

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)
华北地区大气细颗粒物(PM _{2.5})年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应	杨伟, 姜晓丽 (2995)
郑州市民运会期间大气PM _{2.5} 改善效果评估	王申博, 姜亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)
成都夏冬季PM _{2.5} 中水溶性无机离子污染特征	冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析	雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱	徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱	周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)
郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估	齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响	牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面O ₃ 污染特征及敏感性	欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)
稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性	顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霞 (3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析	卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征	谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程NO _x 排放特征对比分析	李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别	宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响	魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源	赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析	田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)
木沥河流域氮素污染及其污染源解析	齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析	齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应	王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾琰杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析	王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献	张慧, 王世亮, 余杨 (3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征	李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险	吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律	路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征	王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析	刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)
海水中的红毒素与营养盐对微藻的复合影响	王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律	温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析	徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)
分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控	闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾克宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响	毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型	刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制	崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe ⁰ /WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制	计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)
一硫代肟在针铁矿上的吸附及影响因素	廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)
生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响	张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响	邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性	高春娣, 张娜, 韩微, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化	董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)
城镇河流CO ₂ 及CH ₄ 排放与市政排水管网污水输入的关联影响	李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土N ₂ O排放的影响	姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放	张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)
不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异	黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)
锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响	孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响	曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)
叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响	杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)
《环境科学》征订启事 (3011)	《环境科学》征稿简则 (3084)
信息 (3174, 3185, 3391)	

钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响

曹坤坤, 李成成, 胡学玉*, 郭晓, 黄洋

(中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430078)

摘要: 为探索中轻度重金属镉(Cd)污染农田安全利用技术,实现农产品安全生产,以两种不同镉累积基因型红菜苔为供试作物,采用盆栽试验的方法,分别于两种作物上设置相同的6个处理:对照(CK)、添加3%(质量分数)生物炭(BC)、添加0.17%钙镁磷肥(CMP)、叶面喷施 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Na}_2\text{SeO}_3$ 的水溶液(Se)、BC+Se和CMP+Se,研究不同处理土壤镉有效性变化及植株不同部位镉累积特征。结果表明:①相同处理下,低镉累积基因型金秋红三号红菜苔根部土壤有效态镉含量均显著低于高镉累积基因型十月红。BC和CMP两种钝化剂对金秋红三号根部土壤中的镉钝化效果显著,且BC效果更佳,钝化处理的效果显著优于叶面阻控。②金秋红三号红菜苔根系较十月红对镉有更强的富集能力,其富集的镉倾向于囤积在根部。叶面施硒与两种钝化剂对抑制镉向红菜苔可食部位转移富集无协同效果。③在BC和CMP钝化处理下,金秋红三号红菜苔可食部位镉含量低于GB 2762-2017中镉限量值($0.10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。本研究表明,针对中轻度镉污染农田土壤,通过施加生物炭、钙镁磷肥等绿色钝化剂,种植弱吸收低积累作物品种,可以实现受镉污染农田的安全利用和农产品的安全生产。

关键词: 生物炭(BC); 钙镁磷肥; 低镉累积基因型红菜苔; 土壤钝化; 叶面阻控

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3434-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202001098

Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai

CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu*, GUO Xiao, HUANG Yang

(School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China)

Abstract: To explore the safe utilization of technology in mildly and moderately cadmium (Cd)-contaminated farmland and realize the safe production of agricultural products, two different cadmium-accumulating genotypes of Tsai-tai were used as test crops, using the pot experiment method. The same six treatments were set on the soil where the two test crops were planted: control (CK), addition of 3% (mass fraction) biochar (BC), addition of 0.17% calcium magnesium phosphate fertilizers (CMP), foliar application of $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Na}_2\text{SeO}_3$ aqueous solution (Se), BC+Se, and CMP+Se, to study the changes in available cadmium in soil under different treatments and the characteristics of cadmium accumulation in different parts of the plant. The results showed that: ① Under the same treatment, the content of available cadmium in soil near the root of the low-cadmium-accumulating genotype of Tsai-tai of Jinqiuhong III was significantly lower than that of the high-cadmium-accumulating genotype of Shiyuehong. BC and CMP had a significant passivating effect on cadmium in the soil near the root of Jinqiuhong III, and the passivating effect of BC was better than that of CMP; the effect of passivating treatment was significantly better than that of foliar application of selenium. ② The root system of Tsai-tai of Jinqiuhong III had a stronger ability to accumulate cadmium than that of Shiyuehong, and the accumulated cadmium tended to be stored in the root. There were no synergistic effects between the foliar application of selenium and the two kinds of passivants on inhibiting the transfer and enrichment of cadmium to the edible parts of Tsai-tai. ③ Under the treatments of BC and CMP, the content of cadmium in the edible part of Tsai-tai of Jinqiuhong III was lower than the limit value of cadmium in GB 2762-2017 ($0.10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). This study shows that for mildly and moderately cadmium-contaminated farmland, applying green passivants such as biochar, calcium magnesium phosphate fertilizers, and planting crops with weak absorption and low accumulation can achieve the safe use of the cadmium-contaminated farmland and safe production of agricultural products.

