

目次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用刘润璞, 彭栓, 陈玉烁, 陈民, 张楠, Nihed Benani, 吕连宏, 阳平坚 (1233)

全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析任晓松, 李昭睿 (1243)

京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式田超, 程琳琳, 邵盈钊 (1254)

太原市“十四五”规划大气污染防治政策的CO₂协同效益评估肖婷玉, 束赕, 李慧, 王涵, 李俊宏, 严沁, 张文杰, 姜华 (1265)

湖南省工业领域碳减排与空气质量改善协同李楠, 刘弯弯, 朱书涵, 邢晓雯, 汤克勤, 王松伟, 白露 (1274)

“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径张静, 杨萌, 张伟, 曹东, 赵静, 李勃, 薛英岚, 蒋洪强 (1285)

郑州市公交车队电动化减排降碳环境效益邹超, 汪亚男, 吴琳, 何敬, 倪经纬, 毛洪钧 (1293)

长江中游城市群城市化对PM_{2.5}浓度的多尺度驱动机制张政, 周廷刚, 周志衡, 昌悦 (1304)

天山北坡城市群PM_{2.5}浓度时空分布特征及影响因素分析王相男, 张喆, 刘方青 (1315)

天津市PM_{2.5}碳组分空间差异性来源解析武甫亮, 吴建会, 戴启立, 肖致美, 冯银厂 (1328)

贵阳市花溪城区大气PM_{2.5}中碳质气溶胶的变化特征及来源解析桂佳群, 杨员, 王显钦, 李云武, 闫广轩, 徐鹏 (1337)

新乡市大气PM_{2.5}中水溶性离子的污染特征、来源解析及气象影响分析刘桓嘉, 李岚清, 李焕莉, 任言, 许梦源, 贾梦珂, 刘恒志, 杨莹, 宋天颂, 洪启航 (1349)

2017~2018年冬季菏泽大气PM_{2.5}中金属元素特征及健康风险评估杜虹萱, 任丽红, 赵明升, 韩慧霞, 徐义生 (1361)

北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析潘锦秀, 安欣欣, 刘保献, 李云婷, 李倩, 孙峰, 张章, 邱启鸿, 陈阳 (1371)

南京夏季大气臭氧光化学特征与敏感性分析罗丽彤, 章炎麟, 林煜棋, Ahsan Mozaffar, 曹梦瑶 (1382)

苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化吴也正, 张鑫, 顾韵, 缪青, 魏恒, 熊宇, 杨倩, 吴斌, 沈文渊, 马强 (1392)

长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源卢洪斌, 卢少勇, 李响, 张霖霖, 黄张根 (1402)

基于PCA-APCS-MLR模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析崔志谋, 史小红, 赵胜男, 卢俊平, 张昊, 刘莹慧, 郭鑫, 王彦隽 (1415)

重庆市长寿湖水表层水体重金属时空分布及风险评价张瑞溪, 刘娅君, 罗泳楠, 李杰芹, 李彩霞, 李佳佳, 张成 (1428)

长江流域微塑料污染特征及生态风险评估李思琼, 王华, 储林佑, 曾一川, 闫雨婷 (1439)

宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算丁爽, 李卫明, 张续同, 刘子健, 高雅坤, 李映成, 王芳炜 (1448)

汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估赵长民, 和兵, 李和通, 张瑞琪, 李银月, 张发文, 桂新, 马丽 (1457)

宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评估高礼, 李凌云, 郑兰香, 吴海娟, 陶红, 刘邓超 (1468)

浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评估钟奕昕, 李立湘, 吴鑫, 周施阳, 姚飞延, 董好刚 (1480)

鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析马妍, 孙晨, 毕茹乐, 张波涛, 刘艳, 邵鹏, 刘统, 王圣瑞, 钟文军 (1492)

杭州湾南岸20a水质净化功能变化及预测王珊珊, 曹公平, 徐明伟, 黄君宝, 曾剑 (1502)

不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例代孟均, 张兵, 杜倩倩, 孙季琰, 田蕾, 王义东 (1512)

长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素刘海, 宋阳, 李迎春, 魏伟, 赵国红, 王旭东, 黄健敏 (1525)

富营养化湖泊藻华腐解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应张瑾, 陈明滢, 郝智能, 钟寰, 何欢, 雷沛 (1539)

紫外光活化亚硫酸盐降解水中卡马西平林涛, 苑宇杰 (1553)

再生水消毒副产物的检测、生成与控制廖雨枫, 王正, 潘昀, 李爱民 (1561)

3种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性何强, 陈博文, 杨雨静, 周全, 刘彦君, 王志刚, 程呈 (1577)

基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 王旭 (1586)

基于AWRSEI的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析赵嘉丽, 李兴, 孙冰 (1598)

定量评估气候变化对长江中下游地区植被GPP_{GS}变化的影响徐勇, 盘钰春, 邹滨, 郑志威, 郭振东 (1615)

基于Meta分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响李健明, 康雨欣, 蒋福祺, 宋明丹, 祁凯斌, 卢素锦, 李正鹏 (1629)

连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响鲁泽让, 李永梅, 杨春怀, 夏梓泰, 程伟威, 王自林, 赵吉霞, 范茂攀 (1644)

4种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (1655)

不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系邵奇, 吴涛, 解雪峰, 徐梓晴, 李文琦, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞 (1665)

黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征王传盈, 王凯月, 王浩然, 张梦迪, 周云凯 (1674)

覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响宋宁宁, 李梦佳, 王学霞, 刘君, 王芳丽, 宗海英, 黄小丽, 王斌, 梁丽娜 (1684)

秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 陈琦琦, 张冬明, 雷菲, 曾建华, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (1692)

耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 李天姿, 于媛, 李晶 (1702)

基于遥感时-空-谱特征及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测王泽强, 张冬有, 徐夕博, 王兆鹏, 杨东宇, 宋晓宁 (1713)

黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 曹素珍 (1724)

广西贺州市典型矿区周边耕层土壤Cd通量特征杨烨宇, 李程, 杨忠芳, 张起钻, 邹胜章, 宋淑娟, 蔡贺清 (1739)

基于信息扩散模型的沔东新区土壤重金属潜在生态风险评估杨楠楠, 韩玲, 刘明 (1749)

湘西地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价肖凯琦, 徐宏根, 甘杰, 戴亮亮, 李毅, 李凯, 许青阳, 张俊, 邓世民, 李颖 (1760)

典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评估沈城, 王文娟, 沙晨燕, 谢雨晴, 王敏, 吴健 (1769)

省级尺度土壤As迁移转化与水稻安全种植区划:以贵州省为例董心月, 吴勇, 周子寒, 王佛鹏, 张云霞, 宋波 (1781)

谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉累积的效应易轩韬, 欧阳坤, 辜娇峰, 李倩, 游萍, 周航, 廖柏寒 (1793)

EDDS对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响刘文英, 吴刚, 胡红青 (1803)

叶面凋制剂对复合污染农田小麦籽粒Cd、As和Pb累积的阻控效应肖冰, 王秋实, 高培培, 赵全利, 杨威, 王钊, 刘文菊, 薛培英 (1812)

民勤绿洲退耕地土壤微生物群落结构与功能多样性特征李常乐, 张富, 王理德, 赵赫然, 赵学成, 张恒平 (1821)

宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制李雨桐, 余海, 刘坤, 柏宏成, 汪军, 朱正杰 (1830)

养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险白渔樵, 孙兴滨, 仇天雷, 郭雅志, 高敏, 王旭明 (1840)

玛瑙河多环境介质和铜锈环螺体内微塑料的赋存特征高雅坤, 李卫明, 张续同, 刘子健, 李映成, 丁爽, 王芳炜, 刘流 (1849)

不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应闫振华, 张燕, 包旭辉, 朱培元, 陈玉芳 (1859)

谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉砷累积的效应

易轩韬¹, 欧阳坤^{2,3}, 辜娇峰^{1*}, 李倩^{2,4}, 游萍², 周航¹, 廖柏寒¹

(1. 中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004; 2. 湖南浩美安全环保科技有限公司, 长沙 410100; 3. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650504; 4. 中南大学资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘要: 为研究谷壳灰制备硅肥对水稻不同生育期土壤重金属镉(Cd)和砷(As)生物有效性、酶活性、微生物群落结构和糙米重金属含量的影响, 开展水稻盆栽试验. 结果表明, 施用 0.1%~1.0% 谷壳灰硅肥能提高土壤 pH 值 0.04~0.24 个单位, 有效硅含量 44.2%~97.5%, 也能降低土壤有效态 Cd 含量 16.2%~21.4%, 有效态 As 含量 16.0%~24.9%; 随施加量的增大各生育期土壤酶活性增大, 其中蔗糖酶活性显著增大 6.3%~145.7%, 脱氢酶活性显著增大 6.7%~224.1%; 分析土壤成熟期微生物群落结构显示, 施用谷壳灰硅肥不影响微生物 α -多样性, 但对微生物 β -多样性产生显著影响, 促进微生物生长, 维持群落结构稳定性; 随施加量的增大, 糙米 Cd 含量降低了 29.3%~89.7%, 糙米总 As 和无机 As 含量分别降低 7.8%~42.3% 和 17.2%~44.5%, 当施用量在 0.5% 和 1.0% 时水稻糙米 ω (Cd) < 0.2 mg·kg⁻¹, ω (无机 As) < 0.35 mg·kg⁻¹. 综上, 谷壳灰硅肥能改善土壤质量、降低糙米 Cd 和 As 含量, 具有环境友好性, 可用于 Cd 和 As 复合污染稻田土壤的治理.

