

目 次

基于时间序列分解的京津冀区域PM _{2.5} 和O ₃ 空间分布特征	姚青, 丁净, 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹	(2487)
基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析	周红, 王鸣, 柴文轩, 赵昕	(2497)
基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测	杨晓彤, 康平, 王安怡, 臧增亮, 刘浪	(2507)
海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估	符传博, 林建兴, 唐家翔, 丹利	(2516)
京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估	高冉, 李琴, 车飞, 张艳平, 祖永刚, 刘芬	(2525)
2022年北京市城区PM _{2.5} 水溶性离子含量及其变化特征	陈圆圆, 崔迪, 赵泽熙, 常森, 景宽, 沈秀娥, 刘保献	(2537)
郑州市冬春季PM _{2.5} 中金属元素污染特征、来源及健康风险评估	陶杰, 闫慧姣, 徐艺斐, 荆海涛	(2548)
淄博市供暖前后PM _{2.5} 中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险	孙港立, 吴丽萍, 徐勃, 高玉宗, 赵雪艳, 姬亚芹, 杨文	(2558)
西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析	李萌津, 张勇, 张倩, 田杰, 李丽, 刘卉昆, 冉伟康, 王启元	(2571)
天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析	卢苗苗, 韩素芹, 刘可欣, 唐晓, 孔磊, 丁净, 樊文雁, 王自发	(2581)
基于空间尺度效应的山东省PM _{2.5} 浓度时空变化及空间分异地理探测	徐勇, 韦梦新, 邹滨, 郭振东, 李沈鑫	(2596)
我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势	武婷, 崔焱文, 肖成德, 翟增秀, 韩萌	(2613)
廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析	张敬巧, 刘铮, 丁文文, 朱瑶, 曹婷, 凌德印, 王淑兰, 王宏亮	(2622)
景观格局对河流水质影响的尺度效应 Meta 分析	王玉仓, 杜晶晶, 张禹, 吴昊, 胡敏娟, 陈丁江	(2631)
白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源	孟佳靖, 宴红, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升	(2640)
北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析	胡昱欣, 周瑞静, 宋炜, 杨全合, 王鑫茹	(2651)
庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价	刘海, 魏伟, 宋阳, 徐洁, 管政亭, 黄健敏, 赵国红	(2665)
农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价	王蔚青, 徐雄, 刘权震, 林利华, 吕婧, 王东红	(2678)
黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征	韦程宸, 魏枫沂, 夏慧, 黄魁	(2686)
基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析	金晓龙, 邓学良, 戴睿, 徐倩倩, 吴月, 范裕祥	(2694)
再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征	贺赞, 李雪梅, 李宏权, 魏琳琳, 姜春晖, 姜大伟, 李魁晚	(2707)
水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响	梅渝, 黄平, 王鹏, 朱凯	(2715)
银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系	蒙俊杰, 刘双羽, 邱小琼, 周娟娟	(2727)
热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析	张含, 张涵, 王佳伟, 高金华, 文洋, 李相昆, 任征然	(2741)
市政污水中吗啡来源辨析	邵雪婷, 赵悦彤, 蒋冰, 裴伟, 李彦莹, 谭冬芹, 王德高	(2748)
滦河流域生态环境动态遥感评价	李艳翠, 袁金国, 刘博涵, 郭豪	(2757)
黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素	王奕洪, 孙学堂	(2767)
基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例	蔡进, 危小建, 江平, 梁玉琦	(2780)
贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因	李月, 冯霞, 吴路华, 罗光杰, 罗红芬	(2793)
2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子	周怡婷, 严俊霞, 刘菊, 王瑛	(2806)
基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量	崔伟, 董燕, 张露尹, 王荣臻	(2817)
京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响	武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 秦彦杰, 刘欣, 郭小平	(2828)
西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响	江可, 贾亚男, 杨琰, 陈坚淇, 禹朴家	(2840)
不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析	黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 刘贺雷, 刘姣姣, 陈稍, 陈佳永, 张阿凤	(2848)
基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测	胡志瑞, 赵万伏, 宋根先, 王芳, 林妍敏	(2859)
不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响	孙凯, 崔玉涛, 李顺晋, 魏冰丽, 王媛, 杨宏博, 王孝忠, 张伟	(2871)
集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性	周连吴, 曾全超, 梅唐英泽, 汪明霞, 谭文峰	(2881)
控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响	高玮, 王学霞, 谢建治, 陈延华, 倪小会, 王甲辰, 董艳芳, 李子双, 曹兵	(2891)
生物炭对黄绵土中NO ₃ -N运移过程影响及模拟	白一茹, 刘旭, 张钰涵, 张睿媛, 马艳, 王幼奇	(2905)
中国农田土壤重金属污染分析与评价	杨雳, 白宗旭, 薄文浩, 林静, 杨俱佳, 陈涛	(2913)
城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望	王晓雨, 刘恩峰, 杨祥梦, 王碧莲, 林锦阔, 颜梦霞, 毕世杰	(2926)
场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展	陈玥如, 高文艳, 陈虹任, 薛生国, 吴川	(2939)
黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析	戴文婷, 张晖, 吴霞, 钟鸣, 段桂兰, 董霁红, 张培培, 樊洪明	(2952)
拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价	韩双宝, 袁磊, 张秋霞, 郑焰, 李甫成	(2962)
银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析	于路加, 马海军, 王翠平	(2971)
基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估	陈莲, 邹子航, 张培珍, 王雨菡, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆	(2983)
西南典型碳酸盐岩高地地质背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型	唐瑞玲, 徐进力, 刘彬, 杜雪苗, 顾雪, 于林松, 毕婧	(2995)
贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划	韦美溜, 周浪, 黄燕玲, 庞瑞, 王佛鹏, 宋波	(3005)
柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应	刘梦宇, 罗绪锋, 辜娇峰, 易轩韬, 周航, 曾鹏, 廖柏寒	(3016)
改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响	肖乃川, 王子芳, 杨文娜, 谢永红, 代文才, 高明	(3027)
生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响	郑晨格, 裴欢欢, 张亚珊, 李嘉欣, 刘奋武, 乔星星, 秦俊梅	(3037)
基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应	姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 闫广轩, 刘栋	(3047)
微塑料对土壤N ₂ O排放及氮素转化的影响研究进展	刘一戈, 杨安琪, 陈舒欣, 牛英奕, 卢瑛, 李博	(3059)
土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响	戴柳云, 侯磊, 王化, 符立松, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌	(3069)
养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征	宋可心, 贺金成, 李昌文, 解思琦, 刘宝堃, 黄伟, 冯志华	(3078)
聚乙烷微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响	李志超, 李哲, 李嘉晨, 屈忠义, 杨文煊, 李卫平	(3088)
鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测	俞锦丽, 赵俊凯, 罗思琦, 朱颖婷, 张文慧, 胡启武, 刘淑丽	(3098)
粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径	徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡	(3107)
电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析	徐圆圆, 龚德鸿, 黄正光, 杨浪	(3119)

生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响

郑晨格, 裴欢欢, 张亚珊, 李嘉欣, 刘奋武, 乔星星, 秦俊梅*

(山西农业大学资源环境学院, 太谷 030800)

摘要: 通过生菜盆栽试验, 研究四环素(TC)和铜(Cu)复合污染胁迫下施用不同生物炭(苹果枝条、玉米秸秆和谷子秸秆生物炭及其改性生物炭)对生菜生长的影响. 结果表明, 与CK相比, 添加生物炭处理生菜株高、根长、株鲜重和根鲜重均显著增加($P < 0.05$). 添加不同生物炭可以在不同程度上提高生菜生理指标中硝态氮、叶绿素和可溶性蛋白含量, 降低丙二醛、脯氨酸含量以及过氧化氢酶活性, 在幼苗期和成熟期生物炭对生菜生理指标的影响趋势一致. 与CK相比, 添加生物炭后生菜地上部和地下部的TC和Cu含量均有不同程度的降低, 生菜地上部TC和Cu分别降低了2.49%~92.32%和12.79%~36.47%, 地下部TC和Cu分别降低了12.53%~55.64%和22.41%~42.29%. 相关性分析表明, 生菜硝态氮、叶绿素和可溶性蛋白含量与生菜TC含量呈显著负相关, 丙二醛、脯氨酸含量以及过氧化氢酶活性与生菜TC含量呈显著正相关, 生菜抗性基因与TC含量呈显著正相关($P < 0.05$). 总体趋势上, 改性生物炭对提高生菜生长及降低污染物累积的效果优于原生物炭, 其中改性谷子秸秆生物炭的修复效果最佳.

