

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铎, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期
Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析	刘春景, 吕建毅, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳 (3375)
基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟	庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏 (3386)
基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨	王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰 (3396)
厦门港大气 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平 (3404)
南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征	张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇 (3416)
晋中盆地主要城市冬季 PM _{2.5} 传输特征分析	王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣 (3423)
鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析	孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳峰 (3439)
济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP	王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋 (3451)
长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析	罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧 (3463)
2019 年 7 月石家庄市 O ₃ 生成敏感性控制策略解析	朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇 (3473)
华北平原 AOD 时空演化与影响因素	郭霖, 孟飞, 马明亮 (3483)
基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系	郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康 (3494)
基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征	王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威 (3508)
近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析	陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏 (3523)
高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素	杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强 (3532)
三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性	纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽 (3543)
典型喀斯特城市湖泊溶解性有机质成分特征及来源解析	倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康 (3552)
骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估	黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕 (3562)
千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素	王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军 (3575)
泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征	张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮 (3587)
降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响	周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕 (3597)
典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价	储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏 (3608)
筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响	王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜 (3623)
天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识	刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德 (3635)
地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制	彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪 (3645)
北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析	门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵 (3656)
微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响	胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明 (3664)
不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响	任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟 (3672)
微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd ²⁺ 吸附机制	马文艳, 裴鹏刚, 高歌, 孙约兵 (3682)
不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素	连宁海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水 (3692)
Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能	印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨根, 何世颖, 薛利红 (3699)
一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析	李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送 (3708)
丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性	高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程阳阳, 彭永臻 (3718)
2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测	徐勇, 郑志威, 郭振东, 宴世卿, 黄雯婷 (3730)
近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估	陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明 (3741)
土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响	何宇, 盛茂根, 王轲, 王霖娇 (3752)
长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价	张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁 (3763)
煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性	尚誉, 桑楠 (3773)
燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价	李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚 (3781)
广州市南沙区第四剖面镉富集特征及生物有效性	王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏 (3789)
黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准	徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀 (3799)
土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测	张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南 (3811)
添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响	鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利 (3825)
不同稻作系统土壤的 CH ₄ 产生潜力与产生途径	沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华 (3835)
东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程	马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮 (3844)
同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (3854)
岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较	肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛 (3865)
紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异响应	王智慧, 蒋先军 (3876)
有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响	肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全 (3884)
《环境科学》征订启事 (3403) 《环境科学》征稿简则 (3462) 信息 (3493, 3655, 3834)	

煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性

尚誉, 桑楠*

(山西大学环境与资源学院, 太原 030006)

摘要: 煤矸石在自然堆积过程中会通过风化和雨淋条件释放重金属等污染物质, 从而对周边土壤环境造成严重的生态危害. 研究了矸石山周边土壤中重金属含量, 探讨了土壤样本暴露诱导的植物毒性效应, 以期全面评估矸石堆积区周边土壤的生态风险. 结果表明, 煤矸石堆积区周边土壤中 Cd、Pb 和 Zn 的含量平均值均超过山西省土壤元素背景值, 并且随着距矸石山的距离越远, 土壤重金属含量呈现先上升后下降的趋势; 富集因子结果同样显示周边土壤中 Cd、Pb 和 Zn 元素污染较严重. 暴露于距矸石山不同距离的土壤后, 大麦幼苗生长受抑, 部分土壤诱导叶绿素含量降低和丙二醛 (MDA) 含量升高, 超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和谷胱甘肽 (GSH) 活性上升, 过氧化氢酶 (CAT) 活性显著下降, 并且造成根尖细胞中有丝分裂指数 (MI) 降低和微核率 (MN) 显著上升. 皮尔森相关系数表明, 矸石堆积区周边土壤中 Cr、As 和 Zn 元素分别与大麦芽重、根重和微核率之间呈显著的正相关, Cu 和 Pb 元素分别与叶绿素和微核率之间呈显著的负相关.

关键词: 煤矸石; 重金属污染; 大麦; 植物毒性; 氧化应激

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2022)07-3773-08 DOI: 10.13227/j.hjks.202106016

Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area

SHANG Yu, SANG Nan*

(College of Environment and Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Coal gangue releases heavy metals and other pollutants through weathering and rain conditions during the natural accumulation process, which causes serious ecological risks to the surrounding soil environment. This study aimed to analyze the content of heavy metals in the soil around a coal gangue dump and to explore the phytotoxic effects induced by the exposure of soil samples to comprehensively assess the ecological risks of the soil around the coal gangue accumulation area. The results showed that the average contents of Cd, Pb, and Zn in the soil around the coal gangue accumulation area exceeded the background values of soil elements in Shanxi Province, and the content of heavy metals in the soil first increased and then decreased with the distance from the coal gangue dump. The enrichment factor results also showed that the pollution of Cd, Pb, and Zn in the soil was serious. The growth of barley seedlings was inhibited after exposure to the soil at different distances from the gangue dump, and some soils could induce the decrease in chlorophyll and the increase in MDA content; the increase in SOD, POD, and GSH activities; the significant decrease in CAT activities; and the decrease in mitotic index (MI) and significant increase in micronucleus rate (MN) in root tip cells. The Pearson correlation coefficient showed that Cr, As, and Zn were significantly positively correlated with the shoot weight, root weight, and micronucleus rate of barley, whereas Cu and Pb were significantly negatively correlated with the chlorophyll and micronucleus rate, respectively.

