

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立 40 周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战	王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)
河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险	王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)
海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展	袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)
环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测	李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)
环境水体中无机砷现场分析方法研究进展	薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)
海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展	黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展	骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)
水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制	王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876)
中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物	史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)
中国油气系统甲烷逸散排放估算	陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)
2015 ~ 2020 年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征	李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)
九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征	程宏, 陈荣 (4924)
厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征	姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)
九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制	戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)
福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制	杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)
厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制	潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)
改性生物炭固定床对模拟湖水体中 Mn^{2+} 的吸附	赵洁, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)
基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测	徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)
紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯	徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 譙杨 (4992)

研究报告

2019 年秋季海南省 4 次臭氧污染过程特征及潜在源区分析	符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)
伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制	陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)
城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性	齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)
南京北郊 BTESX 特征及健康风险评估	冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)
我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估	孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奔, 马长文, 叶建锋 (5040)
东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析	陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)
长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析	刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)
青藏高原湖泊水环境特征及水质评价	刘智琦, 潘保柱, 韩谔, 李刚, 王韬轶 (5073)
基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水文地球化学特征及控制因素	查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)
丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系	贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)
铜沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能	王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)
基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群	章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍 (5115)
寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析	杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)
中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析	田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾立新 (5131)
硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析	刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)
不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响	邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 张广林 (5149)
不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 NO 和 N_2O 排放的影响	唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)
基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征	刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)
基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析	高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)
基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析	张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)
老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 Cd^{2+} 的影响	王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)
磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响	芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)
牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响	赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)
磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和锌镉累积的影响	帅祖华, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)
重庆开州区农地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估	方林发, 叶萃萃, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)
基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应	侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)
黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征	许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263)
土壤多功能性对微生物多样性降低的响应	陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)
氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响	苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)
碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比	李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)
中国能源消费碳排放的空间化与时空动态	郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颜斌斌, 杜海波 (5305)
京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO_2 协同减排效益评估	杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束轲 (5315)
我国塑料污染防治政策分析与建议	李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)

牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响

赵丽芳¹, 黄鹏武¹, 杨彩迪², 卢升高^{2*}

(1. 浙江省乐清市农业农村发展中心, 温州 325600; 2. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058)

摘要: 我国南方粮食主产区土壤酸化治理是提升耕地地力促进粮食增产的重要内容, 目的是探究酸化土壤改良剂牡蛎壳粉和石灰对水稻土酸度、磷有效性和形态以及酶活性和相关功能基因的影响。盆栽试验设计 2 种改良剂的 3 个施用量 (0.05%、0.10% 和 0.15%), 以水稻为试验作物。结果表明: ①牡蛎壳粉和石灰均显著提高土壤 pH, 降低土壤交换性酸, 且改良效果随着改良剂用量增加而提高, 相同用量下石灰对土壤酸性的改良效果高于牡蛎壳粉; ② 4 种有效磷提取剂提取的土壤有效磷测定结果表明, 牡蛎壳粉和石灰显著提高 H_2SO_4 -P、Bray-1 P 和 Olsen-P 含量, 其中 Olsen-P 含量随改良剂用量的增加而提高。③土壤中不同形态无机磷含量表现为: $Fe-P > Al-P > Ca-P$, 石灰和牡蛎壳粉显著提高 Al-P 和 Fe-P 含量, 分别提高 26.3% ~ 37.4% 和 7.9% ~ 23.7%; 0.15% 改良剂显著增加 Ca-P 含量; ④石灰和牡蛎壳粉对土壤 DHA、ALP、IPP 活性和 *phoD* 基因拷贝数具有提高作用, 而对土壤 ACP 活性、*phoC* 和 *pqqC* 拷贝数表现为降低; ⑤改良剂 (0.10% 和 0.15%) 显著提高水稻产量, 0.15% 用量的石灰和牡蛎壳粉分别提高水稻产量 34.2% 和 46.8%, 但对秸秆生物量无显著影响。相关分析表明, 土壤无机磷和有效磷含量与 pH 和 ALP 活性呈显著正相关, 改良剂通过消除土壤酸化和提高土壤磷酸酶活性来改善土壤磷营养状况, 这对促进作物产量具有积极作用。

关键词: 石灰; 牡蛎壳粉; 酸度; 磷有效性; 酶活性; 作物产量

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-5224-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202201176

Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil

ZHAO Li-fang¹, HUANG Peng-wu¹, YANG Cai-di², LU Sheng-gao^{2*}

(1. Zhejiang Yueqing Agricultural and Rural Development Center, Wenzhou 325600, China; 2. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Soil acidification improvement in the main grain production regions of southern China is an important issue to enhance the quality of cultivated land and promote grain yield. In order to explore the effects of oyster shell powder and lime on acidity and availability and inorganic forms of phosphorus in acidic paddy soil, a pot experiment was performed using oyster shell powder and lime amendments with dosages of 0.05%, 0.10%, and 0.15%. The results showed that both oyster shell powder and lime significantly ($P < 0.05$) increased the pH and decreased exchangeable acid content of paddy soil. The improvement effects increased with the dosage of soil amendments. Under the same amendment dosage, the effects of lime on soil pH and acidity were higher than those of oyster shell powder. Both lime and oyster shell powder significantly increased the content of available P extracted using H_2SO_4 -P, Bray-1 P, and Olsen-P techniques. The contents of inorganic P in soils decreased in the order of $Fe-P > Al-P > Ca-P$. The application of lime and oyster shell powder significantly increased the contents of Al-P and Fe-P in soil. Compared with the control treatment, lime and oyster shell powder increased Al-P and Fe-P by 26.3%-37.4% and 7.9%-23.7%, respectively. However, there was no significant difference in Al-P content among treatments of the three amendment dosages. The contents of Fe-P and Ca-P in soils increased with an increased dosage of amendments. The activities of DHA, ALP, and IPP and the copy number of the *phoD* gene in soil increased with the application of lime and oyster shell powder, whereas the activities of ACP and the copy numbers of *phoC* and *pqqC* decreased. The application of lime and oyster shell powder at a rate of 0.10% and 0.15% significantly ($P < 0.05$) increased the yield of rice. The lime and oyster shell powder treatments at the dosage of 0.15% increased rice yield by 34.2% and 46.8%, respectively, whereas the amendment had no significant effect on straw biomass of the rice crop. Correlation analysis showed that soil pH and the ALP activity were significantly positively correlated with inorganic P and available P contents, respectively. These results suggested that lime and oyster shell powder could effectively increase the content of available phosphorus by eliminating soil acidity and improving the phosphatase activity, which played a positive role in increasing crop yield.

Key words: lime; oyster shell powder; acidity; phosphorus availability; enzyme activity; crop yield

土壤酸化是我国南方农田土壤退化的主要表现之一, 而磷缺乏是限制酸性土壤耕地地力和农业生产的重要因素。随着氮肥施用和人类活动加强, 土壤酸化已造成土壤板结、养分流失和重金属活化等危害, 严重影响生态环境和制约农业生产^[1,2]。土壤酸化是由于土壤中带正电荷的离子增加, 土壤胶体上吸附的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 等阳离子通过置换变成游

离状态, 在亚热带强降雨的条件下极易淋失形成^[3,4]。同时, 土壤酸化的加剧导致磷酸根离子与酸

收稿日期: 2022-01-18; 修订日期: 2022-03-10

基金项目: 温州市科技局基础性农业科技项目 (N20210020); 农业农村部退化耕地治理示范县项目

作者简介: 赵丽芳 (1966 ~), 女, 高级农艺师, 主要研究方向为酸性农田土壤修复与地力提升, E-mail: 1300286003@qq.com

* 通信作者, E-mail: lsg@zju.edu.cn

性土壤中大量存在的 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 等金属离子或金属氧化物发生沉淀被固定,从而难以被植物吸收利用^[5].