关键词: 谷壳灰; 硅(Si); 镉砷; 水稻; 土壤酶; 土壤微生物群落

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1793-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202303212

Effect of Silica Fertilizer (Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice

YI Xuan-tao¹, OUYANG Kun^{2,3}, GU Jiao-feng^{1*}, LI Qian^{2,4}, YOU Ping², ZHOU Hang¹, LIAO Bo-han¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. Hunan Hermes Safe Environmental Protection Science Co., Ltd., Changsha 410100, China; 3. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China; 4. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A rice pot experiment was conducted to identify the effect of silica fertilizer prepared from husk ash on the soil bioavailability of cadmium (Cd) and arsenic (As), enzyme activities, microbial community structure, and heavy metal content in brown rice at different growth stages. The results showed that the application of 0.1%-1.0% silica fertilizer-husk ash increased the pH value of soil by 0.04-0.24 units and the content of soil available silicon by 44.2%-97.5%. It also decreased the content of available Cd and available As by 16.2%-21.4% and 16.0%-24.9%, respectively. With the increase in application amount, the soil enzyme activities increased at all growth stages, and the sucrase activity and the dehydrogenase activity significantly increased by 6.3%-145.7% and 6.7%-224.1%, respectively. The analysis of the soil microbial community composition structure at mature stages showed that the application of silica fertilizer-husk ash had no effect on microbial α -diversity, but it had a significant effect on microbial β -diversity and then promoted microbial growth and maintained the stability of the community structure. With the increase in application amount, the contents of Cd in brown rice decreased by 29.3%-89.7%, and the contents of total As and inorganic As in brown rice decreased by 7.8%-42.3% and 17.2%-44.5%, respectively. Under the application of 0.5% and 1.0% silica fertilizer-husk ash, the Cd contents in brown rice were lower than 0.2 mg·kg⁻¹, and the inorganic As contents in brown rice were lower than 0.35 mg·kg⁻¹. In conclusion, the silica fertilizer-husk ash can improve soil quality and reduce the contents of Cd and As in brown rice, and it is eco-friendly and can be used to remedy the paddy soil contaminated with Cd and As.

Key words: husk ash; silicon(Si); cadmium-arsenic; rice; soil enzyme; soil microbial community

2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》^[1]显示,耕地土壤污染点位超标率为19.4%,主要污染物镉(Cd)和砷(As)点位超标率分别达到7.0%和2.7%,且《2021中国生态环境状况公报》^[2]报道影响农用地土壤环境质量的主要污染物是重金属,其中Cd为首要污染物.重金属Cd和类金属As具有迁移能力强、降解性差、生物毒性大等特点^[3],进入土壤后造成土壤污染和降低土壤质量,进而增大稻米等农作物重金属污染风险^[4].因此,能否降低土壤Cd和As的迁移性和生物毒性,提升土壤质量,降低稻米等农作物中Cd和As含量,以符合《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762-2022)^[5]要求,是亟需解决的环境问题.

硅(Si)是土壤介质中丰度最高的元素,能缓解不利环境给水稻带来的迫害.例如,施用硅肥(主要成分SiO₂)能够增强水稻的抗倒伏性^[6]、抗热和抗旱能力^[7],以及对稻瘟病、褐斑病、叶鞘腐败病和螟虫等病虫害的抵抗力^[8].在缓解Cd和As毒害方面,已有研究发现硅肥对植株Cd的累积抑制效果优于硒肥^[9];硅肥能有效降低糙米中Cd的含量,降幅可达到39.82%^[10];富Si的土壤调理剂(稻壳灰,1%)能将糙

收稿日期: 2023-03-25; 修订日期: 2023-06-05

基金项目: 湖南省企业科技特派员计划项目(2021GK5003); 国家自然科学基金项目(41907126)

作者简介: 易轩韬(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染控制, E-mail: 494516099@qq.com

* 通信作者, E-mail: gujiaofeng@csuftu.edu.cn

米中无机 As 含量降低 31.0%~54.0%^[11]. 同时,将谷壳灰硅肥和矿物硅肥施用到单一 As 污染土壤,谷壳灰硅肥降低水稻植株无机 As 累积的效果较矿物硅肥更显著,对水稻的产量也有明显促进作用^[12]. 水稻喜 Si 且植株累积大量的 Si,有研究表明,水稻谷壳中约含有 10.0% 以上的 Si^[13],将谷壳有氧燃烧得到的谷壳灰中 Si 含量远高于常规硅肥,相比由矿物制备的硅肥,谷壳灰制备的硅肥更适合长期使用,它减少了其他离子的加入,对土壤无二次伤害^[14].

土壤酶系统主要控制土壤中碳(C)、氮(N)和(P)等营养元素的转化,土壤酶活性反映了各营养元素代谢活动的强弱^[15]. 植物根际微生物数量庞大,参与土壤中各种物质转化过程,根际微生物是土壤生态系统动态平衡的重要调节者. 因此,土壤酶活性和微生物多样性是评价土壤肥力和土壤健康的重要指标. 有研究表明,土壤中施加硅肥后(矿物硅肥),不仅能显著改变土壤的理化性质,也能改变植物根际分泌物,影响根际酶和微生物的群落结构,进而对植物生理性状产生影响^[16].

表 1 供试材料基本理化性质¹⁾
Table 1 Basic physical and chemical properties of the test materials

材料	pH	ω (有机质) /g·kg ⁻¹	ω (有效 Si) /mg·kg ⁻¹	ω (TCLP-Cd) /mg·kg ⁻¹	ω (TCLP-As) /mg·kg ⁻¹	ω (总 Cd) /mg·kg ⁻¹	ω (总 As) /mg·kg ⁻¹
水稻土(熟化后)	5.39	14.12	44.5	0.25	0.27	1.54	60.45
谷壳灰硅肥	7.39	ND	6.35×10 ⁵ *	ND	ND	ND	ND

1)*表示材料的 Si 总量,ND 表示未检出

1.2 试验设计

本研究采用水稻盆栽试验,该试验地点在中南林业科技大学校内水稻种植基地,自然条件符合水稻生长. 取无污染土壤(湖南宁乡,东经 111°53',北纬 27°55')自然风干去杂物后,装入圆柱形塑料桶(内径 200 mm,高 240 mm),每桶装土 3.5 kg,然后外源添加分析纯 Cd(NO₃)₂·4H₂O 和 Na₂HAsO₄·7H₂O 至土壤重金属污染中重度水平(含量见表 1),淹水熟化培养 2 个月. 谷壳灰硅肥按质量比 0、0.1%、0.2%、0.5% 和 1.0% 分别加入,依次标记为 CK、T1、T2、T3 和 T4,每个处理重复 3 次,搅拌均匀后,继续淹水培育 15 d,水层深度为 2 cm. 2020 年 7 月 14 日水稻秧苗移栽前 3 d,向盆栽土壤中加入基肥尿素(按 N 计算) 0.28 g·kg⁻¹、(NH₄)₃PO₄(按 P₂O₅ 计算) 0.21 g·kg⁻¹ 和 K₂CO₃(按 K₂O 计算) 0.22 g·kg⁻¹. 水稻秧苗提前在无重金属污染稻田育苗,移栽时选取长势一致的五叶一心禾苗,一盆一穴 2 株. 水稻种植过程中自来水灌溉,淹水培育,水层 2 cm,并根据水稻长势进行农药喷施和基肥补施.

分别在水稻分蘖期(8月23日)、孕穗期(9月26

针对 Cd 和 As 复合污染稻田土壤,谷壳灰硅肥的施用研究尚在不断深入阶段,本课题组在文献[17]中围绕谷壳灰硅肥制备和降低不同水稻品种 Cd 和 As 累积开展了研究. 本研究施用由谷壳灰制备的硅肥,开展水稻盆栽试验,分析谷壳灰硅肥不同施用量下水稻根际土壤基本理化性质、Cd 和 As 的生物有效性、土壤酶活性以及微生物群落结构的变化,探究谷壳灰硅肥影响水稻根际微环境、改善土壤质量的效应,以期为 Cd 和 As 复合污染稻田土壤的治理提供理论基础和技术参考.

1 材料与方 法

1.1 供试土壤与材料

按文献[17]有氧燃烧和稀硝酸浸洗制备谷壳灰硅肥. 供试土壤经由添加分析纯 Cd(NO₃)₂·4H₂O、Na₂HAsO₄·7H₂O(国药集团化学试剂有限公司)熟化后制备. 供试水稻品种为黄华占(常规稻),由湖南农丰种业有限公司生产. 土壤和谷壳灰硅肥基本理化性质及重金属含量见表 1.

