

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期

Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力 ..... 李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培(5563)

汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策 ..... 王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平(5574)

西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单 ..... 高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益(5585)

新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析 ..... 陈军辉, 冯小球, 李媛, 王书肖(5594)

基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM<sub>2.5</sub> 浓度估算 ..... 吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪(5602)

《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性无机离子特征 ..... 李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思(5616)

洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析 ..... 孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(5624)

北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素 ..... 曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭(5633)

天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析 ..... 王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂(5644)

沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性 ..... 杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜(5656)

典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析 ..... 葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正(5663)

南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估 ..... 张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟(5673)

基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征:以郑州市高新区为例 ..... 任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄(5687)

我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响 ..... 高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小拴(5698)

VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析 ..... 王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿(5713)

山东省 O<sub>3</sub> 时空分布及影响因素分析 ..... 张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨(5723)

2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性 ..... 钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政(5736)

基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建 ..... 郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇(5747)

三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析 ..... 张凯, 吴凤平, 成长春(5757)

长江流域总氮排放量预测 ..... 丁肇慰, 郑华(5768)

1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征 ..... 姚梦雅, 胡敏娟, 陈丁江(5777)

黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布 ..... 韩语, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明(5786)

基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源 ..... 邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅(5796)

水源水库真核微生物种群结构季相演替特征 ..... 张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容(5804)

达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异 ..... 李文宝, 郭鑫, 张博亮, 杜蕾, 田雅楠(5814)

尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制 ..... 王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞(5826)

武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估 ..... 张坤锋, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军(5836)

上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系 ..... 徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮(5848)

曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素 ..... 李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇(5857)

水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除 ..... 赵伟, 范增增, 杨新萍(5865)

木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响 ..... 孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报(5876)

黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮 ..... 魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英(5884)

玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响 ..... 南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒(5896)

饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径 ..... 周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉(5905)

污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势 ..... 曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高(5912)

阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应 ..... 高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕(5921)

典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 ..... 李强, 曹莹, 何连生, 王耀锋, 龚成, 何书涵(5930)

我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价 ..... 王耀锋, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健(5938)

浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险 ..... 王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜霓雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军(5949)

北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探 ..... 管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华(5958)

典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价 ..... 强瑛, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫(5967)

雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应 ..... 周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌(5977)

铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划 ..... 朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波(5988)

干湿交替对铈镉改性生物炭固定红壤 As 的影响 ..... 黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧(5997)

铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除 ..... 王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郜红建, 叶新新(6006)

稻田灌溉河流 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放特征及影响因素 ..... 吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文(6014)

节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房(6025)

有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N<sub>2</sub>O 的排放特征及微生物特性 ..... 王楷, 史雷, 马龙, 王书婷, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年(6038)

不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响 ..... 孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖(6047)

氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响 ..... 杨建强, 刁华杰, 胡姝娅, 陈晓鹏, 王常慧(6058)

化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响 ..... 向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明(6067)

浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量 ..... 王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛(6078)

《环境科学》第42卷(2021年)总目录 ..... (6091)

《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)

# 典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价

强瑀<sup>1</sup>, 李英菊<sup>1</sup>, 罗谦<sup>1</sup>, 陈美凤<sup>1</sup>, 李海燕<sup>1</sup>, 黄先飞<sup>1</sup>, 秦樊鑫<sup>2,3,\*</sup>

(1. 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学生命科学学院, 贵阳 550025; 3. 贵州师范大学贵州省植物生理与发育调控重点实验室, 贵阳 550025)

**摘要:** 土壤团聚体重金属对生态环境产生的危害不容忽视. 为考察农作物与土壤团聚体重金属之间的相关性及其可能产生的风险, 以贵州都匀马坡铅锌矿段菜园河铅锌矿区农作物为例, 研究土壤团聚体重金属的分布状况和农作物对土壤团聚体重金属的富集特征. 采用 Pearson 相关性分析农作物与耕地土壤不同粒径团聚体重金属之间的关系, 同时分别采用生态危害指数 (RI) 法和危险商值 (HQ) 法研究不同粒径土壤团聚体重金属污染物的生态风险和农作物重金属对人群的健康风险. 结果表明: ①土壤团聚体 Cd 含量随粒径减小而逐渐增加, 而 Pb 和 Zn 含量在不同粒径团聚体中表现为:  $0.25 \sim 0.5 \text{ mm} > 0.053 \sim 0.25 \text{ mm} > 0.5 \sim 1 \text{ mm} > 2 \text{ mm} > 0.053 \text{ mm}$ ; ②叶菜类、果菜类和籽粒类农作物对土壤重金属的富集能力大小均为:  $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb}$ ; ③Pearson 相关性分析表明籽粒类可富集各粒径团聚体中的 Pb 并转移到籽实中, 籽粒类中的 Zn 主要来源于粒径  $> 1 \text{ mm}$  的团聚体, 而且各种农作物同时富集土壤团聚体多种重金属可产生拮抗作用; ④土壤团聚体粒径越小总潜在生态风险越大, 相同粒径土壤团聚体重金属生态风险的大小顺序为:  $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn}$ , 而且研究区中叶菜类和果菜类农作物中 Pb 对儿童健康风险极高.

**关键词:** 铅锌矿区; 土壤团聚体; 农作物; 重金属; 风险评价

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5967-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202104253

## Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area

QIANG Yu<sup>1</sup>, LI Ying-ju<sup>1</sup>, LUO Qian<sup>1</sup>, CHEN Mei-feng<sup>1</sup>, LI Hai-yan<sup>1</sup>, HUANG Xian-fei<sup>1</sup>, QIN Fan-xin<sup>2,3,\*</sup>

(1. Guizhou Key Laboratory for Information System of Mountainous Areas and Protection of Ecological Environment, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 3. Guizhou Key Laboratory of Plant Physiology and Developmental Regulation, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** The threat that heavy metals in soil aggregates pose to the ecological environment is an issue that should not be neglected. In order to determine the relationship between heavy metals in soil aggregates and those in crops, and to study the potential risk of heavy metals in soil aggregates, a portion of arable land in the Caiyuanhe lead-zinc mining area, which belongs to the section of Mapo lead-zinc mining in Duyun City, Guizhou province, was selected as the study area. The soil sample was collected from the cultivated layer (0-20 cm), and all crops were classified as leaf crops, fruit crops, and grain crops. The various sizes of soil aggregates sieved were  $> 2$ , 1-2, 0.5-1, 0.25-0.5, 0.053-0.25, and  $< 0.053 \text{ mm}$ . The contents of cadmium (Cd), lead (Pb), and zinc (Zn) in different soil aggregates, the accumulation characteristics of these metals by crops, and the Pearson correlation between these metals in soil aggregates and crops were studied and discussed. The ecological risk of heavy metals in different sized aggregates and the health risk of heavy metals in crops were assessed via the potential ecological risk index (RI) and the hazardous quotient (HQ), respectively. The results showed that: ① the contents of Cd increased with the increase in soil aggregate size, and the concentrations of Pb and Zn in different aggregates followed the order of  $0.25\text{-}0.5 \text{ mm} > 0.53\text{-}0.25 \text{ mm} > 0.5\text{-}1 \text{ mm} > 2 \text{ mm} > 0.053 \text{ mm}$ ; ② the enrichment capacity of all the crops included in the study was  $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb}$ ; ③ the Pearson correlation analysis suggested that grain crops could enrich and transfer Pb in soil aggregates of different size, and the Zn in grains mainly originated from soil aggregates with a size of  $> 1 \text{ mm}$ ; ④ it was also found that soil aggregates of a smaller size presented a greater total potential ecological risk. The order of ecological risk of heavy metals in soil aggregates of the same size was  $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn}$ . Moreover, the Pb in leaf crops and fruit crops poses a great health risk to children in the study area.

