形式。不过,X4会降低有效磷含量,可能调理剂中的 Ca^{2+} 易与 PO_4^{3-} 结合生成 $Ca_3(PO_4)_2$ 沉淀,降低磷的有效性^[23]。调理剂对速效钾的影响并不显著,X1、X3、X5处理下速效钾含量下降较明显。X1脱硫石膏施入土壤会促进 K^+ 被土壤胶体吸附;石灰已被证明可提高pH,但速效钾和有效磷会随着石灰用量的增加而降低,而且会引起土壤钾、镁的淋失^[24]。速效钾含量下降也与调理剂中的 Ca^{2+} 有关,它即能与 Na^+ 发生置换反应,又可置换土壤中的 K^+ ^[23]。本试验中添加牡蛎壳对速效钾含量没有显著影响,与以往研究结果相似^[25]。施用6种调理剂都会降低碱解氮含量。几种调理剂所携带的氮素含量较低甚至没有,所以其对碱解氮的直接影响较小,可能通过影响pH、微生物等间接影响碱解氮含量。在本研究中,碱解氮会随着pH值的升高而下降与胡敏等^[24]的结果一致,在石灰用量 $>2.4 g \cdot kg^{-1}$ 时硝态氮含量显著下降。此外,碱解氮在土壤中稳定性较差,容易受土壤水热状况和微生物活动的作用而发生变化。6种调理剂均能提高CEC含量,这是因土壤颗粒表面带负电荷,其吸附的 H^+ 易被 OH^- 取代,正负电荷相互吸引,更多的阳离子被吸附在土壤颗粒表面;调理剂可改变土壤颗粒结构,增加土壤的比表面积,使土壤具有更强的吸附能力,从而提高CEC。林小兵等^[26]的研究表明,原料含白云石、石灰石和牡蛎壳等矿物源调理剂能提高

CEC,与本试验结果相同。pH和有机质与CEC关系紧密,土壤胶体的可变负电荷量会随pH的上升而提高,CEC也随之增加。有机质本身带负电荷,它能够吸附和交换阳离子,而CEC会影响有机质的分解与转化,二者相互影响、相互促进^[19,27]。X4处理显著提高了土壤呼吸,而X5和X6显著降低了土壤呼吸。究其原因,可能是X4原料中的甜叶菊渣具有提高土壤微生物功能和优化土壤结构的作用,促进土壤碳、氮循环^[20]。本试验中牡蛎壳会降低土壤呼吸速率,与Ji等^[28]提出的牡蛎壳可通过提高土壤pH和酶活性来促进土壤呼吸的结果相悖,可能与供试土壤本底的生物量和生物多样性有关。黏粒含量高且有机质充足的土壤更有利于团聚体的形成,因为这类土壤能够提供充足的胶结物质。研究表明,磷石膏和石灰配施能够促进大团聚体形成^[27]。土壤大团聚体的形成是一个缓慢的过程,通常需要较长时间才能显现显著效果。本试验所用调理剂小分子有机物质含量有限,较难与无机成分形成稳定的结构体,因此对土壤水稳定性团聚体的形成贡献有限。

本研究中,部分调理剂的施用会导致土壤氮、钾含量及呼吸速率降低。为优化改良效果,建议在调理剂施用过程中配施氮、钾复合肥以补充养分,同时增施有机肥或微生物菌剂,以激活土壤微生物活性,促进养分循环与呼吸速率提升,从而稳定土壤肥力与生态功能,保障植物健康生长。此外,供试土壤有效磷含量已处于较高水平,而X1、X3、X5处理显著增加了有效磷含量,增加磷素通过地表径流或淋溶进入水体的风险,引发水体富营养化等环境问题。因此,在实际应用中,应根据土壤磷素本底值及作物需求合理选择调理剂,并配合磷素管理措施(如优化施肥量、减少磷肥投入等),以降低环境风险,实现农业生产的可持续性。

3.2 不同调理剂处理土壤质量综合分析

土壤质量评价涵盖大量指标,指标间关系复杂,仅靠简单或单一的统计方式难以实现科学、准确地评价。为此,本研究采用主成分分析和隶属函数分析相结合的方法,将复杂的多指标数据转化为易于解释的综合评价结果。本试验以韶关市酸性水稻土为研究对象,选取的评价指标涵盖了土壤理化指标、生物指标及结构障碍指标,这与大多数研究^[12,14]一致。