目前,针对土壤酸化的治理和磷有效性的提高主要集中在石灰等改良剂的应用.李光辉等^[6]的研究发现石灰和有机物料配施可以显著提高土壤 pH、SOM 含量和 CEC,降低酸性稻田镉污染.马国柱等^[7]通过在南方典型双季稻种植区施用石灰,发现土壤 pH 和有效磷含量显著提高.方克明等^[8]的研究发现施用石灰不仅对稻田的调酸改土和增产增收效果显著,同时还能降低稻谷镉含量.这些研究均说明石灰对于酸性土壤的改良具有积极作用.近年来,新型土壤改良剂——牡蛎壳粉因其具有多孔、较强的吸附性能和离子交换功能和“保肥、净水、缓释”等特点和功能,已在土壤改良领域开展应用^[9].牡蛎壳占我国重要的海洋经济贝类——牡蛎总质量的 60% 以上,具有易获取、价格低和环境友好等多种优势^[9].同时,牡蛎壳粉在酸化土壤治理方面也表现出了初步成果.柳开楼等^[10]通过在旱地红壤施用牡蛎壳粉发现,土壤 pH 和花生产量分别提高 0.18~0.33 个单位和 10.2%~23.8%.陈勇红^[11]的研究发现,施用牡蛎壳土壤调理剂对红壤蔬菜增产、活化土壤养分和阻控土壤酸化具有重要意义.有研究发现,改良剂对酸性土壤磷素养分有效性的提高不仅受到化学性质的影响,也与土壤中参与磷循环的微生物和酶活性有关^[12-16].向书江等^[17]发现有机肥配施生物炭可以促进紫色土磷从难溶态向有效态转化,改善磷营养状况.宋文涛等^[18]的研究发现秸秆生物炭处理显著影响土壤磷素化学形态、微生物活性及磷素转化,增加磷素有效性.杨文娜等^[19]的研究发现化肥和有机肥配施生物质炭可以增加根际土壤的酶活性以及土壤中 *phoC* 和 *phoD* 基因的多样

性.以上研究多集中于生物质炭对土壤磷转化的研究,因此,探究无机改良剂施用对酸化土壤改良提高磷养分有效性的微生物机制至关重要.

尽管石灰改良酸化土壤已有许多研究^[20-22],但石灰等无机改良剂对土壤养分有效性影响的研究十分有限.而牡蛎壳粉作为酸化土壤改良剂对酸化稻田土壤养分有效性的改良试验未有系统研究,尤其是对微生物机制的研究.本文针对我国南方粮食主产区广泛分布的酸化耕地治理问题,采用盆栽试验,探究不同用量石灰和牡蛎壳粉对稻田土壤酸度、磷有效性、酶活性和作物产量的影响,以期为酸性土壤治理、提高耕地质量和促进作物增产提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

本试验所用土壤为水稻土,取自浙江省乐清市柳市镇(28.08°N,120.87°E)水田表土(0~20 cm),风干后过 2 mm 筛备用.水稻土的基本性质:pH 为 5.1, ω (有机质)为 20.58 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, CEC 9.15 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, ω (黏粒)27.79 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.试验所用石灰购自当地农资市场,牡蛎壳粉购自福建玛塔生态科技有限公司.石灰和牡蛎壳粉的 pH 和元素组成见表 1.其中,改良剂 pH 以石灰/牡蛎壳粉:去离子水=1:20 使用 pH 计(Metler Toledo)测定,元素组成采用原子荧光光度计(AFS-9760,北京海光仪器有限公司)测定.石灰和牡蛎壳粉分别以 0.05%、0.10% 和 0.15% 的用量与干土混匀,以不添加石灰和牡蛎壳粉土壤为对照(CK),每盆装入 5 kg 干土.将 0.05%、0.10% 和 0.15% 石灰和牡蛎壳粉处理分别标记为 Lime1、Lime2、Lime3、OS1、OS2 和 OS3.每个处理重复 3 次.

表 1 石灰和牡蛎壳粉的 pH 和元素组成

Table 1 The pH and elemental composition of lime and oyster shell powder

项目	pH	$\omega/\%$								
		O	Si	Al	Fe	Ca	Mg	K	Na	P
石灰	12.88	40.5	1.34	0.28	0.14	52.4	0.81	0.044		0.006 6
牡蛎壳粉	9.71	37.0	2.66	1.21	0.33	16.1	0.53	0.345	8.26	0.091 8

1.2 水稻种植与土样采集

盆栽试验始于 2021 年 1 月装土,3 月插秧,7 月 15 日收获,供试水稻品种为中浙优 8 号.试验所用花盆的规格为:直径 32 cm,高 20.9 cm,每盆插入 3 株水稻幼苗.所有处理采用相同的灌水、插秧、施肥和水管理,水稻生长期间保持花盆中水面高度约为 2 cm.底肥施用水稻专用肥 0.15 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,追肥施用水稻专用肥 0.05 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和尿素 0.05 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

水稻成熟后,采用盆栽取样器在距离水稻根部 5 cm 的位置取样 3 次并混匀,一部分土壤样品保存在 -80℃ 冰箱中,用于土壤微生物分析;另一部分风干,过 2 mm 和 0.15 mm 筛备用.采集土壤样品后收割水稻,计算产量和秸秆生物量.

1.3 土壤理化指标测定方法

土壤理化性质采用常规方法测定^[23].土壤 pH 采用 pH 计(Metler Toledo)土水比 1:2.5 测定.交换

性酸和交换性 H^+ 通过 $1 \text{ mol} \cdot L^{-1}$ KCl 交换-中和滴定法测定, 交换性 Al^{3+} 通过差减法计算得到. 土壤有机质 (SOM) 含量用重铬酸钾氧化- $FeSO_4$ 滴定法测定. 土壤速效钾含量用 NH_4OAc 提取-火焰光度法测定. 土壤阳离子交换量 (CEC) 和交换性阳离子含量采用 $1 \text{ mol} \cdot L^{-1}$ 乙酸铵交换法提取, 交换性 K^+ 和 Na^+ 通过火焰光度法测定; 交换性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 通过原子吸收法测定, CEC 由交换性阳离子加和法计算得到. 土壤有效磷分别使用 $NaHCO_3$ 提取 Olsen-P, $HCl + NH_4F$ 提取 Bray-1 P, 去离子水提取水溶性磷 (H_2O -P)、双酸法提取酸溶性磷 (H_2SO_4 -P), 土壤总磷采用 $NaOH$ 熔融法, 钼锑抗比色法测定各溶液中磷酸盐含量^[24]. 无机磷形态采用连续提取法, 分别是 NH_4Cl-NH_4F 提取 Al-P, $NaOH$ 提取 Fe-P, H_2SO_4 提取 Ca-P, 钼锑抗比色法测定^[24,25].

1.4 土壤微生物指标测定方法

土壤微生物生物量磷 (MBP) 采用氯仿熏蒸法提取-钼锑抗比色法测定^[26]. 土壤脱氢酶 (DHA)、酸性磷酸单酯酶 (ACP)、碱性磷酸单酯酶 (ALP)、磷酸二酯酶 (PD) 和无机焦磷酸酶 (IPP) 活性根据 Tabatabai 的方法测定, 分别用 1 h 内 TPF、对硝基酚、对硝基酚、对硝基酚和 PO_4^{3-} 的产生量表示^[27,28]. 土壤 DNA 提取使用 FastDNA SPIN 试剂盒

按照标准协议进行 (MP Bio-medicals, Solon, OH, USA). 提取液中 DNA 的含量和质量使用 Nanodrop ND-1000 紫外分光光度计测定. 在 ABI 7300 循环实时 PCR 系统 (Applied Biosystems, Germany) 中进行基因定量, *phoC*、*phoD*、*gcd* 和 *pqqC* 基因的引物和测定程序参照文献^[29]. 以上测序和扩增由广东美格生物有限公司完成.