关键词: 生物炭; 四环素(TC); 铜(Cu); 四环素类抗生素抗性基因(TC ARGs); 生菜

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-3037-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202306155

Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper

ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, LI Jia-xin, LIU Fen-wu, QIAO Xing-xing, QIN Jun-mei*

(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030800, China)

Abstract: Through lettuce potting experiments, the effects of different types of biochar (apple branch, corn straw, and modified sorghum straw biochar with phosphoric acid modification) on lettuce growth under tetracycline (TC) and copper (Cu) co-pollution were investigated. The results showed that compared with those under CK, the addition of biochar treatment significantly increased the plant height, root length, shoot fresh weight, and root fresh weight of lettuce ($P < 0.05$). The addition of different biochars significantly increased the nitrate nitrogen, chlorophyll, and soluble protein content in lettuce physiological indicators to varying degrees, while also significantly decreasing the levels of malondialdehyde, proline content, and catalase activity. The effects of biochar on lettuce physiological indicators were consistent during both the seedling and mature stages. Compared with those in CK, the addition of biochar resulted in varying degrees of reduction in the TC and Cu contents of both the aboveground and underground parts of lettuce. The aboveground TC and Cu levels decreased by 2.49%-92.32% and 12.79%-36.47%, respectively. The underground TC and Cu levels decreased by 12.53%-55.64% and 22.41%-42.29%, respectively. Correlation analysis showed that nitrate nitrogen, chlorophyll, and soluble protein content of lettuce were negatively correlated with TC content, whereas malondialdehyde, proline content, and catalase activity were positively correlated with TC content. The resistance genes of lettuce were positively correlated with TC content ($P < 0.05$). In general, modified biochar was found to be more effective in improving lettuce growth quality and reducing pollutant accumulation compared to unmodified biochar, with modified sorghum straw biochar showing the best remediation effect.

Key words: biochar; tetracycline (TC); copper (Cu); tetracycline resistance genes(TC ARGs); lettuce

随着科技的发展, 抗生素日渐被广泛应用, 其中, 四环素(TC)作为一种广谱性抗生素, 在家禽养殖、水产养殖行业和农林业生产中被广泛应用. 我国畜禽养殖业得到了快速发展, 生产方式也逐步从散养发展为规模化. 随着集约化猪、鸡养殖的推广与普及, 包括抗生素在内的兽药被大量使用. 抗生素可以预防和治疗畜禽的传染性疾病, 并在低剂量时促进动物生长, 在保护动物健康和降低养殖成本方面发挥了积极作用^[1-3]. 研究表明, 猪粪中抗生素残留量最高, 其中四环素类残留量高达1 390~354 000 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[4]. 然而抗生素在动物体内极难被吸收, 大部分抗生素都会以母体化合物形式排出动物

体外, 其作为有机肥进入土壤和水体环境中, 从而对植物产生危害. 林琳等^[5]研究发现土壤TC污染对小白菜幼苗的生长发育产生抑制作用; 迟荪琳等^[6]研究也表明TC抑制了生菜的生长. 因此, 环境中残留的抗生素已经引起了高度关注^[7,8].

长期以来, 为了提高养殖业生产效率, 部分重金属如铜(Cu)和锌(Zn)等常被作为饲料添加剂使用, 可见, 在抗生素污染的同时往往伴有严重的重

收稿日期: 2023-06-19; 修订日期: 2023-08-14

基金项目: 山西省重点研发计划项目(201903D221015); 山西省“1331工程”项目(20211331-15)

作者简介: 郑晨格(1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农业环境保护与废弃物资源化利用, E-mail: zcg199912@163.com

* 通信作者, E-mail: sxashr@163.com

金属污染. 而 Cu 作为一种抗菌剂和骨骼强壮剂, 导致猪饲料中普遍添加 CuSO_4 ^[9], 而大多数情况下铜的添加量往往高于动物的需求量, 导致大量的铜不能被吸收利用, 随动物的排泄物进入土壤环境中, 形成一定程度的污染, 猪粪中 $\omega(\text{Cu})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 最高, 中位值分别为 $406.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $671.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[10]. 而铜进入土壤中会造成大面积的植物毒害, 不但会严重影响植物产量和质量, 而且还会通过食物链影响人体健康. 且有研究表明, 土壤重金属与抗生素的复合污染, 其作用机制比单一污染更为复杂^[11]. 这种复合污染不仅对植物生长发育产生抑制作用, 而且会造成农产品质量下降. 因此, 土壤重金属与抗生素复合污染的修复逐渐被广泛关注.

而生物炭作为一种新兴的土壤钝化材料, 是物质通过厌氧条件在高温裂解下形成的炭质材料, 比表面积大、孔隙发达且含有大量较稳定的官能团^[12,13], 可吸附土壤中的各种污染物, 影响其在土壤中的迁移性和生物有效性. 目前, 生物炭在固碳、改良土壤、提高土壤生产力和吸附废水及土壤中的重金属等方面研究比较多, 而对于有机污染物的研究较少^[14]. 现已有研究发现通过向土壤中添加生物炭, 可以加速土壤中土霉素的耗散速率, 减缓土霉素向农作物根系的迁移, 从而降低植物根系中抗生素抗性基因的丰度值^[15]. 也有研究发现生物炭使得土壤中四环素的去除率提高了 10.86%^[16]. 这说明生物炭对土壤中抗生素的污染物具有很强的固定吸附能力, 并且能够显著降低抗生素在土壤中的迁移和潜在危害性^[17]. 生物炭一般呈碱性, 重金属离子在碱性条件下容易发生沉淀, 沉淀形式包括生物炭与

金属离子形成氢氧化物、氧化物、碳酸盐和磷酸盐等^[18]. 生物炭吸附重金属的离子交换机制主要是指重金属与生物炭表面碱土金属(如 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 等)发生离子交换^[19]. Yan 等^[20]研究表明, 富磷生物炭可有效吸附水中 Pb^{2+} . 刘桃妹等^[21]研究发现在水稻土中施用椰壳生物炭能有效缓解土壤中的重金属污染. 张英等^[22]研究结果表明生物炭能够有效吸附农田土壤内的重金属离子, 且随着时间的推移吸附效果会逐渐增强, 从而降低土壤重金属污染. 由此可见, 生物炭已经成为减轻土壤抗生素和重金属污染的有效手段之一.

在之前的研究中, 生物炭施加可以通过提高土壤的保水能力、改变土壤营养有效性和影响土壤微生物结构等途径对植物根系的生长发育产生影响^[23]. 而不同生物炭的修复效果也有所差异, 因此, 本研究为实现秸秆资源化利用, 采用北方较常见且易获取的 3 种材料制备生物炭, 分别为玉米秸秆生物炭、谷子秸秆生物炭和苹果枝条生物炭. 本文拟通过土培试验, 以全国广泛种植的生菜为试验对象, 讨论不同生物炭对四环素(TC)和铜(Cu)复合污染土壤中生菜生长及其污染物累积的影响, 以期为生物炭修复污染土壤、保护植物生长及人体健康提供现实基础及理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤: 采自山西省晋中市太谷区石象村农田耕层土壤(0~20 cm), 土壤为石灰性褐土, 土样风干后过 1 mm 筛网. 土壤基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

项目	pH	$\omega(\text{有机质})$ / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{全氮})$ / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{碱解氮})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{速效磷})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{速效钾})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TC})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{Cu})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
数值	7.78	24.69	1.47	63.83	19.24	193.87	0.20	11.19

供试生物炭材料: 采用限氧热解法制备生物炭, 将苹果树枝条、玉米秸秆和谷子秸秆粉碎后过 0.9 mm 筛备用. 称取一定质量原材料, 放入加盖坩埚内, 置于马弗炉中, 将 3 种材料分别在 600°C 下恒温热解炭化 3 h, 制得 3 种生物炭, 分别记为 A、C 和 M. 3 种生物炭基本理化性质见表 2. 最后将生物炭研磨后过 0.25 mm 筛备用. 在 25°C 下, 将生物炭和 14% 的 H_3PO_4 溶液以 1:2 的比例浸泡 24 h 后, 使用蒸馏水洗涤, 直到上清液的 pH 接近中性. 然后, 将上清液弃去, 并将生物炭放入 105°C 的烘箱中进行干燥, 从而制得其改性生物炭, 分别记为 PA、PC 和 PM.

供试生菜: 供试生菜种子购自河北省沧州市青县良达盛农技术推广中心, 品种名称为“全年耐抽苔生菜”.