日)、灌浆期(10月13日)和成熟期(11月11日),采集水稻植株和根际土壤. 水稻植株用超纯水洗净,105℃杀青后 70℃烘干至恒重并粉碎待测. 根际土壤,部分自然风干,去杂质、碾磨过 10 目和 100 目筛,用于土壤基本理化性质和土壤酶的测定;部分新鲜土壤(成熟期),无菌采集、干冰保存和转运,用于土壤微生物多样性的分析.

1.3 样品分析和测试

土壤 pH 值用酸度计(PHS-3C,雷磁)测定,固液比为 1:2.5、有机质含量用水合热重铬酸钾氧化-比色法测定、土壤 Cd 总量采用王水-高氯酸消煮^[18],生物有效态 Cd 采用美国 EPA 毒性浸提方法(toxicity characteristic leaching procedure, TCLP)^[19]冰醋酸浸提,浸提液中 Cd 含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP 6300, Thermo Fisher, 美国)测定. 土壤 As 总量采用(1+1)王水水浴法消解^[20],生物有效态 As 同样采用 TCLP 法冰醋酸浸提,浸提液中 As 浓度稀释后使用原子荧光分光光度计(AFS-8220,北京吉天仪器有限公司,中国)测定. 土壤有效态 Si 含量采用柠檬酸浸提-硅钼蓝比色法(0.025 mol·L⁻¹ C₆H₈O₇ 柠檬酸)^[18],在

650 nm 波长下用紫外分光光度计(UV-1700, 岛津, 日本)测定. 水稻糙米中 Cd 含量采用干灰法消解, $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HNO}_3$ 浸提^[21], 石墨炉原子吸收分光光度计(iCE-3500, Thermo Fisher, 美国)测定. 糙米总 As 含量采用干灰化法消解 $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$ 浸提、无机 As 含量使用 $0.15 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HNO}_3$ 溶液 90°C 热浸提^[22], 液相色谱-原子荧光光谱联用仪测定(LC-AFS 6500, 北京海光仪器有限公司, 中国). 所有样品分析过程中以国家标准物质土壤[GBW(E)-070009]和大米标准物质[GBW(E)-100354]进行质量控制, 同时做空白试验. 土壤 Cd 和 As 回收率分别为 98.6%~100.1% 和 98.7%~104.0%, 糙米 Cd 和总 As 的回收率分别为 99.3%~100.6% 和 98.4%~101.2%.

土壤脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶和土壤脱氢酶, 使用风干土壤、市售试剂盒(南京建成生物工程研究所, 南京, 中国)分析, 在紫外分光光度计对应 578、540、450 和 485 nm 波长处测量. 试剂盒分析准确率为 96.0%~105.0%.

土壤微生物多样性, 采用 NucleoSpin®96 Soil 提取土壤 DNA, -20°C 保存. 采用正向引物 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3') 和反向引物 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3') 进行细菌 V3~V4 可变区的 PCR 扩增(9902, 96 well PCR 仪, 上海吉泰依科赛生物科技有限公司). PCR 扩增反应条件为: 95°C 预变性 5 min; 25 个循环 (95°C , 30 s; 50°C , 30 s; 72°C , 40 s; 72°C , 7 min). PCR 扩增产物经过纯化、定量和均一化形成测序文库, 质检合格的文库用 Illumina HiSeq 2500(美国 Illumina 公司)进行测序.

1.4 数据处理

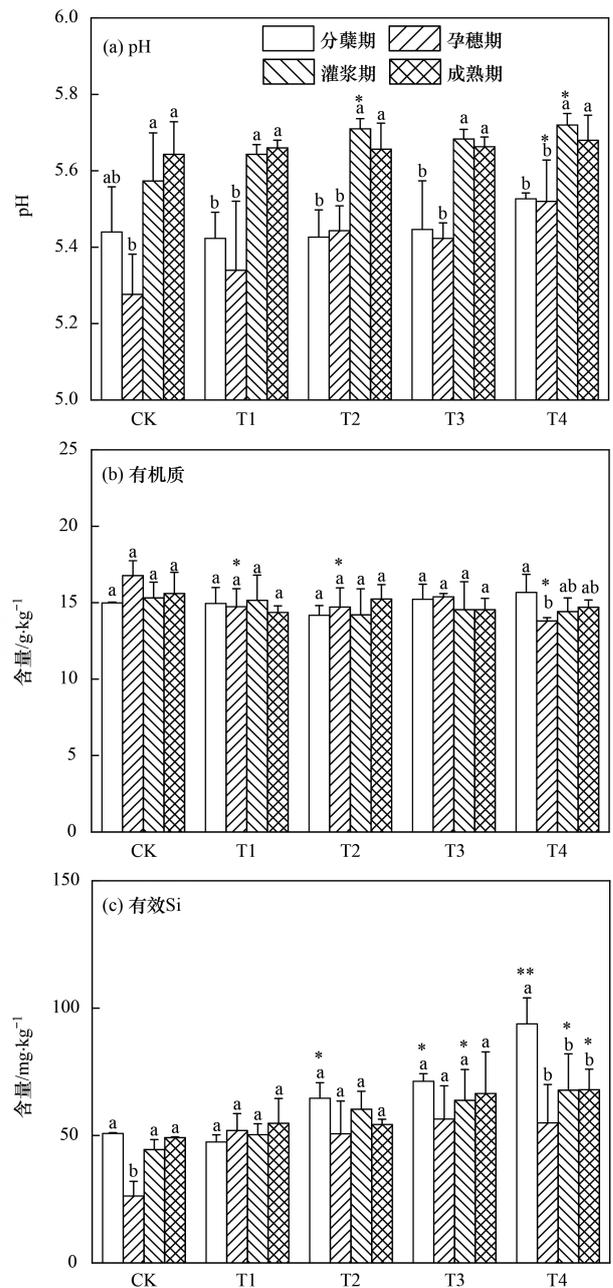
采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 19.0 进行数据统计分析, 文中数据表示为平均值 \pm 标准偏差 ($n=3$). 各处理间差异使用 one-way ANOVA with Duncan's multiple range 检验 ($P<0.05$). 土壤微生物群落结构分析、主成分分析(PCA)和热图等在美吉生物云平台完成, Mantel 测试分析在厦门大学合作的云平台上完成. Origin 2018 软件进行数据绘图.

2 结果与分析

2.1 谷壳灰硅肥对土壤基本理化性质及镉砷生物有效性的影响

由图 1(a)可知, 与分蘖期水稻根际土壤 pH 相比, 随生育期延长, 土壤 pH 呈增大趋势, 增大了 0.15~0.24 个单位, 各处理的灌浆期和成熟期土壤 pH 达到显著差异 ($P<0.05$); 随谷壳灰硅肥施用量增大 (0.1%~1.0%), 各处理土壤 pH 呈增大趋势, 与对照 CK 处理相比, 增大了 0.04~0.24 个单位, 且在 T4 处理

的孕穗期和 T2、T4 处理的灌浆期差异显著 ($P<0.05$). 由图 1(b)可知, 随生育期延长, 水稻根际土壤有机质含量无显著变化; 与对照 CK 处理相比, T1~T4 处理 (0.1%~1.0%) 土壤有机质含量在孕穗期时显著降低了 8.3%~17.7% ($P<0.05$), 其他时期差异不显著. 分析土壤有效 Si 含量[图 1(c)]发现, 随生育期延长, 各处理整体呈现降低趋势, 与分蘖期相比, T4 处理的水稻孕穗期、灌浆期和成熟期显著降低 ($P<0.05$); 而与对照 CK 处理相比, T2、T3 和 T4 处理水稻根际土壤有效 Si 含量显著增大了 44.2%~97.5% ($P<0.05$).

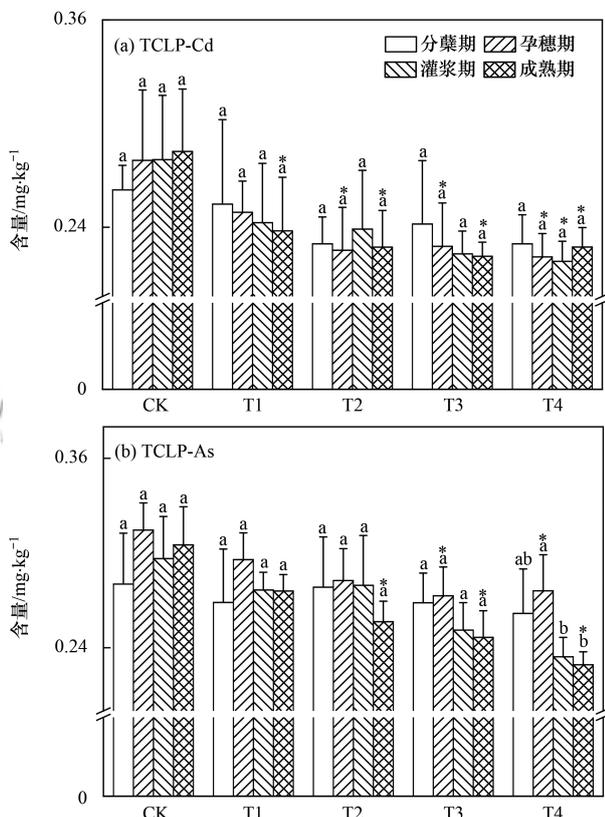


不同小写字母表示各处理生育期间的差异显著 ($P<0.05$), *表示 T1~T4 处理与 CK 差异显著 (*表示 $P<0.05$, **表示 $P<0.01$)