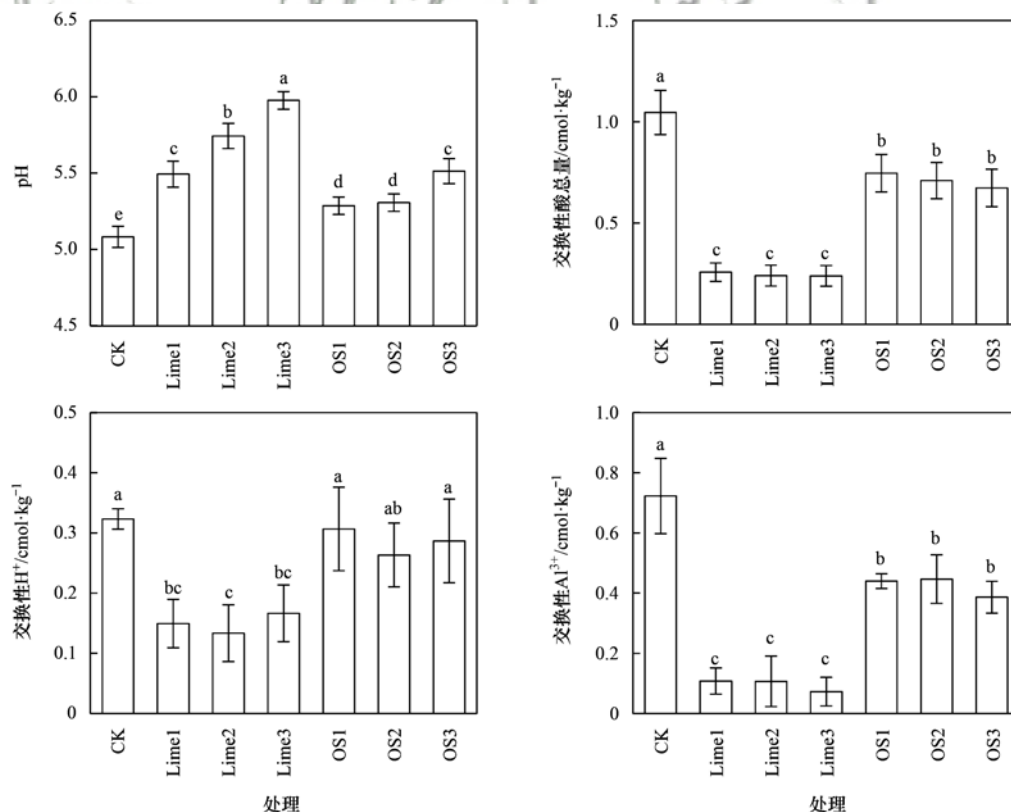
1.5 数据处理

采用 Excel 进行数据整理和绘图; 采用 SPSS 17.0 对数据进行统计分析. 采用单因素方差分析 (ANOVA) 确定处理间差异显著性 ($P < 0.05$).

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 和交换性酸

不同用量石灰和牡蛎壳粉对水稻土 pH 和交换性酸的影响见图 1. 石灰和牡蛎壳粉施用显著 ($P < 0.05$) 提高土壤 pH, 降低土壤交换性酸总量和交换性 Al^{3+} , 其中石灰对土壤 pH 的改良随用量显著增加. 施用 0.05%、0.1% 和 0.15% 石灰分别提高土壤 pH 0.41、0.66 和 0.90 个单位, 牡蛎壳粉分别提高土壤 pH 0.21、0.23 和 0.43 个单位. 石灰和牡蛎壳粉分别降低土壤交换性酸总量 75.4%~77.2% 和 28.6%~35.6%, 石灰降低土壤交换性酸的效果明显



相同小写字母表示不同处理间无显著差异 ($P > 0.05$), 不同小写字母表示处理间存在显著差异 ($P < 0.05$), 下同

图 1 不同用量石灰和牡蛎壳粉对水稻土 pH 和交换性酸的影响

Fig. 1 Effects of different dosages of lime and oyster shell powder on pH and exchangeable acid of paddy soil

优于牡蛎壳粉. 石灰处理显著 ($P < 0.05$) 降低土壤交换性 H^+ 48.5%~58.8%, 然而牡蛎壳粉降低土壤交换性 H^+ 的效果不显著. 土壤交换性 Al^{3+} 的变化趋势与交换性酸总量一致, 石灰和牡蛎壳粉分别降低土壤交换性 Al^{3+} 85.1%~89.0% 和 38.2%~46.5%. 石灰降低土壤交换性 Al^{3+} 的效果明显比牡蛎壳粉的效果好.

2.2 土壤有机质和交换性阳离子

不同用量石灰和牡蛎壳粉对水稻土有机质和交换性阳离子的影响见表 2. 不同处理显著提高土壤 SOM 含量, 且随改良剂用量增加而提高, 0.15% 用量下石灰和牡蛎壳粉分别较对照显著提高 SOM 含量 65.4% 和 65.5%. 仅 OS3 处理显著提高土壤总磷含量 21.3%. 牡蛎壳粉提高土壤速效钾含量效果显著, 0.05%、0.10% 和 0.15% 用量下分别提高 26.9%、30.7% 和 37.2%. 与对照比较, 只有

Lime2、Lime3 和 OS3 处理显著 ($P < 0.05$) 增加土壤 CEC, 分别较对照提高 8.0%、14.2% 和 10.0%. 土壤交换性阳离子含量的大小表现为 $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$. 除交换性 Na^+ 外, 石灰和牡蛎壳粉施用提高土壤交换性阳离子含量. Lime2、Lime3 和 OS3 处理分别较对照提高土壤交换性 K^+ 含量 36.3%、42.2% 和 35.6%. 石灰和牡蛎壳粉处理降低土壤交换性 Na^+ 含量. 石灰处理显著 ($P < 0.05$) 提高土壤交换性 Ca^{2+} 含量, 0.05%、0.10 和 0.15% 用量下分别较对照提高 14.1%、15.0% 和 27.0%, 牡蛎壳粉仅在 0.15% 用量下显著 ($P < 0.05$) 提高土壤交换性 Ca^{2+} 含量 12.2%. Lime2、OS2 和 OS3 处理分别较对照提高交换性 Mg^{2+} 含量 39.3%、36.4% 和 42.1%. 整体来看, 高剂量石灰和牡蛎壳粉能够显著提高土壤交换性阳离子含量.

表 2 不同用量石灰和牡蛎壳粉对水稻土有机质和交换性阳离子的影响¹⁾

处理	$\omega(\text{SOM})$ / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{总磷})$ / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{速效钾})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	CEC / $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	交换性阳离子/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$			
					K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
CK	18.68 ± 0.32e	0.79 ± 0.04b	66.84 ± 4.45b	11.46 ± 0.43d	0.19 ± 0.02b	0.44 ± 0.03a	8.72 ± 0.41c	1.07 ± 0.04b
Lime1	21.56 ± 0.55d	0.75 ± 0.03b	67.73 ± 4.67b	11.79 ± 0.13cd	0.20 ± 0.02b	0.36 ± 0.04ab	9.95 ± 0.2b	1.02 ± 0.05b
Lime2	26.58 ± 0.33bc	0.87 ± 0.14ab	62.84 ± 6.00b	12.38 ± 0.08bc	0.26 ± 0.03a	0.36 ± 0.03ab	10.03 ± 0.22b	1.49 ± 0.24a
Lime3	30.89 ± 1.32a	0.84 ± 0.07ab	63.73 ± 5.58b	13.09 ± 0.48a	0.27 ± 0.02a	0.35 ± 0.04b	11.08 ± 0.52a	1.15 ± 0.02ab
OS1	24.73 ± 1.17c	0.88 ± 0.03ab	84.80 ± 9.34a	11.28 ± 0.27d	0.19 ± 0.02b	0.33 ± 0.05b	8.86 ± 0.29c	1.16 ± 0.02ab
OS2	28.25 ± 1.44b	0.75 ± 0.05b	87.37 ± 8.47a	11.63 ± 0.18d	0.20 ± 0.02b	0.35 ± 0.04b	8.92 ± 0.31c	1.46 ± 0.24a
OS3	30.92 ± 0.86a	0.95 ± 0.05a	91.70 ± 6.89a	12.6 ± 0.28ab	0.26 ± 0.02a	0.37 ± 0.03ab	9.78 ± 0.31b	1.52 ± 0.24a