Key words: coal gangue; heavy metal pollution; barley; phytotoxicity; oxidative stress

煤炭的开采和洗选过程会产生大量的煤矸石固体废弃物, 约占原煤总产量的 10%~15%, 成为了矿区污染的主要来源^[1]. 煤矸石的大量排放及露天堆放不仅占据了大量的土地资源, 而且在自然堆积过程中会通过风化和雨水淋溶释放重金属等有毒有害物质, 其可随地表径流迁移至周边土壤或水体环境中, 从而对生态环境和人群健康产生严重威胁^[2,3].

目前关于煤矸石堆积区周边土壤的重金属污染已有较多研究. 任珊珊等^[4]的研究测定了山西霍州某煤矸石山周边土壤中重金属元素 (Pb、Zn、Cr 和 Cu) 的含量及其污染特征, 结果发现, 以山西省土壤背景值为参考, Pb、Zn 和 Cr 元素均已超标, 并且 4 种重金属均出现不同程度的富集. 丛鑫等^[5]的研究采集了海州某煤矿矸石山附近的土壤样品, 并分析了重金属污染特征, 结果发现土壤中重金属含量随距煤矸石堆距离的增加而呈现出降低的趋势, 说明

矸石山的长久堆积已对其周边环境造成了一定程度的污染.

煤矸石堆积区周边土壤是一种复杂的混合污染环境, 其中包含多种重金属物质, 它们所产生的协同或拮抗作用可能无法仅仅通过传统的理化性质分析来全面反映其实际的生态风险^[6,7]. 而生物测定法已被大量实验证明是评估土壤污染的有力工具, 能够有效监测土壤中污染物的含量与归趋, 为污染土壤的修复治理提供理论依据^[8]. 如 Radić 等^[9]的研究利用浮萍评估了矿区周边污染土壤所诱导的植物毒性效应, 结果表明煤矿污染的土壤水提取物可抑制浮萍的生长速率、降低其叶绿素含量和抗氧化酶

收稿日期: 2021-06-02; 修订日期: 2021-11-25

基金项目: 山西重点研发计划项目 (201903D321078)

作者简介: 尚誉 (1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态毒理学, E-mail: 406907439@qq.com

* 通信作者, E-mail: sangnan@sxu.edu.cn

的活性. Cotellet 等^[10]的研究利用蚕豆微核实验评估了工业废弃物污染的土壤,结果显示污染土壤能够显著诱导蚕豆根尖微核率的上升.

因此,本研究一方面分析矸石山堆积区周边不同距离土壤中重金属含量,探讨其距离依赖性分布特征和污染状况;另一方面以大麦为模式植物,分析不同距离土壤暴露所诱导的植物毒性效应,以期全面评估煤矸石堆积区生态风险提供基础数据和理论依据.

1 材料与方法

1.1 土壤样本采集与处理

土壤样本采集于山西省太原古交市东部的东曲煤矿(37°54′14.24″N, 112°13′14.52″E). 根据矿区中煤矸石堆周边地形地貌,并结合当地条件,以煤矸石堆为中心,在其西北方向处布设 6 个采样点,包括

0、100、200、400、600 和 800 m 处土壤,如图 1 所示. 对照土壤采自距矿区 5 km 外的未受污染的地点. 每个采样点通过梅花布点法采集 3~5 个子样本,采样深度为 0~20 cm,四分法充分混匀土壤后存储在密封的聚乙烯袋送至实验室,自然风干后研磨破碎,用 100 目筛过筛后储存备用.

1.2 土壤样本理化性质和重金属含量测定

土壤样本基本理化性质如表 1 所示. 土壤 pH 值使用酸度 pH 测定仪测定,土水比为 1:2.5;土壤有机质使用重铬酸钾容量法测定;全氮使用半微量凯氏定氮法测定;全磷使用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定;全钾使用 NaOH 熔融-火焰光度法;土壤重金属含量使用 HNO₃-HCl-HF-HClO₄ 消解处理,随后采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定土壤样品中 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 和 As 元素含量.

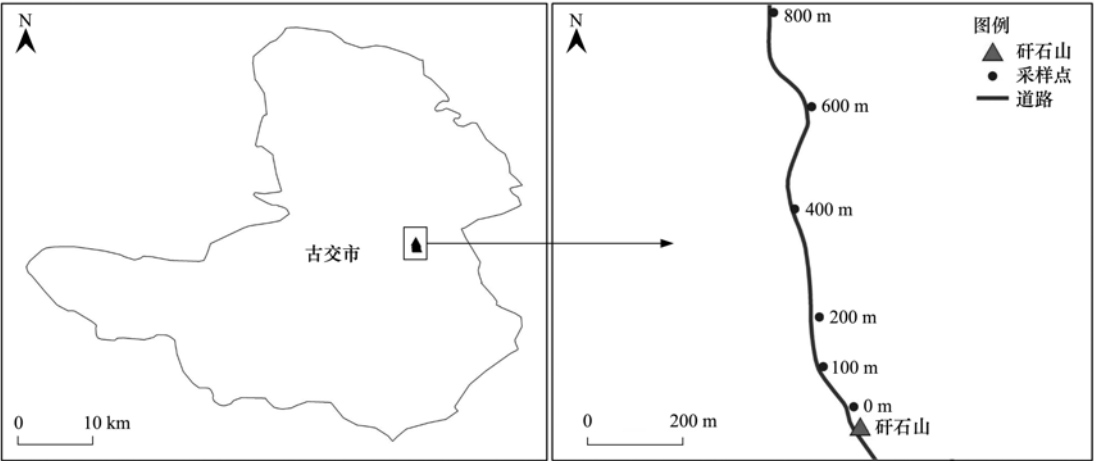


图 1 研究区采样点示意
Fig. 1 Soil sampling sites of study area

表 1 土壤样本基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of soil samples					
采样点	pH	$\omega(\text{有机质})$ /g·kg ⁻¹	$\omega(\text{总氮})$ /g·kg ⁻¹	$\omega(\text{总磷})$ /g·kg ⁻¹	$\omega(\text{总钾})$ /g·kg ⁻¹
对照	7.22	8.62	0.75	0.34	7.58
0 m	7.63	7.62	0.62	0.36	6.90
100 m	7.31	9.37	0.86	0.32	8.32
200 m	7.82	8.23	0.72	0.41	7.47
400 m	7.64	8.48	0.71	0.35	7.98
600 m	7.78	8.55	0.64	0.34	8.76
800 m	7.55	7.93	0.61	0.39	7.28