Key words: biochar (BC); calcium magnesium phosphate fertilizers; Tsai-tai genotype with low cadmium accumulation; immobilization; foliar application of selenium

有报告显示,全国土壤污染总的点位超标率为16.1%,污染类型以无机型为主,镉(Cd)在无机污染物中占比最大,其污染点位超标率达7%,但其重度污染点位只占到总超标点位的0.5%,多数点位仍处于中轻度污染状态^[1]。与全国土壤污染物总的点位超标率相比,耕地土壤污染状况不容乐观,其污染点位达19.4%。我国耕地资源有限且后备资源不足,不仅在数量上呈现出刚性减少,同时还存在质量型

短缺,中低等耕地占比超过70%^[2],因此,对于中轻度污染农田的安全利用尤为必要和迫切。

在我国耕地资源紧张态势下,相比于将重金属

收稿日期: 2020-01-10; 修订日期: 2020-02-16

基金项目: 湖北省技术创新专项重大项目(2019ABA118); 国家自然科学基金项目(41371485); 中央高校基本科研业务费专项(CUG170103)

作者简介: 曹坤坤(1994~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染修复, E-mail: 1638981729@qq.com
* 通信作者, E-mail: huxueyu@cug.edu.cn

Cd 活化淋洗移除土体的路径,只采取钝化措施以降低其活性更易实现农田土壤“边修复边利用”的目的,因而也受到更多的关注^[3,4].钝化技术的关键在于选择合适的钝化材料,这些材料通过吸附、沉淀和离子交换等一系列物理化学作用降低土壤中镉的移动性及生物有效性^[5~7].近些年,生物质炭和一些含磷、钙及铁等的天然无机矿物类成为农田土壤 Cd 钝化的热点材料^[7,8].不同钝化剂的钝化效果及其作用机制各有差异,无机矿物类钝化剂主要通过改变土壤 pH、与重金属形成溶解度很小的金属复合物,降低土壤中重金属的有效性^[8];而生物质炭具有发达的孔隙结构和丰富的表面官能团,能吸附固定重金属,降低其有效性^[9,10].

鉴于土壤环境的复杂性,单一钝化技术或许无法满足特殊条件下土壤重金属的有效钝化及其农产品安全生产.因此钝化技术与其它技术联用,成为目前农业土壤重金属钝化研究的前沿热点^[11].对重金属 Cd 而言,在钝化作用基础上,联合叶面生理阻控以及低镉积累作物品种筛选与种植可能是在耕地资源紧张态势下对中轻度 Cd 污染耕地土壤安全利用的重要途径之一.硒(Se)元素是一种人体必需的微量营养元素,能与镉、汞和砷等重金属元素产生拮抗效应,通过与重金属形成大分子复合物及促进重金属引起的自由基的清除,缓解重金属对植物的毒害作用^[12~14].目前将含 Se 制剂作为抑制作物吸收重金属 Cd 的生理阻控剂的研究主要集中于水稻、玉

米及部分蔬菜水果上^[15],但研究结果不一,二者的交互作用效果各异,Se 制剂可降低玉米、黄瓜中镉含量^[15,16],而叶面喷施高浓度的硒却促进了草莓中镉的累积^[12].另有研究显示,硒对水稻中镉累积的作用效果取决于硒和镉的量^[17,18],可见硒对有些作物富集镉起阻抑作用,有些则相反.

一些调查研究发现,种植在重金属 Cd 污染土壤上的蔬菜类作物存在一定的健康风险^[19,20].如何降低蔬菜可食部位 Cd 含量至安全水平,控制土壤中的 Cd 通过食物链向人体迁移成为了一个亟待解决的问题.红菜苔(*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *perperea* Hort.)作为长江中下游地区多个省份菜篮子工程的主要蔬菜种之一,对重金属 Cd 富集能力相对较弱,本文以课题组前期筛选出的低镉累积品种(金秋红三号)和高镉累积品种(十月红)红菜苔为研究对象^[21],结合土壤钝化和叶面阻控,探究不同品种红菜苔对土壤 Cd 吸收累积的差异以及土壤镉有效性的变化,以期为中轻度重金属 Cd 污染农用地的安全利用提供理论和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤:取自湖北省黄石市大冶市某水稻田.取样深度为 0~20 cm.取回的土经自然风干后,去除植物残体、石块等,研磨过 2 mm 筛备用.供试土壤的基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤的理化性质

Table 1 Basic properties of the experimental soil						
测定指标	pH	有机质 /g·kg ⁻¹	总镉 /mg·kg ⁻¹	有效镉 /mg·kg ⁻¹	总磷(P) /g·kg ⁻¹	有效磷(P) /mg·kg ⁻¹
测定值	6.78 ± 0.06	59.42 ± 0.93	0.94 ± 0.03	0.28 ± 0.00	0.86 ± 0.02	17.82 ± 1.07

供试作物:红菜苔,基于课题组前期的“城郊农业生态系统中弱吸收低积累重金属 Cd 茎菜类蔬菜品种的筛选”工作所获得的结果,取其中 2 个品种:金秋红三号红菜苔(低镉积累基因型);十月红红菜苔(高镉积累基因型).