1) 相同小写字母表示不同处理间无显著差异 ($P > 0.05$), 不同小写字母表示处理间存在显著差异 ($P < 0.05$), 下同

2.3 土壤有效磷

不同用量石灰和牡蛎壳粉对水稻土不同形态有效磷的影响见图 2. 不同提取剂提取的土壤有效磷含量表现为: $H_2SO_4\text{-P} > \text{Bray-1 P} > \text{Olsen-P} > H_2O\text{-P}$. 试验水稻土的有效磷含量很低, $\omega(\text{Olsen-P})$ 仅为 $17.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 石灰和牡蛎壳粉处理显著 ($P < 0.05$) 提高土壤 Olsen-P 含量, 且随用量的增加而提高. 0.15% 用量下, 石灰和牡蛎壳粉分别较对照提高 Olsen-P 含量 91.3% 和 91.9%. 对照土壤的 $\omega(\text{Bray-1 P})$ 为 $31.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 除 OS1 处理外, 石灰和牡蛎壳粉处理较对照提高 Bray-1 P 含量 19.6%~39.1%. 石灰和牡蛎壳粉对土壤 $H_2O\text{-P}$ 含量的影响不明显. 除 Lime1 处理外, 石灰和牡蛎壳粉处理较对照提高土壤 $H_2SO_4\text{-P}$ 含量 27.3%~38.9%. 整体来看, 石灰和牡蛎壳粉对于提高土壤有效磷含量均有一定的作用, 且较高用量下效果较好.

2.4 土壤无机磷和微生物生物量磷

不同用量石灰和牡蛎壳粉对水稻土无机磷和 MBP 的影响见图 3. 土壤中无机磷含量呈现出 $\text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{Ca-P}$ 的规律. 不同用量石灰和牡蛎壳粉处

理较对照提高 Al-P 含量 26.3%~37.4%, 但不同改良剂用量处理间无显著差异. 除 OS1 处理外, 石灰和牡蛎壳粉处理显著提高土壤 Fe-P 含量, 土壤 Fe-P 含量随石灰和牡蛎壳粉用量的增加而提高, 0.15% 的石灰和牡蛎壳粉处理分别提高土壤 Fe-P 含量 23.7% 和 21.5%. 试验土壤的 $\omega(\text{Ca-P})$ 为 $46.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 石灰和牡蛎壳粉对土壤 Ca-P 含量的影响只有 0.15% 用量下显著提高, 分别较对照提高 61.5% 和 47.0%, 其余处理提高 Ca-P 含量的效果不显著. 石灰和牡蛎壳粉对土壤 MBP 的影响不明显. 整体来看, 石灰和牡蛎壳粉两种改良剂对无机磷的影响差异不显著, 而改良剂用量对 Fe-P 和 Ca-P 含量的影响较为明显.

2.5 土壤磷酸酶活性和功能基因

不同用量石灰和牡蛎壳粉对水稻土酶活性的影响见表 3. 石灰处理显著提高土壤 DHA 活性, 0.05%、0.10% 和 0.15% 用量下分别较对照提高 15.7%、33.1% 和 12.8%, 而牡蛎壳粉降低土壤 DHA 活性. 不同处理显著降低土壤 ACP 活性 27.9%~43.1%, 且石灰处理随用量增加显著 ($P <$

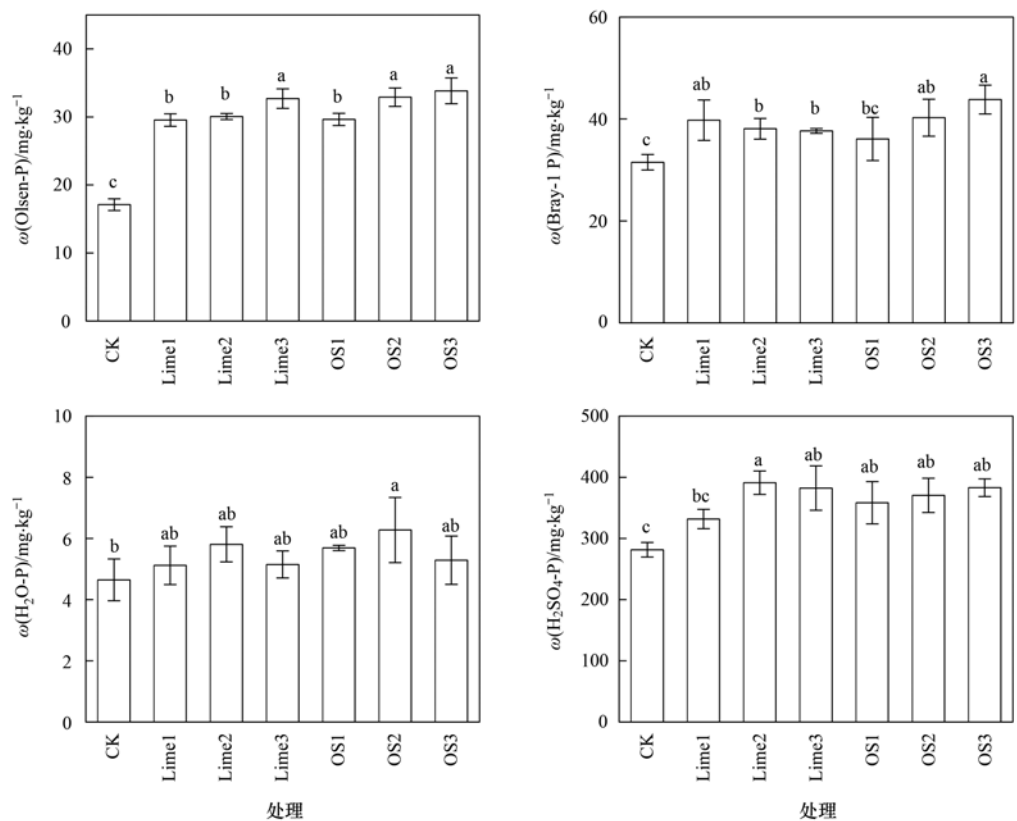


图 2 不同用量石灰和牡蛎壳粉对水稻土不同形态有效磷的影响

Fig. 2 Effects of different dosages of lime and oyster shell powder on Olsen-P, Bray-1 P, H₂O-P, and H₂SO₄-P of paddy soil