**Key words:** lead-zinc mining area; soil aggregate; crop; heavy metal; risk assessment

土壤团聚体是评价土壤结构受破坏严重程度的重要指标<sup>[1,2]</sup>. 土壤团聚体的形成过程一方面是在土壤菌团或植物根系分泌物的作用下, 通过絮凝和胶结等方式使土壤小颗粒凝聚而成; 另一方面大颗粒土壤在微生物新陈代谢作用下, 通过分解有机物导致颗粒破碎, 从而形成不同粒径的团聚体<sup>[2]</sup>. 土壤团聚体不仅能够保持土壤通透性、避免水土侵蚀和养分流失, 而且对促进土壤微生物群落生长和提高酶的活性具有重要作用<sup>[3]</sup>. 由于团聚体颗粒与矿

物质或有机质结合方式不同, 导致不同粒径的团聚体对重金属的吸附能力、植物根系对养分的摄取和富集程度等方面存在很大差异<sup>[3,4]</sup>. 土壤重金属的吸附大多发生在土壤颗粒内部, 因此土壤团聚体颗粒与重金属之间存在密切联系<sup>[5]</sup>. 有研究表明<sup>[6]</sup>,

收稿日期: 2021-04-24; 修订日期: 2021-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(21467005)

作者简介: 强瑀(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水土污染与防治, E-mail: 305336847@qq.com

\* 通信作者, E-mail: qinfanxin@126.com

土壤重金属含量过高会影响过氧化氢酶的活性,进而对不同粒径土壤团聚体中重金属的含量和稳定性产生影响,其中 Cu 和 Cd 在粒径  $< 0.002$  mm 团聚体中会更稳定. 虽然粒径  $< 0.053$  mm 的土壤团聚体占土壤总量比例最小,仅约为 6.46%,但吸附重金属的能力最强,而且重金属的含量更易发生变化<sup>[7]</sup>. 此外,土地利用方式不仅会改变土壤团聚体的粒径,也会影响重金属在土壤团聚体中的分配<sup>[8]</sup>. 近年来,土壤团聚体的研究工作成果丰硕<sup>[9~11]</sup>,特别是在土壤团聚体重金属污染类型以及与含量相关因素(如 pH、有机质和生物酶活性等)方面成果显著,这些成果不仅阐明重金属的分布与土壤团聚体颗粒性质之间的关系,而且探索出重金属在土壤中的迁移规律,为防范土壤重金属污染导致的生态风险提供理论依据. 从目前的研究成果来看,土壤重金属风险评价大多采用因子分析、污染指数法、地累积指数法和潜在生态风险指数法等方法<sup>[12~14]</sup>. 以上评价方法已然成熟,体现了重金属在土壤中富集和迁移体系的科学性. 作为土壤生态系统的一部分,富集土壤重金属的农作物对生态系统的危害极其严重,而关于农作物富集土壤团聚体重金属的研究鲜有报道,特别是农作物富集土壤团聚体重金属的特性有待深入研究. 探讨土壤团聚体重金属与农作物之间的关系可以进一步明确土壤团聚体形成过程、了解农作物对土壤重金属迁移和富集过程以及不同粒径土壤团聚体重金属对农作物的提供方式,从根本上为改善土壤质量和恢复土壤生态提供理论依据.

采矿活动是土壤产生重金属的主要来源之一,特别是在大规模开采过程中在粉尘源的作用下严重破坏耕地土壤及周边环境,开采后闲置尾矿长期暴露于自然环境中,对整个生态系统造成严重威胁. 马坡铅锌矿段菜园河铅锌矿区位于贵州省都匀市坝固镇,该地区耕地土壤地质结构复杂,复合重金属污染程度和含量均比较高,农作物种类比较多,重金属在

土壤-农作物系统中的干扰少,因此,以该地区作为研究对象具有典型性和代表性. 为探求铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属与农作物重金属之间的相关性,从土壤团聚体重金属分布状况和农作物对土壤团聚体重金属的富集特征两方面进行研究,利用二者之间的 Pearson 相关性进行分析,并分别采用生态危害指数(potential ecological risk index, RI)法和危险商值(hazardous quotient, HQ)法研究不同粒径团聚体重金属产生的生态风险和农作物重金属的摄入对人群的健康风险,评价结果对防范研究区域内生态环境和人群健康风险提供参考依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与处理方法

耕地土壤和农作物样品均采自贵州都匀菜园河铅锌矿区的耕地土壤(图 1),该矿区总面积约为  $0.2$  km<sup>2</sup>,地势平坦且地块面积较小,样点布设按单元划分,样品采集采用五点采样法. 随机采集农作物可食用部分样品和对应土壤样品各 35 份,土壤样品为农作物样品所在耕地  $0\sim 20$  cm 的耕作层土壤,采集量约为 1 kg;农作物样品包括白菜(*Brassica pekinensis* L.)、旱菜(*Herba rorippae* L.)、佛手瓜(*Sechium edule* L.)、番茄(*Solanum lycopersicum* L.)、辣椒(*Capsicum annuum* L.)和玉米(*Zea mays* L.)共 6 种常见农作物,采集量约为 500 g. 每份土壤样品和农作物样品均由 5 个子样混合而成.

土壤样品经自然风干后沿自然形成的裂缝轻轻掰开,除去植物残体和石块等杂物过 5 mm 筛后将其分为两部分:一部分粗磨过 10 目筛用于测定土壤 pH 值和细磨后过 100 目筛测定 Cd、Pb 和 Zn 总体含量;另一部分采用干筛法<sup>[15]</sup>,先分成  $> 2$ 、 $1\sim 2$ 、 $0.5\sim 1$ 、 $0.25\sim 0.5$ 、 $0.053\sim 0.25$  和  $< 0.053$  mm 粒径的团聚体,然后细磨后过 100 目筛测定不同粒径土壤团聚体中 Cd、Pb 和 Zn 含量. 农作物样品先

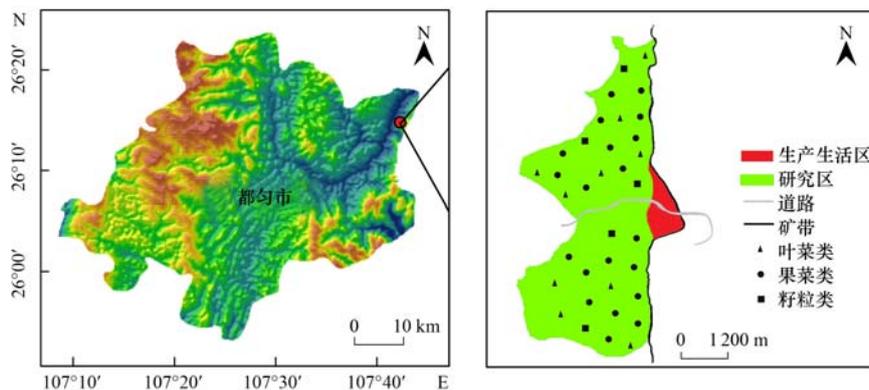


图 1 研究区采样点示意

Fig. 1 Sketch map of sampling points in the study area

用自来水冲洗表面附着的泥沙后再用去离子水冲洗至少 3 遍,并用滤纸吸收表面多余水分,称重后放入牛皮纸袋中于 105℃ 下杀青 30 min,再于 80℃ 干燥箱中烘干后粉碎样品。

### 1.2 样品测定方法

土壤样品 pH 测定采用去离子水浸提法,水土比为 2.5:1,经充分搅拌后平衡 30 min,再用 PHS-3C 型 pH 计测定.土壤样品重金属含量采用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>-HF 混酸法体系消解后测定,农作物样品重金属含量采用 HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 体系微波消解后测定.土壤

样品 Cd、Pb 和 Zn 的含量使用 Optima 5300V 型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP,美国玻金埃尔默公司)测定,农作物样品 Cd 和 Pb 含量使用石墨炉-原子吸收光谱仪(GFAAS,德国耶拿公司)测定,Zn 含量使用火焰-原子吸收光谱仪(FAAS,德国耶拿公司)测定.为保证分析测定结果的准确性,实验分析过程所用试剂均为优级纯,使用国家标准物质(土壤标样 GBW-07408、土壤标样 GBW-07405 和植物标样 GBW-10020)进行质量控制,测定误差均在 5% 以内,测定结果见表 1.