供试钝化剂材料:400℃ 玉米秸秆生物质炭,钙镁磷肥(购自湖北金明珠化工有限公司,P₂O₅ 含量 1.97 g·kg⁻¹).两种钝化剂的 pH 分别为 8.03 ± 0.06 和 8.02 ± 0.03,总镉含量均未检出.

供试叶面阻控剂:含硒叶面阻控剂,由 Na₂SeO₃ (分析纯)溶于水配制而成,其浓度为 3 mg·L⁻¹.

1.2 试验设计

试验采用模拟田间条件下的室外控制盆栽试验的方法,试验中控制所有盆栽免受干湿沉降的影响.分别在种植两种供试作物的土壤上设置相同的 6 个

处理:①对照(CK)、②添加 3% (质量比) 生物质炭(BC)、③添加 0.17% 钙镁磷肥(CMP)、④叶面喷施 3 mg·L⁻¹ Na₂SeO₃ 的水溶液(Se)、⑤BC + Se 和⑥ CMP + Se. 试验处理共计 12 个,每个处理重复 3 次.

向盆钵中装土,每盆装土 4 kg. 然后向盆中添加钝化剂(生物质炭、钙镁磷肥)和无机肥.无机肥添加种类及其量分别为:ω(N) = 280 mg·kg⁻¹、ω(P₂O₅) = 180 mg·kg⁻¹和 ω(K₂O) = 560 mg·kg⁻¹,氮磷钾肥分别以尿素、磷酸二氢钾和氯化钾的形式添加.将钝化剂和基肥同土壤混匀,保持土壤含水量为田间持水量的 65% 左右.稳定 7 d 后,每盆移栽定植 4 株长势相近的红菜苔幼苗(3 叶期).移栽后第 10 d,向 Se 处理、BC + Se 处理和 CMP + Se 处理的作物叶面处喷施含硒叶面阻控剂,以后每隔 1 周喷一次,至红菜苔植株收获前一周停止喷施.期间喷施含

硒叶面阻控剂次数总计 10 次。

1.3 样品的采集与测定

在红菜苔成熟期分别采集土壤样品和植物样品。土壤样品采集于植株根系周围 0~2 cm 内土壤, 对其进行风干, 研磨过筛后密封保存。收获植株地下部分和地上部分, 分别用自来水、超纯水冲洗干净, 并擦干植株上附着的水珠, 测量菜苔鲜重, 然后将样品放入烘箱杀青烘干至恒重, 研磨后过 0.149 mm 的尼龙网筛, 密封存放于自封袋, 用于植物样品总镉的测定。

土样基本理化性质的测定^[22]; 土样总镉采用 HF-HClO₄-HNO₃ 消解, 原子吸收分光光度法测定; 土样有效态镉采用二乙基三胺五乙酸 (DTPA) 提取^[23]; 植物样总镉含量采用 HNO₃-HClO₄ 消解^[24]。设置空白和国家标准物质进行分析质量控制, 提取液和消解液采用原子吸收分光光度计 (日本 HITACH, Z-2000) 测定镉含量。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 23.0 以及 origin 8.5 进行数据处理分析及相关图表的绘制。文中显示结果为平均值 ± 标准偏差 ($n=3$), 采用单因素方差分析 (ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 进行显著性检验, 显著性水平设为 $P<0.05$ 。