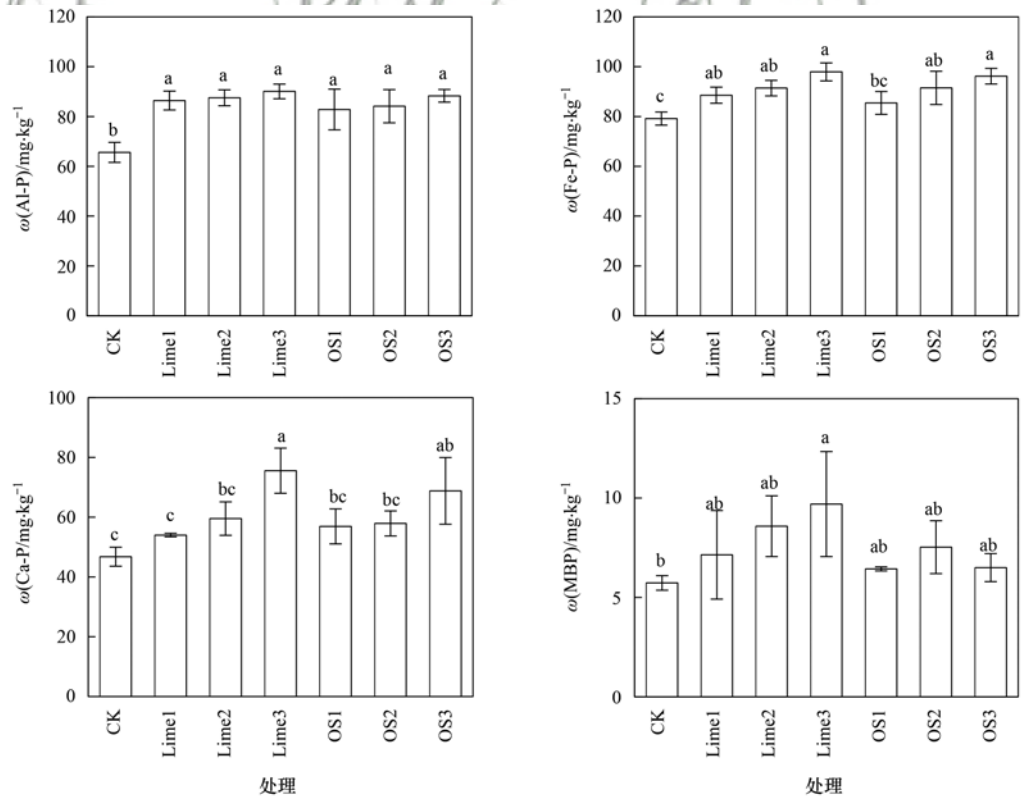


图 3 不同用量石灰和牡蛎壳粉对水稻土无机磷和 MBP 的影响

Fig. 3 Effects of different dosages of lime and oyster shell powder on inorganic P and microbial biomass P of paddy soil

0.05)降低.土壤 ALP 活性在不同处理下显著提高,且随改良剂用量增加而提高,0.15%用量下石灰和

牡蛎壳粉分别较对照显著($P < 0.05$)提高 ALP 活性 366% 和 272%.仅 OS3 处理显著($P < 0.05$)提高土

壤 PD 活性 13.4%,石灰处理对 PD 活性表现为明显的降低效果.石灰和牡蛎壳粉均可以提高土壤 IPP 活性,在 Lime2、Lime3 和 OS2 处理下分别较对照显著 ($P<0.05$) 提高 25.5%、27.3% 和 23.0%.因此,添加石灰和牡蛎壳粉提高土壤 ALP 和 IPP 活性,降低 ACP 活性,而 DHA 和 PD 活性受到改良剂类型的影响,分别在石灰和牡蛎壳粉处理下提高,改良剂用量显著影响土壤 ACP、ALP 和 IPP 活性的变化.

不同用量石灰和牡蛎壳粉对水稻土磷功能基因的影响见表 4.石灰和牡蛎壳粉分别较对照降低土壤 *phoC* 拷贝数 82.7%~95.2% 和 83.3%~93.7%.

相反,不同处理提高土壤 *phoD* 拷贝数,且随改良剂用量增加而提高,0.15% 用量下石灰和牡蛎壳粉分别较对照显著提高 *phoD* 拷贝数 161.5% 和 151.3%.石灰处理显著降低土壤 *gcd* 拷贝数 21.4%~66.5%,仅 OS2 和 OS3 处理显著提高土壤 *gcd* 拷贝数 22.0% 和 40.1%.除 OS3 处理外,改良剂施用对土壤 *pqqC* 拷贝数表现为降低效果,石灰和牡蛎壳粉处理分别较对照显著降低 46.8%~78.6% 和 24.9%~45.4%.整体来看,添加石灰和牡蛎壳粉提高土壤 *phoD* 拷贝数,降低 *phoC* 和 *pqqC* 拷贝数,而 *gcd* 拷贝数的变化与改良剂类型有关.

表 3 不同用量石灰和牡蛎壳粉对水稻土脱氢酶和磷酸酶活性的影响/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Effects of different dosages of lime and oyster shell powder on soil dehydrogenase and phosphatase activities/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$					
处理	DHA	ACP	ALP	PD	IPP
CK	275.21 $\pm$ 13.87c	228.26 $\pm$ 10.34a	16.38 $\pm$ 2.83d	111.90 $\pm$ 3.18b	58.82 $\pm$ 5.45b
Lime1	318.30 $\pm$ 9.91b	164.64 $\pm$ 5.70b	39.06 $\pm$ 5.16c	91.37 $\pm$ 6.49c	64.13 $\pm$ 4.12b
Lime2	366.22 $\pm$ 19.30a	148.82 $\pm$ 3.94c	59.90 $\pm$ 6.36b	84.53 $\pm$ 6.93c	73.79 $\pm$ 2.00a
Lime3	310.49 $\pm$ 7.37b	129.89 $\pm$ 2.70d	76.33 $\pm$ 3.60a	88.55 $\pm$ 5.24c	74.85 $\pm$ 2.70a
OS1	235.88 $\pm$ 7.33d	164.96 $\pm$ 5.78b	34.63 $\pm$ 8.40c	109.40 $\pm$ 5.72b	61.75 $\pm$ 4.19b
OS2	193.38 $\pm$ 10.44e	144.77 $\pm$ 7.11c	57.52 $\pm$ 6.21b	114.44 $\pm$ 3.72b	72.32 $\pm$ 2.52a
OS3	189.22 $\pm$ 10.53e	151.14 $\pm$ 4.28c	60.99 $\pm$ 6.06b	126.85 $\pm$ 4.01a	63.32 $\pm$ 3.69b

表 4 不同用量石灰和牡蛎壳粉对水稻土磷功能基因的影响/ $\text{copies}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 4 Effects of different dosages of lime and oyster shell powder on soil P functional genes/ $\text{copies}\cdot\text{g}^{-1}$				
处理	拷贝数			
	<i>phoC</i> $\times 10^7$	<i>phoD</i> $\times 10^9$	<i>gcd</i> $\times 10^8$	<i>pqqC</i> $\times 10^7$
CK	3.35 $\pm$ 0.27a	0.39 $\pm$ 0.07c	1.82 $\pm$ 0.05c	4.85 $\pm$ 0.32a
Lime1	0.16 $\pm$ 0.06d	0.47 $\pm$ 0.1bc	0.61 $\pm$ 0.12f	1.04 $\pm$ 0.48d
Lime2	0.42 $\pm$ 0.06bc	0.88 $\pm$ 0.22ab	1.08 $\pm$ 0.14e	1.38 $\pm$ 0.51d
Lime3	0.58 $\pm$ 0.05b	1.02 $\pm$ 0.15a	1.43 $\pm$ 0.13d	2.58 $\pm$ 0.34c
OS1	0.21 $\pm$ 0.05cd	0.46 $\pm$ 0.31bc	1.14 $\pm$ 0.12e	2.65 $\pm$ 0.35c
OS2	0.41 $\pm$ 0.03bc	0.93 $\pm$ 0.22a	2.22 $\pm$ 0.08b	3.64 $\pm$ 0.2b
OS3	0.56 $\pm$ 0.06b	0.98 $\pm$ 0.12a	2.55 $\pm$ 0.16a	5.08 $\pm$ 0.31a

2.6 水稻产量与秸秆生物量

不同用量石灰和牡蛎壳粉对水稻籽粒产量和秸秆生物量的影响见图 4.对照处理的水稻产量为 $38.49\text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$,较高用量的石灰和牡蛎壳粉

处理显著提高籽粒产量.0.15% 石灰和牡蛎壳粉处理的水稻产量较对照分别提高 34.2% 和 46.8%.然而石灰和牡蛎壳粉改良剂对水稻秸秆生物量无显著影响.