1.3 富集因子法

该方法能够判断人为因素干扰下的重金属污染状况,其计算公式为:

$$EF = (C_n/C_{ref})_{\text{sample}} / (B_n/B_{ref})_{\text{background}}$$

式中,EF 为富集因子, C_n 为测量元素的含量, C_{ref} 为参比元素的含量, B_n 为测量元素的背景值含量, B_{ref} 为参比元素的背景值含量. 选取山西省土壤背景值作为参比值^[11],选取 Al 元素作为参比元素. 富集因子的污染程度划分如表 2 所示^[12].

表 2 富集因子污染程度划分

Table 2 Classification of enrichment factor						
污染等级	无污染	轻度污染	中度污染	显著污染	高度污染	极度污染
EF	<1	1~2	2~5	5~20	20~40	>40

1.4 大麦种子的处理

大麦种子购自山西省农业科学院. 种子实验前

用 3% 的过氧化氢表面灭菌 30 min,随后用去离子水冲洗干净,将种子在蒸馏水中浸泡 4~6 h,挑选颗

粒饱满的种子移至潮湿的滤纸上发芽. 36 ~ 48 h 后, 选择根长为 1.5 ~ 2 cm 的大麦种子移植入圆形塑料花盆中(上部直径 9 cm, 下部直径 7 cm, 高度为 7 cm), 每盆放置 10 粒种子, 并称取 200 g 土样. 所有实验组以光照: 黑暗周期为 12 h: 12 h 的条件下在 (25 ± 1) °C 的恒温培养箱中生长.

1.5 大麦幼苗生长实验

大麦幼苗培养 7 d 后, 收集各处理组幼苗并测量其茎叶长和根长, 随后用蒸馏水洗涤并干燥, 剪下茎叶和根部称重.

1.6 叶绿素含量测定

培养 7 d 后, 采集新鲜叶片以测定叶绿素含量. 具体的测定方法采用丙酮-乙醇混合液提取法^[13].

1.7 氧化应激反应测定

培养 7 d 后, 采集新鲜叶片(0.1 g)剪碎后根据重量: 体积 = 1: 9 的比例用磷酸盐缓冲液(0.1 mol·L⁻¹, pH = 7.4)在研钵中匀浆破碎, 离心提取上清液, 按照试剂盒(建成, 南京)的说明测定叶片中 MDA、SOD、CAT、POD 和 GSH 的活性.

1.8 有丝分裂指数和微核测定

培养 2 d 后, 将其根系从土壤中移出并用自来水彻底冲洗, 除去粘附在根部的土壤, 然后自根尖端切下 1 ~ 1.5 cm 长的幼根并用卡诺固定液(乙醇: 乙酸 = 3: 1)固定 24 h, 随后转入 70% 的乙醇中保存. 通过 Feulgen 法对根尖染色后, 切去根尖 1 mm

左右并滴加 45% 的乙酸, 加盖玻片, 常规压片. MI 为有丝分裂细胞占细胞总数的百分比, MN 为千分比. 每个处理约观察 5 000 个根尖细胞.

1.9 数据统计与分析

采用 Origin 8.0 统计软件对数据进行分析, 结果描述为平均值 ± 标准偏差(SD). 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)分析处理组之间的显著性差异, 然后进行 Fisher 最小显著差异(LSD)检验. * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$.

2 结果与分析

2.1 煤矸石堆积区周边土壤中重金属含量与分布特征

矸石山周边土壤中重金属 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 和 $\omega(\text{As})$ 均值分别为 0.097、22.50、13.13、25.67、76.00 和 5.05 mg·kg⁻¹(表 3), 均未超过文献[14]中各重金属污染的风险筛选值, 但 Cd、Pb 和 Zn 含量均高于山西省土壤元素背景值, 分别为背景值的 1.39、1.75 和 1.12 倍, 表明土壤中 Cd、Pb 和 Zn 元素污染较严重. 各重金属的变异系数大小为: Cr(0.33) > As(0.25) > Zn(0.20) > Pb(0.19) > Cd(0.17) > Cu(0.13), 均小于 0.36, 显示出中等水平的空间变异性.

表 3 煤矸石堆积区周边土壤中重金属含量
Table 3 Heavy metal concentrations in soil around the coal gangue stacking area

元素	最小值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	标准差 /mg·kg ⁻¹	变异系数	山西省土壤背景值 /mg·kg ⁻¹	风险筛选值 /mg·kg ⁻¹
Cd	0.09	0.13	0.097	0.016	0.17	0.07	0.3
Cr	11.00	31.00	22.50	7.34	0.33	53	200
Cu	10.40	15.30	13.13	1.68	0.13	20	100
Pb	20.00	30.00	25.67	4.76	0.19	14.7	120
Zn	61.00	104.00	76.00	15.32	0.20	68	250
As	3.40	7.10	5.05	1.27	0.25	9.2	30

图 2 为矸石山周边土壤中重金属的分布特征. 距矸石山 0、100、200、400、600 和 800 m 土壤中 6 种重金属的总含量分别为 142.79、132.29、150.39、154.09、145.93 和 129.19 mg·kg⁻¹, 总体表现为随着距矸石山距离越远, 重金属含量呈现出先增加后降低的趋势, 表明矸石山经过长年堆积与风化淋溶等过程可能导致其周边土壤中重金属的污染与富集.