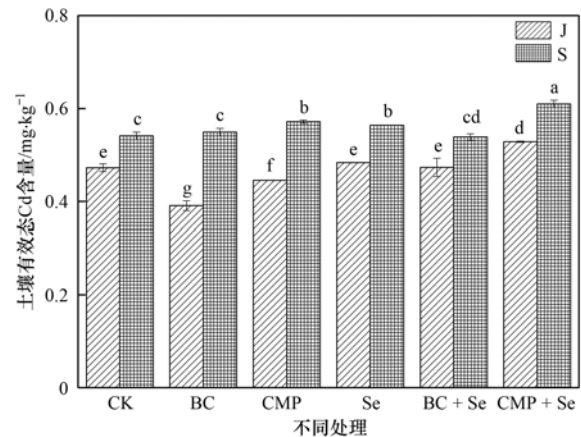
2 结果与分析

2.1 土壤钝化和叶面阻控对红菜苔根部土壤镉含量的影响

由图 1 可知, 不同处理对两种红菜苔根部土壤有效态镉含量的影响有所差异。BC 和 CMP 处理条件下, 金秋红三号红菜苔根部土壤有效态镉含量较 CK 处理分别显著降低了 17.3% 和 5.8% ($P<0.05$), 但两种钝化剂对十月红红菜苔根部土壤中的镉无钝化效果, 使得添加生物质炭和钙镁磷肥两种钝化剂后两品种红菜苔根部土壤有效态镉含量的差异幅度达到最大值, 金秋红三号红菜苔根部土壤有效态镉含量显著低于十月红。无论是单独施 Se 还是将叶面施 Se 分别与两种土壤钝化剂联用, 土壤中有效态 Cd 含量均与 CK 处理相差无几, 甚至还略有增加, 这种变化在两个品种间表现相似。可见, 两种钝化剂联合叶面阻控剂硒对降低两种红菜苔根部土壤中有效态镉含量均未表现出协同效应。叶面施硒可能更多地表现为阻止重金属元素在植株地上部分不同器官间的迁移^[25,26]。

2.2 土壤钝化和叶面阻控对红菜苔体内镉富集转移的影响

不同处理下两种红菜苔镉富集转移系数见表



图例中“J”代表种植金秋红三号红菜苔的所有处理,

“S”代表种植十月红红菜苔的所有处理;

图中不同小写字母表示不同处理间差异显著

($P<0.05$), 相同字母表示不显著, 下同

图1 不同处理条件下土壤有效态 Cd 含量

Fig. 1 Available Cd content in soil under different treatment conditions

2. BC 和 CMP 两种钝化剂均可显著降低金秋红三号红菜苔根部镉富集系数, 较 CK 处理, 降幅分别为 13.6% 和 22.5% ($P<0.05$). 同时, 在钝化处理条件下, 低镉累积品种金秋红三号红菜苔镉转移系数不同程度降低, 这可能是添加 BC 和 CMP 两种钝化剂后金秋红三号红菜苔可食部位镉富集系数显著低于 CK 处理的原因所在。对于十月红红菜苔, BC 和 CMP 两种钝化剂也可显著降低其根部镉的富集系数, 降幅分别为 10.7% 和 13.6% ($P<0.05$), 但却对十月红红菜苔镉转移系数无降低效果。

叶面施 Se 即 Se、BC + Se 和 CMP + Se 处理条件下, 两种红菜苔根部镉富集系数较 CK 处理均不同程度降低, 十月红红菜苔降低幅度更大, 这种差异性可能与转移系数有关, Se、BC + Se 和 CMP + Se 处理下, 十月红红菜苔镉转移系数较 CK 处理分别显著提升了 37.5%、46.3% 和 57.9%, 叶面施硒对十月红转移系数的提升幅度大于金秋红三号。以上数据表明, 叶面施 Se 可促进镉由两种红菜苔根部向可食部位转移, 但低镉累积品种金秋红三号红菜苔对这种促进作用的响应程度更低。

就品种间差异而言, 低镉累积品种金秋红三号红菜苔对镉的富集转移特征与十月红红菜苔表现不同。相同处理条件下, 金秋红三号红菜苔根部镉富集系数均高于十月红红菜苔, 而镉由根部至可食部位的转移系数却均显著低于十月红, 低出范围为 24.4%~43.3% (表 2)。由 2.1 节可知, 相同处理下, 金秋红三号红菜苔根部土壤有效态镉含量均显著低于十月红红菜苔根部土壤。可见, 金秋红三号红菜苔根系较十月红对镉有更强的富集能力, 且其富集的镉倾向于围

表 2 不同处理条件下两种红菜苔 Cd 的富集和转移系数

Table 2 Enrichment and transportation factor of Cd in two types of Tsai-tai under different treatment conditions							
项目	类型	CK	BC	CMP	Se	Se + BC	Se + CMP
根部富集系数	金秋红三号	0.258 ± 0.011a	0.223 ± 0.020bc	0.200 ± 0.013def	0.240 ± 0.018ab	0.226 ± 0.015bc	0.209 ± 0.013cde
	十月红	0.214 ± 0.015cd	0.191 ± 0.009efg	0.185 ± 0.003fg	0.170 ± 0.030gh	0.145 ± 0.004i	0.160 ± 0.000hi
可食部位富集系数	金秋红三号	0.138 ± 0.004abc	0.110 ± 0.006ef	0.102 ± 0.011f	0.139 ± 0.009abc	0.125 ± 0.028cde	0.129 ± 0.001bed
	十月红	0.143 ± 0.008ab	0.151 ± 0.003a	0.099 ± 0.011f	0.115 ± 0.005def	0.124 ± 0.018cde	0.138 ± 0.005abc
转移系数	金秋红三号	0.537 ± 0.006g	0.495 ± 0.010g	0.438 ± 0.032h	0.602 ± 0.010f	0.694 ± 0.004e	0.636 ± 0.049f
	十月红	0.710 ± 0.008e	0.821 ± 0.047d	0.738 ± 0.000e	0.976 ± 0.066c	1.039 ± 0.054b	1.121 ± 0.075a

1) 数据为 3 个重复的平均值 ± 标准误差, 表中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示不显著, 下同

