

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)

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¹, 刘鸿雁^{1,2*}, 梅雪¹, 毛诗佳¹, 刘芳¹, 张秋野², 敬鹏²

(1. 贵州大学农学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 黔西北是喀斯特重金属地质高背景区, 受历史上土法炼锌影响, 区域内大气降尘重金属含量高, 土壤污染严重. 为探究叶菜类蔬菜重金属的累积途径, 以大白菜为供试作物, 选择 Cd、Pb 和 Zn 含量一致的地质高背景土壤和锌冶炼污染土壤, 在锌粉厂污染区和无污染对照区进行盆栽试验, 研究露天、覆膜和大棚栽培条件下大白菜重金属含量、富集系数 (BCF) 和转运系数 (TF). 结果表明, 污染区和对照区大白菜 ω (Cd) 范围分别在 0.10 ~ 1.01 mg·kg⁻¹ 和 0.10 ~ 0.91 mg·kg⁻¹, ω (Pb) 为 0.31 ~ 0.62 mg·kg⁻¹ 和 0.23 ~ 0.37 mg·kg⁻¹, ω (Zn) 为 7.50 ~ 32.74 mg·kg⁻¹ 和 4.88 ~ 21.79 mg·kg⁻¹, 总体上污染区重金属含量偏高, 在地质高背景土壤上种植的大白菜, Cd 和 Pb 基本达到国家食品安全标准限值的要求. 受大气沉降的影响, 污染区大白菜 Pb 和 Zn 含量显著高于对照区, Cd 差异不明显. 污染土壤弱酸溶态 Cd、Pb 和 Zn 占比分别为 48%、3.0% 和 16%, 是地质高背景对照土壤的 3.15、1.01 和 1.57 倍, 受重金属活性的影响, 污染土壤种植的大白菜 Cd 和 Zn 含量超过国家标准, 显著高于对照土壤. 污染土壤大白菜 Cd、Pb 和 Zn 的 BCF_{根-土壤} 显著高于对照土壤, 且 Cd 和 Zn 的 BCF 大于 Pb; 大白菜 Cd 和 Zn 的 TF_{地上部-根} 显著高于对照土壤, 而 Pb 的 TF_{地上部-根} 在污染区显著高于对照区, 两个研究区内大白菜 Pb 含量均表现出: 露天 > 覆膜 > 大棚. 综上, 大白菜 Cd 和 Zn 的含量受土壤重金属活性的影响大, 主要累积途径是根的吸收和转运; 除根系吸收外, 大气沉降是 Pb 的重要累积途径. 因此, 在地质高背景区, 要注意控制外源污染叠加土壤上种植叶菜类作物的 Cd 和 Zn 暴露风险, 同时, 采用大棚种植能有效降低 Pb 的积累.

关键词: 地质高背景; Cd、Pb、Zn; 土壤; 大白菜; 富集系数; 转运系数

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4448-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202209034

Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area

JIAN Huai-liang¹, LIU Hong-yan^{1,2*}, MEI Xue¹, MAO Shi-jia¹, LIU Fang¹, ZHANG Qiu-ye², JING Peng²

(1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Northwest Guizhou is a karst area with a high geological background. Affected by historical soil zinc smelting, the heavy metal content of atmospheric dust in the region is high, and soil pollution is severe. In order to explore the accumulation pathway of heavy metals in leafy vegetables, Chinese cabbage was used as the test crop, and the geological high background soil and zinc smelting-contaminated soil with the same contents of Cd, Pb, and Zn were selected. A pot experiment was carried out in the polluted area of zinc smelting and the non-polluting control area. The heavy metal content, enrichment coefficient (BCF), and transport coefficient (TF) of Chinese cabbage were studied under open-air, plastic mulching film, and greenhouse cultivation conditions. The results showed that the contents of Cd, Pb, and Zn in Chinese cabbage in the polluted area and the control area were 0.10-1.01 and 0.10-0.91 mg·kg⁻¹, 0.31-0.62 and 0.23-0.37 mg·kg⁻¹, and 7.50-32.74 and 4.88-21.79 mg·kg⁻¹, respectively. Overall, the contents of heavy metals in the polluted area were relatively high. The contents of Cd and Pb in Chinese cabbage planted in soil with a high geological background met the requirements of the national food safety standard limits. Affected by atmospheric deposition, the contents of Pb and Zn in Chinese cabbage in the polluted area were significantly higher than that in the control area, and the difference in Cd was insignificant. The proportions of weak acid-soluble Cd, Pb, and Zn in the contaminated soil were 48%, 3.0%, and 16%, respectively, which were 3.15, 1.01, and 1.57 times higher than those in the control soil with a high geological background. Affected by the activity of heavy metals, the contents of Cd and Zn in Chinese cabbage planted in the contaminated soil exceeded the national standard and were significantly higher than those in the control soil. The root-soil BCF of Cd, Pb, and Zn in polluted soil was significantly higher than that in the control soil, and the BCF of Cd and Zn was higher than that of Pb. The TF aboveground root Cd and Zn in Chinese cabbage was significantly higher than in the control soil, whereas the TF aboveground root Pb in the polluted area was significantly higher than that in the control area. The Pb content of Chinese cabbage in the two study areas showed open field > plastic mulching film > greenhouse cultivation. In conclusion, the content of Cd and Zn in Chinese cabbage was greatly affected by the activity of heavy metals in soil, and the main accumulation pathway was root absorption and transportation. In addition to root absorption, atmospheric deposition was an important accumulation pathway of Pb. Therefore, in areas with high geological backgrounds, attention should be paid to controlling the exposure risk of Cd and Zn in leafy vegetables planted on exogenously polluted soils. Additionally, greenhouse cultivation could effectively reduce the accumulation of Pb.

Key words: high geological background; Cd, Pb, and Zn; soil; Chinese cabbage; enrichment coefficient; transfer coefficient

收稿日期: 2022-09-04; 修订日期: 2022-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42067028)

作者简介: 简槐良 (1997 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农业资源与环境植物营养学, E-mail: 1745244520@qq.com

* 通信作者, E-mail: hylu@gzu.edu.cn

我国西南喀斯特地区具有典型的重金属地球化学高背景特征,受地质条件控制,黔西北土壤中以镉为主的重金属背景值远高于全国平均值,土壤镉(Cd)、铅(Pb)和锌(Zn)等污染严重^[1],农用地重金属污染面积全国第一.地质高背景区重金属污染土壤种植农作物存在一定安全风险^[2],受历史遗留土法炼锌的影响,该区域外源污染叠加严重,农作物的安全生产风险更高^[3].黔西北威宁县是“全国153个夏秋蔬菜生产基地县”之一,大白菜种植面积大,但也存在Cd和Zn超标的问题.在以往的研究中,较多关注重金属低积累品种的筛选^[4].但大白菜不仅可以通过根系吸收重金属,因其叶片数量多,比表面积大,也可通过叶片吸收重金属^[5].有研究表明,工业污染地区大气沉降中重金属含量高,对大白菜重金属积累的贡献不可忽视^[6].

本研究选择地质高背景和外源叠加污染的两种土壤,在锌冶炼工业污染区和无污染对照区,在露天、覆膜和大棚这3种植植方式下,分析镉高、低积累的两个大白菜品种重金属的富集和转移规律,探

索大白菜Cd、Pb和Zn的累积途径,以期为地质高背景区外源污染叠加条件下的叶菜类作物安全生产提供理论基础和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 供试材料

研究区概况:锌粉厂污染区位于贵州省威宁县金钟镇(104°23′04″E, 26°47′02″N),大气沉降Cd、Pb和Zn浓度高^[7],年均沉降量分别为28.7、602和2 225 mg·m⁻².无污染对照区位于贵州省威宁县炉山镇(104°23′33″E, 26°48′11″N),大气沉降中Cd、Pb和Zn年均沉降量分别为13.8、440和1 292 mg·m⁻².两个研究区直线距离约10 km.

供试作物:供试大白菜是Cd高积累品种晋菜三号^[8]和Cd低积累品种北京新三号^[9].

供试土壤:无外源污染叠加的地质高背景土壤和有锌粉厂外源污染叠加的锌冶炼污染土壤,两种土壤均为典型的地带性酸性黄壤,土壤pH、有机质和Cd、Pb、Zn含量如表1所示.