图 1 施用谷壳灰硅肥对水稻 4 个生育期土壤理化性质的影响

Fig. 1 Effect of application silica fertilizer-husk ash on soil physical and chemical properties at four growth stage of rice

由图2(a)可知,土壤Cd和As的生物有效性随水稻生长和谷壳灰硅肥的施用发生改变. 随生育期延长,水稻根际土壤 TCLP-Cd 含量整体呈现降低趋势,与分蘖期相比,降低了0.8%~7.7%;与对照CK处理相比,T1~T4处理(0.1%~1.0%)土壤 TCLP-Cd 含量显著降低了16.2%~21.4% ($P<0.05$). 分析元素As,图2(b)显示水稻根际土壤 TCLP-As 含量,随水稻生育期延长呈现孕穗期增大而灌浆期和成熟期小幅回落的趋势,与分蘖期相比,T4处理显著降低了12.4% ($P<0.05$);与CK处理相比,T1~T4处理(0.1%~1.0%)水稻根际土壤 TCLP-As 含量降低,且T2~T4处理土壤 TCLP-As 含量显著降低了16.0%~24.9% ($P<0.05$). 由此可知,随着水稻生长,土壤Cd和As的生物有效性逐渐降低,且谷壳灰硅肥施用量的增大能更好地降低土壤Cd和As的生物有效性,尤其是T4处理.



不同小写字母表示各处理生育期间的差异显著 ($P<0.05$), *表示 T1~T4 处理与 CK 差异显著 (*表示 $P<0.05$)

图2 施用谷壳灰硅肥对水稻4个生育期土壤 TCLP 提取态 Cd 和 As 的影响

Fig. 2 Effects of application of silica fertilizer-husk ash on soil TCLP-Cd and TCLP-As at four growth stages of rice

2.2 谷壳灰硅肥对土壤酶活性的影响

由图3(a)可知,随生育期延长,水稻根际土壤脲酶活性呈降低趋势,成熟期脲酶活性相比于分蘖期降低了5.0%~19.3%,其中T1,T3和T4处理差异显著 ($P<0.05$);随谷壳灰硅肥施用量增大(0.1%~1.0%),

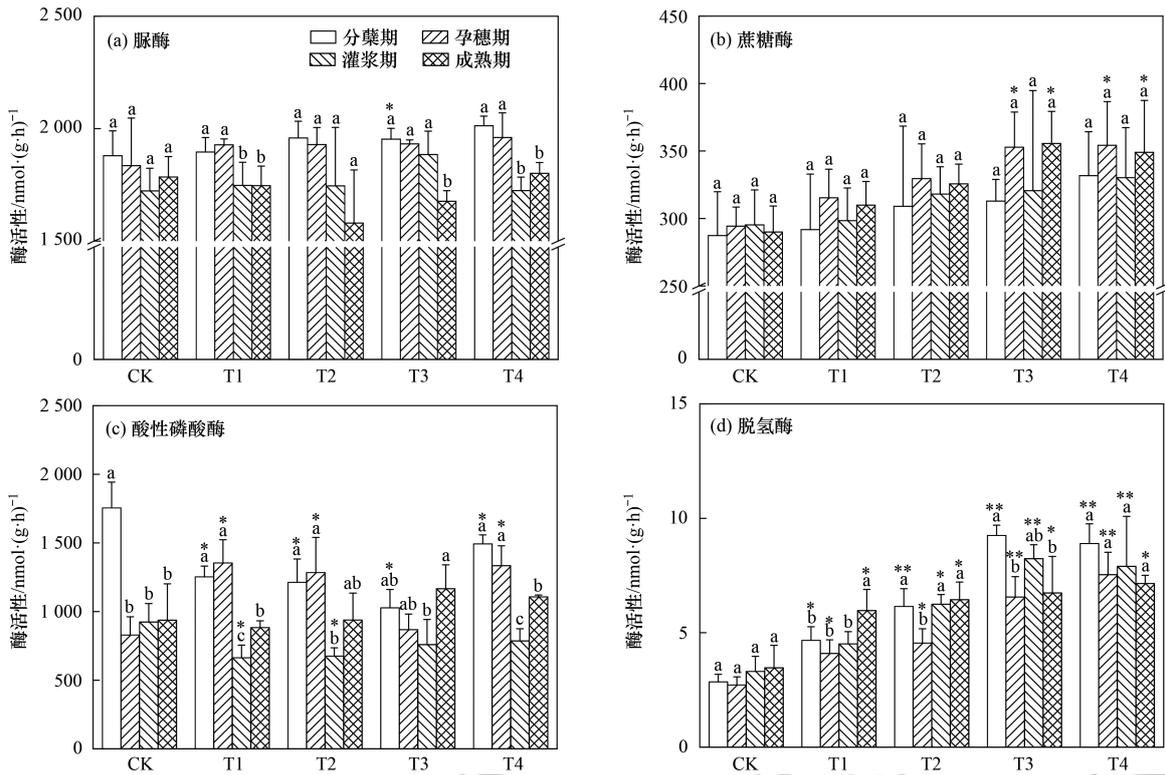
各处理土壤脲酶活性增大,与CK处理相比增大了0.1%~9.4%,但仅在T3处理的分蘖期与对照差异显著. 由图3(b)可知,随生育期延长,土壤蔗糖酶活性呈先增加后小幅降低趋势,但并不显著;随谷壳灰硅肥施用量增大(0.1%~1.0%),各处理土壤蔗糖酶活性增大,与CK处理相比,增大了1.5%~22.6%,其中T3和T4处理在孕穗期和成熟期差异显著 ($P<0.05$). 分析土壤酸性磷酸酶活性[图3(c)],与分蘖期相比,随生育期延长显著降低了22.6%~47.3% ($P<0.05$);谷壳灰硅肥施用(0.1%~1.0%)则增大了孕穗期和成熟期土壤酸性磷酸酶活性,分别增大了4.8%~63.4%和0.2%~24.5% ($P<0.05$). 由图3(d)可知,随生育期延长,水稻根际土壤脱氢酶活性呈先降低后增大趋势,且在T1、T2和T3处理中表现出显著差异 ($P<0.05$);同时,谷壳灰硅肥的施用能显著增大各处理各生育期土壤脱氢酶活性 ($P<0.05$),与CK处理相比,谷壳灰硅肥各处理(0.1%~1.0%)可增大6.7%~224.1% ($P<0.05$). 综上分析,水稻持续生长,其根际土壤酶活性呈现降低趋势,谷壳灰硅肥的施用能够提高水稻根际酶活性,尤其是在孕穗期和成熟期.

2.3 谷壳灰硅肥对土壤微生物群落多样性的影响

由表2可知,与CK处理相比,水稻成熟期谷壳灰硅肥各处理的土壤微生物 OTUs 数量和 Shannon 多样性指数无显著差异,ACE 和 Chao 指数无显著差异,表明谷壳灰硅肥对土壤中微生物群落的丰富度和多样性无明显影响.

基于门分类水平,采用主成分分析(PCA)研究施用不同量谷壳灰硅肥对土壤微生物 β -多样性的影响(图4). PC 轴1和2的贡献率分别为60.65%和19.02%,累积贡献率为79.67%,大于50%,表明PCA可有效解释不同施加量下土壤微生物群落结构的相似性. 同时,与CK处理相比,T1、T3和T4处理下土壤微生物群落结构具有显著差异,且T2、T3和T4处理之间也具有显著差异.

由图5(a)可知,成熟期时土壤中的微生物主要隶属于变形菌门(Proteobacteria, 18.66%~20.11%,相对丰度,下同)、放线菌门(Actinobacteriota, 14.93%~16.21%)、酸杆菌门(Acidobacteriota, 12.72%~16.74%)、绿弯菌门(Chloroflexi, 12.53%~16.24%)、厚壁菌门(Firmicutes, 6.02%~8.86%)、拟杆菌门(Bacteroidota, 4.25%~5.97%)、粘液菌门(Myxococcota, 4.53%~5.00%)、浮游菌门(Planctomycetota, 2.26%~3.65%)、脱硫杆菌门(Desulfobacterota, 2.90%~3.47%)、芽单胞菌门(Gemmatimonadota, 2.73%~3.48%)和帕氏菌门(Patescibacteria, 2.00%~2.95%)等,表明上述微生物



不同小写字母表示各处理生育期间的差异显著 ($P < 0.05$), *表示 T1~T4 处理与 CK 差异显著 (*表示 $P < 0.05$; **表示 $P < 0.01$)

图 3 施用谷壳灰硅肥对水稻 4 个生育期土壤酶活性的影响

Fig. 3 Effect of application of silica fertilizer-husk ash on soil enzyme activity at four growth stages of rice

表 2 施用谷壳灰硅肥对土壤微生物 α -多样性的影响¹⁾

Table 2 Effect of application of silica fertilizer-husk ash on soil microbial α -diversity

处理	丰富度指数			多样性指数
	OTUs 数量	ACE	Chao	Shannon
CK	3 655±193a	5 010±295a	4 946±222a	7.00±0.10a
T1	3 404±251a	4 736±269a	4 686±318a	6.91±0.08a
T2	3 519±186a	4 825±278a	4 810±335a	6.97±0.02a
T3	3 698±511a	5 073±604a	5 053±613a	6.95±0.21a
T4	3 439±296a	4 789±392a	4 724±387a	6.95±0.10a

1) 不同小写字母表示各处理生育期间的差异显著 ($P < 0.05$)

是土壤中主要优势物种. 与 CK 处理相比, T1~T4 处理中土壤厚壁菌门、拟杆菌门和粘液菌门等门水平物种的相对丰度增加, 其中 T3 处理丰度增幅最大; 而绿弯菌门和芽单胞菌门等门水平物种的相对丰度降低.