积在根部, 不易向地上部转移, 这可能是导致金秋红三号红菜苔可食部位低镉累积的重要原因。

2.3 土壤钝化和叶面阻控对红菜苔生物量及可食部位镉含量的影响

2.3.1 土壤钝化和叶面阻控对红菜苔生物量的影响

两种钝化剂及叶面阻控剂对两种红菜苔可食部位生物量的影响如表 3 所示。两种红菜苔不同处理间的差异趋同, 与 CK 处理相比, 其他 5 个处理均可

显著提高两种红菜苔可食部位生物量, 其中, BC + Se 和 CMP + Se 处理对金秋红三号和十月红两种红菜苔可食部位生物量提升效果最为显著, 较 CK 处理分别显著增加了 114.6%、73.6% 和 129.4%、185.3%。

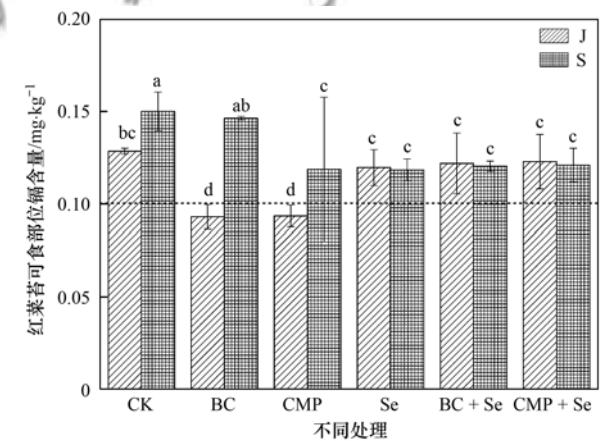
相同处理条件下, 金秋红三号可食部位生物量均显著高于十月红 ($P < 0.05$), 其高出的范围为 120.1% ~ 314.3%, 金秋红三号红菜苔具有明显的生物量优势。

表 3 不同处理条件下两种红菜苔可食部位生物量

Table 3 Biomass in edible parts of two types of Tsai-tai under different treatment conditions							
项目	类型	CK	BC	CMP	Se	Se + BC	Se + CMP
可食部位生物量 /g·盆 ⁻¹	金秋红	123.0 ± 0.0e	179.5 ± 9.2d	232.0 ± 0.0b	242.5 ± 7.8b	264.0 ± 9.9a	213.5 ± 20.5c
	十月红	34.0 ± 0.0i	48.0 ± 0.0h	56.0 ± 7.2h	59.0 ± 7.1h	78.0 ± 5.7g	97.0 ± 14.1f

2.3.2 土壤钝化和叶面阻控对红菜苔可食部位镉含量的影响

不同处理对两种红菜苔根部土壤有效态镉含量及其 Cd 富集转移能力的影响最终会导致其可食部位镉含量的变化。不同处理对两种红菜苔可食部位镉含量的影响存在一定差异 (图 2)。BC 和 CMP 处理下, 金秋红三号红菜苔可食部位镉含量分别为 0.093 mg·kg⁻¹ 和 0.094 mg·kg⁻¹, 低于 GB 2762-2017 标准中镉限量值 (0.10 mg·kg⁻¹), BC 和 CMP 处理可显著降低金秋红三号红菜苔可食部位镉含量, 较 CK 处理降幅分别为 27.5% 和 27.2% ($P < 0.05$), 可食部位镉含量的降低可能与 BC 和 CMP 处理降低了金秋红三号根部土壤有效态镉含量及其根部镉富集转移系数有关。但 BC 和 CMP 处理下, 十月红可食部位镉含量未达到安全标准, 且此条件下两种红菜苔可食部位镉含量差异达到最大, 金秋红三号红菜苔可食部位镉含量显著低于十月红, 低出幅度分别为 36.4% 和 21.2% ($P < 0.05$)。无论是单独施硒还是将硒与两种钝化剂联用, 两种红菜苔可食部位镉含量较 CK 处理均有不同程度地降低, 这可能与可食部位生物量的显著提高有关 (表 3), 对两种红菜苔可食部位的镉具有一定的稀释作用。



虚线表示 GB 2762-2017 中茎类蔬菜生产镉安全线

图 2 不同处理条件下两种红菜苔可食部位 Cd 含量

Fig. 2 Cd content in edible parts of two types of Tsai-tai under different treatment conditions

3 讨论

3.1 土壤钝化对红菜苔镉累积特征的影响

本研究中, CK 处理条件下, 金秋红三号红菜苔可食部位镉含量显著低于十月红红菜苔相应部位的镉含量 ($P < 0.05$), 这进一步验证了本课题组前期的研究结果^[21], 金秋红三号红菜苔具有低镉累积特征, 十月红红菜苔具有高镉累积特征。金秋红三号低