表1 土壤pH、有机质和Cd、Pb、Zn含量
Table 1 Soil pH, organic matter, and Cd, Pb, Zn contents

土壤	pH	ω(有机质) /g·kg ⁻¹	ω(Cd) /mg·kg ⁻¹	ω(Pb) /mg·kg ⁻¹	ω(Zn) /mg·kg ⁻¹
地质高背景土壤	5.67	14.41	5.46	91.85	260.81
锌冶炼污染土壤	5.83	15.53	5.33	113.20	276.06

1.2 试验设计与方法

盆栽试验:为模拟正常田间生长环境,设计了长宽高为90、45和30 cm的超大木质试验箱,土壤为每箱80 kg,种植3棵大白菜.种植方式:露天、覆膜和大棚.共有2个研究区、2种土壤、2个大白菜品种和3种植植方式,共24个处理,每个处理3次重复.播种时间为2021年4月18日,收获时间为2021年6月25日.

1.3 样品制备与检测

样品采集及制备:大白菜整株采集,用自来水冲洗表面泥土,去离子水将白菜反复冲洗3次用吸水纸吸干表层水称量鲜重后记录;将白菜分为根、叶脉和叶片分别装入牛皮纸袋,在105~110℃杀青30 min,再75℃烘干至恒重,磨细过筛(0.149 mm)备用.

重金属的测定方法:

土壤样品:称取一定量的样品于聚四氟乙烯烧杯中,加10 mL硝酸和10 mL氢氟酸:高氯酸(10:1),在230℃电热板加热消解至固体物质完全消解(至少4 h),至溶液蒸干,再加10 mL王水浸提,用超纯水定容至25 mL,摇匀后稀释待测.土壤重金属

形态参照GB/T 25282-2010分步提取,浸提出弱酸溶态、可还原态、可氧化态和残渣态的待测液.

植物样品:称取一定量的样品于消解罐中,加入2 mL过氧化氢预消解12~18 h,加入10 mL纯化硝酸后微波消解.消解完全后转移到容量瓶中,用超纯水定容至50 mL,摇匀后待测.

待测溶液用ICP-MS(Agilent 7800)测定,用国家一级标准物质(GBW 10047,胡萝卜)进行植物内部质量控制,用国家土壤标准物质(GSS-5a)进行土壤内部质量控制,增加空白样和平行样进行外部质量控制,各种金属的回收率均为94%~105%,符合质量控制要求.

1.4 数据统计

白菜Cd富集和转运系数的计算公式如下^[10,11]:

$$BCF(\text{富集系数})_{\text{根-土壤}} = \frac{\text{白菜根 Cd 质量比}}{\text{土壤中重金属 Cd 质量比}} \quad (1)$$

$$BCF(\text{富集系数})_{\text{地上部-土壤}} = \frac{\text{白菜地上部 Cd 质量比}}{\text{土壤中重金属 Cd 质量比}} \quad (2)$$

$$TF(\text{转运系数})_{\text{叶脉-根}} = \frac{\text{白菜叶脉 Cd 质量比}}{\text{白菜根 Cd 质量比}} \quad (3)$$

$$TF(\text{转运系数})_{\text{叶-叶脉}} = \frac{\text{白菜叶 Cd 质量比}}{\text{白菜叶脉 Cd 质量比}} \quad (4)$$

$$TF(\text{转运系数})_{\text{地上部-根}} = \frac{\text{白菜地上部 Cd 质量比}}{\text{白菜根 Cd 质量比}} \quad (5)$$

下文中 Pb 和 Zn 的富集和转运系数按 Cd 的富集和转运系数公式计算。

用 Excel 2016 进行数据统计,SPSS 26.0 单因素方差分析进行差异性检验 (One-way ANOVA), Origin 2018 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 大白菜重金属 Cd 的累积途径

2.1.1 大白菜地上部 Cd 含量

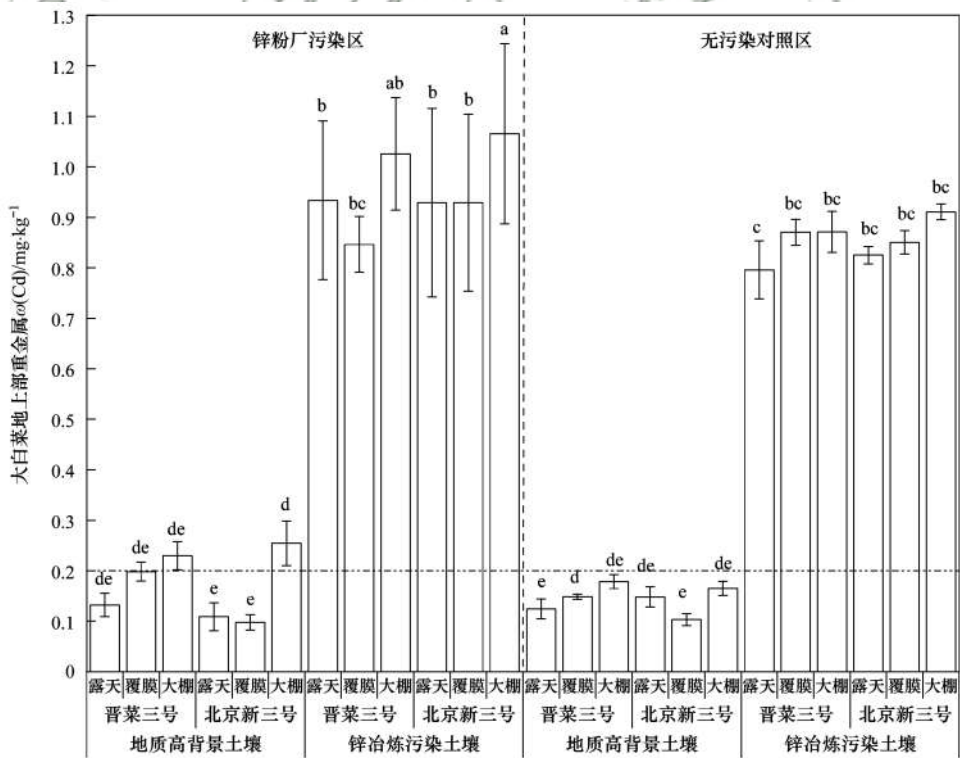
大白菜地上部 Cd 含量如图 1 所示,锌粉厂污染区和无污染对照区大白菜 $\omega(\text{Cd})$ 分别为 0.10 ~ 1.01 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.10 ~ 0.91 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 锌冶炼污染土壤大白菜地上部 $\omega(\text{Cd})$ 均高于 0.79 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于地质高背景土壤大白菜 Cd 含量 ($P < 0.05$), 地质高背景土壤大白菜地上部 $\omega(\text{Cd})$ 低于 0.23 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中锌冶炼污染土壤大白菜地上部 Cd 含量均超过食品安全国家标准 (GB 2762-2017), 而地质高背景土壤在锌粉厂污染区部分超标, 无污染对照区均未超标。相同处理两种大白菜品种 Cd 含量

无显著性差异。锌粉厂污染区和无污染对照区大棚栽培措施大白菜地上部分 Cd 含量高于露天和覆膜措施, 无污染对照区各处理未达显著性差异。

2.1.2 大白菜对 Cd 的富集转运规律

大白菜 Cd $BCF_{\text{根-土壤}}$ 如表 2, 锌粉厂污染区和无污染对照区大白菜 Cd $BCF_{\text{根-土壤}}$ 分别为 0.20 ~ 1.55 和 0.20 ~ 2.45, 锌冶炼污染土壤大白菜 Cd $BCF_{\text{根-土壤}}$ 显著高于地质高背景土壤的 ($P < 0.05$), 地质高背景土壤种植的大白菜 Cd $BCF_{\text{根-土壤}}$ 各处理未达显著性差异。大白菜对 Cd $BCF_{\text{地上部-土壤}}$ 锌粉厂污染区和无污染对照区分别为 0.87 ~ 2.12 和 1.00 ~ 2.58。