从属水平可进一步看出[图 5(b)], 谷壳灰硅肥施用可影响成熟期时土壤中微生物群落的组成. T1~T4 处理中属水平微生物相对丰度变化不一, 其中在 T4 处理下, 厌氧粘细菌 (*Anaeromyxobacter*)、科里杆菌 (*Koribacter*)、芽单胞菌属 (*Gemmatimonas*)、铁氧化属细菌 (*Sideroxydans*)、厌氧绳菌属 (*Anaerolinea*)、链霉菌属 (*Streptomyces*)、类诺卡氏属 (*Nocardioides*) 和氢化菌属 (*Hydrogenispora*) 等微生物的相对丰度较对照 CK 处理升高; 而紫杉霉菌 (*Vicinamibacterales*)、

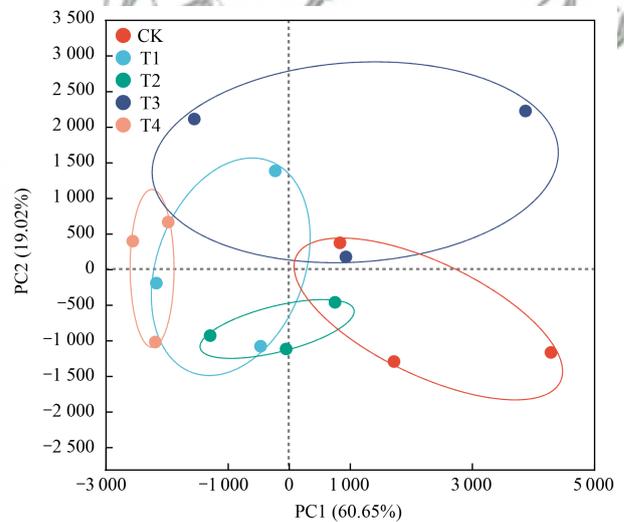


图 4 施用谷壳灰硅肥对土壤微生物 β -多样性的影响

Fig. 4 Effect of application of silica fertilizer-husk ash on soil microbial β -diversity

独生杆菌 (*Solibacter*)、黄杆菌 (*Xanthobacteraceae*)、酸杆菌 (*Acidobacteriales*) 和甲基孢囊菌属 (*Methylocystis*) 等微生物的相对丰度降低. 施加谷壳灰硅肥后各处理水稻根际土壤厌氧粘细菌 (*Anaeromyxobacter*)、链霉菌属 (*Streptomyces*)、氢化菌属 (*Hydrogenispora*) 和类诺卡氏属 (*Nocardioides*) 等相对丰度均高于 CK 处理, 这表明施加谷壳灰硅肥可促进以上微生物的繁殖.

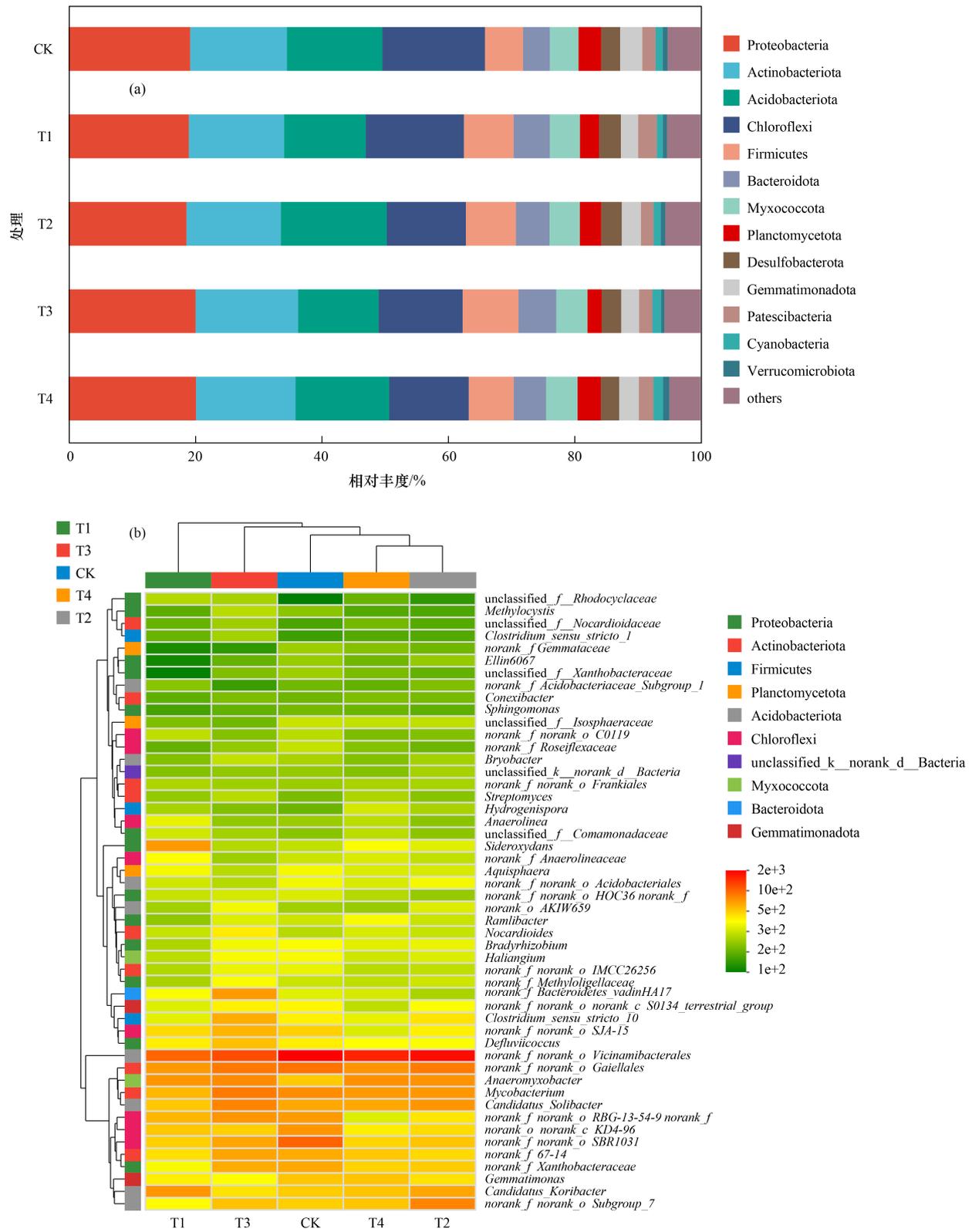


图 5 谷壳灰硅肥处理下土壤主要门和属水平物种分布

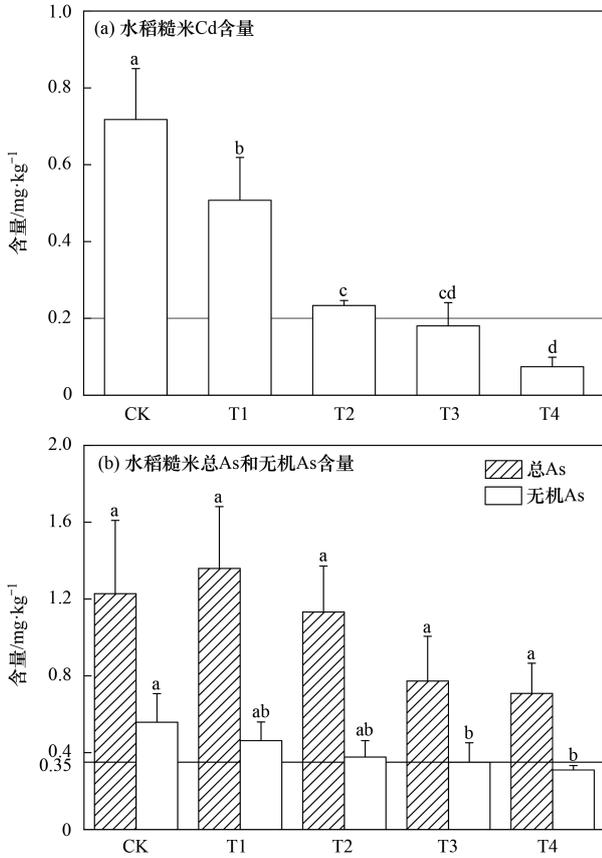
Fig. 5 Distribution of main microorganisms at phylum and genus levels under silica fertilizer-husk ash treatment

2.4 谷壳灰硅肥对水稻糙米镉和无机砷含量的影响

由图 6 可知,与对照 CK 处理相比,随谷壳灰硅肥施用量(0.1%~1.0%)增大,水稻糙米 Cd 含量显著降

低,降幅为 29.3%~89.7% ($P < 0.05$),糙米总 As 含量降低了 7.77%~42.31%,无机 As 含量也降低了 17.23%~44.49% ($P < 0.05$). T3 和 T4 处理的糙米 $\omega(\text{Cd})$ 降低到 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,糙米 $\omega(\text{无$

机 As)降低到 0.34 mg·kg⁻¹和 0.31 mg·kg⁻¹,符合《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2022)对糙米 Cd 和无机 As 限量的要求.