镉累积的特性一方面可能与其根部土壤有效态镉含量低有关,在受到镉胁迫时,金秋红三号红菜苔可能反馈性地分泌一些物质,降低了其根部周围有效态镉的含量,以规避镉在其体内富集^[27]。另一方面可能与金秋红三号红菜苔根部镉囤积机制有关,本研究结果表明,金秋红三号红菜苔根部富集的镉倾向于囤积在根部,而不向其可食部位转移,金秋红三号红菜苔的这种富集转移特征与其耐性作用机制相互佐证^[27]。不同基因型植物对镉富集转移能力不同^[28,29],转移系数低是导致植物低镉富集的重要原因,如低镉累积大豆品种内发现能与镉形成螯合物的蛋白质和氨基酸,减少了镉向地上部位的迁移^[30]。金秋红三号红菜苔镉转移系数低可能与其体内蛋白质、核酸及多糖类物质有关,有研究表明重金属进入植物后会与上述物质结合^[31],可能形成了某些如螯合物质,抑制重金属向地上部转移^[30]。

BC 和 CMP 处理可显著降低金秋红三号红菜苔根部土壤有效态镉含量及其镉转移系数。生物质炭表面有许多如羧基、羟基等含氧官能团及负电荷,能够吸附固定重金属,降低其移动性^[9,10,32,33]。含磷材料主要通过系列化学作用将重金属固定在土壤中,从而降低重金属在土壤中的迁移性和生物有效性^[34]。而对十月红红菜苔,BC 和 CMP 两种钝化剂不能降低其根部土壤有效态镉含量及转移系数,此结果与众多文献资料相悖,这可能与其根系分泌物及其所导致的根际微域环境有关。有研究发现高镉积累小麦品种根际土壤中有机酸含量明显高于低镉积累小麦品种,植物根系分泌物可能与其体内镉累积量存在一定的联系^[35]。根系环境如根际 pH 和 Eh 也会影响根部土壤中重金属的有效性,不同植物根际 pH 和 Eh 存在较大差异^[36]。

3.2 叶面阻控对红菜苔镉累积特征的影响

作为人和动物必须的微量元素,有研究表明,镉能与多种重金属元素产生拮抗效应,可与重金属形成难溶复合物,清除重金属引起的自由基及改变细胞膜的透性来影响植物对重金属的吸收转运^[12~14,37]。但是本研究结果显示,无论单独叶面施硒还是与土壤钝化剂联合使用,两种红菜苔根部土壤有效态镉的含量均与对照无显著差异甚至还略有增加,同时显著促进镉由两种红菜苔根部向地上部分转移,但两种红菜苔可食部位镉含量并未升高,这可能与 Se 处理下两种红菜苔可食部位生物量的显著提高有关,对富集在其可食部位的镉产生了一定的稀释效应,这种稀释效应部分掩盖了镉在红菜苔体内的累积特征。

本研究条件下,叶面施硒未能对 Cd 向红菜苔

植株可食部位转移形成有效阻控,反而不同程度地提升了两种红菜苔镉转移系数,其中,对低镉累积品种金秋红三号红菜苔的提升幅度小于十月红红菜苔,金秋红三号红菜苔的响应度更低,这可能与作物种类及硒施加量有关。不同植物对硒敏感程度不同,张海英^[38]的研究发现,草莓和枣最佳施硒浓度为 $2.5 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而桃最佳施硒浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在上述浓度范围内相应植物体内的镉、铅与 Se 产生拮抗作用,降低果实中镉铅的含量。不同的硒施加量也会影响其与重金属的作用效果,当硒浓度小于 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可有效降低草莓中镉含量,而当硒浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,在草莓生长后期会促进草莓中镉的累积^[12]。硒对水稻累积重金属也有相似的影响趋势,有研究表明,硒对水稻吸收镉及缓解毒害作用均具有两重性,叶面喷施低浓度的硒会减少水稻中丙二醛含量,抑制镉的累积,促进水稻生长,当硒含量高于 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时会增加水稻中丙二醛的量,促进镉向水稻籽粒中迁移,抑制水稻生长^[18,25]。同时,Se 元素可能通过增产稀释作用维持了红菜苔植株正常的根压和蒸腾流,在促进植株生长的同时,也可能激活了镉的转运蛋白,使得 Cd 借助根压和蒸腾流向上运输^[39]。有关叶面施 Se 对红菜苔等茎菜类作物及其它作物对镉等重金属的吸收累积及其相互作用机制还待进一步的研究。

4 结论

(1) 叶面施硒与土壤钝化处理均可显著提高两种红菜苔的生物量,且金秋红三号红菜苔较十月红红菜苔具有更为显著的生物量优势。

(2) 相同处理下,金秋红三号根部土壤有效态镉含量及其镉转移系数均低于十月红,根部镉富集系数却显著高于十月红,金秋红三号根系较十月红对镉有更强的富集能力,且其富集的镉倾向于囤积在根部,不易向地上部转移。

(3) 生物质炭和钙镁磷肥两种钝化剂可降低金秋红三号根部土壤有效态镉含量、植株各部位镉富集系数及转移系数,促使金秋红三号可食部位镉含量降低至 GB 2762-2017 中镉限量值 ($0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 以下。

(4) 本研究表明,对中轻度 Cd 污染农田土壤,借助生物质炭、钙镁磷肥等绿色钝化剂的作用,同时种植低 Cd 积累作物种或品种,可以实现受 Cd 污染农田的安全利用。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.

