

目次

2013~2020年天津市PM _{2.5} -O ₃ 污染变化趋势和影响因素分析	肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)
2015~2020年济南市O ₃ 污染趋势及敏感性变化分析	孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)
南京市南部地区O ₃ 污染特征、生成敏感性及传输影响分析	郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)
天津市“十三五”期间O ₃ 污染特征和驱动因子	李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)
基于随机森林的南京市PM _{2.5} 和O ₃ 对减排的响应	尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)
基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化	吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓炯, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)
污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响	钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)
2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析	郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)
滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源	孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)
重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价	谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 王丹尼, 王志恒 (4304)
衡水市桃城区浅层地下水咸化成因	何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)
吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价	白凡, 周金龙, 周殷竹, 韩双宝, 孙英 (4325)
金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性	丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇诚, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)
白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征	程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)
基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制	朱奔, 叶建峰, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)
甾体激素在污水处理厂的赋存特征和行为归趋	刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)
博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价	郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)
太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价	吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)
雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价	郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)
基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析	段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)
锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价	余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)
老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价	王莹, 董爱俊, 杨建峰, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)
畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估	丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)
地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究	简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)
微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响	马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)
施加Fe ₃ O ₄ /桑树杆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响	阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)
生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制	张丽, 李如霞, 何玉奎, 姚彦坡, 林大松 (4479)
不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响	李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)
椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响	侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)
生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响	冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)
改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应	陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)
改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响	由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)
化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险	赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)
污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失	张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)
化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响	谢军, 王子芳, 王莹, 熊子怡, 高明 (4565)
黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测	刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)
微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (4585)
高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析	姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)
土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响	李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)
中国省域碳达峰路径与政策	苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)
基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制	钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邹娜, 封强, 傅泽强 (4637)
不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析	刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘锦, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)
中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估	陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)
陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟	古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)
气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响	李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)
降水变化下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸	王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)
水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响	秦纪法, 张佳彭, 桑变, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)
中国省域土壤重金属空间分布特征及分区分区管控对策	石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)
壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议	洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)
微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展	张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圆, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)
生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展	周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)
铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展	魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)
畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术进展	安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)
《环境科学》征订启事(4230)	
《环境科学》征稿简则(4303)	
信息	(4506, 4678, 4741)

生物炭与氮肥复施对镉污染水稻土修复效应及机制

张丽¹, 李如霞², 何玉奎¹, 姚彦坡¹, 林大松^{1*}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 石林彝族自治县农业技术推广总站, 昆明 652200)

摘要: 重金属镉(Cd)污染已严重影响土壤健康, 威胁农产品生产安全利用. 因此采用盆栽试验, 以 Cd 污染水稻土为供试土壤, 研究生物炭(BC)、不同氮肥施用水平 2.6 g·pot⁻¹ (N1)、3.5 g·pot⁻¹ (N2)、4.4 g·pot⁻¹ (N3) 和生物炭配施氮肥(BCN1、BCN2、BCN3)对土壤 Cd 形态、水稻体内 Cd 富集和转运以及土壤酶活性的影响, 并通过高通量测序分析土壤微生物菌群变化和微生物间复杂的相互作用关系. 结果表明, 生物炭配施氮肥处理下土壤 Cd 由活性较高的可交换态向活性低的残渣态转化, 可交换态 Cd 含量较对照降低了 6.2%~14.7%, 残渣态 Cd 含量提高了 18.6%~26.4%. 单一氮肥处理增强了水稻根部 Cd 的富集能力, 提高了 22%~33.5%, 单一生物炭和配施氮肥处理下水稻根部 Cd 的富集能力、Cd 从茎叶向稻壳和稻壳向稻米的转运系数均下降. BCN 处理总体上促进了土壤酶活性(脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶), MiSeq 测序显示生物炭配施氮肥提高了土壤细菌主要物种相对丰度(如 Acidobacteriales、Solibacterales、Pedosphaerales 和 Nitrospirales), 共现网络分析表明 N、BC 和 BCN 处理下土壤细菌网络复杂性均增强. 总体来看, 生物炭配施氮肥降低了土壤 Cd 活性, 抑制了水稻对 Cd 的富集和转运, 一定程度上改善了土壤生态环境质量, 为重金属 Cd 污染农田土壤修复提供了技术支撑.

关键词: 生物炭; 氮肥; Cd 形态; 水稻 Cd 富集转运; 酶活性; 微生物群落; 微生物共现网络

中图分类号: X171.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2023)08-4479-10 **DOI:** 10.13227/j.hjks.202208274

Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil

ZHANG Li¹, LI Ru-xia², HE Yu-lei¹, YAO Yan-po¹, LIN Da-song^{1*}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Shilin Yi Autonomous County Agricultural Technology Extension Station, Kunming 652200, China)

Abstract: Cadmium (Cd) heavy metal pollution has posed serious threats to soil health and the safe production utilization of agricultural products. A pot experiment was conducted to study the effects of biochar (BC) and nitrogen fertilizer with three levels, namely 2.6 g·pot⁻¹ (N1), 3.5 g·pot⁻¹ (N2), 4.4 g·pot⁻¹ (N3) biochar combined with nitrogen fertilizer (BCN1, BCN2, and BCN3), on soil Cd fractions, Cd enrichment, the transport of rice, and soil enzyme activity, as well as the changes in microbial community composition and complex interactions between microorganisms through high-throughput sequencing. The results showed that biochar combined with nitrogen fertilizer led to the transformation of Cd from the exchangeable state to the residue state, and the proportion of the exchangeable state was significantly reduced by 6.2%-14.7%; by contrast, the proportion of the residue state increased by 18.6%-26.4% relative to that in CK. In addition, singular treatments of nitrogen fertilizer enhanced the accumulation capacities of Cd in roots, which increased by 22%-33.5% compared with that in CK. By contrast, the BC and BCN treatments reduced Cd accumulation in roots and the transfer capacity from stems to rice husks and husk to rice. Furthermore, the BCN treatments promoted soil enzyme activities (urease, acid phosphatase, invertase, and catalase). MiSeq sequencing showed that BCN treatments increased the abundance of the main species of soil bacterial microbes (such as Acidobacteriales, Solibacterales, Pedosphaerales, and Nitrospirales). Moreover, co-occurrence network analysis showed that the complexity of the soil bacterial network was enhanced under the N, BC, and BCN treatments. Overall, biochar combined with nitrogen fertilizer reduced soil Cd availability, inhibited the capacity of Cd accumulation and the transport of rice, and improved the soil eco-environmental quality. Thus, using BCN could be a feasible practice for the remediation of Cd-polluted agricultural soil.

Key words: biochar; nitrogen fertilizer; Cd fractions; rice Cd enrichment and transport; enzyme activity; bacterial community composition; microbial co-occurrence network

当前,我国重金属污染的耕地大约在 2.0×10^7 hm², 占中国耕地总面积的 20%, 其中重金属镉(Cd)污染点位超标率为 7.1%, 主要污染区为中国南方水稻主产区湖南、湖北、广东、广西和江西等省份, 对中国的粮食安全造成了严重的威胁^[1,2], Cd 影响植物生长、细胞分裂和代谢活动, 导致农产品产量和品质下降, 并且农田土壤中重金属 Cd 可以通过食物链的积蓄作用^[3], 对人类的生命健康造成威胁, 其中 Cd 可以和含有羟基、巯基和氨基的蛋白质分子结合, 从而减弱很多酶的活性, 进而影响肾脏和肝脏正常的代谢活动^[4]. 此外, Cd 离子可以替代人体中的钙和锌, 会引起骨痛病、糖尿病、食管癌和胃

癌等疾病^[5]. 因此, 修复重金属 Cd 污染土壤, 保障水稻安全和生产力, 满足土壤健康管理和人类健康需求具有重要意义.