相关性分析表明,pH与碱解氮呈显著负相关。主要是由于随着pH值的增加,硝化作用受到抑制,同时氮的固定作用得到增强,这两种效应共同导致了碱

解氮含量下降^[29]。土壤CEC与pH、有机质呈显著正相关,调理剂可以通过提升土壤pH和有机质含量,有效增加土壤胶体的负电荷数量,进而增强了土壤对阳离子的吸附能力^[30]。有效磷与速效钾呈显著负相关,与调理剂对土壤中磷和钾的离子竞争吸附以及矿物沉淀等机制有关。综合评价结果表明,与CK相比,除X5(牡蛎壳)外其他调理剂处理均能显著提高土壤质量。其中,X1(燃煤烟气脱硫石膏)和X6(白云石、钾长石与石灰石)处理的改良效果最佳,其SQI值均为0.597。不同调理剂对土壤质量的改良效果差异较大:X1处理在提升pH和有效磷方面贡献较大,与其富含的Ca和S元素能够快速中和土壤酸性并促进磷的有效性有关;而其对速效钾、碱解氮和土壤呼吸的贡献较小,与Ca²⁺与NH₄⁺的竞争吸附有关^[31]。X6处理在提升pH、有机质、CEC和水稳性大团聚体方面效果较好,其富含Ca和Mg元素能够中和土壤酸性,改善土壤环境并促进有机质的积累与稳定;但其对有效磷和土壤呼吸的贡献较小,可能由于其主要成分CaCO₃容易与磷形成磷酸钙沉淀,且钾长石难以活化磷,加之X6调理剂为无机矿物质,缺乏有机成分,对微生物群落结构影响小,所以促进作用有限。X2处理在提升pH和速效钾方面贡献较大,其原因在于原料白云石和钼尾矿的碱性成分及钾元素的补充;但由于缺乏有机物料、石灰石对磷的固定作用以及Ca²⁺对氮素形态转化的影响,其对有机质、有效磷、碱解氮和土壤呼吸贡献较小。X3处理在提升pH和水稳性大团聚体方面表现较好,主要得益于其Ca²⁺能够置换土壤胶体上的H⁺和Al³⁺,缓解土壤酸化并促进土壤颗粒凝聚;但由于调理剂钾素含量较低及Ca²⁺竞争吸附和抑制作用,导致其对速效钾和土壤呼吸贡献较小。X4处理在提升pH、速效钾、土壤呼吸和水稳性大团聚体方面表现较好,主要归因于牡蛎壳和石灰石的碱性成分、Ca²⁺的团聚作用以及甜叶菊渣含有有机物质;但由于石灰石对磷的固定作用以及甜叶菊渣分解速度较慢,其对有机质、有效磷和碱解氮贡献较小。X5处理提升pH、有机质和CEC较好,这得益于牡蛎壳中丰富的CaCO₃能够中和土壤酸性,同时Ca²⁺增加土壤胶体负电荷,增强土壤对阳离子的吸附能力;然而,由于缺乏直接增加有效磷的物质且间接影响有限,加之对微生物刺激作用较弱,难以显著提升微生物活动强度,对有效磷和土壤呼吸的贡献较小。综上可知,土壤pH、有机质、有效磷和CEC对土壤质量提升的贡献率较大,是影响土壤质量提升的主要因素。在各类改良

材料中,燃煤烟气脱硫石膏(X1)和白云石、钾长石与石灰石(X6)对酸性水稻土的改良效果最佳,可作为华南地区酸性农田改良的首选材料。在后续田间推广应用,应根据目标土壤的主要障碍特征(如土壤酸化、结构板结或生物活性低等),科学选择适宜的土壤调理剂,并采用“调理剂+有机肥”或“调理剂+深翻”等复合措施优化改良效果。

4 结论

(1)与不施调理剂相比,6种调理剂能显著提高土壤pH,同时能有效提升有机质含量和CEC。其中,燃煤烟气脱硫石膏、硝酸磷肥副产品和牡蛎壳处理显著增加有效磷含量,但需合理施用避免造成水体富营养化等环境风险。此外,研究施用的调理剂均会降低土壤活性氮,建议配合氮肥施用以维持土壤氮素平衡。

(2)本研究通过主成分分析和相关性分析构建了土壤质量综合评价体系(SQI)。结果表明,所有调理剂均能有效提升酸性水稻土土壤质量,其中以燃煤烟气脱硫石膏和白云石、钾长石与石灰石处理的SQI值最高,因此推荐为酸性土壤改良的首选调理剂,其次是钼尾矿、白云石、硝酸磷肥副产品和牡蛎壳、石灰石、甜叶菊渣,牡蛎壳改良效果一般。

参考文献:

[1] 余心茹, 郭熙, 刘佳越, 等. 耕地土壤酸化改良农户行为的逻辑路径与驱动力分析[J]. 江西农业学报, 2024, 36(10): 109-118. YU X R, GUO X, LIU J Y, et al. Logical path and driving force analysis of farmers' behavior in farmland soil acidification improvement[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2024, 36(10): 109-118.