- [2] GB/T 33469-2016, 耕地质量等级[S].
- [3] Liang X F, Han J, Xu Y M, *et al.* In situ field-scale remediation of Cd polluted paddy soil using sepiolite and palygorskite[J]. *Geoderma*, 2014, **235-236**: 9-18.
- [4] Sun Y B, Sun G H, Xu Y M, *et al.* Evaluation of the effectiveness of sepiolite, bentonite, and phosphate amendments on the stabilization remediation of cadmium-contaminated soils[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **166**: 204-210.
- [5] Komárek M, Vaněk A, Ettler V. Chemical stabilization of metals and arsenic in contaminated soils using oxides-a review[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **172**: 9-22.
- [6] 赵庆圆, 李小明, 杨麒, 等. 磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 389-398.
- Zhao Q Y, Li X M, Yang Q, *et al.* Passivation of simulated Pb- and Cd-contaminated soil by applying combined treatment of phosphate, humic acid, and fly ash[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 389-398.
- [7] 曾晓舵, 王向琴, 涂新红, 等. 农田土壤重金属污染阻控技术研究进展[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(9): 1900-1906.
- Zeng X D, Wang X Q, Tu X H, *et al.* Research progress on speciation and physiological control of heavy metal in soil-plant system[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(9): 1900-1906.
- [8] 吴霄霄, 曹榕彬, 米长虹, 等. 重金属污染农田原位钝化修复材料研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, **36**(3): 253-263.
- Wu X X, Cao R B, Mi C H, *et al.* Research progress of in-situ passivated remedial materials for heavy metal contaminated soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, **36**(3): 253-263.
- [9] Cantrell K B, Hunt P G, Uchimiya M, *et al.* Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **107**: 419-428.
- [10] 胡学玉, 陈筠君, 张沙沙, 等. 磁性玉米秸秆生物炭对水体中 Cd 的去除作用及回收利用[J]. *农业工程学报*, 2018, **34**(19): 208-218.
- Hu X Y, Chen Y J, Zhang S S, *et al.* Cd removal from aqueous solution using magnetic biochar derived from maize straw and its recycle[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(19): 208-218.
- [11] 胡红青, 黄益宗, 黄巧云, 等. 农田土壤重金属污染化学钝化修复研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, **23**(6): 1676-1685.
- Hu H Q, Huang Y Z, Huang Q Y, *et al.* Research progress of heavy metals chemical immobilization in farm land[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, **23**(6): 1676-1685.
- [12] 张海英, 韩涛, 田磊, 等. 草莓叶面施硒对其重金属镉和铅积累的影响[J]. *园艺学报*, 2011, **38**(3): 409-416.
- Zhang H Y, Han T, Tian L, *et al.* Effects of cadmium and lead accumulation in strawberry growing period by spraying Se-fertilizer to leaves[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, **38**(3): 409-416.
- [13] Elguera J C T, Barrientos E Y, Wrobel K, *et al.* Effect of cadmium (Cd(II)), selenium (Se(IV)) and their mixtures on phenolic compounds and antioxidant capacity in *Lepidium sativum* [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, **35**(2): 431-441.
- [14] 袁思莉, 余焱, 万亚男, 等. 硒缓解植物重金属胁迫和累积的机制[J]. *农业资源与环境学报*, 2014, **31**(6): 545-550.
- Yuan S L, Yu Y, Wan Y N, *et al.* Mechanisms of selenium mitigating stress and accumulation of heavy metals in plants[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, **31**(6): 545-550.
- [15] 熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 等. 外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 286-294.
- Xiong S J, Liu J, Xu W H, *et al.* Effect of exogenous selenium on accumulation and chemical forms of cadmium in cucumber [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 286-294.
- [16] 尹炳, 汪建飞, 师胜, 等. 矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1904-1913.
- Yin B, Wang J F, Shi S, *et al.* Selenium uptake characteristics of reclaimed soil-crop from mining wasteland and its antagonistic effects on heavy metals[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1904-1913.
- [17] Feng R W, Wei C Y, Tu S X, *et al.* A dual role of Se on Cd toxicity: evidences from the uptake of Cd and some essential elements and the growth responses in paddy rice[J]. *Biological Trace Element Research*, 2013, **151**(1): 113-121.
- [18] Ding Y Z, Feng R W, Wang R G, *et al.* A dual effect of Se on Cd toxicity: evidence from plant growth, root morphology and responses of the antioxidative systems of paddy rice[J]. *Plant and Soil*, 2014, **375**(1-2): 289-301.
- [19] 杜俊杰, 李娜, 吴永宁, 等. 蔬菜对重金属的积累差异及低积累蔬菜的研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(6): 1193-1201.
- Du J J, Li N, Wu Y N, *et al.* Variation in accumulation of heavy metals in vegetables and low accumulation vegetable varieties: a review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(6): 1193-1201.
- [20] Shahid M, Dumat C, Khalid S, *et al.* Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: a comparison of foliar and root metal uptake[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, **325**: 36-58.
- [21] 张迪, 胡学玉, 殷俊, 等. 城郊农业生态系统中茎菜类蔬菜对重金属镉的累积特征及品质表现[J]. *应用与环境生物学报*, 2015, **21**(2): 188-194.
- Zhang D, Hu X Y, Yin J, *et al.* Cadmium accumulation and vegetable quality of edible parts of stem vegetables growing in suburban farmlands [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2015, **21**(2): 188-194.
- [22] 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, 1999.
- [23] GB/T 23739-2009, 土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法[S].
- [24] GB 5009.15-2014, 食品安全国家标准 食品中镉的测定[S].
- [25] 张璐, 周鑫斌, 苏婷婷. 叶面施硒对水稻各生育期镉汞吸收的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2017, **39**(7): 50-56.
- Zhang L, Zhou X B, Su T T. Effects of foliar application of selenium on cadmium and mercury absorption in different growth periods of rice [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2017, **39**(7): 50-56.
- [26] 高敏, 周俊, 刘海龙, 等. 叶面喷施硅硒联合水分管理对水稻镉吸收转运特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(2): 215-222.
- Gao M, Zhou J, Liu H L, *et al.* Effect of silica and selenite foliar sprays on the uptake and transport of cadmium by rice under water management [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(2): 215-222.

