

## 北京城区PM<sub>2.5</sub>各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期  
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM<sub>2.5</sub> 各组分污染特征及来源分析 ..... 安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)

基于时空混合效应模型的京津冀 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化模拟 ..... 范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)

2000~2018年京津冀城市群 PM<sub>2.5</sub> 时空演变及其与城市扩张的关联 ..... 赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)

海-陆大气交汇作用下青岛冬季天气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征与来源解析 ..... 虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)

硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟 ..... 张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)

省会城市不同功能区大气 PM<sub>2.5</sub> 化学组分季节变化及来源分析 ..... 孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)

太原市冬季不同污染程度下 PM<sub>2.5</sub> 的化学组成、消光特征及氧化潜势 ..... 任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)

郑州市冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 金属元素来源及健康风险评估 ..... 姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)

淄博市冬季 PM<sub>2.5</sub> 载体金属元素污染特征、生态风险评估及来源分析 ..... 白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)

承德市 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评估 ..... 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)

珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移 ..... 付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)

华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源 ..... 张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡亮, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)

基于模式过程分析技术天津地区 PM<sub>2.5</sub> 污染气象成因分析 ..... 郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)

基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制 ..... 陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)

基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征 ..... 菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)

基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测 ..... 陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)

基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进 ..... 蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)

基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法 ..... 石耀鹏, 胡京南, 褚晰晰, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)

重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估 ..... 曾景海, 王灿 (2436)

黄河流域水污染风险分区 ..... 周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)

黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征 ..... 李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)

黄河沉积物重金属时空分布与污染评价 ..... 王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)

APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源 ..... 沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)

河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系 ..... 肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)

太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析 ..... 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)

洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性 ..... 胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)

富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹 ..... 郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)

基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析 ..... 马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)

暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析 ..... 张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)

鄱阳湖流域水葫芦 (*Eichhornia crassipes*) 对水体微塑料的吸附截留效应 ..... 李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)

太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评估 ..... 刘舒娇, 丁剑楠, 石浚哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)

骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量 ..... 姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)

太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示 ..... 蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)

辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析 ..... 李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李元乾, 郑娜 (2586)

面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变 ..... 薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)

微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响 ..... 李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)

白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建 ..... 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)

人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响 ..... 高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)

鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征 ..... 江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)

负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb-Ni 电极催化氧化双酚 A ..... 符远航, 刘安迪, 黄纬斌, 唐柏彬, 张进忠 (2640)

磁性 Mn<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> 催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解亚甲基蓝效能及机制 ..... 徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)

两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响 ..... 蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)

AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素 ..... 张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)

三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响 ..... 卢英源, 董小琦, 彭星然, 贾晓珊 (2685)

污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析 ..... 李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)

基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析 ..... 张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)

铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价 ..... 陈航, 王颖, 王澍 (2719)

典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响 ..... 周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)

两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤 ..... 孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)

基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测 ..... 王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)

紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征 ..... 徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)

不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价 ..... 邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)

木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响 ..... 申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)

生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响 ..... 郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)

戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素 ..... 何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)

模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响 ..... 王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)

中国主要城市的城市化对局地增温的贡献 ..... 李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)

《环境科学》征订启事(2293) 《环境科学》征稿简则(2426) 信息(2585, 2672, 2708)

# 太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析

胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲\*

(山西农业大学城乡建设学院, 太谷 030801)

**摘要:** 为了解太原城区段汾河河岸带土壤中重金属污染现状, 分析了太原城区段汾河西岸河岸带表层土壤 6 种重金属元素 (Cd、Cr、Pb、Cu、Zn 和 Hg) 的含量状况及其分布特征, 利用单因子污染指数法、地累积指数法和潜在生态风险指数法对重金属的污染程度及其生态风险进行评价, 并用相关性分析、主成分分析和聚类分析进行源解析。结果表明, 太原城区段汾河西岸河岸带土壤中 Cr 和 Cu 的均值低于山西省土壤背景值, Cd、Pb、Zn 和 Hg 的均值超过背景值, Cd 和 Hg 的点位超标率大于 90%。沿河流方向, 6 种重金属含量降低, 高值在二期北延段 C 断面。污染评价结果表明, Hg 具有强生态危害, Cd 具有中等强度生态危害, 其它 4 种重金属是轻微生态危害, 各样点综合潜在生态风险为中等。相关性分析、主成分分析和聚类分析结果表明, Zn、Pb 和 Cd 具有同源性, 主要受交通运输、农业生产活动和矿业活动等人为源的影响; Hg 和 Cu 来源相似, 污染源为工业生产, 并且 Cu 在一定程度上受交通运输和农业活动的影响; Cr 的污染源是成土母质和工业生产。

**关键词:** 河岸带; 重金属含量; 分布特征; 风险评价; 源解析

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2500-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202107258

## Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City

HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, GOU Kui-xian, WANG Chun-ling\*

(College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

**Abstract:** To improve understanding of the present situation of heavy metal pollution in the soil of the riparian zone of the Fenhe River in the urban section of Taiyuan, this study analyzed the west bank of the Fenhe River in the urban section of Taiyuan with surface soil heavy metal (Cd, Cr, Pb, Cu, Zn, and Hg) contents and distribution characteristics, using the single factor pollution index method, geo-accumulation index, and potential ecological risk index method to assess pollution degree and ecological risk. Correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis were used for source analysis. The results showed that the mean values of Cr and Cu in the soil of the west bank of the Fenhe River in the Taiyuan urban section were lower than the background values of soils in Shanxi Province, whereas the mean values of Cd, Pb, Zn, and Hg exceeded the background values, and the over-standard rate of Cd and Hg was more than 90%. Along the river direction, the contents of the six heavy metals decreased, and the high values were in the C section of the north extension of the second phase. The results of the pollution assessment showed that Hg was a strong ecological hazard, Cd was a moderate ecological hazard, and the other four heavy metals were slight ecological hazards, and the comprehensive potential ecological risk of each sample was moderate. The results of correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis showed that Zn, Pb, and Cd were homologous and were mainly affected by human sources, including transportation, agricultural production activities, and mining activities. The sources of Hg and Cu were similar, largely industrial production, and Cu was affected by transportation and agricultural activities to a certain extent. The pollution sources of Cr were soil parent material and industrial production.

**Key words:** riparian zone; heavy metal content; distribution characteristics; risk assessment; source analysis

土壤是农业生产和人类赖以生存的基础,也是人类食物与生态环境安全的保障<sup>[1]</sup>。重金属作为典型的持久性有毒污染物<sup>[2]</sup>,在土壤中具有持久性、累积性和污染后果严重性等特点<sup>[3]</sup>。目前,我国的重金属污染土壤已达 333 万  $\text{hm}^2$  且这个数字还在增长,重金属污染对土壤的生态安全和人体健康构成了极大的威胁<sup>[4]</sup>。河岸带是介于陆地与河流之间的过渡地带,承担着河流上、下游之间,地表上、下层之间等多维度的物质与能量迁移和转换功能<sup>[5]</sup>,极易受到工业活动、交通运输、地表径流、农业耕作、垃圾堆放和旅游等人类活动的影响,它们均会向环境中释放出大量的重金属,造成河岸带土壤重金属污染,破坏河岸带生态系统平衡,使得河岸带生态系统退化和景观价值功能降低<sup>[6,7]</sup>。汾河流域地处黄

河中游,是山西省重要的生态功能区、人口密集区、粮棉生产区和经济发达区,在山西经济发展中居于十分重要的地位<sup>[8]</sup>。但近年来,随着城市规模迅速扩张,经济开发力度加大,汾河流域人口持续增长,土地资源承受着巨大的压力,不仅退化严重,土壤重金属污染亦显著凸显<sup>[9,10]</sup>。太原市是中国重要的能源和重工业基地之一,有学者对太原市的土壤重金属污染问题一直比较关注,相关研究主要针对太原市农田土壤重金属的含量、分布特征、潜在生态风险评价和污染原因等,对城市中的河岸带土壤研究

收稿日期: 2021-07-31; 修订日期: 2021-10-14

基金项目: 山西省自然科学基金项目 (201801D121262); 山西农业大学科技创新基金项目 (2015 YJ21)

作者简介: 胡杰 (1996 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为土壤污染与修复, E-mail: hujie2343@163.com

\* 通信作者, E-mail: well6501@126.com

较少,同时对景观治理改造后的太原城区段汾河河岸带土壤还少有研究<sup>[11~15]</sup>. 因此,本文以太原城区段汾河西岸河岸带土壤为研究对象,分析6种重金属元素的含量状况和分布特征,探讨重金属来源,并评价其污染现状,以期为该区域土壤重金属的管控和防治提供可借鉴的依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

太原市位于山西省中部,矿产资源丰富,煤炭的储量高达176.7亿t,铁矿的储量位居第二,约有6.7亿t. 太原市中南部为汾河河谷平原,整体地势北高南低,属于温带半干旱季风气候,昼夜温差大,年降水量420mm左右,海拔约800m<sup>[16,17]</sup>,由冲积平原和冲洪积倾斜平原组成,太原市城区就坐落于河谷平原.