表 1 国家标准样品含量及测定结果

Table 1 Concentrations of national standard samples and test values

元素	GBW-07408		GBW-07405		GBW-10020	
	标准值 /mg·kg <sup>-1</sup>	测量值 /mg·kg <sup>-1</sup>	标准值 /mg·kg <sup>-1</sup>	测量值 /mg·kg <sup>-1</sup>	标准值 /mg·kg <sup>-1</sup>	测量值 /mg·kg <sup>-1</sup>
Cd	0.13 ± 0.02	0.14	0.45 ± 0.06	0.49	0.17 ± 0.02	0.16
Pb	21 ± 2	20.36	552 ± 29	550.42	9.7 ± 0.9	9.56
Zn	68 ± 4	65.37	494 ± 25	498.76	18 ± 2	17.84

### 1.3 评价方法

#### 1.3.1 土壤团聚体重金属潜在生态危害指数法

潜在生态风险评价采用瑞典科学家 Håkanson 提出的生态危害指数法(RI)<sup>[16]</sup>.该方法是土壤或沉积物重金属污染研究中比较常用的生态风险评估方法.该方法不仅考虑了土壤单一重金属元素对生态功能的影响,而且体现了多种重金属复合污染的综合效应,同时利用潜在生态危害指数(RI)对生态危害程度进行分级.其表达式如下:

$$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times (C_i/C_n^i) \quad (1)$$

式中, $C_i$  为单一重金属元素实测值(mg·kg<sup>-1</sup>); $C_n^i$  为单一重金属元素参比值,采用贵州省土壤环境背景值作为参照标准<sup>[17]</sup>;  $T_r^i$  为第  $i$  种重金属元素的毒性响应系数; $E_r^i$  为第  $i$  种重金属元素的潜在生态危害系数;RI 为土壤团聚体中多种重金属潜在生态危害指数.

与本研究中有 Cd、Pb 和 Zn 的参比值分别为 0.659、35.2 和 99.50 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[17]</sup>,毒性响应系数分别为 30、5 和 1<sup>[18]</sup>.根据重金属的潜在生态危害系

数( $E_r^i$ )将土壤中重金属污染状况设置为 5 个等级,重金属的潜在生态危害指数(RI)将土壤中重金属污染程度设置为 4 个等级.由于 Håkanson 研究的是 8 种有机污染物和重金属的潜在生态风险,参评的污染物种类越多、污染浓度越大,产生的风险等级越高,RI 值越大<sup>[19]</sup>.因此,采用 RI 进行生态风险评价需要根据参评污染物的数量进行调整.研究中共有 3 种重金属元素,本文根据 Håkanson 提出的方法对分级标准做了相应调整,具体方法是:非污染的污染系数( $k=1$ )与参评重金属 Cd 最大的毒性响应系数(30)相乘的结果为  $E_r^i$  值风险分级的第一级的上限值,其他风险分级的上限值为上一级的结果乘以 2; RI 值的第一级上限值( $R=150$ )除以其研究的 8 种污染物总毒性响应系数( $C=133$ ),得到单位毒性系数的 RI 分级值( $b=1.13$ ),再乘以本研究的 3 种重金属毒性响应系数总值 36,四舍五入取十位整数值作为 RI 值第一级的上限值,其他 RI 值分级的上限值为上一级的结果乘以 2,得到本研究调整后的土壤重金属潜在生态风险评价的分级标准(表 2).

表 2 土壤潜在生态危害风险指数评价标准分级

Table 2 Grading standards of potential ecological risk of heavy metals in soils

$E_r^i$		RI		危害程度
Håkanson 方法	本研究	Håkanson 方法	本研究	
<40	<30	<150	<41	轻微
40~80	30~60	150~300	41~82	中等
80~160	60~120	300~600	82~164	强
160~320	120~240	>600	>164	很强
>320	>240			极强

#### 1.3.2 农作物重金属摄入的健康风险评价法

人群摄入农作物中重金属从而产生的健康风险

采用危险商法(HQ<sub>i</sub>)进行评价<sup>[20,21]</sup>,该法可反映农作物中重金属含量对各类暴露人群健康的危害程

度,当  $HQ_i > 1$  时,表明摄入农作物重金属会对人体的健康产生危害;当  $HQ_i < 1$  时,则不会对人体的健康造成危害.  $HQ_i$  的计算公式如下:

$$HQ_i = \frac{C_i \times FIR \times EF \times ED}{BW \times AT \times RfD_i} \quad (2)$$

式中,  $C_i$  为农作物样品中重金属  $i$  的含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $FIR$  为人均对农作物的日食用量 ( $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $EF$  为重金属年暴露频率 ( $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $ED$  为人体平均暴露年限 ( $\text{a}$ );  $BW$  为人体平均体重 ( $\text{kg}$ );  $AT$  为人均寿命期望值 ( $\text{d}$ );  $RfD_i$  为人体对重金属  $i$  的摄入参考剂量 [ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ].

农作物中多种重金属经人体摄入后产生的总风险采用危害指数 (HI) 表示, HI 的计算公式如下:

$$HI = \sum HQ_i \quad (3)$$

式中,  $HI \leq 1$  表明摄入农作物中多种重金属对人体的健康不会造成危害;  $HI > 1$  表明农作物中多种重金属经人体摄入后对健康产生危害的可能性大;  $HI > 10$  表明农作物中多种重金属摄入人体后存在慢性中毒的危害. 儿童 (6 ~ 12 岁) 和成人 (20 ~ 44 岁) 的农作物重金属摄入的风险系数相关参数见表 3.

表 3 农作物健康风险评价相关参数

相关参数	成人参考值	儿童参考值	文献
FIR	0.355	0.233	[22]
EF	350	350	[23]
ED	24	6	[23]
BW	61.8	19.2	[23]
AT	$ED \times 365$	$ED \times 365$	[24]
	$RfD_{Cd} = 0.001$		[25]
$RfD_i$	$RfD_{Pb} = 0.0035$		[26]
	$RfD_{Zn} = 0.3$		[27]

## 1.4 数据处理及分析

数据处理、分析和作图采用 Excel 2019、SPSS 23 和 Origin 2019 软件.

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤团聚体重金属富集特征

研究区耕地土壤 pH 为 6.5 ~ 7.5, 以中性为主, 图 2 所示为土壤中重金属含量测定结果. 结果显示, 土壤中重金属  $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Pb})$  和  $\omega(\text{Zn})$  的范围分别是 16.78 ~ 40.13、355.7 ~ 768.9 和 2398 ~ 5012  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 算术平均值分别为 26.22、530.3 和 3877  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 分别是贵州土壤环境背景值的 39.8、15.1 和 39.0 倍. 单项污染指数可以确定土壤环境受重金属污染的严重程度, 定义为某土壤重金属元素实测的含量与该元素所限定的含量之比<sup>[28]</sup>. 根据 GB 15618-2018 中规定的 Cd、Pb 和 Zn 风险筛选值 ( $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ , 农用地类型为其他) 分别为 0.3、120 和 250  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[29]</sup>, 土壤重金属单项污染指数的顺序为:  $\text{Cd}(87.40) > \text{Zn}(15.51) > \text{Pb}(4.42)$ . Cd、Pb 和 Zn 的变异系数分别为 27.79%、22.31% 和 22.47%, 均属中等变异, 土壤中 Cd、Pb 和 Zn 在研究区土壤空间分布存在差异, 与矿产开采活动有关.