[2] 叶英聪, 孙波, 刘绍贵, 等. 中国水稻土酸化时空变化特征及其对氮素盈余的响应[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 246-256. YE Y C, SUN B, LIU S G, et al. Spatio-temporal variation of paddy soil acidification and its response to nitrogen surplus in China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(2): 246-256.

[3] 刘娇娴, 崔骏, 刘洪宝, 等. 土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1): 173-184. LIU J X, CUI J, LIU H B, et al. Research progress of soil amelioration of acidified soil by soil amendments[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(1): 173-184.

[4] 范贝贝, 黄尚书, 黎鑫林, 等. 硅酸盐矿物基土壤改良剂降低土壤酸度及促进菠菜生长的效果[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2025, 45(1): 93-102. FAN B B, HUANG S S, LI X L, et al. Research on the effect of silicates mineral based soil amendments on reducing soil acidity and promoting the growth of spinach[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2025, 45(1): 93-102.

[5] 张文俊, 付小花, 乐毅全, 等. 土壤改良剂: 固体废弃物处置与资源化的有效途径[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(32): 14281-14284. ZHANG W Q, FU X H, LE Y Q, et al. Soil amelioration: a effective way of disposition and recycle of solid wastes[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(32): 14281-14284.

[6] 刘瑞浩. 腐植酸肥、微生物菌肥和土壤调理剂对连作丹参产量和品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022: 7-29. LIU R H. Effects of humic acid fertilizer, microbial fertilizer and soil conditioner on yield and quality of continuous cropping *Salvia miltiorrhiza*[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022: 7-29.

[7] 刘影, 于年文, 李宏建, 等. 土壤调理剂改良苹果园土壤的研究进展[J]. 北方果树, 2024(6): 1-5. LIU Y, YU N W, LI H J, et al. Research progress on the improvement of apple orchards soil by using soil conditioners[J]. *Northern Fruits*, 2024(6): 1-5.

[8] 林小兵, 武林, 王惠明, 等. 不同用量土壤调理剂对镉污染农田土壤环境的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1734-1745. LIN X B, WU L, WANG H M, et al. Soil environment under different application rates of soil conditioners[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7): 1734-1745.

[9] 范贝贝, 彭宇涛, 潘成杰, 等. 矿物调理剂对酸性土壤酸度降低和菠菜镉累积的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(5): 96-105. FAN B B, PENG Y T, PAN C J, et al. Effects of mineral amendments on acidic soil acidity reduction and spinach cadmium accumulation[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(5): 96-105.

[10] 李岚涛, 鲁剑巍, 任涛, 等. 酸化土壤调理剂在油菜上的应用效果[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(5): 57-60. LI L T, LU J W, REN T, et al. Application effects of acid soil conditioner on winter oilseed rape[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2014, 33(5): 57-60.

[11] 熊管乐, 邵孝候, 张永涛, 等. 土壤调理剂用量对酸性土壤肥力影响的综合评价[J]. 广东农业科学, 2020, 47(1): 53-61. XIONG G L, SHAO X H, ZHANG Y T, et al. Comprehensive evaluation on effects of the soil conditioner with different dosages on acid soil fertility[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020, 47(1): 53-61.

[12] BÜNEMANN E K, BONGIORNO G, BAI Z G, et al. Soil quality: a critical review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 105-125.

[13] ZAHEDIFAR M. Assessing alteration of soil quality, degradation, and resistance indices under different land uses through network and factor analysis[J]. *CATENA*, 2023, 222: 106807.

[14] 李鑫, 张文菊, 邬磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. 中国农业科学, 2021, 54(14): 3043-3056. LI X, ZHANG W J, WU L, et al. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(14): 3043-3056.

[15] 金慧芳, 史东梅, 陈正发, 等. 基于聚类及PCA分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 155-164. JIN H F, SHI D M, CHEN Z F, et al. Evaluation indicators of cultivated layer soil quality for red soil slope farmland based on cluster and PCA analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(7): 155-164.