- [27] 江行玉, 赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1): 92-99.
Jiang X Y, Zhao K F. Mechanism of heavy metal injury and resistance of plants [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2001, 7(1): 92-99.
- [28] 肖亚涛. 冬小麦苗期对镉胁迫的响应及阻控机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019. 6-8.
Xiao Y T. The response and control mechanism of cadmium stress during seedlings stage of winter wheat [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019. 6-8.
- [29] Zhang G P, Fukami M, Sekimoto H. Genotypic differences in effects of cadmium on growth and nutrient compositions in wheat [J]. Journal of Plant Nutrition, 2000, 23(9): 1337-1350.
- [30] Ahsan N, Nakamura T, Komatsu S. Differential responses of microsomal proteins and metabolites in two contrasting cadmium (Cd)-accumulating soybean cultivars under Cd stress [J]. Amino Acids, 2012, 42(1): 317-327.
- [31] 邢艳帅, 朱桂芬. 重金属对水生生物的生态毒理效应及生物耐受机制研究进展[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(3): 13-26.
Xing Y S, Zhu G F. Advances on ecotoxicological effects of heavy metals to aquatic organisms and the tolerance mechanisms of aquatic organisms[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, 12(3): 13-26.
- [32] Zeng G M, Wu H P, Liang J, *et al.* Efficiency of biochar and compost (or composting) combined amendments for reducing Cd, Cu, Zn and Pb bioavailability, mobility and ecological risk in wetland soil[J]. RSC Advances, 2015, 5(44): 34541-34548.
- [33] Zheng R L, Cai C, Liang J H, *et al.* The effects of biochars from rice residue on the formation of iron plaque and the accumulation of Cd, Zn, As in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings [J]. Chemosphere, 2012, 89(7): 856-862.
- [34] Mahar A, Wang P, Li R H, *et al.* Immobilization of lead and cadmium in contaminated soil using amendments: a review[J]. Pedosphere, 2015, 25(4): 555-568.
- [35] Cieśliński G, Van Rees K C J, Szmigielska A M, *et al.* Low-molecular-weight organic acids in rhizosphere soils of durum wheat and their effect on cadmium bioaccumulation [J]. Plant and Soil, 1998, 203(1): 109-117.
- [36] 杨俊兴, 郑国砥, 胡健, 等. 湿地植物铅的富集特征及根际铅移动性的影响因素研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 1058-1067.
Yang J X, Zheng G D, Hu J, *et al.* Characterization of Pb accumulation and factors influencing Pb mobility in rhizosphere soils of wetland plants [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(4): 1058-1067.
- [37] Filek M, Keskinen R, Hartikainen H, *et al.* The protective role of selenium in rape seedlings subjected to cadmium stress [J]. Journal of Plant Physiology, 2008, 165(8): 833-844.
- [38] 张海英. 硒处理对桃、枣和草莓生理指标影响的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011. 34-35.
Zhang H Y. Effects of selenium to physiological indexes of peach, jujube and strawberry [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. 34-35.
- [39] 王晓娟, 王文斌, 杨龙, 等. 重金属镉(Cd)在植物体内的转运途径及其调控机制[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7921-7929.
Wang X J, Wang W B, Yang L, *et al.* Transport pathways of cadmium (Cd) and its regulatory mechanisms in plant [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): 7921-7929.

CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohe Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)