不同小写字母表示各处理生育期间的差异显著(P<0.05), (a)中 0.2 mg·kg⁻¹表示糙米 Cd 的食品安全限量值, (b)中 0.35 mg·kg⁻¹表示糙米无机 As 的食品安全限量值

图6 施加谷壳灰硅肥对水稻糙米中 Cd、As 和无机 As 的影响
Fig. 6 Effect of application silica fertilizer-husk ash on Cd, As, and inorganic As in brown rice

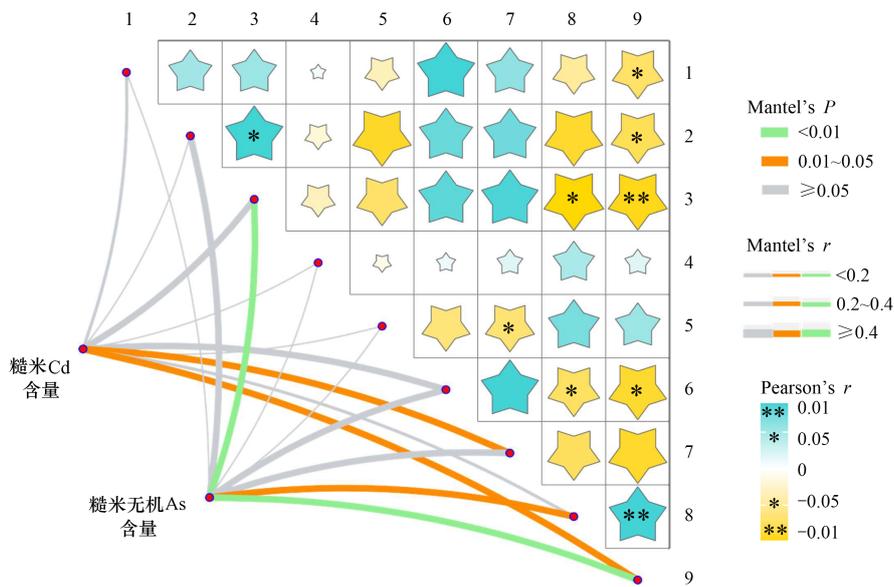
2.5 糙米镉砷含量的影响因素分析

利用偏 Mantel 检验,对糙米中 Cd 和无机 As 含量与土壤理化性质和酶活性进行相关性分析(图 7). 由图可知,糙米 Cd 含量与土壤 pH 呈显著负相关关系(P<0.05),糙米无机 As 含量与土壤 TCLP-As 含量呈极显著正相关关系,与脱氢酶活性呈极显著负相关关系(P<0.01),表明土壤 pH 和脱氢酶活性越高,糙米 Cd 和无机 As 含量越低,土壤 TCLP-As 含量越小,糙米无机 As 含量越低;土壤有效 Si 含量与土壤 TCLP-Cd 及 TCLP-As 呈显著负相关关系(P<0.05),表明土壤有效 Si 含量越大,土壤 TCLP-Cd 和 TCLP-As 含量越小;土壤 TCLP-Cd 和 TCLP-As 含量与土壤酸性磷酸酶、蔗糖酶和脱氢酶活性均呈显著负相关关系(P<0.05),表明土壤 TCLP-Cd 和 TCLP-As 含量越小,土壤酸性磷酸酶、蔗糖酶和脱氢酶活性越大. 上述相关性显示,谷壳灰硅肥可能是通过提高土壤 pH 和有效 Si 含量,降低土壤有效态 Cd 和 As 的含量,进而促进土壤酶活性的增大和降低水稻对 Cd 和 As 的积累.

3 讨论

3.1 谷壳灰硅肥对土壤有效态 Cd、As 含量的影响机制

随水稻生育期的延长,水稻根际土壤 pH 有所升高,这可能是因为酸性土壤淹水后由于铵盐的形成,或是在淹水厌气条件下形成的还原性碳酸铁、锰水解而产生了氢氧化亚铁和氢氧化亚锰,降低了土壤溶液中 H⁺ 的浓度^[23]. 施用谷壳灰硅肥后,土壤 pH 值进一步增大,尤其是 T2 和 T4 处理差异显著[图 1



1. 酸性磷酸酶, 2. 蔗糖酶, 3. 脱氢酶, 4. 脲酶, 5. 有机质, 6. 土壤有效硅, 7. pH, 8. TCLP-Cd, 9. TCLP-As

图7 糙米中 Cd 和无机 As 与土壤指标的相关性

Fig. 7 Correlations between Cd and inorganic As in brown rice and soil indexes

(a)],这是因为谷壳灰硅肥 pH 值为 7.39(表 1),施入土壤后可中和土壤酸度.随着水稻生育期的延长,根际土壤有效 Si 的含量呈下降趋势,这是因为水稻是一种喜 Si 作物,生长过程中需要吸收大量的 Si 来维持正常的生长发育^[24],同时,土壤所含 Si 尽管不断被淋溶渗漏、硅酸盐被不断地置换出来,但土壤中所含 Si 在水稻生长过程中不能及时补偿^[25].随着谷壳灰硅肥施用量的增大,土壤有效 Si 含量上升[图 1(c)],这是因为外源施用的谷壳灰硅肥是富 Si 物质(表 1),增大了土壤有效 Si 含量.

施用谷壳灰硅肥改变了土壤中有效态 Cd、As 的变化趋势,随着施用量的增大,有效态 Cd、As 含量在逐渐降低(图 2).对于根际土壤有效态 Cd 含量的降低,一方面是因为谷壳灰硅肥材料疏松多孔、比表面积大^[17],有利于吸附土壤 Cd;且随着施用量的增大,土壤 pH 升高,使土壤颗粒表面对 Cd²⁺的吸附力由静电吸附变为结合力更强的专性吸附,从而使土壤溶液中有效态 Cd 的含量下降^[26];另外土壤 pH 的升高会导致土壤溶液中铁、铝、镁等金属离子的浓度减小,使土壤有利于吸附 Cd²⁺,致使有效态 Cd 含量降低^[27];另一方面是因为谷壳灰硅肥不断向土壤中释放 Si 和增大了土壤有效 Si 含量,土壤中可溶性 Cd 与 Si 发生化学反应生成难溶的硅酸盐沉淀,从而改变土壤中 Cd 的赋存形态,使得 Cd 的酸提取态含量降低,难溶的有机态和残渣态含量增大^[17],进而降低了 Cd 的生物有效性.此外,土壤有效 Si 含量的增加可显著降低有效态 Cd 的含量,限制 Cd 在土壤中的迁移扩散,且在酸性土壤中,硅酸通过聚合形成硅酸凝胶,硅凝胶在酸性环境内产生负电荷,进而增加了土壤的负电荷表面,促进对 Cd 的吸附^[28].而对于 As,有研究发现 pH 的升高会对土壤中 As 的活性产生促进作用^[29],而本研究中施加谷壳灰硅肥后土壤 pH 的增大并未增大 As 生物有效性,原因可能是:首先,谷壳灰硅肥结构上的特性,对 As 也具有物理吸附效应;其次,土壤有效 Si 含量增大,会增加特异性吸附态和无定型铁铝氧化物结合态 As 含量,减少了结晶型铁铝氧化物结合态和残留态 As 含量^[30],因此土壤中有效态 As 含量降低;此外,本研究中水稻灌浆期和成熟期土壤有效态 As 含量低于孕穗期原因可能还在于,相比于水稻营养生长阶段,水稻生殖生长阶段根系生物量大,根表铁膜已经形成且逐渐老化变厚,吸收和附着 As 的位置充足,对 As 具有较强的富集能力,谷壳灰硅肥的施用,促进了水稻根系的生长以及根表铁膜的形成^[31],因此,生长后期 As 进一步被根表铁膜富集,土壤中有效态 As 的含量降幅更大.

3.2 谷壳灰硅肥改善土壤质量且降低糙米镉砷含量

土壤酶来源于根系分泌物、凋落物和微生物活动,是各种生化过程和养分循环的活性成分,是连接土壤微生物和土壤化学过程的重要媒介^[32],提高土壤酶活性可以改善土壤结构,促进养分的积累、转化和保持.在本研究中 4 种土壤酶活性整体有所增大(图 3),可能是因为较高含量的重金属积累会导致水稻土中土壤酶活性下降^[33],例如,土壤中 Cd²⁺可以与脱氢酶分子中的活性部位——巯基和含咪唑的配位体等结合,形成比较稳定的络合物,从而与底物发生竞争作用,抑制酶活性^[34],而谷壳灰硅肥的施用降低了土壤中有效态 Cd、As 含量(图 2),缓解了重金属的毒害效应,土壤酶活性就得到提升.另外,谷壳灰具有一定的孔隙度和较大表面积,能为土壤微生物提供充足的氧气、水分以及栖息地,有利于微生物的生长和繁殖,促进酶的活性提升^[17, 35].