1.2 试验设计

盆栽试验于 2021 年在山西农业大学资源环境学院试验基地进行, 每盆土壤用量为 3 kg. 以生菜为供试作物, 将污染物 $[\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}]$ 和盐酸四环素均匀喷洒于供试土壤, 将其混匀后老化 30 d, 其中 TC 添加量为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu 添加量为 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 生物炭用量为 $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 本试验设置 7 个处理, 每个处理重复 3 次, 分别为: 不添加生物炭(CK)、添加苹果枝条生物炭(A)、添加玉米秸秆生物炭(C)、添

表 2 3 种生物炭基本理化性质¹⁾
Table 2 Basic physicochemical properties of three types of biochar

生物炭种类	pH	ω (有机质) /g·kg ⁻¹	ω (全氮) /g·kg ⁻¹	ω (全磷) /g·kg ⁻¹	ω (全钾) /g·kg ⁻¹	ω (TC) /mg·kg ⁻¹	ω (Cu) /mg·kg ⁻¹
A	9.97	17.33	6.97	24.11	12.75	—	—
C	8.71	16.68	1.82	2.98	38.47	—	—
M	10.58	22.49	9.88	3.85	47.54	—	—

1)“—”表示未检测到相关指标含量

加谷子秸秆生物炭(M)、添加改性苹果枝条生物炭(PA)、添加改性玉米秸秆生物炭(PC)和添加改性谷子秸秆生物炭(PM). 生长期间按土壤质量的百分比定量浇水, 分别在 15 d 和 45 d 取生菜幼苗期和成熟期植株样品.

1.3 测试指标与方法

1.3.1 生菜生理指标测定

通过碘量滴定法测定过氧化氢酶含量; 通过硫代巴比妥酸法测定丙二醛含量; 用酸性茚三酮法测定脯氨酸含量; 用 80% 丙酮研磨法测定叶绿素含量; 通过考马斯亮蓝 G-250 染色法测定可溶性蛋白含量; 用水杨酸-硫酸比色法测定硝态氮含量.

1.3.2 四环素和铜含量及抗性基因的提取与测定

四环素含量提取与测定: 将土壤和植物样品分别置于 50 mL 离心管中, 加入 10 mL 提取液(Na₂EDTA-Milvaine: 甲醇=1:1). 通过涡旋混匀 1 min, 并进行 20 min 超声处理. 然后以 3 500 r·min⁻¹ 离心 10 min, 并重复此步骤 3 次, 将上清液合并. 将合并的上清液进行两次正乙烷洗涤, 每次使用 10 mL 正乙烷, 洗涤后进行离心, 去除正乙烷. 然后将洗涤后的上清液在 40℃ 下旋转蒸发至体积约为 12 mL. 然后, 进行固相萃取. 首先, 使用 6 mL 甲醇和 6 mL 超纯水依次活化固相萃取小柱. 活化后, 以 1 mL·min⁻¹ 的流速通过小柱进行提取液的处理. 使用 5 mL 5% 甲醇淋洗小柱, 再用 5 mL 超纯水冲洗小柱. 随后, 用真空抽干法将小柱中的溶液抽滤 10 min. 最后, 使用 5 mL 甲醇溶液对小柱进行洗脱, 收集洗脱液. 将固相萃取得到的洗脱液使用氮吹仪浓缩至 1 mL 左右, 然后使用甲醇定容至 1 mL. 将溶液通过 0.22 μm 有机滤头过滤后, 使用高效液相色谱法(HPLC)进行测定. 以原始土壤生长的生菜进行质量控制, 其回收率为 97.6% ~ 99.2%.

四环素类抗生素抗性基因测定: 采用 StepOnePlus 实时荧光定量 PCR 进行 Q-PCR 检测.

Cu 含量提取与测定: 植物和土壤样品用硝酸、盐酸和氢氟酸消煮结束后用原子吸收分光光度法测定, 原始土壤生长的生菜进行质量控制, 回收率为 96.4% ~ 100.6%.

1.4 数据处理

运用 Excel 2016 计算各处理组的平均值和标准偏差; 通过 Origin 2022 制作数据图; 运用 DPS 软件进行单因素方差分析, 并利用 LSD 多重比较进行差异性显著分析($P < 0.05$).

2 结果与分析

2.1 不同生物炭对生菜生理特性的影响

2.1.1 不同生物炭对生菜生长及品质的影响

表 3 可知, 与 CK 相比, 添加生物炭显著影响了生菜的生长, 生菜株高、根长、株鲜重和根鲜重均显著增加($P < 0.05$). 可以看出, PA 处理生菜株高最大, 增幅为 24.38%, 但 PM 处理生菜根长、株鲜重和根鲜重均最大, 增幅分别为 80.71%、236.13% 和 338.17%. 总体趋势, 改性生物炭对提高生菜株高、根长、株鲜重和根鲜重的效果优于原生物炭, 其中 PM 处理对提高生菜生长的效果最佳.

图 1(a)表明, 与 CK 相比, 添加 3 种原生物炭(A、C 和 M)后, 在幼苗期, 生菜硝态氮含量都有不同程度地增加, 其中 C 处理硝态氮含量最大, 增幅为 91.49%; 而在成熟期, 生菜硝态氮含量均显著增加, 其中 M 处理含量最大, 增幅为 82.34%. 同 CK 相比, 添加 3 种改性生物炭(PA、PC 和 PM)后, 在幼苗期和成熟期, 生菜硝态氮含量均显著增加, 其中 PM 处理硝态氮含量最大, 增幅分别为 123.05% 和 102.43%. 图 1(b)表明, 同 CK 相比, 添加 3 种原生物炭(A、C 和 M)后, 在幼苗期和成熟期叶绿素含量均显著增加, 幼苗期 C 处理的叶绿素含量最大, 增幅为 170.59%; 成熟期 M 处理的叶绿素含量最大, 增幅为 46.67%. 同 CK 相比, 添加 3 种改性生物炭(PA、PC 和 PM)后, 在幼苗期和成熟期, 生菜叶绿素含量均显著增加, 其中 PA 处理的叶绿素含量均最大, 增幅分别为 197.06% 和 66.67%. 可以看出, 无论是在幼苗期还是成熟期, 叶绿素含量增加最为显著的均为 PA 处理. 图 1(c)表明, 同 CK 相比, 添加 3 种原生物炭(A、C 和 M)后, 在幼苗期和成熟期可溶性蛋白含量均显著增加, 在幼苗期 C

处理的可溶性蛋白含量最大,增幅为 97.58%,而在成熟期 A 处理的含量最大,增幅为 220.00%.同 CK 相比,添加 3 种改性生物炭(PA、PC 和 PM)后,在幼苗期和成熟期,生菜可溶性蛋白含量均显著增加,其中 PA 处理在两个时期的可溶性蛋白含量均最大,增幅分别为 183.06% 和 513.33%.可以看出,

改性后的生物炭整体效果较好;无论是在幼苗期还是成熟期,可溶性蛋白质含量增加最为显著的均为 PA 处理.由此可见,生物炭添加能够减少 TC 和 Cu 复合污染物从土壤向植物迁移,减少污染物对生菜蛋白质合成的抑制及破坏,从而使生菜中硝态氮、叶绿素和可溶性蛋白质含量增加.

表 3 不同处理对生菜生长的影响¹⁾

Table 3 Effects of different treatments on lettuce growth

不同处理	株高/cm	根长/cm	株鲜重/g	根鲜重/g
CK	9.43±0.93 c	9.33±0.76 d	7.98±1.43 e	0.44±0.17 d
A	11.17±1.04 ab	12.00±1.33 bed	17.45±4.72 cd	0.68±0.38 cd
C	10.20±1.06 bc	11.50±1.80 cd	12.57±1.93 de	0.65±0.21 cd
M	10.93±0.55 ab	14.53±0.50 ab	18.29±1.37 bc	1.06±0.11 bc
PA	11.73±0.68 a	14.37±2.20 abc	23.17±2.23 ab	1.50±0.15 ab
PC	11.03±0.15 ab	13.50±2.80 bc	21.20±2.73 bc	1.19±0.10 bc
PM	11.33±0.68 ab	16.87±1.11 a	26.82±3.54 a	1.91±0.72 a

1)数值为平均值±标准偏差,不同的小写字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$)

2.1.2 不同生物炭对生菜抗逆指标的影响

图 2(a)表明,同 CK 相比,添加 3 种原生物炭(A、C 和 M)后,在幼苗期和成熟期生菜 MDA 含量均显著降低,在幼苗期, A 处理的 MDA 降幅最大,为 12.50%;而在成熟期, M 处理降幅最大,为 25.16%.同 CK 相比,添加 3 种改性生物炭(PA、PC 和 PM)后,在幼苗期和成熟期,生菜 MDA 含量均显著降低,在两个时期均为 PA 处理降幅最大,降幅分别为 23.61% 和 40.88%.图 2(b)表明,同 CK 相比,添加 3 种原生物炭(A、C 和 M)后,在幼苗期和成熟期生菜过氧化氢酶(CAT)活性均显著降低,均为 M 处理降幅最大,降幅分别为 66.18% 和 80.15%.同 CK 相比,添加 3 种改性生物炭(PA、PC 和 PM)后,在幼苗期和成熟期,生菜 CAT 活性均显著降低,在两个时期均为 PA 处理降幅最大,降幅分别为 72.79% 和 92.24%.图 2(c)表明,同 CK 相比,添加 3 种原生物炭(A、C 和 M)后,在幼苗期和成熟期生菜脯氨酸含量均显著降低,均为 M 处理降幅最大,降幅分别为 49.15% 和 58.41%.同 CK 相比,添加 3 种改性生物炭(PA、PC 和 PM)后,在幼苗期和成熟期,生菜脯氨酸含量均显著降低,在两个时期均为 PA 处理降幅最大,降幅分别为 83.47% 和 69.13%.说明生物炭添加能够降低生菜中 TC 和 Cu 复合污染物含量,进而降低生菜受逆境胁迫,其中 PA 处理效果最明显.