锌粉厂污染区和无污染对照区大白菜对 Cd $TF_{\text{叶脉-根}}$ 分别为 0.69 ~ 1.61 和 0.73 ~ 1.66, $TF_{\text{叶-叶脉}}$ 分别为 1.49 ~ 2.73 和 0.94 ~ 2.52, 两研究区大棚处理大白菜 Cd $TF_{\text{叶-叶脉}}$ 均大于露天和覆膜处理; 锌粉厂污染区地质高背景土壤大棚种植的北京新三号 and 锌冶炼污染大棚种植的晋菜三号和新北京三号以及对对照区锌冶炼污染大棚种植晋菜三号 Cd $TF_{\text{叶-叶脉}}$ 均显著高于露天和覆膜处理 ($P < 0.05$)。锌粉厂污染区和无污染对照区大白菜对 Cd $TF_{\text{地上部-根}}$ 分别为 0.13 ~ 2.07 和 0.26 ~ 2.55。不同处理大白菜 Cd 富集系数和转运系数整体呈现: $BCF_{\text{根-土壤}} < TF_{\text{地上部-根}} < TF_{\text{叶脉-根}} < BCF_{\text{地上部-土壤}} < TF_{\text{叶-叶脉}}$ 。



不同小写字母表示不同处理大白菜地上部重金属 Cd 含量差异显著 ($P < 0.05$);
0.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为食品安全国家标准食品中污染物 Cd 限量 (GB 2762-2017)

图 1 不同处理大白菜地上部重金属 Cd 含量

Fig. 1 Concentration of heavy metal Cd in shoot of Chinese cabbage under different treatments

表 2 不同处理大白菜重金属 Cd 富集系数和转运系数¹⁾

Table 2 Enrichment and transport coefficients of heavy metal Cd in Chinese cabbage under different treatments

区域	土壤类型	白菜品种	种植方式	BCF _{根-土壤}	BCF _{地上部-土壤}	TF _{叶脉-根}	TF _{叶-叶脉}	TF _{地上部-根}
锌粉厂 污染区	地质高背 景土壤	晋菜 三号	露天	0.20 ± 0.01g	1.03 ± 0.04f	0.71 ± 0.02d	1.49 ± 0.08d	0.30 ± 0.09g
			覆膜	0.21 ± 0.01g	1.22 ± 0.03ef	1.01 ± 0.09cd	1.67 ± 0.07cd	0.37 ± 0.02g
			大棚	0.21 ± 0.01g	1.34 ± 0.33e	1.12 ± 0.1bc	1.76 ± 0.07c	0.36 ± 0.02g
		北京 新三号	露天	0.21 ± 0.01g	1.07 ± 0.06f	0.81 ± 0.03d	1.73 ± 0.03cd	0.21 ± 0.00gh
			覆膜	0.20 ± 0.01g	0.87 ± 0.04f	0.72 ± 0.00d	2.05 ± 0.05b	0.13 ± 0.01h
			大棚	0.20 ± 0.02g	2.12 ± 0.08b	1.61 ± 0.03a	2.60 ± 0.14a	0.48 ± 0.04fg
	锌冶炼 污染土壤	晋菜 三号	露天	0.88 ± 0.10f	1.93 ± 0.15bc	1.07 ± 0.06c	1.78 ± 0.09c	2.07 ± 0.16bc
			覆膜	0.91 ± 0.07f	1.61 ± 0.14d	1.02 ± 0.04cd	2.08 ± 0.01b	1.50 ± 0.03e
			大棚	1.32 ± 0.13d	1.31 ± 0.1ef	0.80 ± 0.03d	2.69 ± 0.03a	1.72 ± 0.17d
		北京 新三号	露天	0.92 ± 0.11f	1.72 ± 0.08cd	1.09 ± 0.06bc	2.16 ± 0.16b	1.87 ± 0.11cd
			覆膜	0.92 ± 0.12f	1.86 ± 0.09c	1.21 ± 0.06bc	2.17 ± 0.07b	1.72 ± 0.02d
			大棚	1.55 ± 0.01c	1.13 ± 0.12ef	0.69 ± 0.02d	2.73 ± 0.19a	1.96 ± 0.15c
无污染 对照区	地质高 背景土壤	晋菜 三号	露天	0.27 ± 0.01g	1.48 ± 0.07de	1.66 ± 0.10a	1.00 ± 0.07f	0.45 ± 0.11fg
			覆膜	0.23 ± 0.02g	1.34 ± 0.26e	1.33 ± 0.07bc	1.29 ± 0.04de	0.26 ± 0.01gh
			大棚	0.25 ± 0.01g	2.45 ± 0.26a	1.34 ± 0.04b	1.50 ± 0.05d	0.59 ± 0.05fg
		北京 新三号	露天	0.30 ± 0.02g	1.17 ± 0.2ef	1.07 ± 0.05c	1.12 ± 0.06ef	0.33 ± 0.11g
			覆膜	0.20 ± 0.01g	1.71 ± 0.15cd	1.64 ± 0.01a	0.94 ± 0.05f	0.35 ± 0.02g
			大棚	0.28 ± 0.02g	1.00 ± 0.11f	1.02 ± 0.01cd	1.26 ± 0.03e	0.29 ± 0.02gh
	锌冶炼 污染土壤	晋菜 三号	露天	1.11 ± 0.08e	1.68 ± 0.06cd	1.46 ± 0.09ab	0.96 ± 0.07f	2.21 ± 0.12bc
			覆膜	1.25 ± 0.01de	1.64 ± 0.11cd	1.10 ± 0.03bc	1.81 ± 0.02c	2.24 ± 0.26bc
			大棚	1.39 ± 0.02cd	2.58 ± 0.10a	1.27 ± 0.09bc	2.52 ± 0.07a	2.55 ± 0.06a
		北京 新三号	露天	2.01 ± 0.14b	1.42 ± 0.08de	0.73 ± 0.01e	1.06 ± 0.06ef	2.11 ± 0.04bc
			覆膜	1.18 ± 0.05de	1.34 ± 0.12e	0.83 ± 0.04cd	1.31 ± 0.09de	1.78 ± 0.06d
			大棚	2.45 ± 0.08a	1.09 ± 0.05f	0.99 ± 0.04cd	1.33 ± 0.04de	2.14 ± 0.20b

1) 不同小写字母表示同列处理差异性显著 ($P=0.05$), 下同

2.2 大白菜重金属 Pb 的累积途径

2.2.1 大白菜地上部 Pb 含量

大白菜地上部 Pb 含量如图 2 所示, 锌粉厂污染区和无污染对照区大白菜 $\omega(\text{Pb})$ 分别为 0.31 ~ 0.62 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.23 ~ 0.37 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 相同处理锌粉厂污染区大白菜 Pb 含量均显著高于无污染对照区 ($P<0.05$), 锌粉厂污染区大白菜 Pb 含量均超过食品安全国家标准 (GB 2762-2017), 无污染对照区的锌冶炼污染土壤大白菜部分超标, 而地质高背景土壤均未超标. 两种大白菜品种相同处理 Pb 含量无显著性差异. 锌粉厂污染区大棚栽培措施大白菜 Pb 含量显著低于覆膜和露天栽培措施, 两个研究区露天、覆膜和大棚这 3 种处理大白菜地上部 Pb 含量规律一致: 大棚 < 覆膜 < 露天.

2.2.2 大白菜对 Pb 的富集转运规律

大白菜 Pb $\text{BCF}_{\text{根-土壤}}$ 如表 3, 锌粉厂污染区和无污染对照区大白菜 Pb $\text{BCF}_{\text{根-土壤}}$ 分别为 0.06 ~ 0.21 和 0.04 ~ 0.22. 两个研究区内地质高背景土壤各处理大白菜 Pb $\text{BCF}_{\text{根-土壤}}$ 无显著性差异. 大白菜对 Pb $\text{BCF}_{\text{地上部-土壤}}$ 锌粉厂污染区和无污染对照区分别为 0.03 ~ 0.06 和 0.02 ~ 0.04.