近年来, 生物炭在土壤重金属污染控制方面成为一个热点研究领域. 秸秆来源生物炭不仅是富含碳的有机物质, 还包括 N、O 和 S 等多种养分元素和无机碳酸盐成分, 其输入可以增加土壤有机碳含量水平, 提供微生物可利用组分^[6]. 随着研究的深

收稿日期: 2022-08-30; 修订日期: 2022-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877403)

作者简介: 张丽(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田土壤重金属污染修复与治理, E-mail: 18304623994@163.com

* 通信作者, E-mail: lindasong608@126.com

入,生物炭在改善土壤理化性质和修复治理重金属等污染物迁移转化方面的功能逐渐被人们所认知^[7].已有的研究表明生物炭可以通过物理化学吸附作用固定土壤重金属,还可以通过对土壤 pH 和 CEC 等环境因子的改变,影响重金属在污染土壤中的赋存形态,抑制重金属活性和生物有效性^[8,9].

目前,为保障和提高农产品生产力和产量,氮肥已广泛应用于农田,多种形式的氮肥如酰胺氮肥、铵态氮肥和硝态氮肥占我国化肥消费总量的 60% 以上^[10~12].然而氮肥对土壤中 Cd 存在形态和植物 Cd 吸收利用的影响鲜有受到关注.氮能有效调节植物对 Cd 的吸收和积累,进入植物的氮可以通过分子、生化、细胞和整株水平等机制平衡重金属毒性^[13,14].然而,以 NH_4^+ 形式添加氮肥直接导致土壤硝化和间接释放 H^+ ,从而可能会加速土壤酸化^[15],酸性条件会增加 Cd 的生物利用性和溶解度^[16].因此,氮肥对土壤重金属 Cd 活性和农作物体内 Cd 的富集转运的响应机制亟待探究.

水稻是我国最主要的粮食作物,其生产的安全性令人高度关注,而水稻的根际微生物环境在养分转化、作物生产力和重金属修复方面发挥着重要作用^[17].土壤微生物对重金属胁迫敏感,常用于指示土壤环境质量的变化^[18].有研究表明,重金属污染可显著抑制土壤微生物的生长繁殖,改变群落组成,影响土壤微生物活动,破坏其养分循环和物质分解功能^[19].土壤酶活性作为土壤的有机成分,参与土壤中物质和能量的转化,影响着土壤的代谢.土壤酶对重金属较为敏感,其强弱与重金属污染程度存在某种相关性,土壤酶活性对重金属污染程度具有良好的恢复及指示效应^[20].本文选取湖南当前受 Cd 污染较严重的水稻农作物作为研究对象,探讨生物炭配施氮肥如何影响土壤重金属 Cd 的有效性、水稻体内 Cd 富集和转运能力以及水稻根际生态环境,以期修复重金属 Cd 污染农田土壤和保障作物生产安全提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为湖南省湘潭市 Cd 污染水稻土,其基本理化性质为:pH 6.5, ω (全 Cd) $0.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, ω (有效态) Cd $0.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, ω [有机质(SOM)] $37.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ω [有效磷(AP)] $16.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, ω [碱解氮(AN)] $320 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, ω (全 K) $43.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,阳离子交换量(CEC) $13.02 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$.供试水稻品种为黄华占,为当地主栽品种,由湖南湘潭种子公司提供.生物炭为稻壳生物炭,500℃ 缺氧条

件下热解 8 h 制备而成,其基本理化性质为:pH 8.63, ω (全 Cd) $0.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,含碳量 47.5%,CEC $10.8 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,比表面积 $11.92 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$.供试氮肥为铵态氮肥(硫酸铵), ω [总氮(TN)] $\geq 21\%$.

1.2 试验设计

本盆栽试验于 2020 年 5 月在农业农村部环境保护科研监测所温室内开展,设置 8 个处理,分别为对照组(CK)、生物炭(BC)和氮肥,其设置 3 个浓度梯度,即低、中、高用量(N1、N2、N3)和生物炭配施氮肥(BCN1、BCN2、BCN3),每个处理 3 次重复.种植水稻盆体尺寸为 $65 \times 45 \times 30 \text{ cm}$ (长×宽×高),每盆装土 7.5 kg,生物炭以 5% 添加量($0.375 \text{ kg} \cdot \text{pot}^{-1}$)与 Cd 污染土混合均匀.氮肥用量处理是根据每 hm^2 施含 180、240 和 300 kg 的氮来制定,即每盆施含 2.6、3.5 和 4.4 g 含氮的硫酸铵.肥料采用多次施肥法,基肥、蘖肥、穗肥分别在移栽前、分蘖期和抽穗期施用,其施肥比例统一采用 4:4:2 的比例施用,各处理在移栽前施用等量的磷肥(P_2O_5)和钾肥(K_2O)(磷肥和钾肥具体用量分别为 $96 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $192 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)作为基肥补充水稻所需的营养元素.生物炭以 5% 的添加量与土壤整体混合均匀,平衡一周.水稻种子在温室育秧池中进行育苗工作,待水稻幼苗长到三叶一心时,选择长势一致的水稻秧苗进行移栽,每盆移栽 3 株,水稻的基肥、蘖肥和穗肥均为溶于水后施入土柱,施肥后一直保持 4 cm 水层,直至收获前 15 d 排水,灌溉水为蒸馏水.

1.3 土壤和植物样品采集与分析

2020 年 10 月水稻收获后,采用 5 点取样法随机采集土壤样品,每个土壤样品的质量约为 1.5 kg,将处理好的土壤样品储存在塑料袋中并放入冰盒带到实验室.每个土壤样品分为两份:一份 20~25℃ 风干,并分别磨取过 20 和 100 目筛用于土壤化学性质分析,另一份在 -80℃ 冷冻保存用于 DNA 提取.水稻样品用自来水洗涤,然后用去离子水洗涤 2~3 次.水稻鲜样分为根、茎叶、稻壳和稻米这 4 个部分,于 105℃ 固化 30 min 后,60℃ 烘烤至恒重.称重后,用不锈钢粉碎机粉碎,放入密封塑料袋中备用.

1.3.1 土壤样品分析

土壤 Cd 形态参照 Tessier 5 步连续提取法^[21],试验中采用平行样和标准质控样[GBW07442(GSF-2)]控制试验数据质量.

土壤脲酶的酶活采用靛酚蓝比色法,以每天每克土样中产生 $1 \mu\text{g}$ 的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 定义为一个酶活力单位 $[\mu\text{g} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}]$.酸性磷酸酶(S-ACP)活性的测定采用 S-ACP 活性测定试剂盒,以每克土壤每小时水解 PNPP 产生 1 nmol 对硝基苯酚(PNP)为一个酶活

单位[$\text{nmol} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$];蔗糖酶活采用 DNS 比色法,以每天每克土样中产生 1 mg 葡萄糖定义为一个酶活单位[$\text{mg} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$];过氧化氢酶活采用紫外分光光度法测定,以每天每克风干土样催化 1 μmol H_2O_2 降解定义为一个酶活力单位[$\mu\text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{g})^{-1}$].为消除土壤中原有物质对试验结果造成的误差,以上每种土样的酶活测定均需要设置无基质对照,整个试验需做无土对照.为使试验结果精准可靠,每种土样的酶活测定做平行对照.

土壤 DNA 提取和高通量测序:采用 DNA 分离试剂盒(MO BIO Laboratories, Carlsbad, CA, USA)提取土壤总 DNA, DNA 溶液的质量和浓度采用 NanoDrop 2000(Thermo, USA)进行测定,提取好的 DNA 样品稀释 10 倍后保存于 -20°C .以提取的基因组 DNA 为模板,选取引物序列 515F (5'-GTG CCAGCMGCCGCGGTAA-3') 和 907R (5'-CCGTCA ATTCMTTTRAGTTT-3') 对细菌 16S rRNA 基因的 V4-V5 区段进行扩增^[22].