2.2 不同生物炭对生菜 TC 和 Cu 含量及抗性基因的影响

2.2.1 生菜中 TC 含量

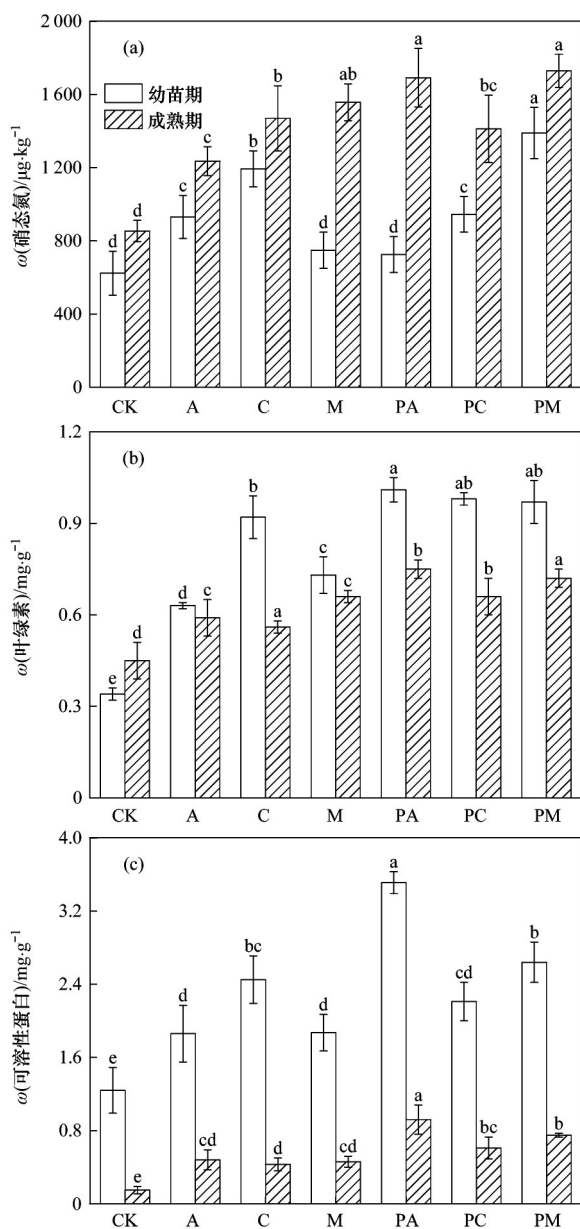
生菜地上部和地下部 TC 含量的测定结果如图 3 所示,总体来说,生物炭加入后,生菜中的 TC 含量均有不同程度地降低.生菜地下部作为与土壤

直接接触的植物,其 TC 含量高低能够较为有效地反映生物炭在土壤中的作用效果.并且生菜地下部的 TC 富集量比地上部高.与 CK 相比,添加 3 种原生物炭(A、C 和 M)后,TC 含量明显降低,添加 M 处理的 TC 含量降低最为显著,降幅为 37.13%;添加 3 种改性生物炭(PA、PC 和 PM)后,TC 含量比添加原生物炭的 TC 含量更低,这说明改性后的生物炭效果更好,其中添加 PM 处理的 TC 含量降低最为显著,降幅为 55.64%.此结果表明,生物炭的添加可以有效地钝化 TC 在土壤中的生物有效性,能够显著减少生菜地下部对于土壤中 TC 的吸收效率,对 TC 在生菜体内的转移和富集起到积极的截流作用.

对于生菜地上部而言,不与土壤中的 TC 直接接触,但值得注意的是,地上部 TC 含量的变化趋势能够较好地反映生菜对 TC 的吸收转运差异,添加不同生物炭后,对生菜 TC 含量转运系数影响并不大,其中添加 PM 处理的 TC 转运系数最低,这说明生物炭添加可以有效地阻止 TC 向地上部转移.生菜地上部测定结果显示:与 CK 相比,添加 3 种原生物炭(A、C 和 M)后,整体变化趋势差异较小,添加 M 处理的 TC 含量降低最为显著,降幅为 54.84%;添加 3 种改性生物炭(PA、PC 和 PM)后,TC 含量均显著降低,其中添加 PM 处理的 TC 含量降低最为显著,降幅为 92.32%.

2.2.2 生菜中 Cu 含量

生菜地上部和地下部 Cu 含量的测定结果如图 4 所示,生物炭加入后,生菜中的 Cu 含量均显著降低.并且生菜地下部的 Cu 富集量比地上部高,与 CK 相比,添加 3 种原生物炭(A、C 和 M)后,Cu 含量均



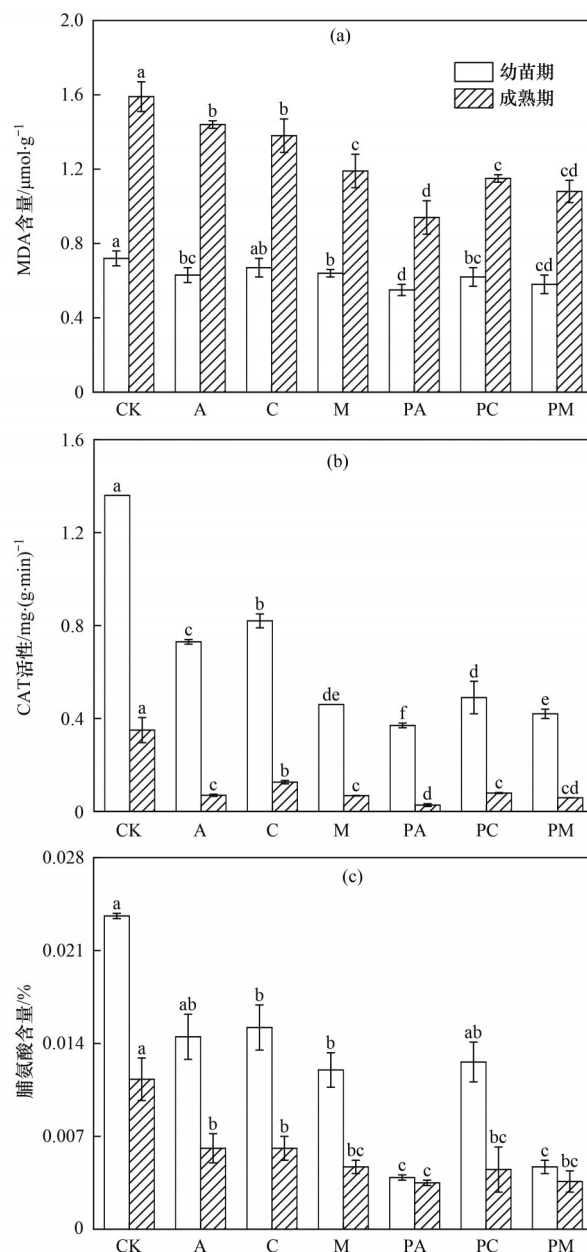
不同的小写字母表示不同处理间在 5% 水平差异显著

图 1 不同处理生菜硝态氮、叶绿素和可溶性蛋白含量

Fig. 1 Nitro nitrogen, chlorophyll, and soluble protein content of lettuce under different treatments

显著降低, 但各处理间的差异并不显著, 分别降低 26.03%、31.89% 和 22.41%; 添加 3 种改性生物炭 (PA、PC 和 PM) 后, 生菜地下部 Cu 含量分别降低了 34.04%、42.29% 和 35.35%, 可以看出 Cu 含量比添加原生物炭的 Cu 含量更低. 此结果表明, 生物炭的添加可以有效地钝化 Cu 在土壤中的生物有效性, 并且改性后的生物炭效果要好.