2.2 土壤重金属富集特征

矸石山周边土壤中重金属元素的富集因子统计结果如图 3 所示. Cd、Pb 和 Zn 元素在 0 m 土壤中

的 EF 值均小于 5, 为中度富集或轻微富集, 而在 100 ~ 800 m 土壤中的 EF 值均大于 5, 表现为显著富集, 说明矸石山堆积区周边土壤中 Cd、Pb 和 Zn 元素污染较严重, 且受到了人为活动带来的影响. Cr、Cu 和 As 元素的 EF 值均小于 5, 为中度富集或轻微富集, 污染程度较轻.

2.3 煤矸石堆积区周边土壤对大麦幼苗生长的影响

图 4 为矸石山堆积区周边土壤对大麦幼苗早期生长的影响. 结果显示, 在不同距离的土壤暴露下, 大麦幼苗的芽长、根长、芽重和根重均受到显著抑制, 且随着距矸石山距离的增加呈现出先降低后上

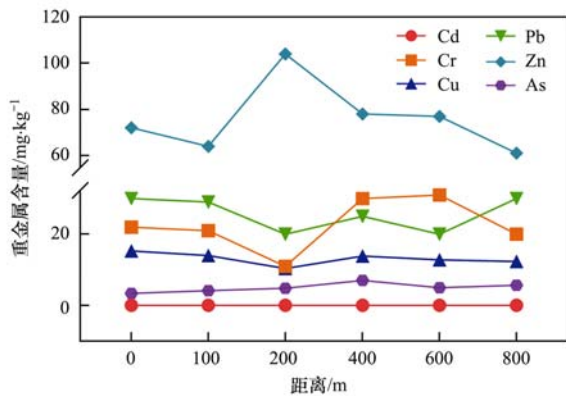


图2 煤矸石堆积区周边土壤中重金属的分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of heavy metals in soil around the coal gangue stacking area

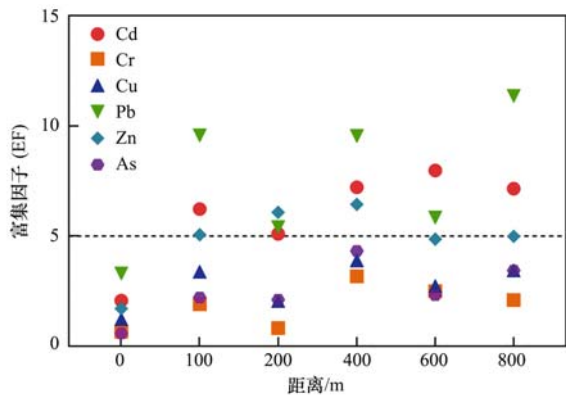


图3 煤矸石堆积区周边土壤中重金属的富集特征

Fig. 3 Enrichment characteristics of heavy metals in soil around the coal gangue stacking area

升再降低的趋势。

2.4 煤矸石堆积区周边土壤对大麦幼苗叶绿素含量的影响

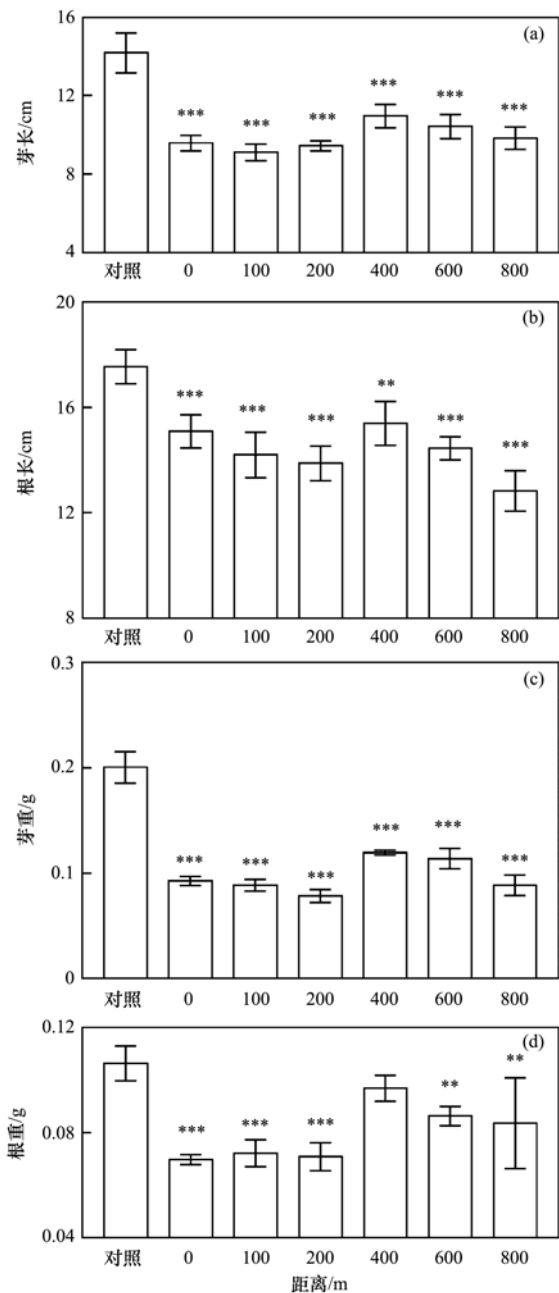
矸石山周边土壤样本处理大麦幼苗7 d后,叶片叶绿素含量的变化如图5所示.在0、100、400和600 m土壤的暴露下,叶绿素a含量显著降低,与对照相比分别降低了19%、12%、20%和17%.而不同土壤处理组下的叶绿素b含量与对照相比无任何显著性变化.总叶绿素含量在0、400和600 m土壤的暴露下同样显著降低,相比对照减少了16%、12%和11%。