高通量测序分析委托生物科技有限公司(Health Time Gene, Shenzhen, China)采用 Illumina Hiseq 2500 平台进行分析.首先对文库进行质检,质检合格后开始测序,使用 Fastp 软件和 Flash 软件对测序结果进行质控和拼接,根据序列两端的序列结构和引物序列得出有效序列,校正序列方向.利用 Usearch 软件对所有有效序列进行聚类并剔除嵌合体,默认以 97% 的一致性将序列聚类成为操作分类单元 OTU.使用 QIIME 软件包挑选出各个 OTUs 的代表序列,并将所有代表序列与数据库进行比对注释.在目水平上将相对丰度小于 1% 细菌类群和无法分类的细菌类群合并为 Others.使用 R 软件(3.6.3)分析前 35 个目.

微生物共现网络构建与分析:根据不同分组土壤样本属级别的物种丰度信息,进行数据过滤,分组过滤后的属物种丰度信息分别进行属物种之间的 Pearson 相关系数计算,选取 $P > 0.6$, $P < 0.05$ 的物

种关系用于网络图构建.使用软件 Gephi 0.9.2 (<https://gephi.org/>) 进行图形绘制及图形属性计算,使用 HITS 算法的 Hub 值来表示网络图中点的大小,Hub 值越大,点越大,表示节点越重要.

1.3.2 植物样品分析

水稻样品中 Cd 含量采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 法消化, ICP-MS 进行测定.

富集系数(BCF)和转移系数(TF)分别用以下公式计算:

$$\text{富集系数(BCF)} = C_j/C_s$$
$$\text{转运系数(TF)} = C_i/C_j$$

式中, C 为 Cd 含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), i 和 j 分别为水稻的不同部位,其中 i 位于 j 的上部(例如 i 为茎叶, j 为根), C_s 为土壤 Cd 含量($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$).

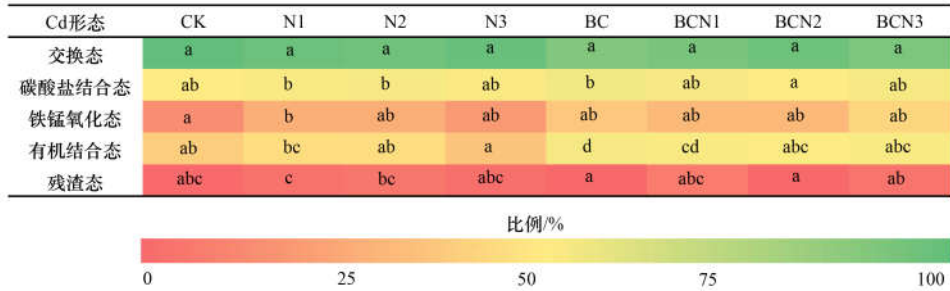
1.4 数据处理与分析

所有数据分析均采用 Excel 2010 进行处理,采用 SPSS 18.0 软件进行单因素(ANOVA)方差分析, Excel 和 Origin 软件进行图表绘制.各组间显著性差异采用 LSD 进行分析,以 5% 水平进行检验($P < 0.05$).处理平均值表示为使用 3 个重复的平均值 $\pm$ 平均值的标准误差.

2 结果与分析

2.1 生物炭配施氮肥对土壤 Cd 形态的影响

如图 1 所示,对照组土壤不同形态 Cd 含量高低为:可交换态 > 碳酸盐结合态 > 铁锰氧化物结合态 > 有机物结合态 > 残渣态.单一氮肥处理土壤可交换态 Cd 含量变化不明显,单一生物炭处理下降了 17.5%,降幅效果最显著,二者联合处理可交换态 Cd 含量下降了 6.2%~14.7%.相反地,与对照相比,所有处理均提高了碳酸盐结合态和铁锰氧化物态 Cd 含量,提高幅度分别 5.7%~63.2% 和 14%~84.3%,单一生物炭和配施氮肥处理效果均显著于单一氮肥处理.有机物结合态 Cd 含量仅在单一高用量氮肥处理下降降低了 6.9%,单一低、中用量氮肥



不同小写字母表示不同处理之间具有显著差异($P < 0.05$)

图 1 生物炭配施氮肥对土壤 Cd 形态的影响

Fig. 1 Effect of biochar combined with nitrogen fertilizer on soil Cd fractions

处理下分别升高了 10.7% 和 10.3%, 单一生物炭处理下升幅最显著, 达 85.5%, 二者联合处理下也显著提高了 36.5%~61%。残渣态 Cd 含量在单一生物炭和配施中用量的氮肥处理下变化不明显, 单一氮肥和低、高用量联合生物炭处理下残渣态 Cd 含量提高了 14.9%~26.4%, 且二者联合比单一氮肥处理效果显著。以上这些结果表明, 生物炭配施氮肥处理下土壤中 Cd 形态由可交换态转化为活性低的残渣态效果最明显。