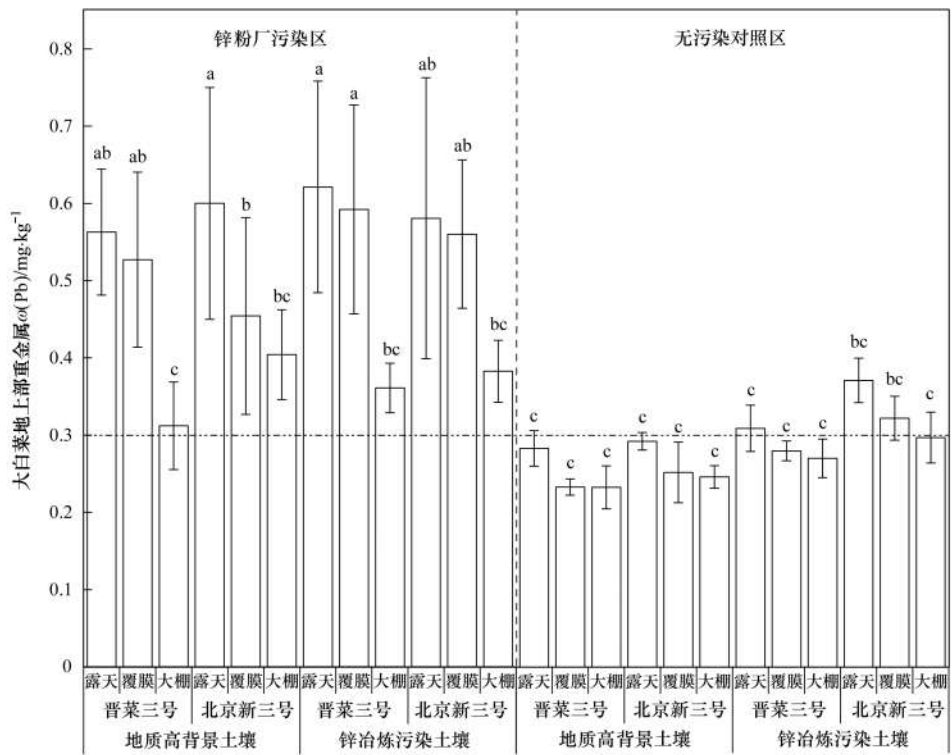
锌粉厂污染区和无污染对照区大白菜对 Pb $\text{TF}_{\text{叶脉-根}}$ 分别为 0.17 ~ 0.74 和 0.11 ~ 0.47. 无污染

对照区相同土壤不同处理间差异性不显著. 锌粉厂污染区和无污染对照区大白菜对 Pb $\text{TF}_{\text{叶-叶脉}}$ 分别为 1.28 ~ 2.46 和 0.66 ~ 1.93, 锌粉厂污染区相同土壤和白菜品种露天处理大白菜 Pb $\text{TF}_{\text{叶-叶脉}}$ 显著大于大棚处理 ($P<0.05$), 无污染对照区除锌冶炼污染土壤大棚处理种植的北京新三号外各处理无显著性差异. 锌粉厂污染区和无污染对照区大白菜对 Pb $\text{TF}_{\text{地上部-根}}$ 分别为 0.26 ~ 1.02 和 0.14 ~ 0.37. 不同处理大白菜 Pb 富集系数和转运系数整体呈现 $\text{BCF}_{\text{根-土壤}}$ 、 $\text{TF}_{\text{地上部-根}}$ 、 $\text{TF}_{\text{叶脉-根}}$ 和 $\text{BCF}_{\text{地上部-土壤}}$ 都远小于 $\text{TF}_{\text{叶-叶脉}}$.

2.3 大白菜重金属 Zn 的累积途径

2.3.1 大白菜地上部 Zn 含量

大白菜地上部 Zn 含量如图 3 所示, 锌粉厂污染区和无污染对照区大白菜 $\omega(\text{Zn})$ 分别为 7.50 ~ 32.74 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 4.88 ~ 21.79 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 两个研究区相同处理锌粉厂污染区大白菜 Zn 显著高于无污染对照区 ($P<0.05$). 锌冶炼污染土壤大白菜地上部 $\omega(\text{Zn})$ 均高于 19.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 地质高背景土壤大白菜地上部 $\omega(\text{Zn})$ 均低于 7.50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 锌冶炼污染土壤大白菜地上部 Zn 显著高于地质高背景土壤, 相同研究区地质高背景土壤各处理未达显著性差异.



不同小写字母表示不同处理大白菜地上部重金属 Pb 含量差异显著 ($P < 0.05$) ;
0.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为食品安全国家标准食品中污染物 Pb 限量 (GB 2762-2017)

图 2 不同处理大白菜地上部重金属 Pb 含量

Fig. 2 Concentration of heavy metal Pb in shoot of Chinese cabbage under different treatments

表 3 不同处理大白菜重金属 Pb 富集系数和转运系数

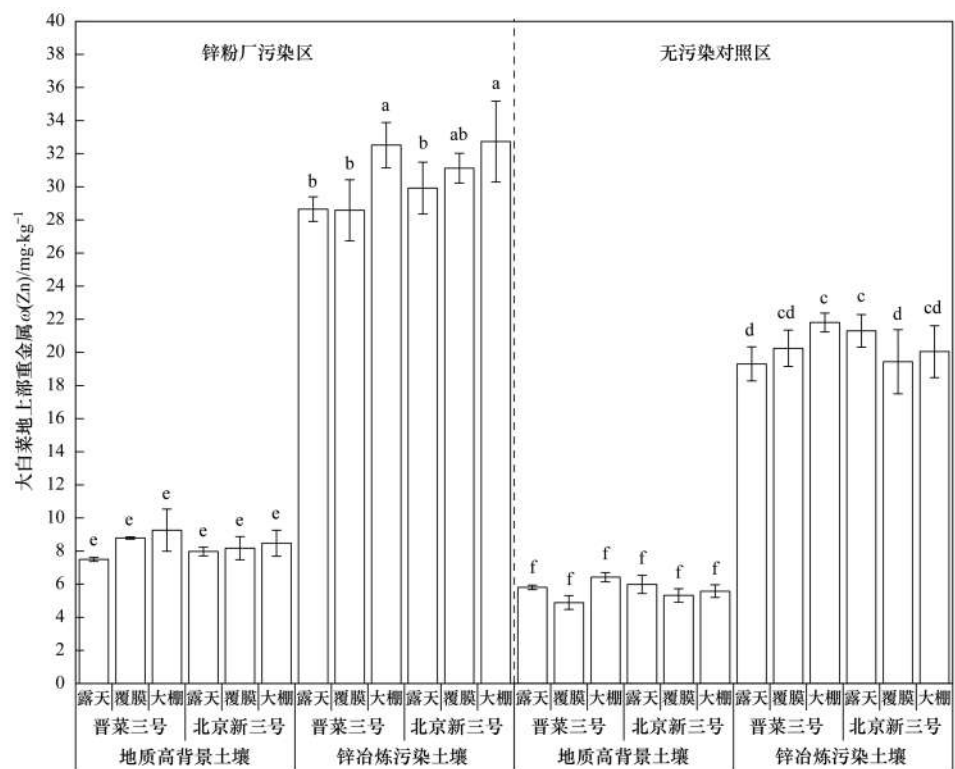
Table 3 Enrichment and transport coefficients of heavy metal Pb in Chinese cabbage under different treatments