2.5 煤矸石堆积区周边土壤对大麦幼苗丙二醛含量的影响

图6为矸石山周边土壤暴露7 d后,大麦幼苗丙二醛含量的变化.随着距矸石山距离的增加,丙二醛含量逐渐升高,在200 m土壤的暴露下达到了最大值,为对照土壤的2.06倍,而400、600和800 m土壤对其含量影响并不明显。

2.6 煤矸石堆积区周边土壤对大麦幼苗抗氧化剂活性的影响

图7为大麦幼苗SOD、CAT、POD和GSH活性



不同星号与对照相比有显著差异,*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$,下同

图4 煤矸石堆积区周边土壤对大麦幼苗芽长、根长、芽重和根重的影响

Fig. 4 Effects of soil around the coal gangue stacking area on shoot length, root length, shoot weight, and root weight of barley

的变化. SOD活性在200 m土壤的暴露下显著上升,相比对照升高了33%. CAT活性在所有土壤处理组的暴露下均显著降低,0、100、200、400、600和800 m的CAT活性分别比对照降低了46%、43%、36%、48%、34%和44%.而POD和非酶类GSH的活性随着距矸石山距离的增加,总体呈现出先上升后下降的趋势,在200 m和800 m土壤的暴露下,GSH的活性相比对照显著上升了约1.81倍和1.16倍。

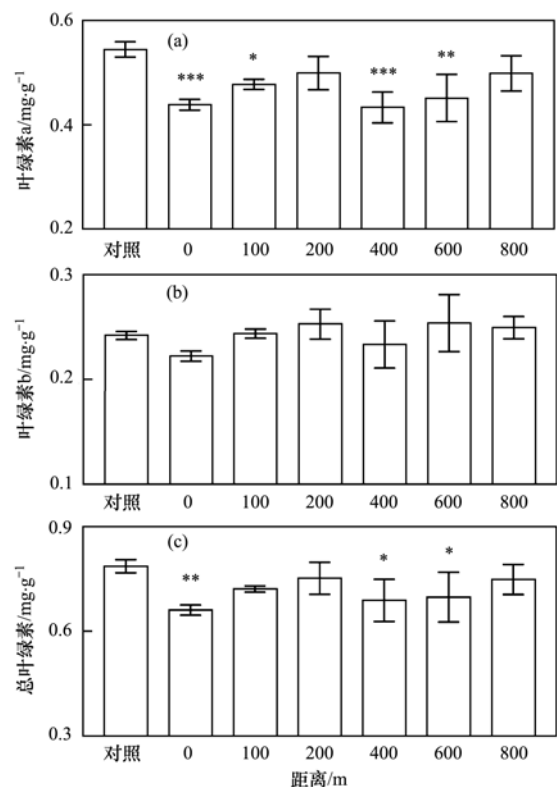


图5 煤矸石堆积区周边土壤对大麦叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量的影响

Fig. 5 Effects of soil around the coal gangue stacking area on chlorophyll a, chlorophyll b, and total chlorophyll content of barley leaves

2.7 煤矸石堆积区周边土壤对大麦根尖细胞有丝分裂指数和微核的影响

表4 为矸石山周边土壤对大麦根尖细胞 48 h

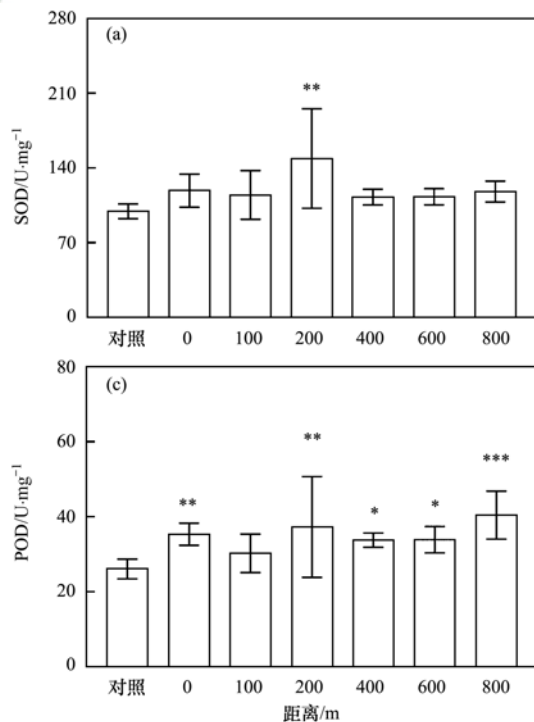


图7 煤矸石堆积区周边土壤对大麦叶片 SOD、CAT、POD 和 GSH 活性的影响

Fig. 7 Effects of soil around the coal gangue stacking area on the SOD, CAT, POD, and GSH activities of barley leaves