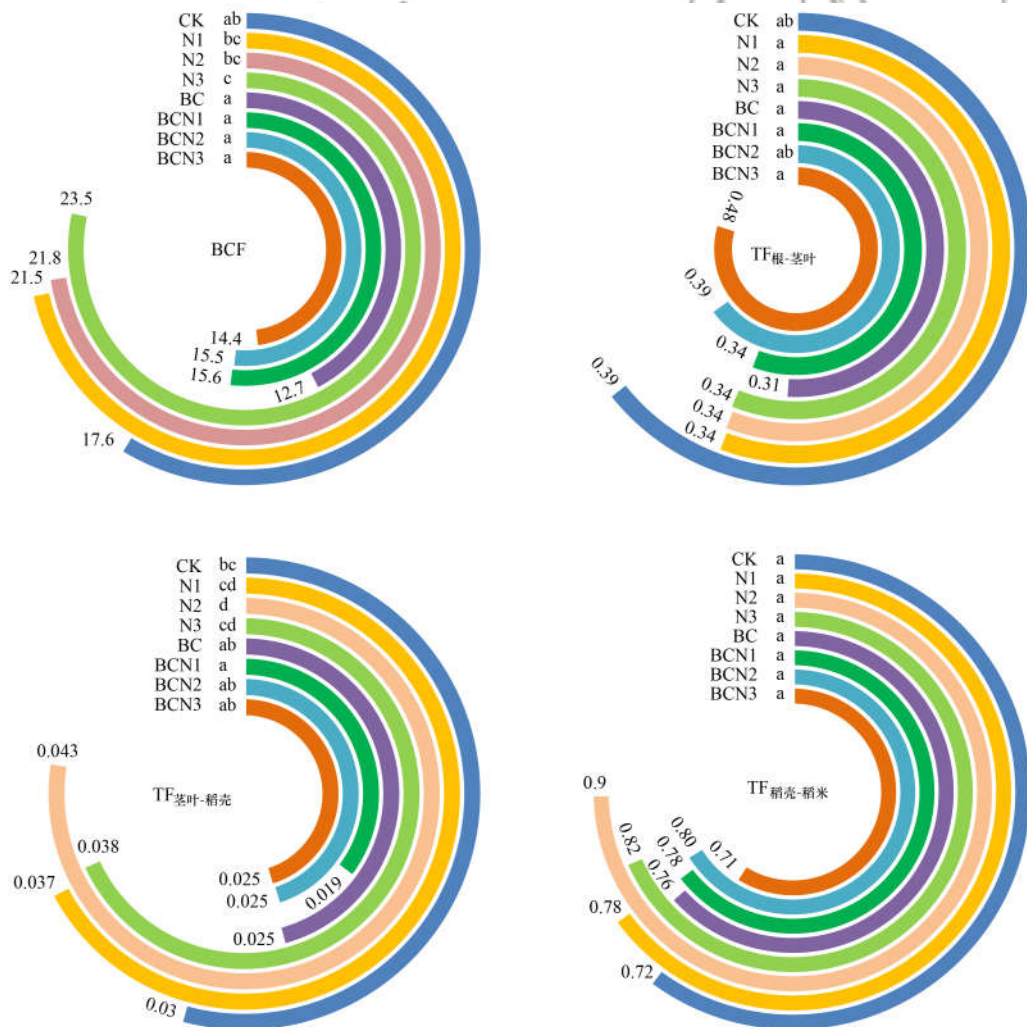
2.2 生物炭配施氮肥对水稻 Cd 富集及迁移转化的影响

富集系数可以用来表征土壤-植物体系中重金属迁移的难易程度, 反映植物将重金属吸收转移到体内的能力大小^[23]。从图 2 可以看出, 单一氮肥处理水稻体内 Cd 富集能力提高, 其富集系数随氮肥用量的增加随之上升, 升高了 22%~33.5%, 而单一生物炭和配施氮肥处理水稻 Cd 富集能力均下降, 降低了 12%~27.8%, 单一生物炭处理效果最显著。

转移系数用来评价植物将重金属从地下向地上的运输和富集能力。转移系数越大, 则重金属从根系向地上部器官转运能力越强^[23]。水稻 Cd 从根部向茎叶转移能力在所有处理除 BCN2 和 BCN3 均下降, 降幅为 12.5%~20.6%。单一氮肥处理提高了水稻 Cd 从茎叶向稻壳部位的转移能力, 升幅为 24%~42.8%, 相反地, $TF_{\text{茎叶-稻壳}}$ 系数在生物炭和配施氮肥处理下降低了 15.4%~34.7%, 且在生物炭配施低用量氮肥处理下降幅最显著。水稻 Cd 从稻壳向稻米转移能力仅在生物炭配施高用量氮肥处理下降低了 1.7%, 其他处理上升了 5.4%~24.3%, 且单一氮肥处理下 $TF_{\text{稻壳-稻米}}$ 系数提高幅度最大。整体而言, 生物炭配施氮肥处理可抑制 Cd 在水稻体内的富集和迁移转运能力。

2.3 生物炭配施氮肥对土壤酶活性的影响

由图 3 可以看出, 与对照相比, 土壤脲酶活性在单一中用量的氮肥处理下变化不明显, 低、高用量处理提高了脲酶活性, 分别升高了 13.02% 和



不同小写字母表示不同处理之间具有显著差异 ($P < 0.05$)

图 2 生物炭配施氮肥对水稻 Cd 富集和转运系数的影响

Fig. 2 Effect of biochar combined with nitrogen fertilizer on Cd bioconcentration and translocation factor of rice

11.48%, 单一生物炭和配施氮肥处理脲酶活性显著上升 ($P < 0.05$), 升幅达 55.96%~106.59%。酸性磷酸酶和蔗糖酶活性在单一高用量氮肥和生物炭配施氮肥处理下提高, 酶活性分别增加了 6.49%~29.18% 和 2.34%~19.85%, 联合处理效果较单一 N3 处理更显著, 而单一低、中高用量的氮肥和生物炭处理酸性磷酸酶和蔗糖酶活性分别下降了 0.73%~18.46% 和 8.46%~20.67%。过

氧化氢酶活性在单一氮肥和生物炭配施中、高用量氮肥处理下均下降, 降低了 20.57%~80.23%, 单一生物炭和配施低用量氮肥处理下过氧化氢酶活性增加, 分别上升了 21.28% 和 24.11%。整体来看, 单一氮肥处理不同程度地抑制了土壤中脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性, 相反地, 生物炭配施氮肥处理表现出对这 4 种酶活性的促进作用。

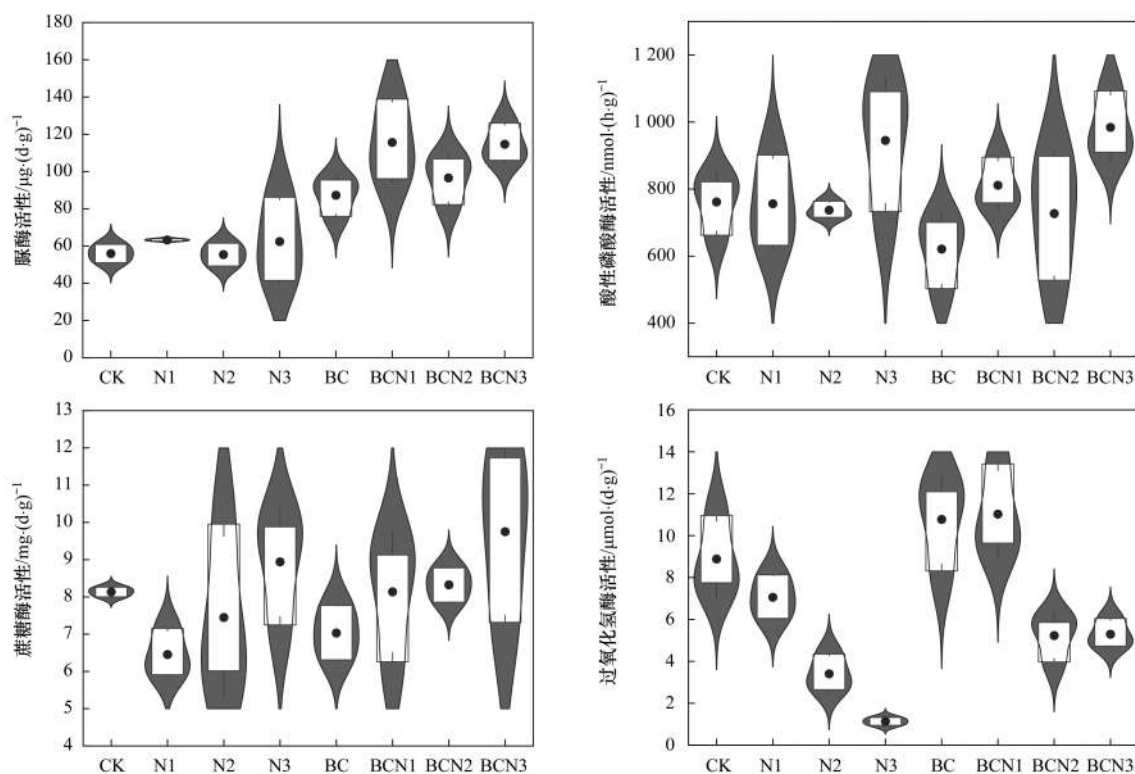


图3 生物炭配施氮肥对土壤酶活性的影响

Fig. 3 Effect of biochar combined with nitrogen fertilizer on soil enzyme activity

2.4 生物炭配施氮肥对土壤细菌群落的影响

不同处理下细菌类群相对丰度如图4所示, 在目水平上, 土壤中主要的12种优势菌群分别为: Acidobacteriales、Burkholderiales、Solibacterales、Desulfuromonadales、Rhodocyclales、Rhizobiales、Sphingomonadales、Xanthomonadales、Myxococcales、Opitutales、Pedosphaerales 和 Nitrospirales, 占土壤细菌群落总数的70%以上。其中, Acidobacteriales 的相对丰度最高, 除单一高用量氮肥和生物炭配施低用量氮肥处理其相对丰度降低(9.3%和0.7%), 其他处理下 Acidobacteriales 相对丰度均增加, 且 BCN2 处理效果最显著 ($P < 0.05$), 其相对丰度增加了 35.2%。单一氮肥、生物炭和二者联合处理均提高了 Solibacterales 和 Xanthomonadales 的相对丰度, Desulfuromonadales、Rhodocyclales 和 Nitrospirales 的相对丰度在单一生物炭和配施氮肥处理下增加, 单一氮肥处理下下降。单一氮肥和联合生物炭处理增