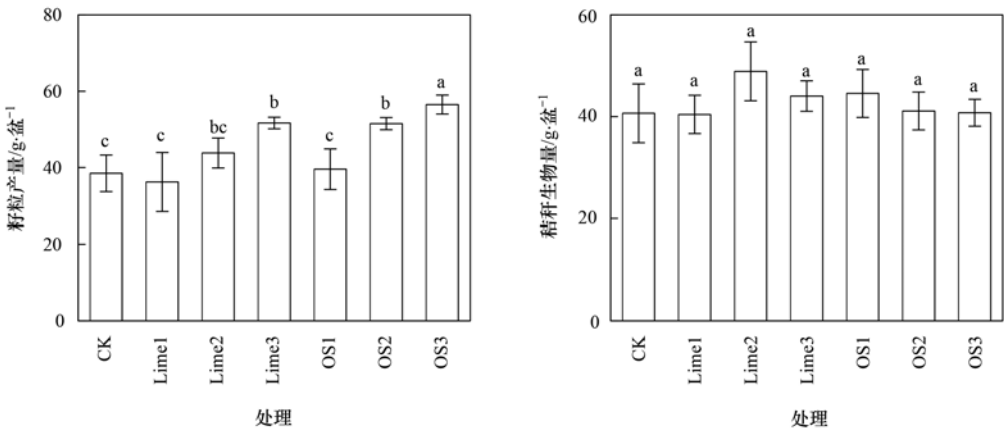


图 4 不同用量石灰和牡蛎壳粉对水稻产量和秸秆生物量的影响

Fig. 4 Effects of different dosages of lime and oyster shell powder on the rice yield and straw biomass

3 讨论

石灰和牡蛎壳粉均在提高土壤 pH 和降低交换性酸含量方面效果显著,且石灰处理效果更好.这是由于石灰本身的 pH 明显高于牡蛎壳粉,加入土壤可以更大程度地中和土壤活性酸和潜性酸(表 1)^[30].同时,土壤 pH 随石灰用量的增加显著提高,这说明石灰用量的变化对土壤 pH 的影响较大.有研究发现,添加石灰通过降低交换性 Al³⁺ 含量和提高交换性 Ca²⁺ 含量,从而减轻土壤酸化造成的铝毒害^[30].相关性分析表明,土壤 pH 和交换性酸呈显

著负相关($R = -0.87, P < 0.05$),而与 CEC 呈极显著正相关($R = 0.89, P < 0.01$, 表 5).土壤交换性能在缓解土壤酸化和维持土壤有效养分方面具有重要作用^[31].土壤 CEC、交换性 K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 含量随石灰和牡蛎壳粉用量的增加而提高.石灰和牡蛎壳粉中主要成分均为 CaCO₃,其中牡蛎壳粉中 CaCO₃ 占比 90% 以上,因此,二者通过提高土壤交换性 Ca²⁺ 含量改善土壤交换性能的作用显著^[9, 32].相关性分析表明,土壤 CEC 与交换性 K⁺ 和交换性 Ca²⁺ 含量呈极显著正相关关系,相关系数分别为 0.96 和 0.90($P < 0.01$, 表 5).

表 5 不同用量石灰和牡蛎壳粉改良土壤酸度、交换性能、磷有效性和作物产量的相关性¹⁾

Table 5 Correlation between soil acidity, exchange performance, P availability and crop yield improved by different dosages of lime and oyster shell powder

	pH	交换性酸	SOM	总磷	CEC	交换性 K ⁺	交换性 Na ⁺	交换性 Ca ²⁺	交换性 Mg ²⁺
pH	1								
交换性酸	-0.87 *	1							
SOM	0.66	-0.38	1						
总磷	0.30	-0.02	0.52	1					
CEC	0.89 **	-0.62	0.73	0.45	1				
交换性 K ⁺	0.86 *	-0.59	0.75	0.59	0.96 **	1			
交换性 Na ⁺	-0.46	0.54	-0.58	-0.21	-0.17	-0.20	1		
交换性 Ca ²⁺	-0.96 **	-0.85 *	0.54	0.23	0.90 **	0.82 *	-0.31	1	
交换性 Mg ²⁺	0.18	-0.04	0.66	0.45	0.32	0.49	-0.24	0.00	1
Olsen-P	0.60	-0.57	0.86 *	0.33	0.51	0.52	-0.85 *	0.49	0.54
Bray-1 P	0.38	-0.41	0.70	0.32	0.44	0.46	-0.53	0.35	0.61
H ₂ O-P	0.07	-0.16	0.46	-0.03	-0.12	0.01	-0.68	-0.17	0.65
H ₂ SO ₄ -P	0.71	-0.58	0.90 **	0.51	0.62	0.72	-0.76 *	0.53	0.70
Al-P	0.78 *	-0.79 *	0.78 *	0.34	0.63	0.64	-0.83 *	0.69	0.41
Fe-P	0.82 *	-0.64	0.93 **	0.40	0.85 *	0.82 *	-0.57	0.76 *	0.51
Ca-P	0.82 *	-0.52	0.91 **	0.54	0.88 **	0.84 *	-0.50	0.78 *	0.35
MBP	0.91 **	-0.81 *	0.59	-0.01	0.73	0.69	-0.47	0.83 *	0.16
籽粒产量	0.41	-0.07	0.91 **	0.45	0.65	0.66	-0.24	0.34	0.71
	Olsen-P	Bray-1 P	H ₂ O-P	H ₂ SO ₄ -P	Al-P	Fe-P	Ca-P	MBP	籽粒产量
Olsen-P	1								
Bray-1 P	0.86 *	1							
H ₂ O-P	0.62	0.43	1						
H ₂ SO ₄ -P	0.90 **	0.70	0.65	1					
Al-P	0.95 **	0.79 *	0.47	0.89 **	1				
Fe-P	0.88 **	0.77 *	0.31	0.86 *	0.88 **	1			
Ca-P	0.75	0.56	0.13	0.78 *	0.77 *	0.93 **	1		
MBP	0.54	0.21	0.27	0.65	0.67	0.71	0.68	1	
籽粒产量	0.64	0.65	0.32	0.67	0.50	0.80 *	0.78 *	0.36	1

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关; 样本数为 21

磷作为植物生长必须的大量元素,其有效性直接影响作物产量和品质.然而,酸性土壤中大量的有效磷被吸附固定,难以被植物吸收利用^[18].土壤总磷仅在 OS3 处理下显著提高,一方面,石灰和牡蛎壳粉的总磷含量较低,因此其处理效果不显著;另一方面,牡蛎壳粉的总磷含量约为石灰的 14 倍,因

此仅有较高用量下的牡蛎壳粉才能显著提高土壤总磷含量(表 1).石灰和牡蛎壳粉对提高不同提取剂测定的有效磷含量均有一定的作用,且随施用量增加而提高.石灰和牡蛎壳粉处理均显著提高 Olsen-P 含量,且随改良剂用量的增加而提高.石灰和牡蛎壳粉中的磷含量极低,因此通过直接输入

提高土壤磷有效性的贡献不大. 石灰和牡蛎壳粉对土壤磷有效性的提高主要是由于土壤酸性的改良^[33]. 已有研究发现,对酸性土壤 pH 的提高可以降低铁铝氧化物对磷的吸附,从而提高有效磷含量;同时,Fe³⁺和 Al³⁺等金属离子与改良剂带来的碱性基团相结合,减少金属离子对磷酸根离子的吸附^[33~35]. 另一方面,石灰和牡蛎壳粉改善土壤结构,增强土壤微生物活性,土壤中溶磷菌丰度和

磷酸酶活性的提高促进土壤有机磷的矿化和无机磷溶解^[36~40]. 相关性分析表明,Olsen-P 含量与土壤 SOM 呈显著正相关($R=0.86$, $P<0.05$),说明石灰和牡蛎壳粉通过提高土壤 SOM 含量,优化土壤团粒结构,从而提高土壤肥力(表 5). 此外,土壤 ALP 活性与 Olsen-P 和 H₂SO₄-P 呈显著正相关,说明 ALP 在促进土壤 P 向有效形态转化方面具有关键作用(表 6).