区域	土壤类型	白菜品种	种植方式	BCF _{根-土壤}	BCF _{地上部-土壤}	TF _{叶脉-根}	TF _{叶-叶脉}	TF _{地上部-根}
锌粉厂污染区	地质高背景土壤	晋菜三号	露天	0.09 ± 0.00ef	0.05 ± 0.00ab	0.50 ± 0.03b	2.46 ± 0.08a	0.72 ± 0.04c
			覆膜	0.08 ± 0.00f	0.05 ± 0.01b	0.47 ± 0.01b	2.11 ± 0.1bc	0.66 ± 0.06d
			大棚	0.07 ± 0.00fg	0.03 ± 0.00de	0.28 ± 0.01de	2.05 ± 0.1bc	0.39 ± 0.05gh
		北京新三号	露天	0.09 ± 0.01f	0.06 ± 0.01a	0.74 ± 0.01a	2.32 ± 0.08ab	0.81 ± 0.08b
			覆膜	0.07 ± 0.01fg	0.04 ± 0.00cd	0.51 ± 0.02b	2.09 ± 0.11bc	0.54 ± 0.01f
			大棚	0.06 ± 0.00g	0.04 ± 0.00cd	0.32 ± 0.06d	1.36 ± 0.03e	0.42 ± 0.05g
	锌冶炼污染土壤	晋菜三号	露天	0.17 ± 0.02bc	0.06 ± 0.00a	0.40 ± 0.02c	2.23 ± 0.11b	1.02 ± 0.04a
			覆膜	0.16 ± 0.00c	0.05 ± 0.01ab	0.22 ± 0.01ef	2.10 ± 0.07bc	0.51 ± 0.02f
			大棚	0.11 ± 0.01e	0.03 ± 0.00d	0.25 ± 0.03e	1.69 ± 0.03d	0.41 ± 0.03g
		北京新三号	露天	0.21 ± 0.01ab	0.05 ± 0.01ab	0.17 ± 0.00f	1.87 ± 0.13cd	0.60 ± 0.01e
			覆膜	0.19 ± 0.01bc	0.04 ± 0.00bc	0.32 ± 0.01d	1.33 ± 0.01e	0.35 ± 0.02h
			大棚	0.14 ± 0.00d	0.04 ± 0.00cd	0.22 ± 0.01ef	1.28 ± 0.06e	0.26 ± 0.03j
无污染对照区	地质高背景土壤	晋菜三号	露天	0.05 ± 0.00g	0.03 ± 0.00e	0.23 ± 0.01e	1.16 ± 0.11e	0.24 ± 0.02jk
			覆膜	0.05 ± 0.00g	0.03 ± 0.00de	0.47 ± 0.01b	1.23 ± 0.05e	0.33 ± 0.01h
			大棚	0.06 ± 0.00g	0.02 ± 0.00e	0.30 ± 0.01de	1.30 ± 0.06e	0.37 ± 0.04gh
		北京新三号	露天	0.06 ± 0.01g	0.03 ± 0.00de	0.28 ± 0.01de	1.34 ± 0.07e	0.32 ± 0.01h
			覆膜	0.06 ± 0.01g	0.03 ± 0.00e	0.28 ± 0.01de	1.23 ± 0.04e	0.33 ± 0.02h
			大棚	0.04 ± 0.00g	0.03 ± 0.00cd	0.28 ± 0.01de	0.66 ± 0.04f	0.20 ± 0.01k
	锌冶炼污染土壤	晋菜三号	露天	0.13 ± 0.00de	0.03 ± 0.01de	0.21 ± 0.02ef	1.15 ± 0.06e	0.22 ± 0.02jk
			覆膜	0.15 ± 0.01cd	0.03 ± 0.00de	0.17 ± 0.01f	1.25 ± 0.05e	0.17 ± 0.00kl
			大棚	0.14 ± 0.01d	0.04 ± 0.00c	0.22 ± 0.00ef	1.19 ± 0.08e	0.25 ± 0.02jk
		北京新三号	露天	0.21 ± 0.01a	0.04 ± 0.00c	0.11 ± 0.00g	1.93 ± 0.09c	0.16 ± 0.02kl
			覆膜	0.22 ± 0.01a	0.04 ± 0.00cd	0.22 ± 0.02ef	1.55 ± 0.08de	0.18 ± 0.00kl
			大棚	0.21 ± 0.01a	0.03 ± 0.00de	0.15 ± 0.01fg	1.61 ± 0.08d	0.14 ± 0.01l

2.3.2 大白菜对 Zn 的富集转运规律

大白菜对 Zn BCF_{根-土壤} 如表 4, 锌粉厂污染区和

无污染对照区大白菜 Zn BCF_{根-土壤} 分别为 0.21 ~ 1.00 和 0.18 ~ 1.42, 锌冶炼污染土壤大白菜 Zn



不同小写字母表示不同处理大白菜地上部重金属 Zn 含量差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 不同处理大白菜地上部重金属 Zn 含量

Fig. 3 Concentration of heavy metal Zn in shoot of Chinese cabbage under different treatments

表 4 不同处理大白菜重金属 Zn 富集系数和转运系数

Table 4 Enrichment and transport coefficients of heavy metal Zn in Chinese cabbage under different treatments

区域	土壤类型	白菜品种	种植方式	BCF _{根-土壤}	BCF _{地上部-土壤}	TF _{叶脉-根}	TF _{叶-叶脉}	TF _{地上部-根}
锌粉厂污染区	地质高背景土壤	晋菜三号	露天	0.24 ± 0.00f	0.20 ± 0.00g	0.71 ± 0.02e	1.44 ± 0.04c	0.87 ± 0.02de
			覆膜	0.23 ± 0.01f	0.25 ± 0.00g	1.07 ± 0.04bc	1.18 ± 0.07d	1.12 ± 0.02cd
			大棚	0.21 ± 0.01f	0.26 ± 0.05g	1.12 ± 0.08bc	1.35 ± 0.11cd	1.38 ± 0.07b
		北京新三号	露天	0.21 ± 0.01f	0.22 ± 0.01g	0.77 ± 0.01de	1.06 ± 0.05d	1.07 ± 0.08cd
			覆膜	0.23 ± 0.01f	0.18 ± 0.01g	0.86 ± 0.01d	1.39 ± 0.04cd	0.95 ± 0.12de
			大棚	0.21 ± 0.01f	0.23 ± 0.03g	1.01 ± 0.05c	1.45 ± 0.08c	1.19 ± 0.05c
	锌冶炼污染土壤	晋菜三号	露天	0.84 ± 0.03d	0.81 ± 0.05e	0.56 ± 0.07f	1.38 ± 0.05cd	0.89 ± 0.10de
			覆膜	0.80 ± 0.05de	0.78 ± 0.05e	0.80 ± 0.01de	1.53 ± 0.06bc	1.02 ± 0.06cd
			大棚	0.86 ± 0.03d	0.77 ± 0.02e	0.87 ± 0.04d	1.57 ± 0.02b	1.11 ± 0.08cd
		北京新三号	露天	0.97 ± 0.06c	1.20 ± 0.08c	0.98 ± 0.09cd	1.22 ± 0.01d	1.12 ± 0.10cd
			覆膜	0.90 ± 0.04cd	1.09 ± 0.09d	1.01 ± 0.06c	1.37 ± 0.05cd	1.22 ± 0.13bc
			大棚	1.00 ± 0.03bc	1.19 ± 0.09cd	1.07 ± 0.05bc	1.40 ± 0.06cd	1.26 ± 0.07bc
无污染对照区	地质高背景土壤	晋菜三号	露天	0.25 ± 0.00f	0.23 ± 0.02g	0.68 ± 0.03ef	1.33 ± 0.08cd	0.79 ± 0.02e
			覆膜	0.20 ± 0.01f	0.18 ± 0.01g	0.83 ± 0.05de	1.38 ± 0.06cd	1.02 ± 0.1cd
			大棚	0.21 ± 0.01f	0.42 ± 0.15f	1.21 ± 0.07ab	1.49 ± 0.02c	2.33 ± 0.08a
		北京新三号	露天	0.19 ± 0.00f	0.23 ± 0.02g	1.01 ± 0.03c	1.78 ± 0.05a	1.08 ± 0.06cd
			覆膜	0.18 ± 0.01f	0.20 ± 0.02g	0.76 ± 0.05de	1.43 ± 0.06c	1.07 ± 0.04cd
			大棚	0.21 ± 0.01f	0.21 ± 0.01g	0.82 ± 0.01de	1.50 ± 0.10c	0.97 ± 0.08d
	锌冶炼污染土壤	晋菜三号	露天	0.68 ± 0.03e	1.06 ± 0.07d	1.34 ± 0.00ab	1.07 ± 0.09d	1.28 ± 0.36bc
			覆膜	0.73 ± 0.05e	1.33 ± 0.08b	1.13 ± 0.08bc	1.33 ± 0.08cd	1.17 ± 0.09c
			大棚	0.94 ± 0.05cd	1.51 ± 0.07a	1.19 ± 0.04b	1.62 ± 0.06a	1.37 ± 0.06b
		北京新三号	露天	1.33 ± 0.05a	1.48 ± 0.07a	0.43 ± 0.02f	0.86 ± 0.09e	1.08 ± 0.11cd
			覆膜	1.07 ± 0.07b	1.21 ± 0.08bc	1.01 ± 0.04c	1.13 ± 0.05d	1.12 ± 0.04cd
			大棚	1.42 ± 0.05a	1.41 ± 0.17ab	1.03 ± 0.05c	1.17 ± 0.08d	1.05 ± 0.09cd