微生物群落结构是土壤物理和化学变化过程的重要表现,也是评估土壤生态功能和肥力的重要指标.本研究结果表明施加谷壳灰硅肥对土壤中微生物群落的 α -多样性的影响较小,这与 Ma 等^[35]研究发现在土壤中施加不同剂量硅肥对微生物多样性影响不大的结论一致.基于 PCA 分析表明谷壳灰硅肥可影响土壤微生物群落的 β -多样性,且不同添加量的影响差异显著(图 4),土壤中厚壁菌门和拟杆菌门的相对丰度有所增加(图 5),且在 T3 处理时丰度增幅最大.

土壤蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶参与土壤中 C、N、P 的养分循环^[35],生物体中绝大多数氧化还原反应都是在脱氢酶的催化下进行^[36],同时土壤酶活性受到多种环境因子的制约.施加谷壳灰硅肥后降低了土壤重金属生物有效态含量,促进了土壤酶和微生物的生长及代谢活动,本研究发现施 Si 可促进厚壁菌门的相对丰度增加(图 5),且 Zhang 等^[37]发现水稻土中 As 含量与厚壁菌门的相对丰度呈显著负相关关系,此类门水平微生物携带 As 解毒基因,能尽量减少毒害或受毒后迅速恢复生长,对重金属有一定的耐受性,这表明施加谷壳灰硅肥能促进特定门水平微生物的生长,并有利于降低土壤中 As 毒害从而促进水稻健康生长.土壤酶活性与微生物群落结构的变化均可显示谷壳灰硅肥对土壤环境健康具有促进作用.

谷壳灰硅肥的施用均不同程度地降低水稻糙米中 Cd 和无机 As 的含量(图 6),这可能是因为谷壳灰硅肥的施用提供了大量活性 Si[图 1(c)],降低了土壤生物有效态 Cd 和 As 的含量(图 2 和图 7).此外,施 Si

除提高水稻抵抗各种环境胁迫的能力^[38]外,还可在根系细胞壁中与Cd形成Si-Cd复合物,有效降低Cd向地上部的转运,降低糙米中Cd含量^[32];Si与As(Ⅲ)共用水通道蛋白,施Si后,Si与As的竞争作用降低了水稻对As(Ⅲ)的转运,且施Si增大了水稻根系量、增大了根表铁膜对As的富集,最终减少水稻地上部As的积累^[31]。本研究中T3和T4处理能使糙米Cd和无机As同时达到低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2022)中的限定值 $[\omega(\text{Cd}) < 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}, \omega(\text{无机As}) < 0.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 的要求,从而实现安全种植。

4 结论

(1)施用谷壳灰硅肥增大了水稻根际土壤pH值0.04~0.24个单位和有效Si含量44.2%~97.5%,土壤有效态Cd和有效态As含量则分别降低了16.2%~21.4%和16.0%~24.9%。

(2)随谷壳灰硅肥施用量的增大各生育期土壤酶活性增大,其中土壤脲酶、蔗糖酶和脱氢酶活性分别增大0.1%~9.4%、6.3%~145.7%和6.7%~224.1%,土壤酸性磷酸酶活性则在孕穗期和成熟期分别增大4.8%~63.4%和0.2%~24.5%。

(3)施用谷壳灰硅肥不影响土壤微生物群落的 α -多样性,对微生物群落的 β -多样性产生显著影响,可促进微生物的生长。

(4)当谷壳灰硅肥施加量为0.5%(T3处理)和1%(T4处理)时水稻糙米 $\omega(\text{Cd}) < 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,糙米 $\omega(\text{无机As}) < 0.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 中国环境保护部,中国国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京:中国环境保护部,2014.
- [2] 中国生态环境部. 2021年中国生态环境状况公报(摘录)[J]. 环境保护,2022,50(12):61-74.
Ministry of Ecological Environment of China. China ecological environment status bulletin 2021 (excerpt) [J]. Environmental Protection, 2022, 50(12): 61-74.
- [3] 袁峰,唐先进,吴骥子,等. 两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复[J]. 环境科学,2021,42(7):3535-3548.
Yuan F, Tang X J, Wu J Z, et al. Simultaneous immobilization of arsenic, lead, and cadmium in paddy soils using two iron-based materials[J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3535-3548.
- [4] 敖明,柴冠群,范成五,等. 稻田土壤和稻米中重金属潜在污染风险评估与来源解析[J]. 农业工程学报,2019,35(6):198-205.
Ao M, Chai G Q, Fan C W, et al. Evaluation of potential pollution risk and source analysis of heavy metals in paddy soil and rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(6): 198-205.
- [5] GB 2762-2022, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [6] 吴云艳. 不同炭硅处理对水稻抗倒伏特性和产量的影响[J]. 中国稻米,2022,28(6):49-53,58.
Wu Y Y. Effects of different biochar and silicon treatments on lodging resistance properties and yield of rice [J]. China Rice, 2022, 28(6): 49-53, 58.
- [7] Ma J F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2004, 50(1): 11-18.
- [8] Kvedaras O L, Keeping M G. Silicon impedes stalk penetration by the borer *Eldana saccharina* in sugarcane [J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2007, 125(1): 103-110.
- [9] 许珂,铁柏清,陈喆,等. 硅肥与硒肥施用对水稻吸收积累Cd的影响规律研究[J]. 湖南农业科学,2012,(11):56-59.
Xu K, Tie B Q, Chen Z, et al. Influence rule of single fertilization of Si or Se on uptake and accumulation of Cd by rice [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2012, (11): 56-59.
- [10] 张森,叶长城,喻理,等. 矿物硅肥与微生物菌剂对水稻吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报,2016,35(4):627-633.
Zhang M, Ye C C, Yu L, et al. Effects of mineral silicon fertilizer and microbial agent on uptake and accumulation of cadmium by rice [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(4): 627-633.
- [11] 王昊. 一种改进的富硅稻壳灰降低稻米无机砷效果研究[D]. 长沙:湖南师范大学,2021.
Wang H. The effect of study on reducing inorganic As in rice grain using an improved Si-rich rice husk ash [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2021.
- [12] Seyfferth A L, Morris A H, Gill R, et al. Soil incorporation of silica-rich rice husk decreases inorganic arsenic in rice grain [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(19): 3760-3766.
- [13] Epstein E. Silicon [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1999, 50: 641-664.
- [14] Teasley W A, Limmer M A, Seyfferth A L. How rice (*Oryza sativa* L.) responds to elevated As under different Si-rich soil amendments [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(18): 10335-10343.
- [15] Jiang Y, Yi X T, Liu M Y, et al. Dynamic responses of soil enzymes at key growth stages in rice after the *in situ* remediation of paddy soil contaminated with cadmium and arsenic [J]. Science of the Total Environment, 2022, 830, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154633.
- [16] 黄蕊,魏维,谢运河,等. 不同性质硅肥影响土壤生物有效态镉砷的主要因素[J]. 环境科学,2023,44(2):991-1002.
Huang R, Wei W, Xie Y H, et al. Primary factors affecting soil bioavailable cadmium and arsenic by different properties of silicon fertilizer [J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 991-1002.
- [17] 刘雅,辜娇峰,周航,等. 谷壳灰对稻田土壤镉、砷生物有效性及糙米镉、砷累积的影响[J]. 环境科学学报,2020,40(7):2581-2588.
Liu Y, Gu J F, Zhou H, et al. Effects of rice husk ash on Cd and As bioavailability in paddy soil and their accumulation in brown rice [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(7): 2581-2588.
- [18] 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] 梁欣冉,鄧紫依,付庆灵,等. 锰改性水稻秸秆生物炭对碱性土壤中砷-镉复合污染的钝化作用[J]. 湖南师范大学自然科学学报,2022,45(4):93-100.
Liang X R, Gao Z Y, Fu Q L, et al. Passivation of arsenic-cadmium combined pollution in alkaline soil by manganese-