表 6 土壤有效磷、分级磷、MBP 与酶活性和功能基因的相关性¹⁾

	Olsen-P	Bray-1 P	H ₂ O-P	H ₂ SO ₄ -P	Al-P	Fe-P	Ca-P	MBP
DHA	-0.22	-0.35	-0.26	-0.03	0.09	-0.051	-0.06	0.51
ACP	-0.96**	-0.72	-0.60	-0.93**	-0.96**	-0.91**	-0.80*	-0.75
ALP	0.86*	0.65	0.42	0.89**	0.85*	0.97**	0.90**	0.82*
PD	-0.04	0.21	0.03	-0.16	-0.31	-0.14	-0.12	-0.71
IPP	0.59	0.31	0.54	0.72	0.64	0.70	0.59	0.93**
<i>phoC</i>	-0.91**	-0.73	-0.64	-0.79*	-0.92**	-0.65	-0.51	-0.46
<i>phoD</i>	0.73	0.64	0.43	0.83*	0.68	0.90**	0.82*	0.67
<i>gcd</i>	0.74	0.70	0.17	0.77*	0.84*	0.74	0.71	0.39
<i>pqqC</i>	-0.26	-0.04	-0.24	-0.26	-0.48	-0.12	-0.01	-0.53

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关; 样本数为 21

土壤无机磷是土壤磷素的重要组成部分,一般占总磷库的 60%~80%,用以评价土壤有效磷库的大小和磷素的供应能力^[18]. 土壤各无机磷含量的大小关系为:Fe-P>Al-P>Ca-P,这与已有的研究结论一致^[41]. 土壤无机磷含量随石灰和牡蛎壳用量的增加而提高,在 0.15% 用量下 Ca-P 含量较对照提高的百分比最大,这是因为石灰和牡蛎壳中含有大量的 CaCO₃,一定程度上促进了 Ca²⁺与 PO₄³⁻的结合^[9, 42]. 土壤无机磷作为供应土壤有效磷的直接来源,通过有机磷矿化的增加和无机磷增溶的减少获得平衡,而有机磷矿化则是促进无机磷增加的主要途径^[43]. 石灰和牡蛎壳粉对土壤酸性的改良促进了土壤中 ALP 活性的提高,从而促进磷有效性的提高. 相关性分析表明,土壤 Al-P、Fe-P 和 Ca-P 含量均与 pH 呈显著正相关关系,相关系数分别为 0.78、0.82 和 0.82 ($P<0.05$); Al-P 和 Fe-P 含量均与 Olsen-P 含量呈极显著正相关关系,相关系数分别为 0.95 和 0.88 ($P<0.01$, 表 5). 同时,土壤 Al-P、Fe-P、Ca-P 和 MBP 含量与 ALP、IPP 活性、*phoD* 和 *gcd* 基因具有较高的相关性,说明土壤磷酸酶活性的提高和功能基因的表达促进土壤有机磷的矿化,进而提高有效磷含量^[44]. 此外,石灰和牡蛎壳粉不仅对土壤酸度和磷有效性具有显著改良,同时可以显著提高水稻产量. 水稻产量与土壤 SOM、Fe-P 和 Ca-P 显著正相关(表 5). 因此,石灰和牡蛎壳粉通过化学和微生物途径改良土壤性状和促进养分有效性对提

高农业生产力具有指导意义^[45].

4 结论

石灰和牡蛎壳粉均可以提高土壤 pH 和交换性,降低土壤交换性酸总量和交换性 Al³⁺,且在较高用量下效果较好. 石灰处理比牡蛎壳粉改良土壤酸性效果较好,且对土壤 pH 的改良随用量显著增加. 石灰和牡蛎壳粉对于提高土壤有效磷含量均有明显作用,且 Olsen-P 含量随改良剂用量的增加而提高. 土壤无机磷含量表现为:Fe-P>Al-P>Ca-P,石灰和牡蛎壳粉处理较对照显著提高 Al-P 含量,但不同用量处理之间无显著差异,土壤中 Fe-P 和 Ca-P 含量均在较高改良剂用量下增加最为明显. 石灰和牡蛎壳粉提高土壤 ALP 活性和 *phoD* 基因拷贝数,促进土壤中有有机磷的矿化,进而提高磷的生物有效性. 石灰和牡蛎壳粉改良剂在 0.15% 用量下显著提高水稻产量,但对秸秆生物量无显著影响. 石灰和牡蛎壳粉对土壤酸化的改良作用和养分有效性的提高是提升耕地质量和农作物产量的主要机制.

参考文献:

[1] 张玲玉,赵学强,沈仁芳. 土壤酸化及其生态效应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1900-1908.
Zhang L Y, Zhao X Q, Shen R F. Soil acidification and its ecological effects [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38 (6): 1900-1908.
[2] 张福锁. 我国农田土壤酸化现状及影响[J]. 民主与科学, 2016, (6): 26-27.
Zhang F S. Current situation and influence of farmland soil

- acidification in China[J]. *Democracy & Science*, 2016, (6): 26-27.
- [3] 陈乐, 詹思维, 刘梦洁, 等. 生物炭对不同酸化水平稻田土壤性质和重金属 Cu、Cd 有效性影响[J]. *水土保持学报*, 2020, **34**(1): 358-364.
- Chen L, Zhan S W, Liu M J, *et al.* Effects of biochar on the properties and the availability of Cu and Cd in paddy soil with different acidification levels [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(1): 358-364.
- [4] 孟红旗, 刘景, 徐明岗, 等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变[J]. *土壤学报*, 2013, **50**(6): 1109-1116.
- Meng H Q, Liu J, Xu M G, *et al.* Evolution of pH in topsoils of typical Chinese croplands under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, **50**(6): 1109-1116.
- [5] Hong C, Lu S G. Does biochar affect the availability and chemical fractionation of phosphate in soils? [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, **25**(9): 8725-8734.
- [6] 李光辉, 成晴, 陈宏. 石灰配施有机物料修复酸性 Cd 污染稻田[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 925-931.
- Li G H, Cheng Q, Chen H. Remediation of Cd contaminated acidic rice fields using the combined application of lime and organic matter[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 925-931.
- [7] 马国柱, 屠乃美, 方畅宇, 等. 有机无机肥配施锌肥和石灰对双季稻产量及土壤养分特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, **34**(4): 171-177.
- Ma G Z, Tu N M, Fang C Y, *et al.* Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers with zinc fertilizer and lime on yield and soil nutrient characteristics of double cropping rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(4): 171-177.
- [8] 方克明, 肖欣, 王美玲, 等. 农用石灰在酸性及镉污染稻田中试效果[J]. *中国农学通报*, 2021, **37**(26): 93-97.
- Fang K M, Xiao X, Wang M L, *et al.* Intermediate test effect of agricultural lime on acid and cadmium contaminated paddy field [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, **37**(26): 93-97.
- [9] 曹敏杰, 丁希月, 许玲玲, 等. 牡蛎壳资源利用研究进展[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2021, **26**(5): 390-397.
- Cao M J, Ding X Y, Xu L L, *et al.* Progress of the utilization of oyster shell resource [J]. *Journal of Jimei University (Natural Science)*, 2021, **26**(5): 390-397.
- [10] 柳开楼, 熊华荣, 胡惠文, 等. 特贝钙土壤调理剂对红壤旱地花生产量和阻控土壤酸化的影响[J]. *广东农业科学*, 2017, **44**(5): 93-98.
- Liu K L, Xiong H R, Hu H W, *et al.* Effects of soil conditioner (named by Tebeigai) on peanut yield and controlling soil acidification in red soil [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2017, **44**(5): 93-98.
- [11] 陈勇红. 特贝钙土壤调理剂在南方红壤区蔬菜上的应用效果[J]. *东南园艺*, 2019, **7**(4): 1-5.
- Chen Y H. Application effect of Tebeigai soil conditioner on vegetable in red soil areas of southern China [J]. *Southeast Horticulture*, 2019, **7**(4): 1-5.
- [12] Glaser B, Lehr V I. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: a meta-analysis[J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1), doi: 10.1038/s41598-019-45693-z.
- [13] Eduah J O, Nartey E K, Abekoe M K, *et al.* Phosphorus retention and availability in three contrasting soils amended with rice husk and corn cob biochar at varying pyrolysis temperatures [J]. *Geoderma*, 2019, **341**: 10-17.
- [14] Gao S, DeLuca T H. Wood biochar impacts soil phosphorus dynamics and microbial communities in organically-managed croplands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **126**: 144-150.
- [15] Huang Y L, Dai Z M, Lin J H, *et al.* Labile carbon facilitated phosphorus solubilization as regulated by bacterial and fungal communities in *Zea mays* [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, **163**, doi: 10.1016/j.soilbio.2021.108465.
- [16] Chen X D, Jiang N, Condron L M, *et al.* Soil alkaline phosphatase activity and bacterial *phoD* gene abundance and diversity under long-term nitrogen and manure inputs [J]. *Geoderma*, 2019, **349**: 36-44.
- [17] 向书江, 余泳, 熊子怡, 等. 化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 6067-6077.
- Xiang S J, Yu L, Xiong Z Y, *et al.* Effects of combined application of biochar with chemical fertilizers and organic fertilizers on nutrients and phosphorus forms in purple soils[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 6067-6077.
- [18] 宋文涛, 田纪辉, 董宇豪, 等. 秸秆生物炭对水稻土和赤红壤磷素有效性及化学形态的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, **28**(5): 1-10.
- Song W T, Tian J H, Dong Y H, *et al.* Effects of straw biochar amendment on the availability and fractions of phosphorus in paddy soil and lateritic red soil [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, **28**(5): 1-10.
- [19] 杨文娜, 余泳, 罗东海, 等. 化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 540-549.
- Yang W N, Yu L, Luo D H, *et al.* Effect of combined application of biochar with chemical fertilizer and organic fertilizer on soil phosphatase activity and microbial community [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 540-549.
- [20] 吴彬, 徐晶晶, 成艳红, 等. 石灰施用对酸性土壤矿物结合有机碳形成的影响[J]. *中国农学通报*, 2021, **37**(21): 98-105.
- Wu B, Xu J J, Cheng Y H, *et al.* Effects of liming on formation of mineral-associated organic carbon in acidic soil [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, **37**(21): 98-105.
- [21] 梁军伟. 生石灰施用量对酸性土壤和烟草生长前期的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- Liang J W. Effects of quicklime amounts on acidic soil and pre-growth of tobacco[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [22] 刘洋. 田间试验下石灰与生物质炭施用对雷竹林酸化土壤的改良效应研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
- Liu Y. The amelioration effects of lime and biochar on an acidified bamboo (*Phyllostachys praecox*) plantation soil: a field study[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2021.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] Mehlich A. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1978, **9**(6): 477-492.
- [25] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, **46**(5): 970-976.
- [26] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of