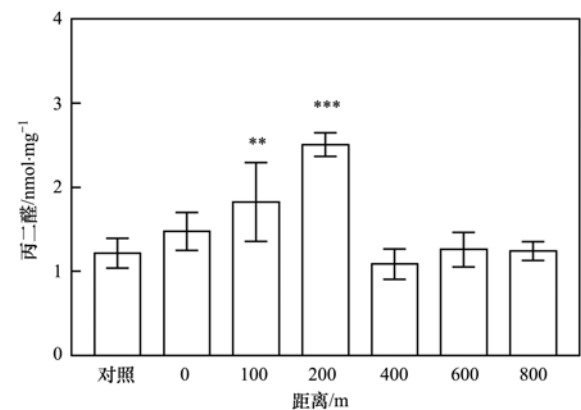


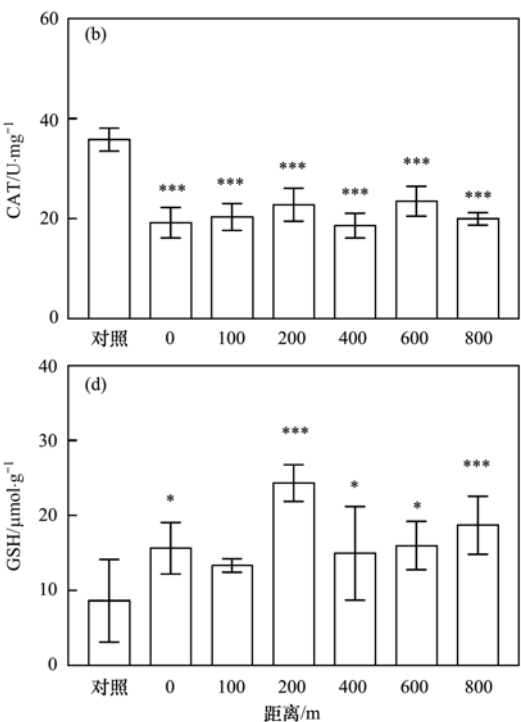
图6 煤矸石堆积区周边土壤对大麦叶片丙二醛含量的影响

Fig. 6 Effect of soil around the coal gangue stacking area on malondialdehyde content of barley leaves

有丝分裂指数的影响. 仅在 0 m 和 200 m 土壤的暴露下, 有丝分裂指数相比对照显著降低, 分别降低了 21% 和 24%. 在有丝分裂相分布中, 暴露组中的前期指数相比对照均有显著性降低, 且随着距离的增加, 呈现出先降低后上升的趋势, 中期、后期和末期指数相比对照无显著变化. 如表 5 所示, 矸石山周边土壤均诱导大麦根尖细胞中微核的发生, 0、100、200、400、600 和 800 m 土壤的微核率相比对照分别增加了约 7、6、10、6、9 和 4.83 倍.

2.8 煤矸石堆积区周边土壤重金属与植物毒性之间的相关关系

表 6 为煤矸石堆积区周边土壤重金属与各植物毒性指标之间的相关性关系. 大麦幼苗的芽长和根长与 6 种重金属之间没有发现显著的相关性, Cr 元



素分别与芽重、MDA 和 SOD 呈显著的正相关和负相关, As 元素与根重呈显著的正相关. 同时还观察到 Cu 元素与叶绿素 b 和总叶绿素含量呈显著的负

相关,说明土壤中 Cu 元素的存在能够影响大麦叶片光合作用的进行. 此外, Pb 和 Zn 与微核率之间分别为显著的负相关和正相关关系.

表 4 煤矸石堆积区周边土壤对大麦根尖细胞中有丝分裂指数的影响¹⁾/%

Table 4 Effects of soil around the coal gangue stacking area on mitotic index (MI) of barley root tips/%

采样点	有丝分裂指数	前期	中期	后期	末期
对照	3.24 ± 0.22	1.23 ± 0.63	1.20 ± 0.29	0.60 ± 0.25	0.33 ± 0.31
0 m	2.55 ± 0.33 *	0.66 ± 0.49 *	1.16 ± 0.27	0.36 ± 0.21	0.62 ± 0.48
100 m	3.00 ± 0.47	0.36 ± 0.41 **	1.40 ± 0.28	0.56 ± 0.22	0.68 ± 0.44
200 m	2.45 ± 0.44 *	0.28 ± 0.23 ***	1.48 ± 0.33	0.36 ± 0.26	0.56 ± 0.38
400 m	2.80 ± 0.58	0.44 ± 0.26 **	1.48 ± 0.36	0.36 ± 0.30	0.52 ± 0.11
600 m	3.04 ± 0.54	0.60 ± 0.28 *	1.04 ± 0.52	0.48 ± 0.23	0.92 ± 0.54
800 m	3.03 ± 0.53	0.43 ± 0.29 *	1.37 ± 0.56	0.53 ± 0.30	0.70 ± 0.33

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$,下同

表 5 煤矸石堆积区周边土壤对大麦根尖细胞微核率的影响

Table 5 Effects of soil around the coal gangue stacking area on micronucleus rate of barley root tips

项目	对照	0 m	100 m	200 m	400 m	600 m	800 m
微核率 (MN)/‰	0.20 ± 0.45	1.60 ± 0.55 *	1.40 ± 1.14 *	2.20 ± 0.84 ***	1.40 ± 1.14 *	2.00 ± 0.71 **	1.17 ± 0.75

表 6 煤矸石堆积区周边土壤重金属含量与植物毒性之间的相关关系

Table 6 Correlation between soil heavy metal content and phytotoxicity around the coal gangue stacking area