不同粒径土壤团聚体重金属含量分析结果见图 3. 从中可知, 不同粒径土壤团聚体中各种重金属含量不同, 其中, Cd 平均含量随团聚体粒径的减小而增加, 各粒径土壤团聚体 Pb 和 Zn 平均含量顺序为:  $0.25 \sim 0.5 \text{ mm} > 0.053 \sim 0.25 \text{ mm} > 0.5 \sim 1 \text{ mm} > 2 \text{ mm} > 0.053 \text{ mm}$ . 而且各粒径团聚体重金属的含量存在差异性 (图 3),  $< 0.5 \text{ mm}$  粒径团聚体中 Cd 含量显著高于  $> 0.5 \text{ mm}$  粒径团聚体的含量 ( $P < 0.01$ ), Cd 在团聚体粒径  $< 0.053 \sim 0.5 \text{ mm}$  之间无明显差异 ( $P > 0.05$ ).  $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$  粒径团聚体中

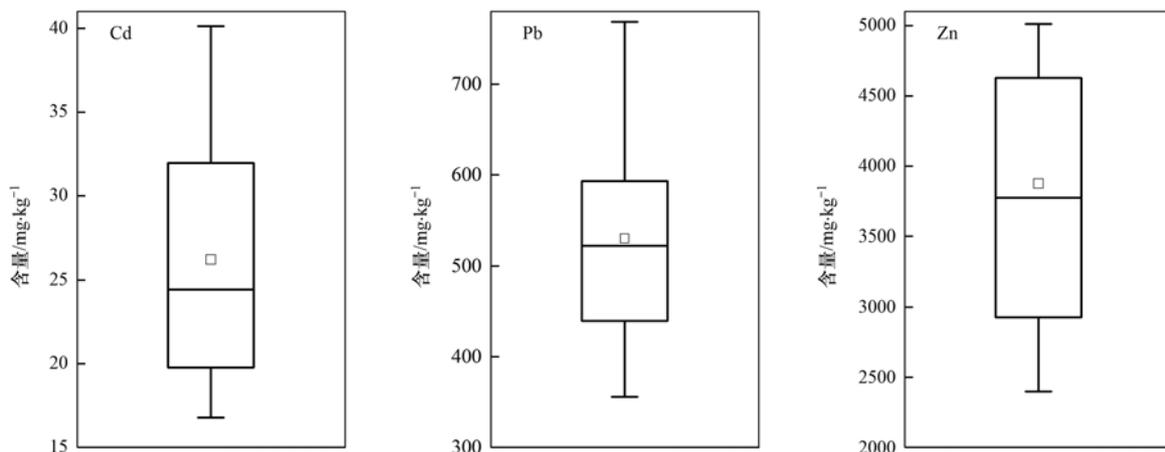
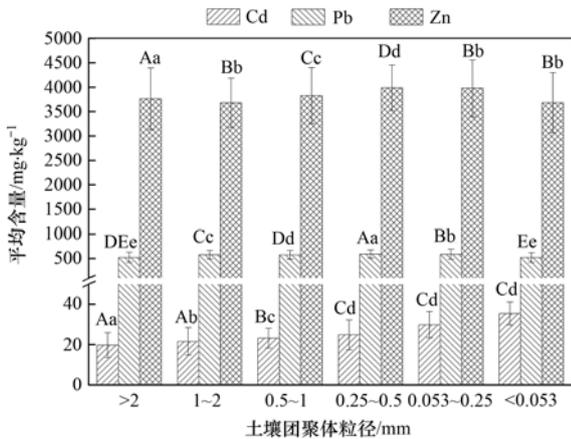


图 2 土壤中重金属含量测定结果

Fig. 2 Determination results of heavy mental contents in soil samples



相关系数用 Pearson 法表示,不同大写字母表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,不同小写字母表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

图 3 不同粒径的土壤团聚体中重金属含量测定结果

Fig. 3 Determination results of heavy mental contents in different aggregates sizes

Pb 和 Zn 含量显著高于其他粒径团聚体的含量 ( $P < 0.01$ ), Zn 在团聚体粒径  $< 0.053 \sim 0.25$  mm 之间无明显差异 ( $P > 0.05$ ). 重金属在不同粒径团聚体的分布可能与土壤团聚体中菌群种类<sup>[30]</sup>、土壤颗粒胶体数量<sup>[31]</sup>、土壤团聚体表面所带电荷<sup>[32]</sup>和动植物残体等因素有关. 通常情况下,重金属受小粒径团聚体的影响较大,团聚体粒径越小,表面接触面积及吸附力越大,所附着重金属含量就越高<sup>[33]</sup>,但是不同粒径的土壤团聚体对重金属的吸附能力并不总是随粒径的减小而增加,土壤团聚体对重金属吸附能力同时受团聚体粒径和重金属种类的影响,而重金属种类是决定土壤团聚体吸附重金属能力的关键因素<sup>[34,35]</sup>. 本研究区粒径  $< 0.053$  mm 团聚体中 Pb 和 Zn 含量最低,原因可能是相比于 Pb 和 Zn, Cd 与粒径  $< 0.053$  mm 团聚体的亲和力更强,占据了更多的接触面,导致 Pb 和 Zn 的含量低于其他粒径团聚体的含量. 此外,土壤微生物摄取营养物质的过程中可产生胶黏性分泌物,小粒径团聚体在这些胶黏性分

泌物作用下会形成稳定的大粒径团聚体,同时重金属的含量也随之增加<sup>[36,37]</sup>.

分布因子可以明确不同粒径土壤团聚体重金属的富集情况,定义为土壤团聚体某重金属含量与全土中该重金属含量之比<sup>[38]</sup>. 土壤团聚体中 Cd、Pb 和 Zn 在全土中的分布情况见图 4. Cd 随团聚体粒径的减小其分布逐渐增加; Pb 随团聚体粒径的减小呈增加-降低-增加-降低的趋势; Zn 随团聚体粒径的减小呈降低-增加-降低的趋势. Cd 在  $< 0.053$  mm 的团聚体中分布最高, Pb 和 Zn 在粒径  $0.25 \sim 0.5$  mm 的团聚体中分布因子高于其他粒径团聚体.

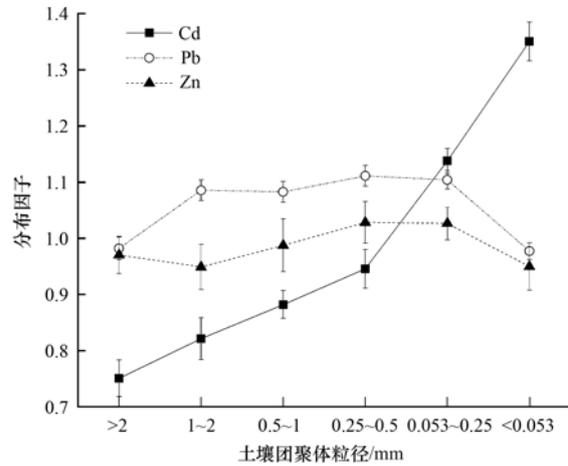
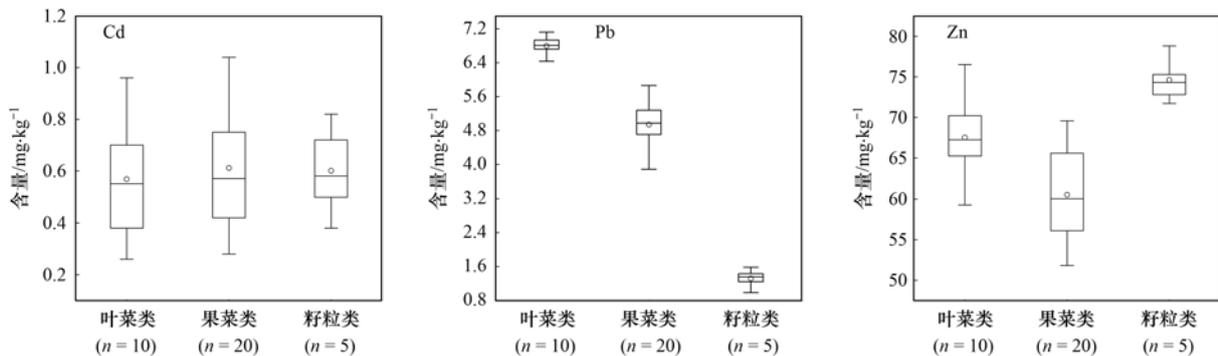