生菜地上部的测定结果显示, 添加不同生物炭后, 对生菜 Cu 含量转运系数影响并不大, 其中添加 A、PA 和 PM 处理可提高生菜 Cu 的转运系数. 与 CK 相比, 添加 3 种原生物炭 (A、C 和 M) 后, 生菜地上部 Cu 含量均显著降低, 分别降低了 12.79%、



不同的小写字母表示不同处理间在 5% 水平差异显著

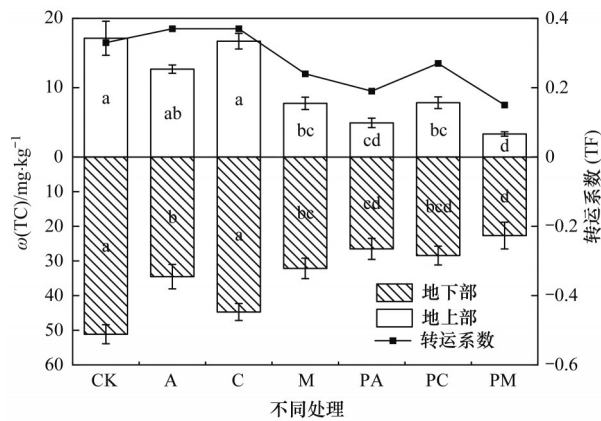
图 2 不同处理生菜丙二醛 (MDA)、过氧化氢酶 (CAT) 和脯氨酸含量

Fig. 2 Promaldehyde (MDA), catalase (CAT), and proline content in lettuce under different treatments

31.18% 和 18.71%; 添加 3 种改性生物炭 (PA、PC 和 PM) 后, 生菜地上部 Cu 含量分别降低了 20.93%、36.47% 和 20.51%, 可以看出 Cu 含量比添加原生物炭的 Cu 含量更低.

2.2.3 生菜中抗性基因丰度

图 5 是 6 种 ARGs 和 *intI1* 基因在生菜地上部和地下部的丰度. 从中可以看出, ARGs 和 *intI1* 基因均被检测出来, 而生物炭的添加可有效减少生菜 ARGs 和 *intI1* 基因的丰度. 通过 PCA 分析 (图 6) 可以很明显看出 CK 处理生菜 ARGs 和 *intI1* 基因相关性最强, 其次为 $C > A > M > PC > PA \geq PM$, 这说明

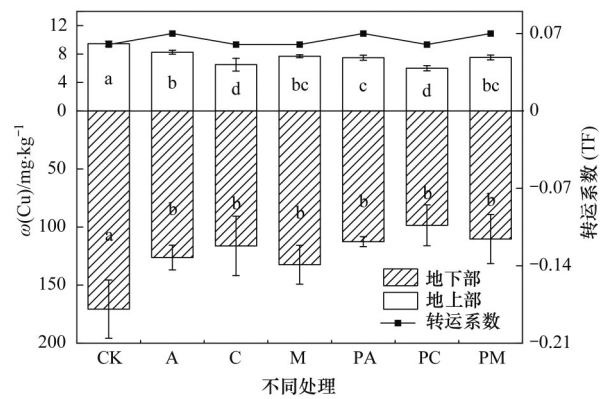


不同的小写字母表示不同处理间在5%水平差异显著

图3 不同处理的生菜TC含量

Fig. 3 Tetracycline content of lettuce under different treatments

PA和PM处理可有效降低生菜体内抗性基因丰度.添加不同生物炭,生菜地下部*tetX*、*tetW*、*tetO*、*tetM*、*tetG*、*tetB*、*intI1*的丰度均降低.与CK相比,添加3种原生物炭(A、C和M)后,M中的抗性基因丰度降幅最大,降低了80.91%;添加3种改性生物炭(PA、PC和PM)后,PA中的抗性基因丰度降幅最大,降低了84.28%.生菜地上部除*tetG*没检

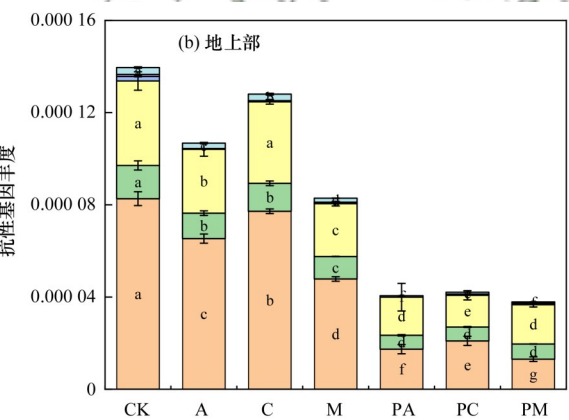
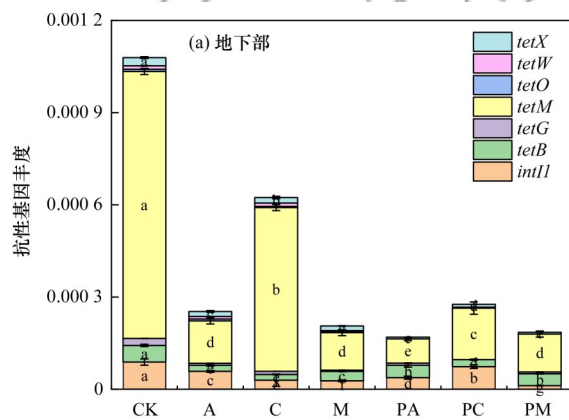


不同的小写字母表示不同处理间在5%水平差异显著

图4 不同处理的生菜Cu含量

Fig. 4 Cu content of lettuce under different treatments

测出来,其余ARGs和*intI1*的丰度均降低.添加3种原生物炭(A、C和M)后,M中的抗性基因丰度降幅最大,降低了40.62%;添加3种改性生物炭(PA、PC和PM)后,PM中的抗性基因丰度降幅最大,降低了72.86%.在添加原生物炭和改性生物炭中,生菜体内ARGs和*intI1*基因丰度表现为:改性生物炭处理明显低于原生物炭处理,并且生菜地上部的ARGs和*intI1*基因丰度明显降低.



(a)地下部,(b)地上部不同的小写字母表示不同处理间在5%水平差异显著

图5 不同处理的生菜地下部和地上部抗性基因丰度

Fig. 5 ARGs content of lettuce under different treatments

2.3 生菜生理指标与TC和Cu含量的相关性

从表4看出生菜TC和Cu含量与生菜品质存在负相关关系,与生菜抗逆指标存在正相关关系,说

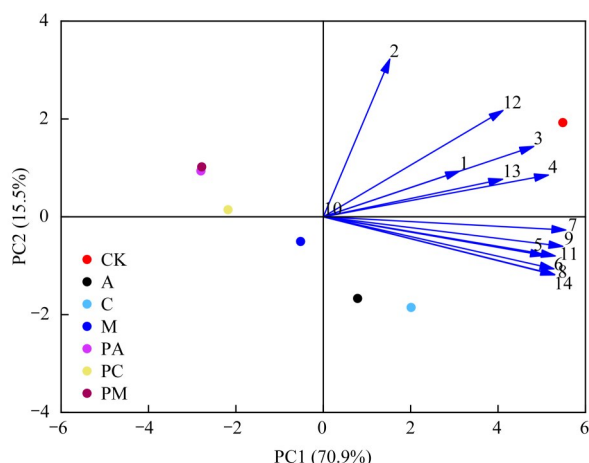
明生菜硝态氮、叶绿素和可溶性蛋白含量随着生菜体内TC和Cu含量的降低而升高,生菜丙二醛(MDA)、过氧化氢酶(CAT)和脯氨酸含量随着生菜

表4 生菜生理指标与TC和Cu含量的相关性¹⁾

Table 4 Correlation between physiological indicators and TC and Cu contents in lettuce

项目	TC(地上部)	TC(地下部)	Cu(地上部)	Cu(地下部)
硝态氮	-0.78*	-0.80*	-0.62	-0.78*
叶绿素	-0.95**	-0.97**	-0.51	-0.77*
可溶性蛋白	-0.90**	-0.92**	-0.49	-0.78*
丙二醛	0.95**	0.92**	0.54	0.73*
过氧化氢酶	0.73*	0.87**	0.62	0.85**
脯氨酸	0.81*	0.91**	0.69	0.89**

1)*为 $P < 0.05$, **为 $P < 0.01$

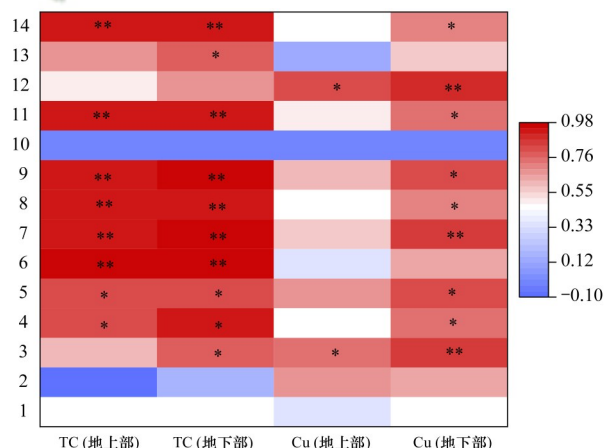


1~14 分别为抗性基因: *intI1*(地下部)、*tetB*(地下部)、*tetG*(地下部)、*tetM*(地下部)、*tetO*(地下部)、*tetW*(地下部)、*tetX*(地下部)、*intI1*(地上部)、*tetB*(地上部)、*tetG*(地上部)、*tetM*(地上部)、*tetO*(地上部)、*tetW*(地上部)和 *tetX*(地上部)

图 6 不同处理的抗性基因主成分分析

Fig. 6 PCA of resistance genes under different treatments

TC 和 Cu 含量的降低而降低. 生菜的叶绿素、丙二醛含量与生菜地上部 TC 含量相关性显著; 生菜的叶绿素、丙二醛、可溶性蛋白和脯氨酸含量与生菜地下部 TC 含量相关性显著; 生菜的脯氨酸含量与生菜地下部 Cu 含量相关性显著 ($P < 0.05$). 总的来说, 生菜品质与生菜地下部 TC 和 Cu 含量相关性强, 并且与生菜 TC 含量相关性显著. 从图 7 可以明显看到生菜抗性基因与生菜 TC 含量呈正相关关系, 其中 *tetX*、*tetW*、*tetM*、*tetB* 和 *intI1* 与生菜 TC 含量呈极显著正相关关系, *tetO* 和 *tetG* 与生菜 Cu 含量相关性显著 ($P < 0.05$).