项目	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	As
芽长	0.385	0.767	0.101	-0.331	0.028	0.772
根长	0.076	0.529	0.603	-0.113	0.151	0.023
芽重	0.514	0.950 **	0.384	-0.232	-0.171	0.555
根重	0.291	0.738	0.046	-0.196	-0.163	0.892 *
叶绿素 a	-0.249	-0.773	-0.746	-0.034	0.147	-0.075
叶绿素 b	0.444	-0.217	-0.826 *	-0.572	0.253	0.201
总叶绿素	-0.186	-0.637	-0.840 *	-0.195	0.223	0.207
MDA	-0.286	-0.855 *	-0.579	-0.335	0.673	-0.414
SOD	-0.280	-0.848 *	-0.753	-0.458	0.833 *	-0.158
CAT	0.683	-0.181	-0.680	-0.791	0.521	-0.196
POD	-0.178	-0.408	-0.489	0.039	0.132	0.188
GSH	-0.146	-0.738	-0.869 *	-0.484	0.745	0.051
MI	0.430	0.558	0.155	0.197	-0.728	0.264
MN	0.461	-0.249	-0.535	-0.857 *	0.848 *	-0.251

3 讨论

本研究发现矸石山堆积区周边土壤中的 Cd、Pb 和 Zn 元素污染较严重,其含量明显高于山西省土壤元素背景值,并随着距矸石山距离越远,重金属含量呈现出先增加后降低的趋势,说明矸石山的长久堆积已对周边土壤环境造成了一定程度的污染,其原因可能是由于矸石中的重金属等污染物质经过长期的雨水淋溶和风化过程,而逐渐迁移到周边的土壤中^[15]. 在此基础上使用富集因子法发现 Cd、Pb 和 Zn 元素污染程度较高,其余元素污染程度较轻. 而相关性分析结果提示 Cr 和 As 分别与大麦芽重和根重之间呈显著的正相关, Cu 与叶绿素 b 和总叶绿素含量呈显著的负相关, Zn 与根尖细胞微核率之

间呈显著的正相关.

植物毒性结果显示,矸石山周边土壤均诱导大麦幼苗的根长、根重、芽长和芽重显著下降,以及叶绿素水平变化. 类似地, Fiket 等^[16]的研究发现多个受煤炭开采活动污染的周边土壤显著抑制葱的生长,并且能够引起脂质过氧化和染色体异常等遗传毒性作用. 这可能是由于土壤中多种重金属之间发生串扰或竞争,从而产生协同或拮抗作用,其会增强或抑制植物对锰、铁和镁等微量元素的吸收,最终导致生物量的下降^[17,18].

植物暴露于环境胁迫后会产生过量 ROS 从而诱导氧化应激反应的发生^[19]. 但当 ROS 的产生超过了抗氧化剂防御系统的阈值后,其会作用于脂质或核酸等大分子,从而诱导脂质过氧化的最终产物

MDA 含量的上升^[20]. 在本研究中, 暴露于 100 m 和 200 m 土壤后, 大麦幼苗中的 MDA 含量显著升高, 这表明土壤中的污染物质会引起大麦脂质过氧化物的发生. 酶促和非酶促抗氧化剂的活性与植物体内氧化损伤的水平密切相关^[21]. 本研究中 SOD、POD 和 GSH 的活性被显著诱导, 而 CAT 的活性显著降低. Dazy 等^[22]的研究同样观察到水生苔藓植物暴露于 Cd、Cu、Zn 和 Pb 后均导致其 MDA 含量的增加, SOD 活性上升. 作为抗氧化防御系统的第一道防线, SOD 可以催化超氧自由基转化为 H_2O_2 , POD 和 CAT 催化 H_2O_2 分解为 H_2O 和 O_2 , 从而帮助抵抗重金属所引起的损伤和维持氧化还原稳态. 然而, 本研究中 CAT 活性的显著降低可能是由于暴露于高浓度土壤污染物后, ROS 的过量产生超过了植物机体内 CAT 本身的清除能力, 从而导致细胞内蛋白质和酶系的失活. 植物细胞遗传毒性中有丝分裂指数和微核率的变化已被广泛用于检测环境中污染物质的生物标志物^[23]. 在本研究中, 煤矸石堆积区周边土壤均诱导有丝分裂前期指数的显著降低和微核率的显著上升, 这可能是由于土壤中重金属等污染物质对细胞线粒体的抑制作用, 并在细胞间期抑制 DNA 和蛋白质的合成过程, 从而阻止了分裂细胞进入有丝分裂前期, 最终导致大麦根系生长受抑^[24,25].

4 结论

(1) 煤矸石堆积区周边土壤中 Cd、Pb 和 Zn 的含量平均值均超过山西省土壤元素背景值, 且随着距矸石山的距离越远, 含量呈现出先增加后降低的趋势. 富集因子结果同样也显示土壤中 Cd、Pb 和 Zn 富集程度较高, 污染较严重.

(2) 暴露于煤矸石堆积区周边土壤后大麦幼苗生长受抑, 且部分土壤能够诱导叶绿素含量降低、MDA 含量升高, SOD、POD 和 GSH 活性上升, CAT 活性的显著下降, 并且诱导了根尖细胞中 MI 的降低和 MN 的显著上升.

(3) 皮尔森相关系数表明, Cr、As 和 Zn 元素分别与大麦芽重、根重和微核率之间呈正相关, Cu 和 Pb 元素分别与叶绿素和微核率之间呈负相关.