图 4 土壤团聚体重金属分布因子

Fig. 4 Distribution factors of heavy metals in soil aggregates

## 2.2 农作物重金属富集特征

研究区农作物中平均  $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Pb})$  和  $\omega(\text{Zn})$  分别为 0.61、5.09 和  $64.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 由于不同种类农作物对重金属富集程度不同,因此根据本研究的实际情况,将各种农作物根据可食用部位以及形态的不同分成 3 类:小白菜和早菜为叶菜类;佛手瓜、番茄和辣椒为果菜类;玉米为籽粒类. 从农作物样品重金属含量测定结果可以看出(图 5),各类农



n 表示样本数

图 5 农作物样品中重金属含量测定结果

Fig. 5 Determination results of heavy mental contents in crop samples

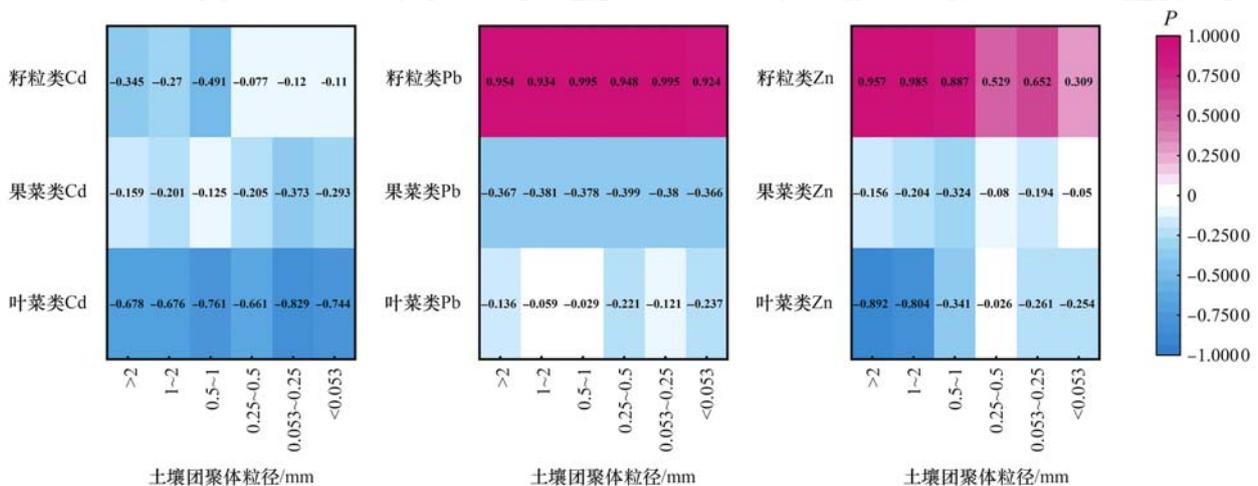
作物中不同重金属的平均含量顺序为:果菜类 > 籽粒类 > 叶菜类 (Cd); 叶菜类 > 果菜类 > 籽粒类 (Pb); 籽粒类 > 叶菜类 > 果菜类 (Zn). 从食品污染物限量标准 (GB 2762-2017) 中规定的限值来看<sup>[39]</sup>, 3 类农作物中  $\omega$ (Cd)、 $\omega$ (Pb) 和  $\omega$ (Zn) 均超出标准所规定的限定值, 其中叶菜类 Cd、Pb 和 Zn 超标率分别为 64.91%、95.68% 和 70.37%, 果菜类 Cd、Pb 和 Zn 超标率分别为 68.25%、96.06% 和 66.96%, 籽粒类 Cd、Pb 和 Zn 超标率分别为 83.33%、86.11% 和 32.98%. 各类农作物中  $\omega$ (Zn) 最高, 而叶菜类中  $\omega$ (Pb) 高于其他类别农作物. 这可能因为 Zn 是各类农作物维持自身生长发育所必需的营养元素<sup>[40]</sup>, 叶菜类作物的叶片单位面积中的气孔数量比其他类作物多, 可以通过呼吸和蒸腾作用摄取 Pb<sup>[41]</sup>.

受土壤污染程度、土壤自然成因、土壤微生物环境等多因素影响, 农作物与土壤重金属的关系问题尚未明确. 目前多采用生物富集系数表达农作物对重金属的富集能力, 其定义为农作物重金属含量与

土壤重金属含量的比值<sup>[42]</sup>. 本研究区中, 不同农作物对 Cd 的富集能力大小为: 籽粒类 (0.024) > 果菜类 (0.023) > 叶菜类 (0.022); 对 Pb 的富集能力大小为叶菜类  $\approx$  果菜类 (0.010) > 籽粒类 (0.0036); 对 Zn 的富集能力大小为: 果菜类 (0.018) > 叶菜类 (0.016) > 籽粒类 (0.015). 从结果来看, 不同农作物对不同重金属的富集能力存在差别, 其原因可能是各类农作物对不同重金属的耐受程度不同, 同时摄入多种重金属可能对农作物产生协同或拮抗作用.

### 2.3 土壤团聚体重金属与农作物重金属的相关性

研究区土壤团聚体重金属与农作物重金属的相关性见图 6. 由相关性分析结果可知, 籽粒类 Pb 含量与各粒径团聚体 Pb 含量以及籽粒类 Zn 含量与粒径 > 1 mm 团聚体 Zn 含量呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 其余农作物重金属含量与各粒径团聚体重金属含量均呈负相关关系. 说明籽粒类的 Pb 与各粒径土壤团聚体中的 Pb 关系密切, 籽粒类则更容易摄取和利用 > 1 mm 粒径土壤团聚体中的 Zn.



$P$  表示 Pearson 相关性系数

图 6 土壤团聚体与农作物重金属含量的相关性

Fig. 6 Pearson correlation levels of heavy metals between different aggregate sizes and crops

### 2.4 土壤团聚体生态风险与农作物健康风险

各种重金属潜在生态风险等级所占的比例见表 4. 各粒径的土壤团聚体 Cd 的潜在生态风险等级最高, 均表现为极强; Pb 的潜在生态危害等级表现为中等以上, 主要集中在 0.053 ~ 2 mm 的团聚体中; Zn 的潜在生态风险等级主要为中等. 通过潜在生态危害风险指数 RI 判断 (图 7), 团聚体粒径越小, RI 均值越大, 而且各粒径团聚体中的 Cd 是潜在生态风险的主要来源.

研究区居民长期食用农作物重金属  $HQ_i$  和 HI 结果见图 8. 从 3 类农作物  $HQ_i$  和 HI 的平均值来看, 摄入农作物对儿童的健康风险高于成年人. 因为

儿童处于发育阶段, 一些解毒和排泄器官尚未成熟, 有毒重金属对儿童作用时间更长, 危害程度越大<sup>[43]</sup>. 叶菜类和果菜类对人群的  $HQ_i$  顺序为: Pb > Cd > Zn, 籽粒类对人群的  $HQ_i$  大小顺序为: Cd > Pb > Zn. 而且 3 类农作物对人群  $HQ_i$  平均值均超过 1, 其中叶菜类和果菜类中 Pb 对儿童的  $HQ_i$  平均值均大于 10, 叶菜类中的 Pb 对成人同样会产生很严重危害. 从总风险值 HI 来看, 除籽粒类对成人的 HI 平均值在 1 ~ 10 范围之内之外, 其余类农作物 HI 平均值均大于 10, 表明摄入富含多种重金属的农作物后可对人群产生健康风险, 尤其对儿童可能产生慢性中毒的危害.