[16] 姜义宝, 史东梅, 蒋光毅, 等. 基于最小数据集的紫色丘陵区坡耕

- 地耕层土壤质量评价[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(5):75-85.
- LOU Y B, SHI D M, JIANG G Y, et al. Evaluation of soil quality in the cultivated-layer of sloping farmland in purple hilly area based on minimum data set[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(5):75-85.
- [17] YEMEFACK M, JETTEN V G, ROSSITER D G. Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 86(1):84-98.
- [18] 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.
- 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.
- [19] 田中学, 徐丽萍, 王旭. 土壤调理剂对小油菜镉吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(1):94-100.
- TIAN Z X, XU L P, WANG X. Effects of soil amendments on the adsorption of Cd by small rape[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(1):94-100.
- [20] 徐江兵. 甜叶菊渣资源化及应用的微生物学研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013:72-78.
- XU J B. Microbiological study on resource utilization and application of *Stevia rebaudiana* residue[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013:72-78.
- [21] LEE Y B, BIGHAM J M, DICK W A, et al. Influence of soil pH and application rate on the oxidation of calcium sulfite derived from flue gas desulfurization[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(1):298-304.
- [22] 孙蓟锋. 几种矿物源土壤调理剂对土壤养分、酶活性及微生物特性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012:20-41.
- SUN J F. Effects of several mineral-derived soil conditioners on soil nutrients, enzyme activities and microbial characteristics[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012:20-41.
- [23] 赵涵, 方宏达, 曹英兰, 等. 复配调理剂对茶园土壤质量和茶叶品质的改良效果[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2022, 27(4):317-325.
- ZHAO H, FANG H D, CAO Y L, et al. Improvement effect of composite conditioner on soil and tea quality in tea garden[J]. *Journal of Jimei University(Natural Science)*, 2022, 27(4):317-325.
- [24] 胡敏, 向永生, 鲁剑巍. 石灰用量对酸性土壤pH值及有效养分含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(4):72-77.
- HU M, XIANG Y S, LU J W. Effects of lime application rates on soil pH and available nutrient content in acidic soils[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(4):72-77.
- [25] 刘莉, 谢德体, 李忠意, 等. 酸性紫色土的阳离子交换特征及其对酸缓冲容量的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(4):887-897.
- LIU L, XIE D T, LI Z Y, et al. Cations exchange and its effect on acid buffering capacity of acid purple soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4):887-897.
- [26] 林小兵, 郭乃嘉, 雷礼文, 等. 矿物源调理剂对南方酸性镉污染水稻农田的修复作用[J]. 土壤与作物, 2023, 12(4):439-447.
- LIN X B, GUO N J, LEI L W, et al. Remediation of mineral conditioners on acid cadmium contaminated paddy farmland in southern China[J]. *Soils and Crops*, 2023, 12(4):439-447.
- [27] BOSSOLANI J W, CRUSCIOL C A C, LEITE M F A, et al. Modulation of the soil microbiome by long-term Ca-based soil amendments boosts soil organic carbon and physicochemical quality in a tropical no-till crop rotation system[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 156:108188.
- [28] JI H N, YUAN G S, LIU Y, et al. Short-term effects of bamboo biochar and oyster shell powder on soil organic carbon fraction, microbial respiration, and enzymatic stoichiometry in a Lei bamboo plantation[J]. *Forests*, 2023, 14(4):853.
- [29] 徐章倩, 周卫军, 崔浩杰, 等. 湖南省柑橘园土壤pH值空间变异特征、成因及养分有效性[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(4):717-730.
- XU Z Q, ZHOU W J, CUI H J, et al. Spatial variation characteristics and influence factors of soil pH and nutrient availability in Citrus orchards of Hunan Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(4):717-730.
- [30] 郭春雷, 李娜, 彭靖, 等. 秸秆直接还田及炭化还田对土壤酸度和交换性能的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5):1205-1213.
- GUO C L, LI N, PENG J, et al. Direct returning of maize straw or as biochar to the field triggers change in acidity and exchangeable capacity in soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5):1205-1213.
- [31] 魏岚, 杨少海, 邹献中, 等. 不同土壤调理剂对酸性土壤的改良效果[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2010, 36(1):77-81.
- WEI L, YANG S H, ZOU X Z, et al. Effects of different modifiers on improvement of acid soils[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2010, 36(1):77-81.