加了 Myxococcales 和 Pedosphaerales 的相对丰度, Burkholderiales、Opitutales、Rhizobiales 和 Sphingomonadales 的相对丰度与对照相比在所有处理下均有下降。

2.5 土壤微生物共现网络分析

图5表明, 不同处理组间细菌共现网络的拓扑属性存在显著差异 ($P < 0.05$)。其中, N、BC 和 BCN 处理组的共现频率(边/点为 9.77、7.83 和 9.84)均高于 CK(7.21), 表明 N、BC 和 BCN 处理下微生物共现网络的紧密度更高。此外, 相比于 CK 组, N、BC 和 BCN 处理组的平均度均提高, 分别上升了 35.51%、8.65% 和 36.48%。而聚类系数仅在 BC 处理组中提高了 4.74%, N 和 BCN 处理组的聚类系数降低了 38.74% 和 36.63%。N、BC 和 BCN 处理的共现网络的复杂性(密度)均提高, 增强了 19.23%~51.92%, 而模块化程度均降低, 下降了 6.37%~31.97%, 且均在 BCN 组中变化最显著。

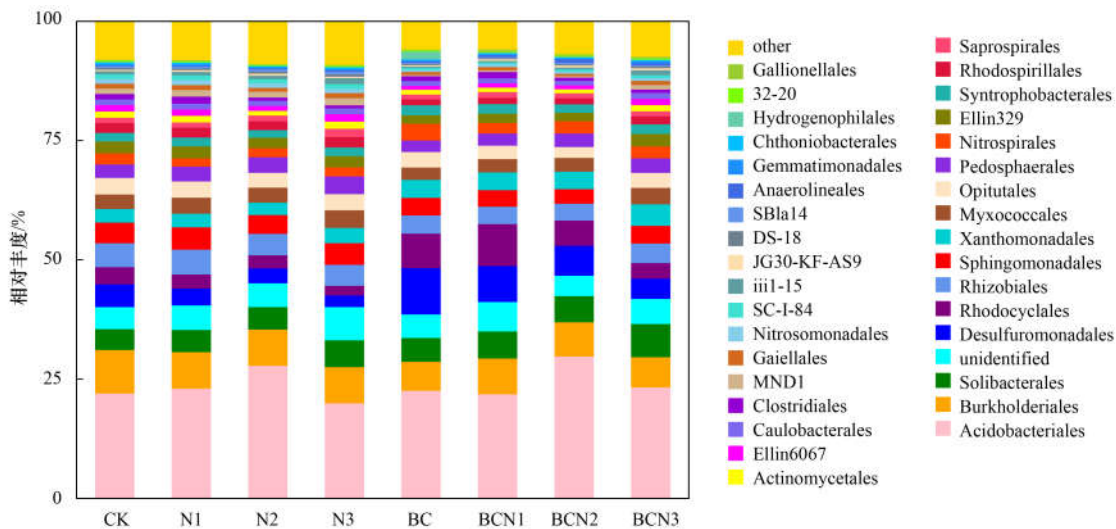


图 4 生物炭配施氮肥对微生物群落结构的影响

Fig. 4 Effect of biochar combined with nitrogen fertilizer on microbial community structure

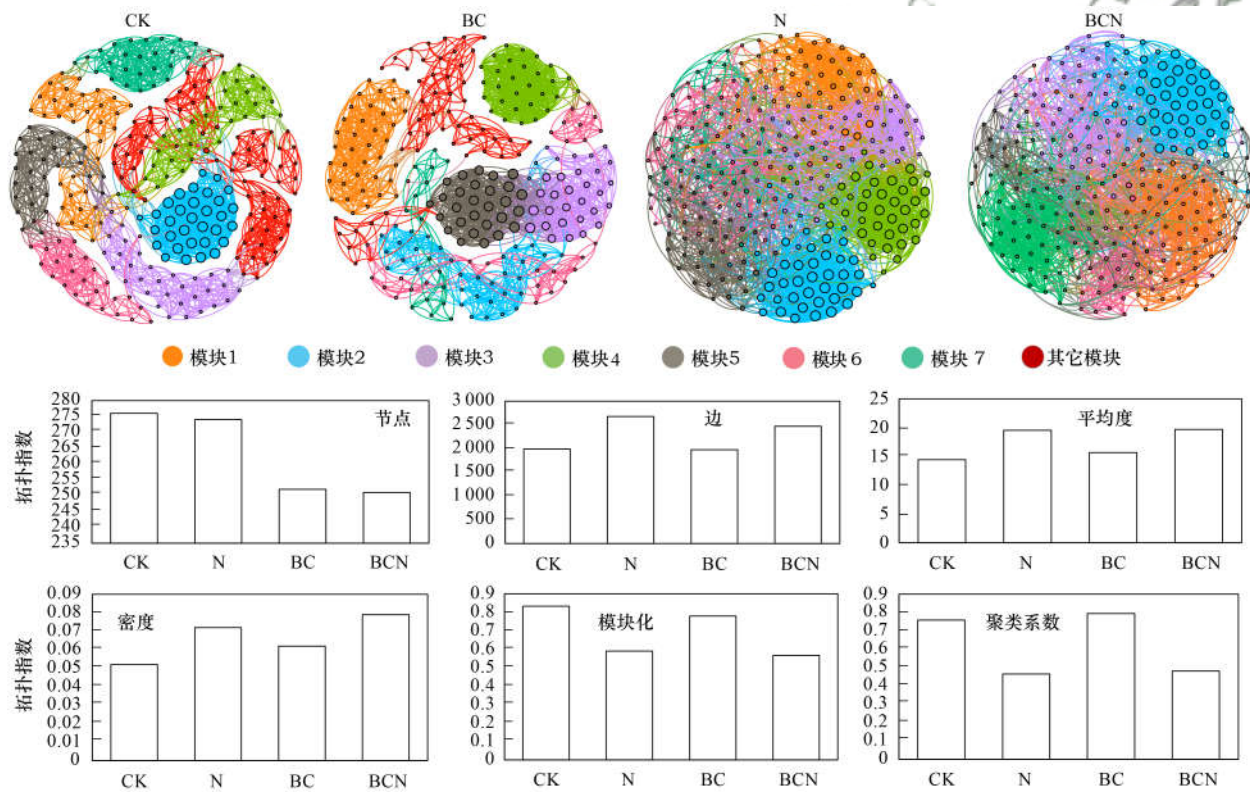


图 5 不同处理微生物的共现网络和网络拓扑结构属性

Fig. 5 Network visualization of microbial co-occurrence patterns and network topology properties along an elevation gradient of different treatments

3 讨论

3.1 生物炭配施氮肥对土壤 Cd 活性的影响

本研究发现,生物炭配施氮肥可促进土壤中 Cd 由活性高的可交换态向活性低的残渣态转化.这主要是因为生物炭自身呈碱性,配施氮肥能够中和氮肥引起 pH 值的降低,由此来降低一些重金属可交换态的含量,进而减轻有害元素对作物生长过程中的伤害^[9].有研究表明,pH 值是影响土壤 Cd 生物有效性的主要因素之一^[24].当 pH 值较低时,土壤

中的颗粒主要以静电吸附为主,由于 H⁺ 质量分数的增加,导致表面官能团被破坏,使得与重金属离子所形成的络合物被解吸,从而吸附态的重金属离子进入土壤溶液中^[25].pH 值越高,重金属的溶解度越低,其活性就越低^[26].而氮肥一方面通过土壤硝化作用,间接释放 H⁺,从而加速土壤酸化,酸性条件会增加 Cd 的生物有效性和溶解度^[15,16],另一方面,铵态氮肥释放的 NH₄⁺ 与 Cd 离子竞争土壤吸附点位,导致土壤溶液中 Cd 离子浓度的升高^[27].生物炭还可以通过离子交换沉淀和阳离子金属吸引力削弱