表 4 不同粒径的土壤团聚体中单一重金属潜在生态风险等级<sup>1)</sup>

Table 4 Rank of potential ecological risk of single heavy metal in different aggregates sizes

重金属元素	粒径/mm	潜在生态风险等级占比/%				
		轻微	中等	强	很强	极强
Cd	>2	—	—	—	—	100
	1~2	—	—	—	—	100
	0.5~1	—	—	—	—	100
	0.25~0.5	—	—	—	—	100
	0.053~0.25	—	—	—	—	100
	<0.053	—	—	—	—	100
Pb	>2	—	25.72	74.28	—	—
	1~2	—	—	100	—	—
	0.5~1	—	—	100	—	—
	0.25~0.5	—	—	100	—	—
	0.053~0.25	—	—	100	—	—
	<0.053	—	17.14	82.86	—	—
Zn	>2	5.71	94.29	—	—	—
	1~2	—	100	—	—	—
	0.5~1	—	100	—	—	—
	0.25~0.5	—	100	—	—	—
	0.053~0.25	—	100	—	—	—
	<0.053	5.71	94.29	—	—	—

1) “—”表示无相关数据

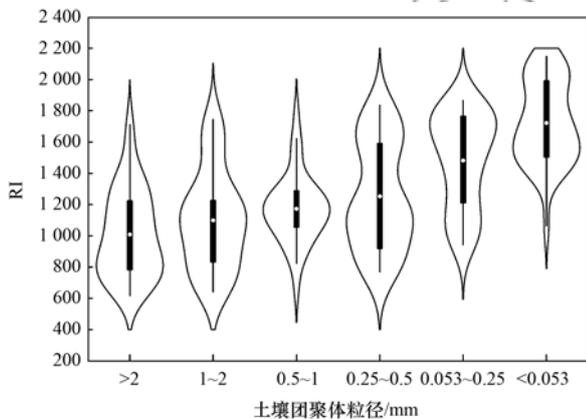
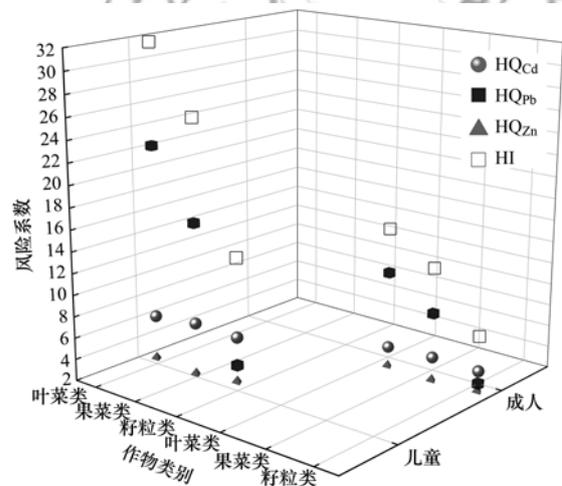


图 7 不同粒径的土壤团聚体总潜在生态危害指数

Fig. 7 Total risk index (RI) of heavy metals in different aggregates sizes



HQ<sub>Cd</sub>、HQ<sub>Pb</sub>和HQ<sub>Zn</sub>分别为重金属Cd、Pb和Zn的风险系数

图 8 不同种类农作物中重金属对人群的HQ<sub>i</sub>和HI

Fig. 8 The HQ<sub>i</sub> and HI value of heavy metals to adolescents and adults in three different types of crops

### 3 讨论

#### 3.1 土壤团聚体重金属的分布特征

研究区受长期采矿活动的影响,该区域耕地土壤重金属含量严重超标.土壤团聚体受土壤总体污染影响,对生态造成严重的潜在危害.不同种类重金属在团聚体中的含量分布不同,Shen等<sup>[7]</sup>选取了3个不同气候类型地区矿山附近的7个土壤剖面作为研究对象,并测定了不同粒径土壤团聚体Cd、Cu、Mn和Pb的含量分布,结果发现Pb的平均含量随土壤团聚体粒径的减小而增加,Cd的平均含量在粒径<0.053mm团聚体中最高,在粒径0.25~0.6mm团聚体中最低.不同的原因可能是研究区土壤常年受雨水影响较大,大粒径团聚体受雨水冲刷和

地表径流的影响产生颗粒侵蚀现象导致重金属暴露,不利于土壤凝聚,使各粒径团聚体的Cd和Pb分布产生差异,而且不同气候类型、土壤污染程度以及土地利用方式可能对不同粒径土壤团聚体重金属的分布产生影响.Liu等<sup>[44]</sup>对汾河盆地土壤团聚体重金属的研究中发现,粒径<0.05mm的土壤团聚体中重金属含量的顺序为: Cd > Pb > Zn,这与本研究结果相同.本研究土壤团聚体重金属含量在总体上的分布与土壤性质、土壤pH、可交换阳离子、重金属种类和总量等多种因素有关,由于研究区土壤pH以中性为主,土壤团聚体表面负电荷量比较多,

提高了 Pb 和 Zn 的吸附能力,降低其在土壤团聚体中的活跃程度,导致各粒径团聚体中 Pb 和 Zn 的分布因子相差不大.同时研究区耕地土壤的利用和种植方式能够改变土壤有机物质含量,对 Cd 的固定产生一定效果<sup>[45]</sup>,但重金属的多样性和高含量导致土壤微生物种群数量减少,这不但不利于土壤团聚体的凝聚,反而加剧土壤团聚体破碎化程度,导致土壤黏度降低,可交换阳离子数量减少,颗粒表面负电荷量增加,从而改变重金属在土壤团聚体的分配<sup>[46]</sup>.Cd 在小粒径土壤团聚体的竞争吸附能力较强,因此 Cd 在小颗粒土壤团聚体分布比较明显.综上所述,从源头控制减少重金属输入量并改善土壤总体生态环境是降低土壤团聚体危害性的重要手段.

### 3.2 土壤团聚体与农作物重金属相关性特征

不同种类农作物对土壤不同重金属的富集能力产生差异.李杰等<sup>[47]</sup>的研究通过对南宁市郊农田土壤-农作物系统重金属的迁移规律进行分析,发现叶菜类对土壤中不同重金属的富集系数大小关系为: Cd > Zn > Pb,籽粒类则为: Zn > Cd > Pb.这与本研究中籽粒类的结果不同,其原因可能是籽粒类作物的根系与地下土壤接触面积更大,加之土壤 Cd 含量高,通过根系可以转运更多的 Cd;而且土壤中的 Zn 能促进 Cd 向籽粒类可食用部位转移<sup>[47]</sup>.籽粒类根系能分泌有机酸,与土壤团聚体中的 Pb 结合形成络合物,促进难溶性的 Pb 移动至籽实中<sup>[48]</sup>.Zn 作为一种营养元素,首先会附着在大粒径团聚体表面,通过籽粒类发达的根系组织更容易从大颗粒获取 Zn,所以二者之间的含量具有正相关性;研究区籽粒类的耕地利用方式以秸秆还田为主,导致土壤中有机物含量增多,从而改变土壤团聚体的结构组成和性质,籽粒类富集土壤中 Cd 的同时可能对土壤团聚体中 Cd 的吸附或解吸作用产生影响<sup>[49]</sup>,因此籽粒类 Cd 含量与土壤团聚体 Cd 含量之间具有负相关性.果菜类对 Pb 能够产生排斥反应,其叶片对 Cd 具有解毒功能<sup>[50]</sup>.因此,农作物与土壤团聚体重金属含量之间的负相关性与外源性干扰、自身排异反应、重金属的选择性吸收以及解毒作用有关,其作用机制和影响因素有待进一步研究.