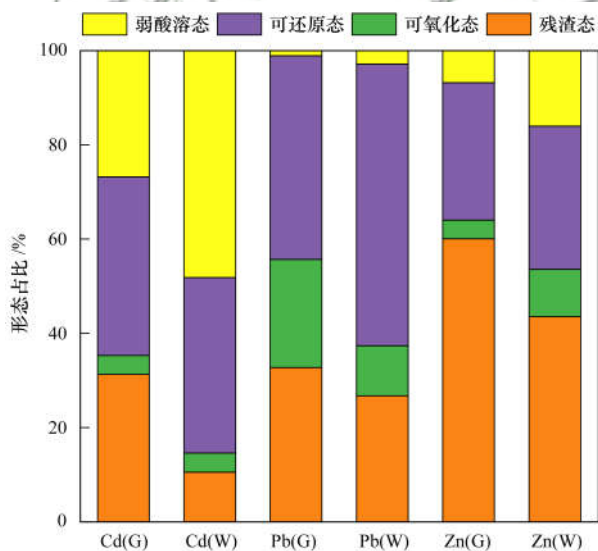
BCF_{根-土壤} 显著高于地质高背景土壤 ($P < 0.05$), 地质高背景土壤种植的大白菜 Zn BCF_{根-土壤} 低于 0.25, 各处理未达显著性差异. 大白菜对 Zn BCF_{地上部-土壤} 锌粉厂污染区和无污染对照区分别为 0.18 ~ 1.20 和

0.18 ~ 1.51, 锌冶炼污染土壤大白菜对 Zn $BCF_{\text{地上部-土壤}}$ 显著高于地质高背景土壤 ($P < 0.05$).

锌粉厂污染区和无污染对照区大白菜对 Zn $TF_{\text{叶脉-根}}$ 分别为 0.56 ~ 1.12 和 0.43 ~ 1.34, Zn $TF_{\text{叶-叶脉}}$ 分别为 1.06 ~ 1.57 和 0.86 ~ 1.78, Zn $TF_{\text{地上部-根}}$ 分别为 0.87 ~ 1.38 和 0.79 ~ 2.23. 不同处理大白菜 Zn 富集系数和转运系数整体呈现出 $BCF_{\text{根-土壤}}$ 和 $BCF_{\text{地上部-土壤}}$ 都远小于 $TF_{\text{地上部-根}}$ 、 $TF_{\text{叶脉-根}}$ 和 $TF_{\text{叶-叶脉}}$.

2.4 土壤重金属 Cd、Pb 和 Zn 形态分级

地质高背景土壤和锌冶炼污染土壤 Cd、Pb 和 Zn 各形态占比如图 4 所示,地质高背景土壤 Cd 弱酸溶态、可氧化态、可还原态和残渣态的占比分别是 27%、38%、4% 和 31%, 锌冶炼污染土壤的分别为 48%、37%、4% 和 11%. 地质高背景土壤 Pb 弱酸溶态、可氧化态、可还原态和残渣态的占比分别是 1%、43%、23% 和 33%, 锌冶炼污染土壤的分别为 3%、59%、11% 和 27%. 地质高背景土壤 Zn 弱酸溶态、可氧化态、可还原态和残渣态的占比分别是 7%、29%、4% 和 60%, 锌冶炼污染土壤的分别为 16%、30%、10% 和 44%. 锌冶炼污染土壤 Cd、Pb 和 Zn 弱酸溶态占比高于地质高背景土壤,残渣态均低于地质高背景土壤,土壤 Pb 弱酸溶态占比最低. 地质高背景土壤和锌冶炼污染土壤 Pb 的活性无显著差异,但 Cd 和 Zn 活性显著增高.



G 表示地质高背景土壤, W 表示锌冶炼污染土壤

图 4 不同土壤重金属 Cd、Pb 和 Zn 形态分布

Fig. 4 Speciation distribution of Cd, Pb, and Zn in different soils

3 讨论

3.1 土壤重金属活性对大白菜吸收的影响

作物富集重金属受土壤中赋存形态的影响^[12], 其中有效态的占比是一重要因素^[13]. 土壤理化性

质、重金属污染程度和重金属形态等都是影响大白菜吸收重金属的重要因素^[14~16], 而 pH、有机质和土壤重金属全量等是影响土壤重金属有效态的重要因素^[17~19], 本研究供试土壤 pH、有机质和重金属全量基本一致, 但锌冶炼污染土壤 Cd 和 Zn 弱酸溶态显著高于地质高背景土壤, 残渣态则低于地质高背景土壤. 可见, 锌冶炼大气沉降的重金属提高了土壤重金属活性^[20], 从而导致锌冶炼污染土壤上大白菜地上部 Cd 和 Zn 含量显著高于地质高背景土壤, 这与其他研究结果相似^[21]. 锌冶炼大气沉降重金属活性高的原因可能是其主要以弱酸溶态存在, 沉降于土壤表层, 既增加了表层重金属总量, 也提高了其活性. 但随着沉降堆积时间的增加, 重金属可能会逐渐钝化而活性降低, 下一步可对土壤中大气沉降重金属的动态环境行为进行深入研究, 探明不同重金属老化时间和钝化的速率. 不同大白菜品种吸收土壤重金属的能力不同^[22], 本研究供试的高低积累品种在相同土壤上没有表现出显著差异, 可能是供试土壤受重金属污染程度严重, Cd、Pb 和 Zn 含量超过土壤环境质量标准《农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) 中的筛选值, 尤其是 Cd. 在 Cd、Pb 和 Zn 含量严重超标的地质高背景土壤上种植大白菜, Cd 和 Pb 未超过《食品安全国家标准 食品中污染物限值》(GB 2762-2017), 地质高背景区土壤重金属总量高但活性低, 可实现大白菜安全生产.

3.2 金属冶炼大气沉降对大白菜重金属累积的贡献

根不是大白菜吸收重金属的唯一器官^[5], 叶片因其面积大、生长速率快和蒸腾作用强等原因是吸收重金属的重要器官^[23,24]. 有研究表明大气沉降是烟叶 Pb 的重要来源^[25,26], 也有研究表明蔬菜中的 Cd 主要来源于重金属污染土壤, Pb 则来源于大气沉降和重金属污染土壤^[27], 以上研究都表明除根系吸收外大气沉降是重金属进入大白菜的重要途径, 可通过叶片气孔进行吸收. 大棚措施能避免大白菜通过大气沉降途径吸收 Pb^[28,29]. 气孔主要分布在叶片背面, 白菜露天种植时, 在雨水冲击作用下, 土壤飞溅到叶片背面, 可增加重金属的吸附和吸收, 因此覆膜处理也能减少叶菜类重金属的累积, 这一点在本研究中也得到了验证. 由于不均匀的大气沉降^[30]、扬尘和雨水冲击土壤, 在本试验中露天处理重复间相对相差较覆膜和大棚处理高.

在锌冶炼区, 蔬菜中的重金属有土壤中的根系吸收和大气中的叶片吸收的双重来源^[31]. 有研究表明大气沉降在土壤中新沉积的铜和铅仅占土壤铜和

铅总量的 0.34%~8.7% 和 0.07%~0.29%,但在水稻组织中的贡献率分别为 30%~84% 和 6%~41%^[32],这表明大气沉降对土壤重金属的贡献很低但是沉降的重金属活性很高.大气沉降对叶菜类重金属累积的贡献率研究结果差异较大,叶菜可食部 Pb 累积平均贡献率土壤为 63.5%,大气沉降为 36.5%^[28];另有研究表明大气沉降对大白菜吸收 Cd 和 Pb 的贡献率高达 93.36% 和 78.28%^[33];Liu 等^[20]研究表明,大气新沉降重金属对小白菜可食部位重金属 Cu、Cd 和 Pb 的积累贡献率达 17%~87%、19%~64% 和 43%~84%. 本研究中大气沉降 Cd、Pb 和 Zn 对大白菜累积的贡献率,分别为 2%~52%、21%~63% 和 21%~73%. Cd、Pb 和 Zn 对大白菜累积的贡献率大小为:Zn>Pb>Cd,这与 Cd、Pb 和 Zn 大气沉降量的大小相一致,这可能是导致这一结论的原因,此外,试验地离沉降中心的距离也可能是导致这一结论的原因.