Cd 的可利用性. 生物炭的施用会增加土壤胶体表面的碱性官能团, 碱性基团的存在促使有效态 Cd 向残渣态转化, 使 Cd 钝化、活性降低^[28,29]. 残渣态重金属一般是由原生、次生硅酸盐、硫化物和其它一些稳定的次生矿物组成, 当土壤 pH 值提高, 有效硅含量增加, S^{2-} 与 Cd^{2+} 反应生成 CdS, 土壤重金属离子与硅酸根离子形成新的结构、性质稳定的硅酸盐沉淀从而增加残渣态比例^[30]. Ucchimaiya 等^[31]的研究同样表明, 生物炭的输入会引起土壤 pH 值的提高, 促进金属可交换态 Cd 向残渣态的转化. 由此可见, 生物炭可以中和氮肥引起的硝化作用, 有效降低酸性土壤中 Cd 的有效性, 这与 Zhao 等^[15]研究的结果相一致.

3.2 生物炭复配氮肥对水稻体内 Cd 富集和转运的影响

本试验表明, 单一氮肥提高了水稻根部 Cd 的富集能力, Cd 在水稻中的富集系数随氮肥的施用而增加, 升高了 22% ~ 33.5%. Yang 等^[32]的研究也发现氮肥增加了 Cd 在水稻体内的累积. 有研究发现, 土壤中 NH_4^+-N 的增加促进了百慕草 [*Cynodon dactylon* (L.) pers.] 中 Cd 富集系数^[33]. 氮肥引起 Cd 在水稻体内富集的原因可能有: 一是 N 通过增加土壤中 Cd 的有效性来增加植物对 Cd 的吸收, Cd 从根际土壤到植物根的吸收能力取决于 CEC 和 Cd^{2+} 电化学潜力^[34]. N 可以显著增加土壤中的 CEC 和 Cd^{2+} 电化学势, 从而释放足够的 Cd 离子到植物的根部并进而在体内迁移转化; 二是 N 通过调节 NO 诱导的二价阳离子来增加 Cd 的吸收运输, 受 N 调节的阳离子金属转运跨膜蛋白在植物对 Cd 吸收和 Cd 在植物体内的迁移转化起着至关重要的作用^[35]. 三是 N 通过调节细胞壁成分和结构促进植物对 Cd 的吸收和富集. N 在生理上调节细胞壁分离、螯合能力和氧化抗性以调节 Cd 在植物体内的迁移转化. 有研究发现在低 Cd 条件下, NH_4^+ 的供应改善了 Cd 从根细胞壁转移到细胞内并增加胞内 Cd 的果胶酸和蛋白质整合形式. 而在较高的 Cd 水平下, NH_4^+ 会促进水稻根部 Cd 的积累^[36]. 本研究结果表明单一生物炭和配施氮肥可以有效减少水稻中 Cd 的可利用性和迁移转化, 降低水稻根、茎叶和稻壳中 Cd 的富集系数和转移系数(图 2). Jing 等^[37]的研究同样发现生物炭可有效抑制水稻对 Cd 的吸收和富集. 在重金属污染的土壤中, 生物炭可增加土壤 pH 值, 其可交换阳离子和表面官能团可沉淀 Cd-P 化合物, 有效地固定 Cd^[38]. 因此, 生物炭引起土壤 pH 值的提高解释了 Cd 对植物的毒性的降低. 生物炭通过降低土壤中 Cd 的有效性抑制了植物对 Cd

的吸收^[39]. 因此, 针对重金属 Cd 污染的土壤, 氮肥不应单独施用, 建议与生物炭联合应用.

3.3 生物炭配施氮肥对土壤生态环境质量的影响

土壤酶活性作为土壤的有机成分, 参与土壤中物质和能量的转化, 影响着土壤的代谢. 土壤酶对重金属较为敏感, 其活性大小对重金属污染程度具有良好的恢复及指示效应, 在土壤污染修复过程中扮演着重要的角色^[20]. 影响土壤酶活性变化的因素比较复杂, 包括不同外源添加物质引起的土壤理化性质和微生物群落的改变、酶种类、重金属附存形态. 本试验中, 单一氮肥、生物炭和二者联合应用土壤脲酶活性均有提高, 有研究表明土壤脲酶活性与土壤的微生物活性、有机物质、全氮和速效氮含量呈正相关^[40]. 脲酶主要来源于植物的根系分泌物、动植物残体和微生物. 氮肥激活土壤脲酶活性的原因可能是氮肥促进了作物代谢, 增加了根系分泌物, 加快了微生物的繁殖, 而根际微生物通过吸收土壤中的养分, 形成了近根缓效供应的养分库, 从而有利于土壤酶活性的提高. 生物炭呈碱性, 施入土壤后可提高土壤 pH 值, 改善生存环境的同时也能够为其生长提供充足的养分, 从而促使微生物分泌更多的脲酶^[41]. 土壤磷酸酶能催化土壤有机磷化合物矿化成无机磷, 其活性高低直接影响着土壤中有有机磷的分解转化及其生物有效性, 与土壤碳、氮含量、有效磷含量和 pH 有一定的关系^[42]. 蔗糖酶对增加土壤中易溶性营养物质起着重要的作用, 与土壤中的有机质、氮、磷含量、微生物活动和土壤呼吸强度有关, 一般情况下, 土壤肥力越高, 蔗糖酶活性越强, 因此该酶也是评价土壤熟化程度和肥力水平的一个指标^[43]. 本研究结果显示(图 3), 土壤酸性磷酸酶和蔗糖酶活性仅在单一高用量氮肥和生物炭配施氮肥处理下有所提高, 这可能主要与氮肥导致土壤 pH 的降低和生物炭引起的 pH 值的升高有关. 徐冬梅^[44]的试验同样发现, 土壤 pH 对酸性磷酸酶的直接影响力体现了生物催化剂对环境 pH 变化的敏感. 过氧化氢酶是土壤中的氧化还原酶类, 与好氧微生物的代谢活性有关, 其活性可以表征土壤腐殖质化强度大小和有机质转化速度, 是土壤肥力的重要指标^[45]. 本试验中其酶活性仅在单一氮肥处理下受到抑制, 单一生物炭和二者联合作用下促进了土壤过氧化氢酶活性. 单一铵态氮肥的施加可提高土壤还原性, 降低氧化还原电位, 从而抑制了土壤过氧化氢酶活性^[46]. 生物炭增加过氧化氢酶活性的原因可能有: 一是其较大的比表面积有利于酶促反应的发生, 二是生物炭通过释放养分物质(N、P 和 K 等营养元素)促进土壤微生物的生长繁殖, 进而增强了

酶活性^[47]. 生物炭也可以通过吸附固定土壤重金属 Cd,降低土壤中有效态 Cd 含量,减弱重金属对土壤微生物的毒害作用,从而提高土壤酶活性^[48]. 本试验结果整体来看,生物炭配施氮肥处理对土壤中酶活性起到了促进作用,这可能与 BCN 处理降低了土壤中 Cd 的活性有关. 此外,由于多种环境因子对土壤酶都具有一定影响力,酶活性变化较为复杂. 除了本研究未考虑的因素外,也反映农田土壤酶活性的多因素影响,其中并不存在具绝对影响力的因子.