1~14 分别为抗性基因: *intI1*(地下部)、*tetB*(地下部)、*tetG*(地下部)、*tetM*(地下部)、*tetO*(地下部)、*tetW*(地下部)、*tetX*(地下部)、*intI1*(地上部)、*tetB*(地上部)、*tetG*(地上部)、*tetM*(地上部)、*tetO*(地上部)、*tetW*(地上部)和 *tetX*(地上部); *为 $P < 0.05$, **为 $P < 0.01$; 色柱表示相关性的数值大小

图 7 生菜抗性基因与 TC 和 Cu 含量的相关性

Fig. 7 Correlation between resistance genes in lettuce and TC and Cu content

3 讨论

3.1 不同生物炭对生菜生理特性的影响

植物对抗生素和重金属吸收的影响因素众多, 添加生物炭等钝化剂可以改变这些因素, 从而影响植物对污染物的吸收, 降低其生物有效性, 从而利于植物的生长发育^[24,25]. 本研究结果表明, 在四环素和铜复合污染土壤中添加生物炭, 提高了生菜株高、根长、株鲜重和根鲜重, 并且改善了生菜硝态氮、叶绿素和可溶性蛋白含量, 这可能是由于生物炭改善了土壤的物理、化学和生物性质, 从而缓解了四环素和铜复合污染对生菜品质的负面影响. 与 CK 相比, 加入不同生物炭后, 硝态氮含量明显提升 [图 1(a)], 这可能是由于生物炭加入土壤, 降低生菜对污染物的吸收, 从而促进植物从土壤中吸收氮素营养. 叶绿素是一类与光合作用有关的色素, 其含量高低决定光合作用的强弱^[26]. 光合作用强, 植物的生长代谢旺盛, 可溶性蛋白质含量增加, 维持植物的正常代谢^[27]. 本试验研究结果表明, 在四环素和铜复合污染土壤中施用不同生物炭可不同程度地提高生菜叶绿素和可溶性蛋白质含量 [图 1(b) 和 1(c)]. 这与蒋欣梅等^[28]和金睿等^[29]的研究结果一致, 王晓维等^[30]也发现施加生物炭后油菜叶片中的叶绿素含量呈上升趋势, 说明生物炭的施用可有效缓解四环素和铜复合污染对生菜的毒害. 当四环素和重金属铜进入生菜后, 产生大量的活性氧, 引发氧化胁迫和膜损伤, 并且四环素中的官能团和铜离子与其他物质结合形成络合物, 能抑制可溶性蛋白质的合成; 而生物炭的施用, 激活了生菜对四环素和铜复合污染的应对机制, 减轻了生菜的脂质过氧化程度. 当生菜所受胁迫降低时, 生菜叶片中叶绿素含量和可溶性蛋白质含量增加^[31]. 当植物面临压力时, 许多活性氧自由基会在体内产生. 如果不能及时清除反应性氧自由基, 将会抑制植物的生长和发育^[32]. 因此, 为保持正常的生长, 植物将通过抗氧化酶系统来抵御外部压力. 丙二醛 (MDA) 是衡量氧化胁迫程度的常用指标之一, 能反映植物膜脂过氧化的程度. 过氧化氢酶 (CAT) 是催化过氧化氢分解成氧和水的酶, 功能是使得氢氧化物不致于与氧在螯合作用下反应生成非常有害的羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$), 存在于细胞的过氧化物体内. 脯氨酸作为植物细胞质内渗透调节物质, 在逆境条件胁迫下, 植物体内脯氨酸大量积累. 当四环素和铜进入生菜体内后, 导致植物受损, MDA 和脯氨酸大量累积、CAT 活性升高, 而添加生物炭后, 降低了土壤中四环素和铜复合污染物含量, 也使植物体内污染物含量下降, 植

物所受胁迫降低,因此MDA和脯氨酸含量以及CAT活性有所下降(图2).王晓维等^[30]研究发现施加生物炭使铜胁迫下油菜叶片中的CAT活性呈一定的下降趋势.李继伟等^[33]研究结果表明,单施生物炭可以显著提高玉米叶片中CAT活性.刘领等^[34]也有类似研究结果,说明施加生物炭可降低植物对污染物的吸收,并增强植物对四环素和铜复合污染胁迫的抵抗能力.

3.2 不同生物炭对生菜TC和Cu含量及抗性基因丰度的影响

TC和Cu被植物吸收后可以通过食物链进入人体,从而对人体健康产生威胁.本研究显示,TC和Cu复合污染土壤中生菜TC和Cu含量提升,在添加生物炭后,生菜TC和Cu含量有所降低(图3和图4).总体来说,生菜地上部TC和Cu含量低于与土壤直接接触的地下部,这可能是因为生物炭直接将TC和Cu复合污染物固定在土壤中,有效地阻止TC和Cu复合污染物向植物地上部迁移.也有相关研究表明土壤中添加生物炭阻止了污染物向植物体内的迁移^[35].以上研究都说明生物炭丰富的孔隙结构给抗生素提供了大量吸附位点,也说明生物炭表面存在大量负电荷,为阳离子提供了大量吸附位点,一部分抗生素和重金属被生物炭吸附所以使得生菜中的TC和Cu含量下降.抗性基因通过植物组织中的气孔迁移,存在于植物地下部,并在植物生长过程中到达地上部.此外,抗生素在土壤-植物系统中的诱导和突变也促进了ARGs的传播.本研究结果发现生菜抗性基因与生菜TC含量主要呈正相关关系(图7),这与以前的研究结果一致^[36,37].添加生物炭能够减少土壤中抗生素的含量,有效降低蔬菜类食物中ARGs,这也与已有研究结果一致^[38~40].*intI1*通常被认为是移动基因组件的指标^[41],它在土壤-植物系统中非常丰富,可以通过水平基因转移促进ARGs的积累和传播.An等^[42]研究发现生物炭的施用显著降低了叶际*intI1*基因的丰度,表明生物炭可有效阻控*intI1*基因在叶际中的传播行为,本研究也存在相同结果.本研究中,ARGs和*intI1*基因可通过生菜地下部迁移至可食用的地上部,而生物炭的施加能够显著减少植物ARGs和*intI1*基因的累积(图5),且改性生物炭比原生物炭具有更强的对植物抗性基因的消减能力,这是因为生物炭经磷酸改性后,其比表面积提高、表面官能团增加,对TC和Cu的吸附与还原能力明显提升^[43],改性生物炭比原生物炭更有效地限制TC和Cu向生菜地上部分转运,降低生菜ARGs的丰度^[44].

3.3 生菜生理特性与TC和Cu含量的相关性

相关性表明(表4),生菜TC和Cu含量影响着生菜生理特性.整体来看,与不添加生物炭相比,加入不同生物炭后,添加PM处理下生菜品质最好,并且添加PM处理的生菜TC含量也最低,这都说明TC含量与生菜品质相关性更强,这可能是因为TC和Cu复合污染中,生菜TC的含量主要影响生菜的品质.李萌等^[45]研究发现,低浓度的氯霉素、金霉素和土霉素能抑制抗氧化酶活性.Riaz等^[46]的试验结果表明,抗生素浓度较高时,能引起氧化胁迫,损害小麦生理结构,影响小麦早期生长,从而降低产量.黄佳等^[47]研究表明,抗生素对生菜生长产生抑制作用,脯氨酸和CAT活性能快速响应抗生素胁迫,这些研究都与本研究结果一致.抗生素和重金属的使用会导致细菌发生基因突变,从而产生抗性基因,使得细菌对抗生素和重金属的抵抗力增强.当抗生素和重金属抗性增加时,可通过交叉抗性或共抗性的方式间接性地诱导并促进环境中ARGs的产生和传播^[48].有研究发现Cu与*tetW*和*sul2*基因为弱负相关性^[49],本研究也发现Cu与*tetW*为弱负相关关系(图7).本研究还发现生菜抗性基因与TC含量呈正相关关系(图7),这说明添加生物炭可以显著降低生菜抗生素的含量,进而控制ARGs在生菜可食用部分的含量.