3.3 大白菜重金属 Cd、Pb 和 Zn 累积途径的差异

富集系数可以表征蔬菜从土壤中吸收重金属的能力^[9],转运系数反映了植物不同部位和器官之间重金属的转运情况^[12],可用于判定农作物重金属吸收途径和各器官转移能力的大小. 本研究与余志等^[34]研究的结果一致,大白菜对不同重金属富集系数大小为: Cd>Zn>Pb,这表明大白菜根系吸收 Cd 和 Zn 的能力远强于 Pb,对 Pb 富集能力极弱^[35]. 作物吸收土壤重金属与土壤理化性质(pH 和有机质等)、重金属的赋存形态和重金属含量密切相关^[16,36],锌冶炼污染土壤上大白菜重金属富集系数显著高于地质高背景土壤,是锌冶炼污染土壤中有有效态重金属高于地质高背景土壤导致的^[37]. 设施蔬菜相比露天种植会促进大白菜对金属 Cd 的吸收,大棚处理大白菜地上部 Cd 高于露天种植^[38,39],因而富集系数和转运系数较露天和覆膜处理高,与本研究中大棚处理 Cd 都高于露天和覆膜处理的结论一致. 可能的原因:一是大棚种植条件下大白菜对 Cd 的吸收和转运能力高于露天和覆膜;二是大气沉降中的 Cd 大多以细颗粒物存在,可悬浮于大棚中而被白菜叶片吸附,且不被雨水冲刷,这两种影响因素是否成立还有待于进一步研究. 不同重金属在大白菜体内的迁移能力不同,Cd 和 Zn 在植物体内移动性强^[40],而 Pb 在植物体内的移动性弱,因为植物吸收 Pb 仅有极少部分会在植物体内转运,绝大部分富集在吸收的器官中^[41],大白菜吸收 Pb 是叶片气孔吸收^[42,43]. 本研究中大白菜重金属 TF_{叶脉-叶} Cd、Zn 和 Pb 差异不大,也间接说明了大白菜吸收 Cd 和 Zn 的途径是根系吸收而 Pb 则是通过叶片吸收. 综

上大白菜主要是从土壤中吸收 Cd 和 Zn,而大气沉降是大白菜吸收 Pb 的重要来源.

4 结论

(1)在相同浓度下,锌冶炼外源污染叠加土壤 Cd 和 Zn 活性显著高于地质高背景土壤,污染土壤种植的大白菜 Cd 和 Zn 的含量、富集系数和转运系数都远大于地质高背景土壤,Cd 和 Zn 累积途径主要是根系吸收.

(2)不同种植方式下大白菜 Pb 含量表现为露天>覆膜>大棚,且锌粉厂污染区大于无污染对照区,除根系吸收外,大气沉降是叶菜类蔬菜重要的累积途径.

(3)重金属地质高背景土壤上种植叶菜类作物,Cd 和 Pb 基本达到国家食品安全限值标准要求,要注意控制外源污染叠加土壤上种植叶菜类作物的 Cd、Zn 暴露风险,同时,采用大棚种植能有效降低 Pb 的积累.

参考文献:

- [1] 刘鸿雁,涂宇,顾小凤,等. 地球化学高背景农田土壤重金属镉的累积效应及环境影响[J]. 山地农业生物学报, 2018, 37(5): 1-5.
Liu H Y, Tu Y, Gu X F, et al. Accumulative effect and environmental impact of cadmium in farmland soil with high background of geochemistry[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2018, 37(5): 1-5.
- [2] 刘爽. 地质高背景区重金属污染农田质量评价及分区分管研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2020.
- [3] 王雪雯,刘鸿雁,顾小凤,等. 地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2094-2103.
Wang X W, Liu H Y, Gu X F, et al. Distribution characteristics of heavy metals in soils affected by different land use types in a superimposed pollution area with high geological background[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 2094-2103.
- [4] 陈瑛,李廷强,杨肖娥,等. 不同品种小白菜对镉的吸收积累差异[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 736-740.
Chen Y, Li T Q, Yang X E, et al. Differences in cadmium absorption and accumulation of brassica varieties on cadmium-polluted soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(3): 736-740.
- [5] Gan Y D, Wang L H, Yang G Q, et al. Multiple factors impact the contents of heavy metals in vegetables in high natural background area of China[J]. Chemosphere, 2017, 184: 1388-1395.
- [6] 朱臻,杨相东,徐章倩,等. 农作物叶片对大气沉降重金属的吸收转运和积累机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(2): 332-345.
Zhu Z, Yang X D, Xu Z Q, et al. Foliar uptake, translocation and accumulation of heavy metals from atmospheric deposition in crops[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(2): 332-345.
- [7] Yu E J, Liu H Y, Tu Y, et al. Superposition effects of zinc smelting atmospheric deposition on soil heavy metal pollution under geochemical anomaly[J]. Frontiers in Environmental