土壤微生物在养分转化、作物生产力和重金属修复等方面发挥着至关重要的作用^[17]. 土壤微生物对重金属胁迫敏感,常用于指示土壤环境质量的. 由图 4 可知,与对照组相比,单一氮肥处理下土壤主要细菌,如 Acidobacteriales、Burkholderiales、Rhizobiales、Sphingomonadales、Opitutales、Desulfuromonadales、Rhodocyclales 和 Nitrospirales 的相对丰度均有下降,这可能与单一氮肥引起的土壤有效态 Cd 含量增加有关,提高了土壤 Cd 毒性风险,有研究表明重金属污染可显著抑制土壤微生物的生长繁殖,改变群落组成,降低群落多样性^[49],蒲俊宇等^[46]试验结果同样发现仅施氮肥抑制了土壤微生物的丰富度和多样性. 本试验中,单一生物炭和联合氮肥处理可增加土壤中大部分主要目细菌(除细菌 Burkholderiales、Rhizobiales、Sphingomonadales 和 Opitutales). 有研究表明,生物炭对微生物群落组成的改变具有积极作用^[50]. 一方面,生物炭可以促进细菌与重金属之间的电子转移,从而促进重金属的转化,使重金属由活性较强的可交换态向活性低的残渣态转化,进而降低重金属对土壤微生物的毒性,另一方面,由于其大的表面积和丰富的孔隙结构,生物炭为土壤微生物提供了重要的栖息地^[51]. 此外,通过创建微生物群落的共现网络可以更好地了解土壤微生物群落及其对环境变化的反应^[52]. 在共生网络中,节点聚集在一个模块中表明相应的微生物占据相似的生态位和/或展示功能相互依赖^[53]. 从图 5 可以看出 N、BC 和 BCN 处理组中细菌 OTU 之间的关系均有增强并改善了细菌中可能的共生关系. 单一生物炭处理均提高了微生物网络的平均度和聚类系数,表明微生物网络复杂性有所加强^[54]. 生物炭配施氮肥可以改善土壤理化性质,进一步驱动微生物间的相互作用,最终反馈于微生物网络结构^[55].

总的来说,生物炭配施氮肥积极地调控了受 Cd 污染的根际微生态环境,增加了土壤微生物菌群丰富度,促进了土壤酶活性,从而改善土壤微生态环境.

4 结论

(1) 生物炭配施氮肥可抑制 Cd 在水稻体内的累积和转运能力,而单一氮肥提高了水稻根部 Cd 的富集能力,因此,建议氮肥联合生物炭修复治理 Cd 污染土壤.

(2) 生物炭配施氮肥可以提高土壤酶活性(脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶),改善土壤细菌群落丰富度,加强土壤细菌网络复杂性,对维护土壤生态环境质量具有积极作用.

参考文献:

- [1] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等.《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(9): 1689-1692. Chen N C, Zheng Y J, He X F, *et al.* Analysis of the report on the national general survey of soil contamination [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(9): 1689-1692.
- [2] Chauhan B S, Jabran K, Mahajan G. Rice production worldwide [M]. Cham: Springer, 2017.
- [3] Carrijo D R, Lundy M E, Linquist B A. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: a meta-analysis [J]. Field Crops Research, 2017, **203**: 173-180.
- [4] 马宁,齐继薇,刘长发,等. 辽河口潮滩湿地不同植被土壤 4 种碳代谢酶活性及其与有机碳含量、pH 值关系[J]. 中国农学通报, 2018, **34**(1): 90-97. Ma N, Qi J W, Liu C F, *et al.* Relationship between 4 carbon metabolism enzymes and organic carbon, pH value under different vegetation in Liaohe estuary tidal flat wetland [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, **34**(1): 90-97.
- [5] 陈卫平,杨阳,谢天,等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, **55**(2): 261-272. Chen W P, Yang Y, Xie T, *et al.* Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, **55**(2): 261-272.
- [6] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, *et al.* Sustainable biochar to mitigate global climate change [J]. Nature Communications, 2010, **1**: 56.
- [7] 陈温福,张伟明,孟军,等. 生物炭应用技术研究[J]. 中国工程科学, 2011, **13**(2): 83-89. Chen W F, Zhang W M, Meng J, *et al.* Researches on biochar application technology [J]. Engineering Sciences, 2011, **13**(2): 83-89.
- [8] Xie Z B, Xu Y P, Liu G, *et al.* Impact of biochar application on nitrogen nutrition of rice, greenhouse-gas emissions and soil organic carbon dynamics in two paddy soils of China [J]. Plant and Soil, 2013, **370**(1-2): 527-540.
- [9] Zhao X, Wang S Q, Xing G X. Nitrification, acidification, and nitrogen leaching from subtropical cropland soils as affected by rice straw-based biochar: laboratory incubation and column leaching studies [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, **14**(3): 471-482.
- [10] Bai S H, Dempsey R, Reverchon F, *et al.* Effects of forest thinning on soil-plant carbon and nitrogen dynamics [J]. Plant and Soil, 2017, **411**(1-2): 437-449.
- [11] Nishida H, Suzuki T. Nitrate-mediated control of root nodule symbiosis [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2018, **44**: 129-136.
- [12] Yang Y J, Xiong J, Tao L X, *et al.* Regulatory mechanisms of