4 结论

(1)施用生物炭可以提高TC和Cu复合污染胁迫下生菜生理指标中硝态氮、叶绿素和可溶性蛋白含量,降低丙二醛、脯氨酸含量以及过氧化氢酶活性,在幼苗期和成熟期生物炭对生菜生理指标的影响趋势一致.

(2)添加生物炭可降低生菜TC和Cu的累积,并且降低TC和Cu从生菜地下部向地上部的转移.

(3)生菜品质与生菜地下部TC和Cu含量均呈显著相关性,与地上部TC含量呈显著相关性,生菜抗性基因丰度顺序为:*tetM* > *intI1* > *tetB* > *tetX* > *tetW* > *tetG* > *tetO*. *tetX*、*tetW*、*tetM*、*tetB*和*intI1*与生菜TC含量呈显著正相关,*tetO*和*tetG*与Cu含量呈显著正相关.

(4)综上所述,不同生物炭对TC和Cu复合污染土壤生菜生长的影响效果有所差异,改性生物炭对提高生菜生长及降低污染物累积的效果优于原生物炭,改性谷子秸秆生物炭的修复效果最佳.

参考文献:

- [1] Guo T, Lou C L, Zhai W W, et al. Increased occurrence of heavy metals, antibiotics and resistance genes in surface soil after long-

- term application of manure[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **635**: 995-1003.
- [2] Li B Z, Song H, Cao W C, *et al.* Responses of soil organic carbon stock to animal manure application: a new global synthesis integrating the impacts of agricultural managements and environmental conditions[J]. *Global Change Biology*, 2021, **27** (20): 5356-5367.
- [3] Yang X P, Li Q, Tang Z, *et al.* Heavy metal concentrations and arsenic speciation in animal manure composts in China[J]. *Waste Management*, 2017, **64**: 333-339.
- [4] 宋婷婷, 朱昌雄, 薛蕊, 等. 养殖废弃物堆肥中抗生素和抗性基因的降解研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(5): 933-943.
- Song T T, Zhu C X, Xue S, *et al.* Degradation of antibiotics and antibiotic resistance genes during composting of livestock waste: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(5): 933-943.
- [5] 林琳, 安婧, 周启星. 土壤四环素污染对小白菜幼苗生长发育的生态毒性[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2430-2435.
- Lin L, An J, Zhou Q X. Ecotoxicological effects of tetracycline on the seedling development of Chinese white cabbage (*Brassica rapa* L. Chinensis Group.) in soil[J]. *Environmental Science*, 2011, **32** (8): 2430-2435.
- [6] 迟荪琳, 王卫中, 徐卫红, 等. 四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 935-943.
- Chi S L, Wang W Z, Xu W H, *et al.* Effects of tetracycline antibiotics on growth and characteristics of enrichment and transformation in two vegetables [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 935-943.
- [7] Ye S J, Zeng G M, Wu H P, *et al.* Co-occurrence and interactions of pollutants, and their impacts on soil remediation-A review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2017, **47**(16): 1528-1553.
- [8] Ren X Y, Zeng G M, Tang L, *et al.* Sorption, transport and biodegradation-An insight into bioavailability of persistent organic pollutants in soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **610-611**: 1154-1163.
- [9] 漆世英, 余少乐, 吴娟, 等. 养殖业抗生素-重金属复合污染治理研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2022, **30**(6): 1014-1026.
- Qi S Y, Yu S L, Wu J, *et al.* Advance in treatment of co-contamination of antibiotics and heavy metals from stock breeding [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, **30**(6): 1014-1026.
- [10] 袁凯, 熊苏雅, 梁静, 等. 畜禽粪便中铜和锌污染现状及风险分析[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(8): 1837-1842.
- Yuan K, Xiong S Y, Liang, J, *et al.* Status and risk analysis of copper and zinc pollution in livestock manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(8): 1837-1842.
- [11] Li J J, Yang H Z, Qin K N, *et al.* Effect of pig manure-derived sulfadiazine on species distribution and bioactivities of soil ammonia-oxidizing microorganisms after fertilization[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **423**, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2021.126994.
- [12] 王忠科, 李刚, 王格格, 等. 污泥-锯末共热解生物炭的制备及土壤应用[J]. *现代化工*, 2017, **37**(1): 147-150, 152.
- Wang Z K, Li G, Wang G G, *et al.* Preparation of biochar from co-pyrolysis of sludge-sawdust and its application in soil[J]. *Modern Chemical Industry*, 2017, **37**(1): 147-150, 152.
- [13] 陶术平, 向速林, 桑文静, 等. 生物炭对土壤重金属影响研究进展[J]. *现代化工*, 2017, **37**(1): 45-49.
- Tao S P, Xiang S L, Sang W J, *et al.* Research progress of the effects of biochar on soil heavy metals [J]. *Modern Chemical Industry*, 2017, **37**(1): 45-49.
- [14] 陈翔, 盛贵尚. 稻壳生物炭对流域内四环素的吸附研究[J]. *中国水运(下半月)*, 2021, **21**(12): 68-70.
- [15] Fu Y H, Jia M Y, Wang F, *et al.* Strategy for mitigating antibiotic resistance by biochar and hyperaccumulators in cadmium and oxytetracycline co-contaminated soil [J]. *Environmental Science Technology*, 2021, **55**, doi: 10.1021/ACS.EST.1C03434.
- [16] Yue Y, Shen C C, Ge Y. Biochar accelerates the removal of tetracyclines and their intermediates by altering soil properties[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **380**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.120821.
- [17] 陈伟昌. 磷酸盐改性生物炭对土壤中四环素污染修复研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- Chen W C. Study on remediation of tetracycline pollution in soil by phosphate modified biochar [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.
- [18] 魏忠平, 朱永乐, 赵楚桐, 等. 生物炭吸附重金属机理及其应用技术研究进展[J]. *土壤通报*, 2020, **51**(3): 741-747.
- Wei Z P, Zhu Y L, Zhao C T, *et al.* Research advances on biochar adsorption mechanism for heavy metals and its application technology [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, **51**(3): 741-747.
- [19] Ahmed M B, Johir A H, Khourshed C, *et al.* Sorptive removal of dissolved organic matter in biologically-treated effluent by functionalized biochar and carbon nanotubes: Importance of sorbent functionality [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **269**: 9-17.
- [20] Yan Y B, Sarkar B, Zhou L, *et al.* Phosphorus-rich biochar produced through bean-worm skin waste pyrolysis enhances the adsorption of aqueous lead [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **266**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115177.
- [21] 刘桃妹, 叶伟, 肖亿金, 等. 椰壳生物炭对多种重金属在广东水稻土中的吸附解吸特性影响[J]. *生态毒理学报*, 2021, **16** (4): 342-350.
- Liu T M, Ye W, Xiao Y J, *et al.* Adsorption and desorption of several heavy metals in paddy soils in Guangdong province influenced by coconut shell biochar [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2021, **16**(4): 342-350.
- [22] 张英, 郑海亮, 贺利飞, 等. 生物炭对农田土壤中重金属离子的吸附固定作用研究[J]. *环境科学与管理*, 2020, **45**(10): 118-122.
- Zhang Y, Zheng H L, He L F, *et al.* Adsorption and fixation of heavy metal ions in farmland soil by biochar [J]. *Environmental Science and Management*, 2020, **45**(10): 118-122.
- [23] 刘悦, 黎子涵, 邹博, 等. 生物炭影响作物生长及其与化肥混施的增效机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 2017, **28**(3): 1030-1038.
- Liu Y, Li Z H, Zou B, *et al.* Research progress in effects of biochar application on crop growth and synergistic mechanism of biochar with fertilizer[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28** (3): 1030-1038.
- [24] Mohamed B A, Ellis N, Kim C S, *et al.* The role of tailored biochar in increasing plant growth, and reducing bioavailability, phytotoxicity, and uptake of heavy metals in contaminated soil[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **230**: 329-338.
- [25] 刘艳, 王聪颖, 史志明, 等. 老化生物炭对小白菜积累重金属的影响[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2019, **39**(3): 58-64.
- Liu Y, Wang C Y, Shi Z M, *et al.* Effect of aged biochar on the accumulation of heavy metals in pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2019, **39**(3): 58-64.
- [26] 叶景秀, 柳海东, 星晓蓉, 等. 甘蓝型油菜叶绿素含量与产量关系研究及叶绿素主效 QTL 位点 *cqSPDA2* 连锁标记开发[J].