- modified rice straw biochar [J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2022, **45**(4): 93-100.
- [20] 李园星露, 叶长城, 刘玉玲, 等. 硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 944-952.
- Li Y X L, Ye C C, Liu Y L, *et al.* Bioavailability of silicon fertilizer coupled water management on soil bioavailability and cumulative control of rice in compound contaminated paddy soils [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 944-952.
- [21] GB 5009.15-2014, 食品安全国家标准 食品中镉的测定[S].
- [22] GB 5009.11-2014, 食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定[S].
- [23] 杨丹, 刘鸣达, 姜峰, 等. 酸性和中性水田土壤施用硅肥的效应研究 I. 对土壤 pH、Eh 及硅动态的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(4): 757-763.
- Yang D, Liu M D, Jiang F, *et al.* Effect of silicon fertilizer in acid and neutral paddy field soils I. Effect on dynamic changes of pH, Eh and Si in soil solution [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(4): 757-763.
- [24] Guntzer F, Keller C, Meunier J D. Benefits of plant silicon for crops: a review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, **32**(1): 201-213.
- [25] 刘鸣达, 张玉龙. 水稻土硅素肥力的研究现状与展望[J]. *土壤通报*, 2001, **32**(4): 187-192.
- Liu M D, Zhang Y L. Advance in the study of silicon fertility in paddy fields [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, **32**(4): 187-192.
- [26] 蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 等. 三元复合调理剂对土壤镉砷赋存形态和糙米镉砷积累的调控效应[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 378-385.
- Jiang Y, Liu Y, Gu J F, *et al.* Regulation control of a tribasic amendment on the chemical fractions of Cd and As in paddy soil and their accumulation in rice [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 378-385.
- [27] 迟琳琳, 徐卫红, 熊仕娟, 等. 不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1654-1666.
- Chi S L, Xu W H, Xiong S J, *et al.* Effect of nano zeolites on pH, CEC in soil and Cd fractions in plant and soil at different cadmium levels [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1654-1666.
- [28] 戴青云, 刘代欢, 王德新, 等. 硅对水稻生长的影响及其缓解镉毒害机理研究进展[J]. *中国农学通报*, 2020, **36**(5): 86-92.
- Dai Q Y, Liu D H, Wang D X, *et al.* A review on silicon: effect on rice growth and its mechanism of relieving cadmium toxicity [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, **36**(5): 86-92.
- [29] 钟松雄, 尹光彩, 陈志良, 等. Eh、pH 和铁对水稻土砷释放的影响机制[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2530-2537.
- Zhong S X, Yin G C, Chen Z L, *et al.* Influencing mechanism of Eh, pH and iron on the release of arsenic in paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2530-2537.
- [30] 李林峰, 文伟发, 徐梓盛, 等. 施硅对水稻铁膜砷固定和体内砷转运的影响[J]. *环境科学*, 2023, **44**(5): 2899-2907.
- Li L F, Wen W F, Xu Z S, *et al.* Effects of silicon application on arsenic sequestration in iron plaque and arsenic translocation in rice [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2899-2907.
- [31] 陈佳, 赵秀兰. 水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1535-1544.
- Chen J, Zhao X L. Effects of water management and silicon application on iron plaque formation and uptake of arsenic and cadmium by rice [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1535-1544.
- [32] 张涵, 贡璐, 刘旭, 等. 氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 403-410.
- Zhang H, Gong L, Liu X, *et al.* Soil enzyme activity in *Picea schrenkiana* and its relationship with environmental factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 403-410.
- [33] 刘娟, 张乃明, 于泓, 等. 重金属污染对水稻土微生物及酶活性影响研究进展[J]. *土壤*, 2021, **53**(6): 1152-1159.
- Liu J, Zhang N M, Yu H, *et al.* Effects of heavy metal pollution on microorganism and enzyme activity in paddy soil: a review [J]. *Soils*, 2021, **53**(6): 1152-1159.
- [34] 郭碧林, 陈效民, 景峰, 等. 外源 Cd 胁迫对红壤性水稻土微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(9): 1850-1855.
- Guo B L, Chen X M, Jing F, *et al.* Effects of exogenous cadmium on microbial biomass and enzyme activity in red paddy soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(9): 1850-1855.
- [35] Ma C Y, Ci K D, Zhu J, *et al.* Impacts of exogenous mineral silicon on cadmium migration and transformation in the soil-rice system and on soil health [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **759**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143501.
- [36] 曹湛波, 王磊, 李凡, 等. 土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1908-1914.
- Cao Z B, Wang L, Li F, *et al.* Response of soil respiration and organic carbon to returning of different agricultural straws and its mechanism [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1908-1914.
- [37] Zhang C, Xiao X, Zhao Y, *et al.* Patterns of microbial arsenic detoxification genes in low-arsenic continental paddy soils [J]. *Environmental Research*, 2021, 201, doi: 10.1016/j.envres.2021.111584.
- [38] 陈喆, 铁柏清, 雷鸣, 等. 施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2762-2770.
- Chen Z, Tie B Q, Lei M, *et al.* Phytoexclusion potential studies of Si fertilization modes on rice cadmium [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2762-2770.

CONTENTS

Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China	LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, <i>et al.</i> (1233)
Evolution and Influencing Factors of Spatial Correlation Network of Construction Carbon Emission in China from the Perspective of Whole Life Cycle	REN Xiao-song, LI Zhao-ru (1243)
Efficiency Characteristics and Evolution Patterns of Urban Carbon Metabolism of Production-Living-Ecological Space in Beijing-Tianjin-Hebei Region	TIAN Chao, CHENG Lin-lin, SHAO Ying-chao (1254)
Assessment of CO ₂ Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan	XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, <i>et al.</i> (1265)
Coordinated Control of Carbon Emission Reduction and Air Quality Improvement in the Industrial Sector in Hunan Province	LI Nan, LIU Wan-wan, ZHU Shu-han, <i>et al.</i> (1274)
Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Medium- and Long-term Study	ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1285)
Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou	ZOU Chao, WANG Ya-nan, WU Lin, <i>et al.</i> (1293)
Multi-scale Driving Mechanism of Urbanization on PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River	ZHANG Zheng, ZHOU Ting-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i> (1304)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomerations on the Northern Slope of Tianshan Mountains	WANG Xiang-nan, ZHANG Zhe, LIU Fang-qing (1315)
Spatial Variability and Source Apportionment of PM _{2.5} Carbon Components in Tianjin	WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, <i>et al.</i> (1328)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} in Huaxi District, Guiyang	GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, <i>et al.</i> (1337)
Pollution Characteristics, Source Apportionment, and Meteorological Response of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xinxiang, North China	LIU Huan-jia, LI Lan-qing, LI Huan-li, <i>et al.</i> (1349)
Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM _{2.5} and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018	DU Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, <i>et al.</i> (1361)
Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing	PAN Jin-xin, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1371)
Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer	LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (1382)
Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation	WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, <i>et al.</i> (1392)
Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the Middle Reaches of the Yangtze River	LU Hong-bin, LU Shao-yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (1402)
Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Model	CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, <i>et al.</i> (1415)
Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing	ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, <i>et al.</i> (1428)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin	LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, <i>et al.</i> (1439)
Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Canal of Yichang City	DING Shuang, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1448)
Occurrence Characteristic and Risk Assessment of Microplastics in Sishui River (Xingyang Section)	ZHAO Chang-min, HE Bing, LI He-tong, <i>et al.</i> (1457)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i> (1468)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province	ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, <i>et al.</i> (1480)
Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake	MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, <i>et al.</i> (1492)
Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years	WANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, <i>et al.</i> (1502)
Effects of Land Use Types on Water Quality at Different Buffer Scales: Tianjin Section of the Haihe River Basin as an Example	DAI Meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, <i>et al.</i> (1512)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Shallow Groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, SONG Yang, LI Ying-chun, <i>et al.</i> (1525)
Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes	ZHANG Jin, CHEN Ming-ying, HAO Zhi-neng, <i>et al.</i> (1539)
Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process	LIN Tao, YUAN Yu-jie (1553)
Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water	LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, <i>et al.</i> (1561)
Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System	HE Qiang, CHEN Bo-wen, HAN Ling, LIU Ming, <i>et al.</i> (1577)
Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on Improved Remote Sensing Ecological Index	FU Kai-xiang, JIA Guo-dong, YU Xin-xiao, <i>et al.</i> (1586)
Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI	ZHAO Jia-li, LI Xing, SUN Bing (1598)
Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, <i>et al.</i> (1615)
Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis	LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, <i>et al.</i> (1629)
Effects of Continuous Annual Crop Rotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon	LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, <i>et al.</i> (1644)
Effects of Four Amendments on Fertility and Labile Organic Carbon Fractions of Acid Purple Soil	DING Xin-ru, YAN Ning-zhen, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (1655)
Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages	SHAO Qi, WU Tao, XIE Xue-feng, <i>et al.</i> (1665)
Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River	WANG Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, <i>et al.</i> (1674)
Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut Field	SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, <i>et al.</i> (1684)
Effects of Straw Returning and Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Nitrate Nitrogen Soil After Flooding in Rice-vegetable Rotation System in Tropical China	HU Tian-yi, CHE Jia-yue, HU Yu-jie, <i>et al.</i> (1692)
Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland	CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-liang, <i>et al.</i> (1702)
Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model	WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, <i>et al.</i> (1713)
Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (1724)
Characteristics of Cd Flux in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi	YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (1739)
Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Fengdong New District Based on Information Diffusion Model	YANG Nan-nan, HAN Ling, LIU Ming (1749)
Traceability Analysis and Environmental Quality Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in West Hunan Province	XIAO Kai-qi, XU Hong-gen, GAN Jie, <i>et al.</i> (1760)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil	SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (1769)
Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province	DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, <i>et al.</i> (1781)
Effect of Silica Fertilizer (Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice	YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (1793)
Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor	LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing (1803)
Blocking Effects of Foliar Conditioners on Cadmium, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farmland	XIAO Bing, WANG Qiu-shi, GAO Pei-pei, <i>et al.</i> (1812)
Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Minqin Oasis	LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, <i>et al.</i> (1821)
Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis	LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, <i>et al.</i> (1830)
Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms	BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (1840)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamyia aeruginosa</i> of Manao River	GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1849)
Biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebrafish (<i>Danio rerio</i>) Embryos	YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, BAO Xu-hui, <i>et al.</i> (1859)