- nitrogen (N) on cadmium (Cd) uptake and accumulation in plants: a review[J]. *Science of Total Environment*, 2020, **708**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135186.
- [13] Srivastava S, Pathare V S, Sounderajan S, *et al.* Nitrogen supply influences arsenic accumulation and stress responses of rice (*Oryza sativa* L.) seedlings [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **367**: 599-606.
- [14] Ying H, Ye Y L, Cui Z L, *et al.* Managing nitrogen for sustainable wheat production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **162**: 1308-1316.
- [15] Zhao H C, Yu L, Yu M J, *et al.* Nitrogen combined with biochar changed the feedback mechanism between soil nitrification and Cd availability in an acidic soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **390**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121631.
- [16] Ye X X, Hu H X, Li H Y, *et al.* Combined nitrogen fertilizer and wheat straw increases the cadmium phytoextraction efficiency of *Tagetes patula* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **170**: 210-217.
- [17] Caporale A G, Violante A. Chemical processes affecting the mobility of heavy metals and metalloids in soil environments[J]. *Current Pollution Reports*, 2016, **2**(1): 15-27.
- [18] Liang X Q, Chen L L, Liu Z W, *et al.* Composition of microbial community in pig manure biochar-amended soils and the linkage to the heavy metals accumulation in rice at harvest[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, **29**(7): 2189-2198.
- [19] Huang D L, Liu L S, Zeng G M, *et al.* The effects of rice straw biochar on indigenous microbial community and enzymes activity in heavy metal-contaminated sediment[J]. *Chemosphere*, 2017, **174**: 545-553.
- [20] Zhang J, Liu J, Liu R L. Effects of pyrolysis temperature and heating time on biochar obtained from the pyrolysis of straw and lignosulfonate[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **176**: 288-291.
- [21] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(7): 844-851.
- [22] Yang W H, Wang S S, Ni W Z, *et al.* Enhanced Cd-Zn-Pb-contaminated soil phytoextraction by *Sedum alfredii* and the rhizosphere bacterial community structure and function by applying organic amendments[J]. *Plant and Soil*, 2019, **444**(1-2): 101-118.
- [23] 孙约兵, 周启星, 任丽萍. 镉超富集植物球果薹菜对镉-砷复合污染的反应及其吸收积累特征[J]. *环境科学*, 2007, **28**(6): 1355-1360.
- Sun Y B, Zhou Q X, Ren L P. Growth responses of *rorippa globosa* and its accumulation characteristics of Cd and As under the Cd-As combined pollution [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(6): 1355-1360.
- [24] 王艳红, 唐明灯, 李盟军, 等. 外加氮源在 Cd 超标菜地上的应用效果 [J]. *中国生态农业学报*, 2016, **24**(2): 218-225.
- Wang Y H, Tang M D, Li M J, *et al.* Effects of nitrogen addition on above-standard Cd-contaminated soils in vegetable fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, **24**(2): 218-225.
- [25] 马献发, 李伟彤, 孟庆峰, 等. 生物炭对土壤重金属形态特征及迁移转化影响研究进展[J]. *东北农业大学学报*, 2017, **48**(6): 82-90.
- Ma X F, Li W T, Meng Q F, *et al.* Research advance on biochars of the speciation, mobility and transfer of heavy metals in soils[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2017, **48**(6): 82-90.
- [26] Valdez-gonzález J C, López-chuken U J, Guzmán-mar J L, *et al.* Saline irrigation and Zn amendment effect on Cd phytoavailability to Swiss chard (*Beta vulgaris* L.) grown on a long-term amended agricultural soil: a human risk assessment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(9): 5909-5916.
- [27] Wei S H, Ji D D, Twardowska I, *et al.* Effect of different nitrogenous nutrients on the cadmium hyperaccumulation efficiency of *Rorippa globosa* (Turcz.) Thell [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(3): 1999-2007.
- [28] Yuan Z W, Wang L, Lan T, *et al.* Water quality assessment and source identification of water pollution in the Banchengzi reservoir, Beijing, China [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, **57**(60): 29240-29253.
- [29] Xu Z W, Yu G R, Zhang X Y, *et al.* The variations in soil microbial communities, enzyme activities and their relationships with soil organic matter decomposition along the northern slope of Changbai Mountain[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, **86**: 19-29.
- [30] Nenmann D, Nieten U Z. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants[J]. *Phytochemistry*, 2001, **56**(7): 685-692.
- [31] Uechimaiya M, Lima I M, Klasson K T, *et al.* Immobilization of heavy metal ions (Cu^{II} , Cd^{II} , Ni^{II} , and Pb^{II}) by broiler litter-derived biochars in water and soil [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, **58**(9): 5538-5544.
- [32] Yang Y J, Xiong J, Chen R J, *et al.* Excessive nitrate enhances cadmium (Cd) uptake by up-regulating the expression of *OsIRT1* in rice (*Oryza sativa*) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, **122**: 141-149.
- [33] Chen B, Tan S D, Zeng Q R, *et al.* Soil nutrient heterogeneity affects the accumulation and transfer of cadmium in Bermuda grass (*Cynodon dactylon* (L.) pers.) [J]. *Chemosphere*, 2019, **221**: 342-348.
- [34] Fujimaki S, Suzui N, Ishioka N S, *et al.* Tracing cadmium from culture to spikelet: noninvasive imaging and quantitative characterization of absorption, transport, and accumulation of cadmium in an intact rice plant [J]. *Plant Physiology*, 2010, **152**(4): 1796-1806.
- [35] Yamaji N, Ma J F. The node, a hub for mineral nutrient distribution in graminaceous plants[J]. *Trends in Plant Science*, 2014, **19**(9): 556-563.
- [36] Chai M W, Li R Y, Shen X X, *et al.* Does ammonium nitrogen affect accumulation, subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Kandelia obovata*? [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **162**: 430-437.
- [37] Jing F, Chen C, Chen X M, *et al.* Effects of wheat straw derived biochar on cadmium availability in a paddy soil and its accumulation in rice[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113592.
- [38] Park J H, Wang J J, Kim S H, *et al.* Cadmium adsorption characteristics of biochars derived using various pine tree residues and pyrolysis temperatures[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, **553**: 298-307.
- [39] Zhang J Y, Zhou H, Gu J F, *et al.* Effects of nano- Fe_3O_4 -modified biochar on iron plaque formation and Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.113970.
- [40] Sun Y B, Sun G H, Xu Y M, *et al.* Assessment of natural sepiolite on cadmium stabilization, microbial communities, and enzyme activities in acidic soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(5): 3290-3299.

- [41] 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 等. 生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 422-432.
Feng H L, Xu C S, He H H, *et al.* Effect of biochar on soil enzyme activity & the bacterial community and its mechanism [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 422-432.
- [42] Hu X F, Jiang Y, Shu Y, *et al.* Effects of mining wastewater discharges on heavy metal pollution and soil enzyme activity of the paddy fields [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, **147**: 139-150.
- [43] Tripathi S, Chakraborty A, Chakrabarti K, *et al.* Enzyme activities and microbial biomass in coastal soils of India[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, **39**(11): 2840-2848.
- [44] 徐冬梅, 刘广深, 许中坚, 等. 模拟酸雨对土壤酸性磷酸酶活性的影响及机理[J]. 中国环境科学, 2003, **23**(2): 176-179.
Xu D M, Liu G S, Xu Z J, *et al.* Effects and mechanism of simulated acid rain on the activities of soil acid phosphatase[J]. China Environmental Science, 2003, **23**(2): 176-179.
- [45] 盛海君, 牛东, 孙光佑, 等. 秸秆直接还田对土壤微生物、理化特性和酶活性的影响研究进展[J]. 土壤科学, 2016, **4**(2): 19-26.
Sheng H J, Niu D, Sun G Y, *et al.* Research progress of effect of direct straw returning on soil microorganism, physical and chemical characteristics and enzyme activities[J]. Soil Science, 2016, **4**(2): 19-26.
- [46] 蒲俊宇, 李忠义, 钟菊新, 等. 绿肥配施氮肥对岩溶区稻田土壤微生物群落的影响[J]. 微生物学报, 2022, **62**(6): 2417-2432.
Pu J Y, Li Z Y, Zhong J X, *et al.* Effect of the combination of green manure with nitrogen fertilizer on microbial community in karst paddy soil[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2022, **62**(6): 2417-2432.
- [47] 包建平, 袁根生, 董方圆, 等. 生物质炭与秸秆施用对红壤有机碳组分和微生物活性的影响[J]. 土壤学报, 2020, **57**(3): 721-729.
Bao J P, Yuan G S, Dong F Y, *et al.* Effects of biochar application and straw returning on organic carbon fractionations and microbial activities in a red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, **57**(3): 721-729.
- [48] 郭碧林, 陈效民, 景峰, 等. 施用生物炭对红壤性水稻土重金属钝化与土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(3): 298-304.
Guo B L, Chen X M, Jing F, *et al.* Effects of biochar application on heavy metal passivation and soil fertility in the red paddy soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(3): 298-304.
- [49] Haider F U, Coulter J A, Cheema S A, *et al.* Co-application of biochar and microorganisms improves soybean performance and remediate cadmium-contaminated soil [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, **214**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112112.
- [50] Naeem I, Masood N, Turan V, *et al.* Prospective usage of magnesium potassium phosphate cement combined with *Bougainvillea alba* derived biochar to reduce Pb bioavailability in soil and its uptake by *Spinacia oleracea* L[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, **208**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111723.
- [51] Zhu X M, Chen B L, Zhu L Z, *et al.* Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: a review[J]. Environmental Pollution, 2017, **227**: 98-115.
- [52] de Menezes A B, Prendergast-Miller M T, Richardson A E, *et al.* Network analysis reveals that bacteria and fungi form modules that correlate independently with soil parameters [J]. Environmental Microbiology, 2015, **17**(8): 2677-2689.
- [53] Layeghifard M, Hwang D M, Guttman D S. Disentangling interactions in the microbiome: a network perspective [J]. Trends in Microbiology, 2017, **25**(3): 217-228.
- [54] Banerjee S, Walder F, Büchi L, *et al.* Agricultural intensification reduces microbial network complexity and the abundance of keystone taxa in roots [J]. The ISME Journal, 2019, **13**(7): 1722-1736.
- [55] de Menezes A B, Richardson A E, Thrall P H. Linking fungal-bacterial co-occurrences to soil ecosystem function[J]. Current Opinion in Microbiology, 2017, **37**: 135-141.

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvio-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weiwei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-ying, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)