- 中国油料作物学报, 2022, **44**(6): 1173-1181.
- Ye J X, Liu H D, Xing X R, *et al.* Relationship between chlorophyll content and yield and development of chlorophyll major QTL *cqSPDA2* linkage marker in *Brassica napus* [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2022, **44**(6): 1173-1181.
- [27] 杨红霞, 陈俊良, 刘崑. 镉对植物的毒害及植物解毒机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, **47**(2): 1-8.
- Yang H X, Chen J L, Liu W. Research progress on cadmium toxicity and detoxification mechanism in plants [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, **47**(2): 1-8.
- [28] 蒋欣梅, 薛冬冬, 于锡宏, 等. 玉米秸秆生物炭对镉污染土壤中小白菜生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, **36**(4): 1000-1006.
- Jiang X M, Xue D D, Yu X H, *et al.* Effects of corn-stalk biochar on the growth of Chinese cabbage in cadmium contaminated soil [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2020, **36**(4): 1000-1006.
- [29] 金睿, 刘可星, 艾绍英, 等. 生物炭复配调理剂对镉污染土壤性状和小白菜镉吸收及其生理特性的影响[J]. 南方农业学报, 2016, **47**(9): 1480-1487.
- Jin R, Liu K X, Ai S Y, *et al.* Effects of biochar complex conditioner on properties of cadmium contaminated soil and cadmium absorption and physiological characteristics of *Brassica chinensis* [J]. Journal of Southern Agriculture, 2016, **47**(9): 1480-1487.
- [30] 王晓维, 徐健程, 孙丹平, 等. 生物炭对铜胁迫下红壤地油菜苗期叶绿素和保护性酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(4): 640-646.
- Wang X W, Xu J C, Sun D P, *et al.* Effects of biochar on chlorophyll and protective enzyme activity of rape seedlings in red soil under copper stress [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(4): 640-646.
- [31] Xu C Y, Hosseini-Bai S, Hao Y B, *et al.* Effect of biochar amendment on yield and photosynthesis of peanut on two types of soils [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(8): 6112-6125.
- [32] Prabhukarthikeyan S R, Keerthana U, Raguchander T. Antibiotic-producing *Pseudomonas fluorescens* mediates rhizome rot disease resistance and promotes plant growth in turmeric plants [J]. Microbiological Research, 2018, **210**: 65-73.
- [33] 李继伟, 悦飞雪, 王艳芳, 等. 施用生物炭和AM真菌对镉胁迫下玉米生长和生理生化指标的影响[J]. 草业学报, 2018, **27**(5): 120-129.
- Li J W, Yue F X, Wang Y F, *et al.* Effects of biochar amendment and arbuscular mycorrhizal inoculation on maize growth and physiological biochemistry under cadmium stress [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, **27**(5): 120-129.
- [34] 刘领, 悦飞雪, 李继伟, 等. 秸秆生物炭和鸡粪对铅胁迫下玉米生长和生理特性的影响[J]. 水土保持学报, 2018, **32**(4): 262-267.
- Liu L, Yue F X, Li J W, *et al.* Effects of stalk-derived biochar and chicken manure on the growth and physiological characters of maize under lead stress [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, **32**(4): 262-267.
- [35] 吴诗颖, 王莉莉, 李学德. 鸡粪中4种抗生素在青菜中的累积动态及生物炭的阻控作用[J]. 安徽农业大学学报, 2022, **49**(2): 286-292.
- Wu S Y, Wang L L, Li X D. Accumulation dynamics of four antibiotics in vegetable from chicken manure and the control effect of biochar [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2022, **49**(2): 286-292.
- [36] Yan M T, Xu C, Huang Y M, *et al.* Tetracyclines, sulfonamides and quinolones and their corresponding resistance genes in the Three Gorges Reservoir, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **631-632**: 840-848.
- [37] Fan N S, Bai Y H, Chen Q Q, *et al.* Deciphering the toxic effects of antibiotics on denitrification: Process performance, microbial community and antibiotic resistance genes [J]. Journal of Environmental Management, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110375.
- [38] Ye M, Sun M M, Wan J Z, *et al.* Feasibility of lettuce cultivation in sophorolipid-enhanced washed soil originally polluted with Cd, antibiotics, and antibiotic-resistant genes [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, **124**: 344-350.
- [39] Jiao W T, Du R J, Ye M, *et al.* 'Agricultural Waste to Treasure' -Biochar and eggshell to impede soil antibiotics/antibiotic resistant bacteria (genes) from accumulating in *Solanum tuberosum* L. [J]. Environmental Pollution, 2018, **242**: 2088-2095.
- [40] Ye M, Sun M M, Feng Y F, *et al.* Calcined eggshell waste for mitigating soil antibiotic-resistant bacteria/antibiotic resistance gene dissemination and accumulation in bell pepper [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, **64**(27): 5446-5453.
- [41] Duan M L, Li H C, Gu J, *et al.* Effects of biochar on reducing the abundance of oxytetracycline, antibiotic resistance genes, and human pathogenic bacteria in soil and lettuce [J]. Environmental Pollution, 2017, **224**: 787-795.
- [42] An X L, Chen Q L, Zhu D, *et al.* Distinct effects of strawite and biochar amendment on the class 1 integron antibiotic resistance gene cassettes in phyllosphere and rhizosphere [J]. Science of the Total Environment, 2018, **631-632**: 668-676.
- [43] 郝志凯. 改性麦秆生物炭修复铬污染效能研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2021.
- Hao Z K. Study on the effectiveness of modified wheat straw biochar to remediate chromium pollution [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021.
- [44] 李志健. 生物炭-蜡样芽孢杆菌联合施用对土壤和生菜中Cu和抗生素抗性基因影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- Li Z J. Effects of biochar-bacillus cereus combined application on Cu and antibiotic resistance genes in soil and lettuce [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [45] 李萌, 杨磊, 季剑南, 等. 3种抗生素对白菜种子萌发的影响[J]. 种子, 2017, **36**(3): 102-105.
- Li M, Yang L, Ji J N, *et al.* Effect of three kinds of antibiotics on the germination of Chinese cabbage seeds [J]. Seed, 2017, **36**(3): 102-105.
- [46] Riaz L, Mahmood T, Coyne M S, *et al.* Physiological and antioxidant response of wheat (*Triticum aestivum*) seedlings to fluoroquinolone antibiotics [J]. Chemosphere, 2017, **177**: 250-257.
- [47] 黄佳, 杨甜, 李泽林, 等. 不同浓度四环素和土霉素对生菜生长的影响及生态毒性[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28**(4): 995-1001.
- Huang J, Yang T, Li Z L, *et al.* Effects of different concentrations of tetracycline and oxytetracycline on the growth and ecotoxicity in lettuce [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, **28**(4): 995-1001.
- [48] 张宁, 李森, 刘翔. 土壤中抗生素抗性基因的分布及迁移转化[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(7): 2609-2617.
- Zhang N, Li M, Liu X. Distribution and transformation of antibiotic resistance genes in soil [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(7): 2609-2617.
- [49] You R, Margenat A, Lanzas C S, *et al.* Dose effect of Zn and Cu in sludge-amended soils on vegetable uptake of trace elements, antibiotics, and antibiotic resistance genes: Human health implications [J]. Environmental Research, 2020, **191**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109879.

CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i>	(2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i>	(2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i>	(2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model	FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i>	(2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020	GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i>	(2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM _{2.5} and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022	CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i>	(2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM _{2.5} Between Winter and Spring in Zhengzhou	TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i>	(2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City	SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution	LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i>	(2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin	LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i>	(2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM _{2.5} Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i>	(2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i>	(2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang	ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i>	(2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis	WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season	MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i>	(2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i>	(2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i>	(2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)	WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i>	(2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River	WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i>	(2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets	JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i>	(2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i>	(2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i>	(2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals	MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i>	(2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System	ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i>	(2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i>	(2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin	WANG Yi-qi, SUN Xue-ying	(2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin	CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i>	(2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i>	(2793)
Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i>	(2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios	CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i>	(2817)
Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i>	(2828)
Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China	JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i>	(2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses	HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i>	(2848)
Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm	HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i>	(2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields	SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i>	(2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity	ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i>	(2881)
Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System	GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i>	(2891)
Effect of Biochar on NO ₃ ⁻ -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation	BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i>	(2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis	YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i>	(2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust	WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i>	(2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site	CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i>	(2939)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong	DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i>	(2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin	HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i>	(2962)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City	YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping	(2971)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models	CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>	(2983)
Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China	TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i>	(2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province	WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i>	(3005)
Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China	LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(3016)
Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice	XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i>	(3027)
Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper	ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i>	(3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis	JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i>	(3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N ₂ O Emissions and Nitrogen Transformation	LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(3059)
Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin	DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i>	(3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay	SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, <i>et al.</i>	(3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils	WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i>	(3088)
Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China	YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i>	(3098)
Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang	XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i>	(3107)
Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck	XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i>	(3119)