### 3.3 土壤团聚体与农作物重金属风险防控

研究区土壤团聚体重金属对生态产生严重的潜在危害,而且食用农作物也会对人群产生健康风险.骆占斌等<sup>[51]</sup>的研究发现,再生铅厂周边土壤中 Cd 和 Pb 对当地居民存在较强的潜在健康风险,特别是对儿童的健康影响尤为严重.张成丽等<sup>[52]</sup>对禹州市矿区周围土壤和农作物重金属污染状况进行研究,

发现农作物籽粒类 Cd 污染风险最为明显,而且 Zn 和 Cd 对儿童产生的健康风险较高,这与本研究区产生的健康风险情况相似.但本研究区籽粒类 Cd 会严重影响人体健康,同时需要对土壤 Pb 进行管控,避免叶菜类和果菜类的 Pb 含量超过健康风险阈值.3 类农作物可食用部分对人类健康的威胁顺序为:叶菜类 > 果菜类 > 籽粒类,对人群产生的危害均表现为儿童大于成人.应对研究区采取有效的治理措施,改进农作物种植方式和控制外源性重金属输入以降低土壤团聚体产生的生态风险,同时要兼顾农作物污染问题,避免损害人体健康.

## 4 结 论

研究区耕地土壤总体呈中性,存在重金属污染源且受 Cd、Pb 和 Zn 严重污染,与长期矿产开采利用有关,各重金属浓度在空间分布上存在差异.粒径 <0.053 mm 团聚体 Cd 含量最高, >2 mm 团聚体 Cd 含量最低; 0.25 ~ 0.5 mm 团聚体 Pb 和 Zn 含量最高, <0.053 mm 团聚体 Pb 和 Zn 含量最低.3 类农作物对 Cd 的富集能力最大,对 Pb 的富集能力最小.籽粒类 Pb 与各粒径土壤团聚体中 Pb 以及籽粒类 Zn 与 >1 mm 粒径土壤团聚体 Zn 具有极显著的正相关性( $P < 0.01$ ).相同粒径团聚体中 Cd 产生的生态风险最大,粒径 <0.053 mm 的土壤团聚体总潜在生态风险最大.叶菜类和果菜类中的 Pb 对儿童健康威胁很大,需采取有效措施进行管控.

### 参考文献:

- [1] 卢金伟,李占斌.土壤团聚体研究进展[J].水土保持研究,2002,9(1):81-85.  
Lu J W, Li Z B. Advance in soil aggregate study[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 81-85.
- [2] 张旭冉,张卫青.土壤团聚体研究进展[J].北方园艺,2020,(21):131-137.  
Zhang X R, Zhang W Q. Research progress of soil aggregates[J]. Northern Horticulture, 2020, (21): 131-137.
- [3] 吴梦瑶,陈林,庞丹波,等.贺兰山不同海拔植被下土壤团聚体分布及其稳定性研究[J].水土保持学报,2021,35(2):210-216.  
Wu M Y, Chen L, Pang D B, et al. Study on distribution and stability of soil aggregate under vegetation at different elevations in Helan Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 210-216.
- [4] 郑顺安,陈春,郑向群,等.污染土壤不同粒径团聚体中铅的富集特征及其与叶类蔬菜铅吸收之间的相关性[J].农业环境科学学报,2013,32(3):556-564.  
Zheng S A, Chen C, Zheng X Q, et al. A correlation between enrichment characteristics of lead in different particle-size fractions of soil aggregates and lead concentrations of leafy vegetables[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(3): 556-564.
- [5] Shen Q, Demisie W, Zhang S, et al. The association of heavy metals with iron oxides in the aggregates of naturally enriched soil

- [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020, **104**(1): 144-148.
- [6] Huang B, Li Z W, Li D Q, *et al.* Distribution characteristics of heavy metal(loid)s in aggregates of different size fractions along contaminated paddy soil profile[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(30): 23939-23952.
- [7] Shen Q, Xiang J M, Zhang M K. Distribution and chemical speciation of heavy metals in various size fractions of aggregates from zonal soils [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2020, doi: 10.1080/03067319.2020.1781840.
- [8] Deng A M, Wang L, Chen F, *et al.* Soil aggregate-associated heavy metals subjected to different types of land use in subtropical China[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2018, **16**, doi: 10.1016/j.gecco.2018.e00465.
- [9] 喻国军, 谢晓尧. 喀斯特地区造林对土壤团聚体稳定性及微生物碳代谢活性的影响[J]. *水土保持研究*, 2020, **27**(6): 21-27, 36.
- Yu G J, Xie X Y. Effects of afforestation on soil aggregate stability and microbial carbon metabolism activity in karst area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, **27**(6): 21-27, 36.
- [10] Guo J Z, Shi W J, Wen L J, *et al.* Effects of a super-absorbent polymer derived from poly- $\gamma$ -glutamic acid on water infiltration, field water capacity, soil evaporation, and soil water-stable aggregates[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2020, **66**(12): 1627-1638.
- [11] Biesgen D, Frindte K, Maarastawi S, *et al.* Clay content modulates differences in bacterial community structure in soil aggregates of different size[J]. *Geoderma*, 2020, **376**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114544.
- [12] 张富贵, 彭敏, 王惠艳, 等. 基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4197-4209.
- Zhang F G, Peng M, Wang H Y, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals at township scale in the high background of heavy metals, southwestern, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4197-4209.
- [13] 周艳, 万金忠, 李群, 等. 铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4733-4739.
- Zhou Y, Wan J Z, Li Q, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment of corn grains from a Pb-Zn mining area [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4733-4739.
- [14] 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- Zhou Y, Chen Q, Deng S P, *et al.* Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- [15] 中国科学院南京土壤所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [16] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [17] 刘凤枝. 农业环境监测实用手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [18] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(2): 112-115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [19] 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.
- [20] 杨刚, 沈飞, 钟贵江, 等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(9): 2014-2021.
- Yang G, Shen F, Zhong G J, *et al.* Concentration and health risk of heavy metals in crops and soils in a zinc-lead mining area in southwest mountainous regions [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(9): 2014-2021.
- [21] 吴迪, 杨秀珍, 李存雄, 等. 贵州典型铅锌矿区水稻土壤和稻中重金属含量及健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(10): 1992-1998.
- Wu D, Yang X Z, Li C X, *et al.* Concentrations and health risk assessments of heavy metals in soil and rice in zinc-lead mining area in Guizhou Province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(10): 1992-1998.
- [22] 李丁, 王济, 宣斌, 等. 贵阳南部近郊蔬菜重金属污染状况及健康风险评估[J]. *环境污染与防治*, 2019, **41**(11): 1362-1367, 1373.
- Li D, Wang J, Xuan B, *et al.* Heavy metals pollution and health risk evaluation of vegetables in southern suburbs of Guiyang, China[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, **41**(11): 1362-1367, 1373.
- [23] HJ 25.3-2019, 建设用土壤污染风险评估技术导则[S].
- HJ 25.3-2019, Technical guidelines for risk assessment of soil contamination of land for construction[S].
- [24] EPA/600/R-09/052F, Exposure factors handbook: 2011 edition [S].
- [25] CASRN 7440-43-9, Cadmium[S].
- [26] CASRN 7439-92-1, Lead and compounds (inorganic)[S].
- [27] CASRN 7440-66-6, Zinc and compounds[S].
- [28] 穆莉, 王跃华, 徐亚平, 等. 湖南省某县稻田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(3): 573-582.
- Mu L, Wang Y H, Xu Y P, *et al.* Pollution characteristics and sources of heavy metals in paddy soils in a county of Hunan Province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(3): 573-582.
- [29] 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].
- GB 15618-2018, Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land[S].
- [30] Zhao F Z, Fan X D, Ren C J, *et al.* Changes of the organic carbon content and stability of soil aggregates affected by soil bacterial community after afforestation [J]. *CATENA*, 2018, **171**: 622-631.
- [31] 刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J]. *水土保持学报*, 2020, **34**(3): 267-273, 298.
- Liu J Y, Zhou Z C, Su X M. Review of the mechanism of root system on the formation of soil aggregates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(3): 267-273, 298.
- [32] 马任甜, 胡斐南, 刘婧芳, 等. 黄土高原植被恢复过程中土壤表面电化学性质演变特征[J]. *土壤学报*, 2020, **57**(2):