研究区为太原城区段汾河西岸河岸带,地势平坦,有较宽阔的河岸滩,土壤类型主要为褐土和草甸土,小店与晋源区以冲积潮土和洪积褐土为主<sup>[17]</sup>,北起柴村桥北侧,南至迎宾桥下游,总长超过30km. 研究区自1998年开始,先后进行了两期景观治理,并于2014年启动第三期景观治理<sup>[16,18]</sup>. 一期景观治理北起胜利桥上游,南至南内环桥下游125m,全长近6km;二期景观治理是在一期的基础上,分别向南、北延伸,总长约14.4km;三期景观治理是在二期的基础上向南延伸,北起二期景观治理末端的祥云桥下游500m,南至晋祠迎宾路下游2km,全长约12km. 研究区采样分布示意如图1所示.

### 1.2 采样点布设

根据汾河公园景观治理的工程期,在每期河岸带均匀布设3条垂直样带,依据植被配置模式、样带长度和距道路的距离在样带内布设土壤采样点,共布设12条样带,37个采样点(图1).

### 1.3 土壤样品的采集

2020年10月在太原城区段汾河西岸河岸带采集表层土壤样品,采集土壤样品时,先用GPS定位,用小铲除去表层3mm左右的草根浮土,然后采集表层0~20cm的土样,并记录周边环境. 每个土壤样品都由样点附近3个点混合而成,每个混合土壤样品不少于1kg,装于聚乙烯自封袋中,并贴好标签,注明编号、日期等. 采集的土壤样品经自然风干后去除植物残体、砾石和碎片等杂物,按四分法取土研磨,分别过10目和100目的筛,常温保存备用.

### 1.4 土壤样品的测定

测试的指标包括pH值、镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)、铜(Cu)、锌(Zn)和汞(Hg),其中pH值用电

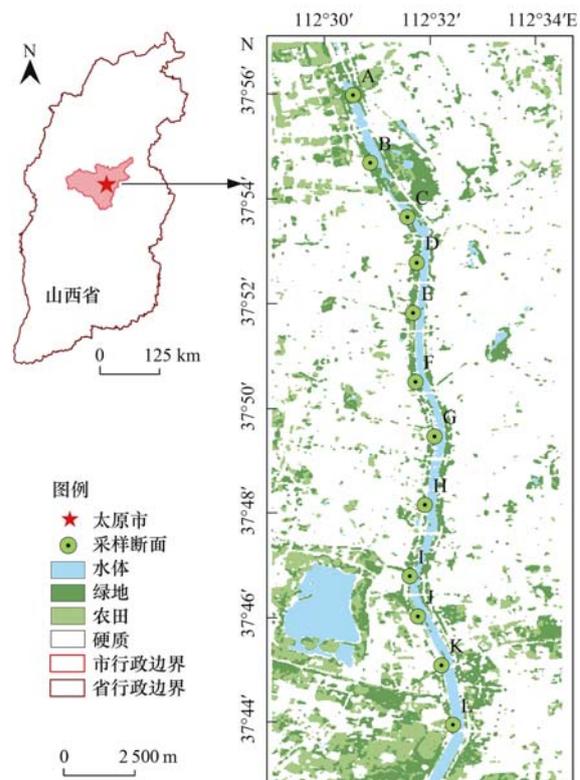


图1 研究区采样分布示意

Fig. 1 Sampling sites distribution of the study area

极法测定,Hg用原子荧光光度法(AFS)测定,Cd、Cr、Pb、Cu和Zn用原子吸收光谱法(AAS)测定.

### 1.5 重金属污染评价

#### 1.5.1 单因子污染指数

采用单因子污染指数法( $P_i$ )对研究区表层土壤重金属污染程度进行评价<sup>[19]</sup>,其计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中, $P_i$ 为重金属*i*的单因子污染指数, $C_i$ 为重金属*i*的实测值( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), $S_i$ 为重金属*i*的评价标准值( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),以山西省土壤背景值<sup>[20]</sup>作为评价标准(表1).

表1 单因子污染指数分级标准

Table 1 Classification standard of single factor pollution index		
单因子污染指数 ( $P_i$ )	污染水平	污染等级
$P_i \leq 1$	无	I
$1 < P_i \leq 2$	轻微	II
$2 < P_i \leq 3$	轻度	III
$3 < P_i \leq 5$	中度	IV
$P_i > 5$	重度	V

#### 1.5.2 地累积指数法

采用德国学者Müller<sup>[21]</sup>提出的地累积指数法( $I_{\text{geo}}$ )对研究区表层土壤重金属污染程度进行评价,该方法既考虑了自然地质运动过程对背景值的影响,又考虑了人为活动对重金属污染的影响,其计算

公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (K \times S_i)] \quad (2)$$

式中,  $I_{geo}$  为重金属  $i$  的地累积指数,  $C_i$  为重金属  $i$  的实测值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $S_i$  为重金属  $i$  的评价标准值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 以山西省土壤环境背景值<sup>[20]</sup> 作为评价标准,  $K$  为消除各地岩石差异可能引起背景值的变动而采用的系数, 一般为 1.5<sup>[22]</sup>. 地累积指数污染等级划分如表 2 所示.