- microbial biomass phosphorus in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, **14**(4): 319-329.
- [27] 苏弘治. 秸秆还田对黑钙土性质的影响和黑钙土肥力质量综合评价[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2019.
- Su H Z. Effect of straw returning on the properties of chernozem and fertility of chernozem overview [D]. Shenyang: Liaoning University, 2019.
- [28] Tabatabai M A. Soil enzymes[A]. In: Bottomley P S, Angle J S, Weaver R W (Eds.). *Methods of Soil Analysis: Part 2-microbiological and Biochemical Properties* [M]. Madison: Soil Science Society of America, 1994.
- [29] Yang C D, Lu S G. Straw and straw biochar differently affect phosphorus availability, enzyme activity and microbial functional genes in an Ultisol[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **805**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150325.
- [30] 闫志浩, 胡志华, 王士超, 等. 石灰用量对水稻油菜轮作区土壤酸度、土壤养分及作物生长的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, **52**(23): 4285-4295.
- Yan Z H, Hu Z H, Wang S C, *et al.* Effects of lime content on soil acidity, soil nutrients and crop growth in rice-rape rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, **52**(23): 4285-4295.
- [31] 杨彩迪, 卢升高. 秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4246-4252.
- Yang C D, Lu S G. Dynamic effects of direct returning of straw and corresponding biochar on acidity, nutrients, and exchangeable properties of red soil[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4246-4252.
- [32] 张东, 扈强, 杜咏梅, 等. 植烟土壤酸化及改良技术研究进展[J]. *中国烟草科学*, 2013, **34**(5): 113-118.
- Zhang D, Hu Q, Du Y M, *et al.* Advances in acidification and improvement of tobacco planting soil [J]. *Chinese Tobacco Science*, 2013, **34**(5): 113-118.
- [33] 洪灿. 土壤改良剂对酸性土壤磷的生物有效性和土壤物理性质的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- Hong C. The effects of the soil modifiers on the bioavailability of phosphorus and the physical properties in acid soils [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [34] Gérard F. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils-A myth revisited[J]. *Geoderma*, 2016, **262**: 213-226.
- [35] Borges B M M N, Strauss M, Camelo P A, *et al.* Re-use of sugarcane residue as a novel biochar fertiliser-Increased phosphorus use efficiency and plant yield[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121406.
- [36] Tian J H, Kuang X Z, Tang M T, *et al.* Biochar application under low phosphorus input promotes soil organic phosphorus mineralization by shifting bacterial *phoD* gene community composition[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **779**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146556.
- [37] Dai Z M, Liu G F, Chen H H, *et al.* Long-term nutrient inputs shift soil microbial functional profiles of phosphorus cycling in diverse agroecosystems[J]. *The ISME Journal*, 2020, **14**(3): 757-770.
- [38] Khadem A, Raiesi F. Response of soil alkaline phosphatase to biochar amendments: changes in kinetic and thermodynamic characteristics[J]. *Geoderma*, 2019, **337**: 44-54.
- [39] Sun Q, Hu Y J, Chen X B, *et al.* Flooding and straw returning regulates the partitioning of soil phosphorus fractions and *phoD*-harboring bacterial community in paddy soils [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2021, **105**(24): 9343-9357.
- [40] Zhou C F, Heal K, Tigabu M, *et al.* Biochar addition to forest plantation soil enhances phosphorus availability and soil bacterial community diversity [J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, **455**, doi: 10.1016/j.foreco.2019.117635.
- [41] Yang C D, Lu S G. Pyrolysis temperature affects phosphorus availability of rice straw and canola stalk biochars and biochar-amended soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, **21**(8): 2817-2830.
- [42] Gustafsson J P, Mwamila L B, Kergoat K. The pH dependence of phosphate sorption and desorption in Swedish agricultural soils [J]. *Geoderma*, 2012, **189-190**: 304-311.
- [43] Zhang Y L, Li Y, Wang S Z, *et al.* Soil phosphorus fractionation and its association with soil phosphate-solubilizing bacteria in a chronosequence of vegetation restoration [J]. *Ecological Engineering*, 2021, **164**, doi: 10.1016/j.ecoleng.2021.106208.
- [44] Jarosch K A, Kandeler E, Frossard E, *et al.* Is the enzymatic hydrolysis of soil organic phosphorus compounds limited by enzyme or substrate availability? [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, **139**, doi: 10.1016/j.soilbio.2019.107628.
- [45] 李雁乔, 章骞, 黄永生, 等. 煅烧牡蛎壳粉对土壤酸化及琯溪蜜柚果实的改善效果[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2020, **25**(4): 256-264.
- Li Y Q, Zhang Q, Huang Y S, *et al.* Improvement effect on acidic soil and the quality of Guanxi pomelo by calcined oyster shell powder[J]. *Journal of Jimei University (Natural Science)*, 2020, **25**(4): 256-264.

CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University	 HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review	 LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary	CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach	YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay	QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province	 YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen	PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn ²⁺ by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters	ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS	XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes	XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019	FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley	 CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM _{2.5} Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas	QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing	FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China	SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed	CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season	 LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau	LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope	 ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir	HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation	WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems	 ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions	 DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis	 TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis	 LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China	 SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N ₂ O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions	TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis	LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model	 GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS	ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd ²⁺ Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area	WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils	 LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil	ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L.	SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing	FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios	 HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity	CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes	SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction	 LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China	HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings	 YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China	LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)