- 392-402.
- Ma R T, Hu F N, Liu J F, *et al.* Evolution of soil surface electrochemical characteristics with vegetation restoration on loess plateau in Ziwuling area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(2): 392-402.
- [33] Ajmone-Marsan F, Biasioli M, Kralj T, *et al.* Metals in particle-size fractions of the soils of five European cities [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **152**(1): 73-81.
- [34] Wang Q Y, Hu B, Yu H W. Adsorption behaviors of fungicide-derived copper onto various size fractions of aggregates from orchard soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(24): 24983-24990.
- [35] Park H J, Park H J, Yang H I, *et al.* Sorption of Pb in chemical and particle-size fractions of soils with different physico-chemical properties[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, **19**(1): 310-321.
- [36] 李婕, 杨学云, 孙本华, 等. 不同土壤管理措施下壤土团聚体的大小分布及其稳定性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, **20**(2): 346-354.
- Li J, Yang X Y, Sun B H, *et al.* Effects of soil management practices on stability and distribution of aggregates in Lou soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, **20**(2): 346-354.
- [37] 谢钧宇, 曹寒冰, 孟会生, 等. 不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的大小分布及其稳定性[J]. *水土保持学报*, 2020, **34**(3): 274-281, 290.
- Xie J Y, Cao H B, Meng H S, *et al.* Effects of different fertilization regimes and fertilization ages on size distribution and stability of soil aggregates [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(3): 274-281, 290.
- [38] Acosta J A, Cano A F, Arocena J M, *et al.* Distribution of metals in soil particle size fractions and its implication to risk assessment of playgrounds in Murcia City (Spain) [J]. *Geoderma*, 2009, **149**(1-2): 101-109.
- [39] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [40] Rehman Z U, Khan S, Shah M T, *et al.* Transfer of heavy metals from soils to vegetables and associated human health risks at selected sites in Pakistan[J]. *Pedosphere*, 2018, **28**(4): 666-679.
- [41] 方月梅, 张晓玲, 刘娟, 等. 铜绿山矿区菜地土壤重金属污染特征[J]. *环境污染与防治*, 2018, **40**(1): 69-74.
- Fang Y M, Zhang X L, Liu J, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals in vegetable soil in the mining area of Tonglvshan [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2018, **40**(1): 69-74.
- [42] 蔡保新, 黄玉, 王宇, 等. 云南某锡矿区主要农作物重金属富集差异性[J]. *地质通报*, 2014, **33**(8): 1175-1181.
- Cai B X, Huang Y, Wang Y, *et al.* An analysis of differences in accumulation of heavy metals in main crops in a tin mining area of Yunnan Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, **33**(8): 1175-1181.
- [43] 周开胜. 蚌埠及周边地区土壤和蔬菜的重金属污染研究 [J]. *环境与职业医学*, 2018, **35**(10): 910-916.
- Zhou K S. Heavy metal pollution in soil and vegetables in Bengbu City and its vicinities [J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2018, **35**(10): 910-916.
- [44] Liu M X, Han Z Q. Distribution and bioavailability of heavy metals in soil aggregates from the Fenhe River Basin, China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020, **104**(4): 532-537.
- [45] 余贵芬, 蒋新, 孙磊, 等. 有机物质对土壤镉有效性的影响研究综述[J]. *生态学报*, 2002, **22**(5): 770-776.
- Yu G F, Jiang X, Sun L, *et al.* A review for effect of organic substances on the availability of cadmium in soils [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(5): 770-776.
- [46] 张良运, 李恋卿, 潘根兴, 等. 重金属污染可能改变稻田土壤团聚体组成及其重金属分配[J]. *应用生态学报*, 2009, **20**(11): 2806-2812.
- Zhang L Y, Li L Q, Pan G X, *et al.* Effects of heavy metals pollution on paddy soil aggregates composition and heavy metals distribution [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(11): 2806-2812.
- [47] 李杰, 朱立新, 康志强. 南宁市郊周边农田土壤-农作物系统重金属元素迁移特征及其影响因素[J]. *中国岩溶*, 2018, **37**(1): 43-52.
- Li J, Zhu L X, Kang Z Q. Characteristics of transfer and their influencing factors of heavy metals in soil-crop system of peri-urban agricultural soils of Nanning, South China [J]. *Carsologica Sinica*, 2018, **37**(1): 43-52.
- [48] 马瑞, 杨帅, 秦鑫, 等. 不同耕作措施及玉米生育期对黄壤坡耕地土壤团聚体稳定性的影响[J]. *长江科学院院报*, 2020, **37**(11): 46-51, 58.
- Ma R, Yang S, Qin X, *et al.* Effects of different tillage measures and maize growing seasons on soil aggregates' stability in sloping yellow soil cropland [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, **37**(11): 46-51, 58.
- [49] Zhang Q, Li Z W, Huang B, *et al.* Effect of land use pattern change from paddy soil to vegetable soil on the adsorption-desorption of cadmium by soil aggregates [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(3): 2734-2743.
- [50] 邓小鹏, 彭克俭, 陈亚华, 等. 4种茄科植物对矿区污染土壤重金属的吸收和富集[J]. *环境污染与防治*, 2011, **33**(1): 46-51.
- Deng X P, Peng K J, Chen Y H, *et al.* Absorption and accumulation of heavy metals by four Solanaceae plants in mining contaminated soil [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2011, **33**(1): 46-51.
- [51] 骆占斌, 陈浮, 张旺园, 等. 再生铅厂土壤重金属污染及健康风险评估[J]. *环境科学与技术*, 2018, **41**(4): 197-204.
- Luo Z B, Chen F, Zhang W Y, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment in the soil surrounding a secondary lead plant [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **41**(4): 197-204.
- [52] 张成丽, 张伟平, 程红丹, 等. 禹州市煤矿区周边土壤和农作物重金属污染状况及健康风险评估[J]. *环境化学*, 2019, **38**(4): 805-812.
- Zhang C L, Zhang W P, Cheng H D, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment of farmland soil around coal mines in Yuzhou City [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(4): 805-812.

## CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios .....	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China; Emission, Management, Purification, and Policy .....	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City .....	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak .....	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM <sub>2.5</sub> Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest .....	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan .....	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang .....	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing .....	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer .....	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang .....	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones .....	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter .....	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone .....	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China .....	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies .....	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province .....	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020 .....	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement .....	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity .....	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin .....	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015 .....	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River .....	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values .....	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir .....	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake .....	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River .....	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan .....	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China .....	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland .....	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands .....	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil .....	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers .....	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sizozem .....	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants .....	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis .....	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge .....	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites .....	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China .....	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province .....	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China .....	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area .....	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District .....	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren .....	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar .....	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L. ....	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China .....	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emission in Single Cropping Paddy Field .....	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N <sub>2</sub> O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid .....	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil .....	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland .....	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils .....	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower .....	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)