- Science, 2022, doi: 10.3389/fenvs.2022.777894.
- [8] 陈晓燕. 不同品种白菜对黄壤镉的富集特征及其安全生产阈值研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- [9] 茹淑华, 张国印, 苏德纯, 等. 河北省白菜主要栽培品种吸收累积重金属镉的特征和质量安全性研究[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(14): 282-287.
- Ru S H, Zhang G Y, Su D C, *et al.* Studies on the uptake and accumulation of cadmium and quality safety about Hebei major Chinese cabbages cultivars [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, **26**(14): 282-287.
- [10] 杨寒雯, 刘秀明, 刘方, 等. 喀斯特高镉地质背景区水稻镉的富集、转运特征与机理[J]. 地球与环境, 2021, **49**(1): 18-24.
- Yang H W, Liu X M, Liu F, *et al.* Translocation and accumulation of cadmium in rice in a Karst area with high geochemical background and its mechanism [J]. Earth and Environment, 2021, **49**(1): 18-24.
- [11] 付天岭, 秦冉, 龚思同, 等. 喷施叶面阻隔剂对马铃薯 Cd、Cu、Ni、Zn 富集转运的影响[J]. 安全与环境学报, 2022, **22**(4): 2217-2230.
- Fu T L, Qin R, Gong S T, *et al.* Effect of foliar barrier agent on the enrichment and transport of Cd, Cu, Ni, Zn in potatoes [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, **22**(4): 2217-2230.
- [12] 李杰, 战明国, 钟晓宇, 等. 广西典型岩溶地区重金属在土壤-农作物系统中累积特征及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(2): 597-606.
- Li J, Zhan M G, Zhong X Y, *et al.* Distribution and accumulation of heavy metals in soil-crop systems from a typical carbonate rocks area in Guangxi [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(2): 597-606.
- [13] 王京文, 谢国雄, 章明奎. 大气沉降对萝卜地上和地下部分铅镉汞砷积累的影响[J]. 土壤通报, 2018, **49**(1): 184-190.
- Wang J W, Xie G X, Zhang M K Effects of atmospheric deposition on the accumulation of lead, cadmium, mercury and arsenic in aboveground and underground parts of radish [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, **49**(1): 184-190.
- [14] 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 等. 冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1482-1490.
- Wang Y W, Rui Y K, Li Z Y, *et al.* Characteristics of heavy metal absorption by winter wheat and its quantitative relationship with influencing factors [J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1482-1490.
- [15] 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 等. 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 975-984.
- Huang T Z, Yi S W, Chen B B, *et al.* Pollution properties and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils and crops around a typical manganese mining area [J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 975-984.
- [16] 周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 等. 雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 2003-2015.
- Zhou Y L, Yang Z B, Wang Q L, *et al.* Potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in soil-crop system in Xiong'an new district [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 2003-2015.
- [17] 孙斌, 魏志敏, 张力浩, 等. 地质高背景土壤重金属赋存特征及微生物群落结构差异[J]. 土壤学报, 2021, **58**(5): 1246-1255.
- Sun B, Wei Z M, Zhang L H, *et al.* Distribution of heavy metals and microbial community structure in soils high in geological background value [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, **58**(5): 1246-1255.
- [18] 陈红燕, 袁旭音, 李天元, 等. 不同污染源对水稻土及水稻籽粒的重金属污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(4): 684-690.
- Chen H Y, Yuan X Y, Li T Y, *et al.* Heavy metal pollution in paddy soil and rice grains from different pollution sources [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(4): 684-690.
- [19] 韦炳干, 虞江萍, 曹志强, 等. 唐山市设施菜地土壤重金属累积与有效态含量的影响特征[J]. 环境化学, 2021, **40**(9): 2649-2657.
- Wei B G, Yu J P, Cao Z Q, *et al.* Factors impact on accumulation and availability of heavy metals in greenhouse vegetable soil from Tangshan City [J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(9): 2649-2657.
- [20] Liu H L, Zhou J, Li M, *et al.* Dynamic behaviors of newly deposited atmospheric heavy metals in the soil-pak choi system [J]. Environmental Science & Technology, 2022, **56**(17): 12734-12744.
- [21] 唐豆豆, 袁旭音, 汪宜敏, 等. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(1): 18-26.
- Tang D D, Yuan X Y, Wang Y M, *et al.* Enrichment characteristics and risk prediction of heavy metals for rice grains growing in paddy soils with a high geological background [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(1): 18-26.
- [22] 柴冠群, 杨娇娇, 陈晓燕, 等. 不同品种白菜对 Cd 的吸收富集特征与安全限值研究[J]. 西南农业学报, 2022, **35**(3): 617-622.
- Chai G Q, Yang J J, Chen X Y, *et al.* Enrichment characteristics and safety limits of Cd absorption by different varieties of cabbage [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, **35**(3): 617-622.
- [23] 刘鹏, 胡文友, 黄标, 等. 大气沉降对土壤和作物中重金属富集的影响及其研究进展[J]. 土壤学报, 2019, **56**(5): 1048-1059.
- Liu P, Hu W Y, Huang B, *et al.* Advancement in researches on effect of atmospheric deposition on heavy metals accumulation in soils and crops [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, **56**(5): 1048-1059.
- [24] 涂宇, 刘鸿雁, 朱恒亮, 等. 贵阳市典型污染区蔬菜和水稻重金属富集特征及质量评价[J]. 山地农业生物学报, 2020, **39**(1): 1-8.
- Tu Y, Liu H Y, Zhu H L, *et al.* Enrichment characteristics and quality assessment of heavy metals in vegetable and rice in typically polluted areas of Guiyang [J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2020, **39**(1): 1-8.
- [25] 戴华鑫, 张仕祥, 王爱国, 等. 大气沉降对烟叶重金属含量的影响及铅同位素示踪[J]. 中国烟草学报, 2018, **24**(1): 14-20.
- Dai H X, Zhang S X, Wang A G, *et al.* Effects of atmospheric deposition on heavy metal contents in flue-cured tobacco leaves, and lead isotope tracing [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2018, **24**(1): 14-20.
- [26] 翟振, 张艳玲, 杨欣, 等. 大气沉降对烟叶重金属含量的影响及溯源分析[J]. 烟草科技, 2019, **52**(6): 9-15.
- Zhai Z, Zhang Y L, Yang X, *et al.* Effects of atmospheric deposition on heavy metal contents in tobacco leaves and traceability analysis [J]. Tobacco Science & Technology, 2019,

- 52(6): 9-15.
- [27] 曹柳, 孟晓飞, 杨俊兴, 等. 河南省大气重金属沉降高风险区蔬菜重金属含量及健康风险评估[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(12): 2170-2183.
- Cao L, Meng X F, Yang J X, *et al.* Heavy metal concentrations and health risk assessment of vegetables in the high-risk area of atmospheric deposition in Henan province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(12): 2170-2183.
- [28] 董俊文, 高培培, 孙洪欣, 等. 设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 481-489.
- Dong J W, Gao P P, Sun H X, *et al.* Characteristics and health risk assessment of cadmium, lead, and arsenic accumulation in leafy vegetables planted in a greenhouse[J]. Environmental Science, 2022, 43(1): 481-489.
- [29] 查燕, 汤婕, 牛天新. 叶菜类蔬菜对重金属富集特征研究[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(3): 773-782.
- Zha Y, Tang J, Niu T X. Study on enrichment characteristics of heavy metals in leafy vegetables[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(3): 773-782.
- [30] Qiao Y F, Hou H, Chen L G, *et al.* Comparison of Pb and Cd in wheat grains under air-soil-wheat system near lead-zinc smelters and total suspended particulate introduced modeling attempt[J]. Science of the Total Environment, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156290.
- [31] Li X Y, Li Z G, Lin C J, *et al.* Health risks of heavy metal exposure through vegetable consumption near a large-scale Pb/Zn smelter in central China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 161: 99-110.
- [32] Zhou J, Du B Y, Liu H L, *et al.* The bioavailability and contribution of the newly deposited heavy metals (copper and lead) from atmosphere to rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121285.
- [33] 孙洪欣, 赵纪舒, 付洁, 等. 大气颗粒物对水芹和白菜可食部位铅镉砷累积的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(9): 3568-3575.
- Sun H X, Zhao J S, Fu J, *et al.* Effects of atmospheric particulate matters on accumulation of Pb, Cd, As in edible parts of cress and cabbage[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(9): 3568-3575.
- [34] 余志, 陈凤, 张军方, 等. 锌冶炼区菜地土壤和蔬菜重金属污染状况及风险评价[J]. 中国环境科学, 2019, 39(5): 2086-2094.
- Yu Z, Chen F, Zhang J F, *et al.* Contamination and risk of heavy metals in soils and vegetables from zinc smelting area[J]. China Environmental Science, 2019, 39(5): 2086-2094.
- [35] 穆德苗, 孙约兵. 西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 965-974.
- Mu D M, Sun Y B. Safety production threshold and land quality classification of vegetable Pb in high geological background area of southwest China[J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 965-974.
- [36] 李想, 龙振华, 朱彦彦, 等. 东北设施叶菜类蔬菜镉铅污染安全生产分区研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2239-2248.
- Li X, Long Z H, Zhu Y Y, *et al.* Zoning of cadmium and lead pollution for the safe production of facility leafy vegetables in northeast China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(10): 2239-2248.
- [37] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 449-459.
- Ma H H, Peng M, Liu F, *et al.* Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China[J]. Environmental Science, 2020, 41(1): 449-459.
- [38] 陈永, 黄标, 胡文友, 等. 设施蔬菜生产系统重金属累积特征及生态效应[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 693-702.
- Chen Y, Huang B, Hu W Y, *et al.* Heavy metals accumulation in greenhouse vegetable production systems and its ecological effects[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(4): 693-702.
- [39] 柴冠群, 杨娇娇, 范成五, 等. 镉高地质背景区设施栽培对土壤与蔬菜镉累积的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(6): 1489-1495.
- Chai G Q, Yang J J, Fan C W, *et al.* Impact of greenhouse cultivation on the accumulation of cadmium in soils and vegetables from an area with a high geochemical background of cadmium[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(6): 1489-1495.
- [40] 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 等. 西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2877-2884.
- Liu Y Z, Xiao T F, Xiong Y, *et al.* Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical background of cadmium, southwestern China[J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2877-2884.
- [41] 任超, 肖建辉, 李竞天, 等. 不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性[J]. 环境科学, 2022, 43(8): 4232-4252.
- Ren C, Xiao J H, Li J T, *et al.* Accumulation and transport characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in different maize varieties[J]. Environmental Science, 2022, 43(8): 4232-4252.
- [42] 程珂, 杨新萍, 赵方杰. 大气沉降及土壤扬尘对天津城郊蔬菜重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(10): 1837-1845.
- Cheng K, Yang X P, Zhao F J. Effects of atmospheric and dust deposition on content of heavy metals in vegetables in suburbs of Tianjin[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(10): 1837-1845.
- [43] Xiong T T, Leveque T, Austruy A, *et al.* Foliar uptake and metal(loid) bioaccessibility in vegetables exposed to particulate matter[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2014, 36(5): 897-909.

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)