参考文献:

- [1] 姚逸, 邓秋婷, 李艺, 等. 煤矸石的综合治理及其开发利用现状[J]. 中国资源综合利用, 2019, **37**(12): 83-85.
Yao Y, Deng Q T, Li Y, et al. Comprehensive treatment of coal gangue and its development and utilization status[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, **37**(12): 83-85.
- [2] Pan L B, Ma J, Hu Y, et al. Assessments of levels, potential ecological risk, and human health risk of heavy metals in the soils from a typical county in Shanxi Province, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(19): 19330-19340.
- [3] Fan J S, Sun Y Z, Li X Y, et al. Pollution of organic compounds and heavy metals in a coal gangue dump of the Gequan coal mine, China [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2013, **32**(3): 241-247.
- [4] 任珊珊, 毕斌, 郭李凯, 等. 煤矸山复垦重构土壤重金属含量及污染状况评价[J]. 贵州农业科学, 2016, **44**(7): 117-120.
Ren S S, Bi B, Guo L K, et al. Heavy metal contents and pollution assessment in reclaimed soil of coal waste pile [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2016, **44**(7): 117-120.
- [5] 丛鑫, 雷旭涛, 付玲, 等. 海州煤矿矸石山周边土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 地球与环境, 2017, **45**(3): 329-335.
Cong X, Lei X T, Fu L, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in soils around the gangue heap of HaiZhou coal mine, China [J]. Earth and Environment, 2017, **45**(3): 329-335.
- [6] Wang G, Xie Y W, Qin Y, et al. Element geochemical characteristics and formation environment for the roof, floor and gangue of coal seams in the Gujiao mining area, Xishan coalfield, China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2018, **190**: 336-344.
- [7] Jiang X F, Chen H, Liao Y C, et al. Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant *Vicia faba* [J]. Environmental Pollution, 2019, **250**: 831-838.
- [8] 周启皇, 王美娥. 土壤生态毒理学研究进展与展望[J]. 生态毒理学报, 2006, **1**(1): 1-11.
Zhou Q X, Wang M E. Researching advancement and prospect of soil ecotoxicology [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2006, **1**(1): 1-11.
- [9] Radić S, Medunić G, Kuharić Ž, et al. The effect of hazardous pollutants from coal combustion activity: phytotoxicity assessment of aqueous soil extracts [J]. Chemosphere, 2018, **199**: 191-200.
- [10] Cotellet S, Dhyèvre A, Muller S, et al. Soil genotoxicity assessment—results of an interlaboratory study on the *Vicia* micronucleus assay in the context of ISO standardization [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(2): 988-995.
- [11] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
State Environmental Protection Agency, China Environmental Monitoring Station. China soil element background value [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [12] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. Environmental Geology, 2000, **39**(6): 611-627.
- [13] 张宪政. 植物叶绿素含量测定——丙酮乙醇混合液法 [J]. 辽宁农业科学, 1986, (3): 26-28.
Zhang X Z. Determination of plant chlorophyll content acetone ethanol mixture method [J]. Liaoning Agricultural Sciences, 1986, (3): 26-28.
- [14] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行) [S].
- [15] Li J Y, Wang J M. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: a review [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **239**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117946.
- [16] Fiket Ž, Medunić G, Vidaković-Cifrek Ž, et al. Effect of coal mining activities and related industry on composition, cytotoxicity and genotoxicity of surrounding soils [J]. Environmental Science

- and Pollution Research, 2020, **27**(6): 6613-6627.
- [17] Kutrowska A, Małecka A, Piechalak A, *et al.* Effects of binary metal combinations on zinc, copper, cadmium and lead uptake and distribution in *Brassica juncea*[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2017, **44**: 32-39.
- [18] Morkunas I, Woźniak A, Mai V C, *et al.* The role of heavy metals in plant response to biotic stress[J]. Molecules, 2018, **23**(9), doi: 10.3390/molecules23092320.
- [19] Das K, Roychoudhury A. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants[J]. Frontiers in Environmental Science, 2014, **2**, doi: 10.3389/fenvs.2014.00053.
- [20] Cheng Y L, Zhu L S, Song W H, *et al.* Combined effects of mulch film-derived microplastics and atrazine on oxidative stress and gene expression in earthworm (*Eisenia fetida*)[J]. Science of the Total Environment, 2020, **746**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141280.
- [21] Wang C R, Tian Y, Wang X R, *et al.* Lead-contaminated soil induced oxidative stress, defense response and its indicative biomarkers in roots of *Vicia faba* seedlings[J]. Ecotoxicology, 2010, **19**(6): 1130-1139.
- [22] Dazy M, Masfaraud J F, Féraud J F. Induction of oxidative stress biomarkers associated with heavy metal stress in *Fontinalis antipyretica* hedw[J]. Chemosphere, 2009, **75**(3): 297-302.
- [23] Bhat S A, Singh J, Singh K, *et al.* Genotoxicity monitoring of industrial wastes using plant bioassays and management through vermitechology: a review [J]. Agriculture and Natural Resources, 2017, **51**(5): 325-337.
- [24] Kumari M, Khan S S, Pakrashi S, *et al.* Cytogenetic and genotoxic effects of zinc oxide nanoparticles on root cells of *Allium cepa*[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **190**(1-3): 613-621.
- [25] Chen L, Yuan S K, Liu X G, *et al.* Genotoxicity response of *Vicia faba* seedlings to cadmium in soils as characterized by direct soil exposure and micronucleus test[J]. Ecotoxicology, 2020, **29**(1): 65-74.



CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model	PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing	ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data	WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period	Ji Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths	WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst	HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province	XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil	XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)