表 2 地累积指数污染等级划分

Table 2 Classification of geo-accumulation index pollution levels

地累积指数 ( $I_{geo}$ )	污染水平	污染等级
$I_{geo} \leq 0$	无	I
$0 < I_{geo} \leq 1$	轻度	II
$1 < I_{geo} \leq 2$	中度	III
$2 < I_{geo} \leq 3$	中度-重度	IV
$3 < I_{geo} \leq 4$	重度	V
$4 < I_{geo} \leq 5$	重度-极度	VI
$I_{geo} > 5$	极度	VII

### 1.5.3 潜在生态风险指数法

采用 1980 年瑞典学者 Hakanson<sup>[23]</sup> 建立的潜在生态风险指数法评价研究区土壤生态风险水平, 该方法综合考虑了重金属的生物毒性、污染含量和环境对重金属污染敏感性等因素, 综合反映重金属对生态环境的影响潜力, 其计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n T_i \times \frac{C_i}{B_i} \quad (3)$$

式中,  $E_i$  为重金属的单项潜在生态风险指数,  $T_i$  为重金属  $i$  的毒性响应系数, 本研究中毒性响应系数<sup>[24]</sup>  $Hg = 40 > Cd = 30 > Pb = Cu = 5 > Cr = 2 > Zn = 1$ ,  $C_i$  为重金属  $i$  的实测值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $B_i$  为重金属  $i$  的评价标准值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 以山西省土壤背景值<sup>[20]</sup> 作为评价标准,  $RI$  为重金属的综合潜在生态风险指数. 潜在生态风险指数分级标准如表 3 所示.

表 3 潜在生态风险指数分级标准

Table 3 Classification criteria of potential ecological risk index

单项潜在生态风险指数 ( $E_i$ )	综合潜在生态风险指数 ( $RI$ )	生态危害程度	生态危害等级
$E_i < 40$	$RI < 150$	轻微	I
$40 \leq E_i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中等	II
$80 \leq E_i < 160$	$300 \leq RI < 600$	强	III
$160 \leq E_i < 320$	$600 \leq RI < 1200$	很强	IV
$E_i \geq 320$	$RI \geq 1200$	极强危害	V

### 1.6 数据处理与分析

采用 SPSS 26.0 对重金属含量和来源进行统计和分析, 用 Origin 2018 绘制重金属分布图和污染评价结果图.

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤重金属含量

太原城区段汾河西岸河岸带土壤 pH 值及重金属元素含量统计见表 4. 从中可知, 研究区表层土壤呈碱性 (pH 值为 7.76 ~ 8.35), 6 种重金属的平均值由大到小排列顺序为:  $Zn (67.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > Cr (44.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > Cu (18.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > Pb (18.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > Cd (0.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > Hg (0.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ ,  $Zn$  和  $Cr$  的含量较高, 约占 6 种重金属总含量的 68% 以上. 与山西省土壤背景值<sup>[20]</sup> 相比,  $Cr$  和  $Cu$  的平均值均低于背景值,  $Cd$ 、 $Pb$ 、 $Zn$  和  $Hg$  的平均值分别为背景值的 2.06、1.23、1.06 和 2.61 倍,  $Cd$ 、 $Pb$  和  $Hg$  的土壤样品点位超标率均在 50% 以上, 分别为 100%、51.35% 和 94.59%. 以土壤环境质量<sup>[25]</sup> 作为评价标准,  $Pb$ 、 $Cu$  和  $Hg$  的含量均低于土壤环境质量筛选值, 2.7% 的土壤样品中  $Cd$  和  $Zn$  含量超过土壤环境质量筛选值, 5.41% 的土壤样品中  $Cr$  含量超过土壤环境质量筛选值, 并且重金属  $Cd$ 、 $Cr$ 、 $Pb$  和  $Hg$  的含量均低于土壤环境质量管控值. 与中国土壤背景值<sup>[26]</sup> 相比,  $Cd$  和  $Hg$  的点位超标率均在 60% 以上, 仅  $Hg$  的平均值超过背景值 1.5 倍. 这些结果表明, 太原城区段汾河西岸河岸带土壤重金属具有一定程度富集现象.

变异系数可以反映土壤重金属受人为干扰程度, 变异系数越大, 其差异与离散程度越大, 土壤受外界干扰越显著, 重金属在土壤中的分布越不均匀<sup>[27,28]</sup>. 6 种重金属元素的变异系数大小为:  $Cr (1.51) > Hg (1.02) > Zn (0.84) > Pb (0.50) > Cd (0.46) > Cu (0.27)$ , 都属于中等强度及以上变异<sup>[29]</sup>, 其中  $Cr$  和  $Hg$  属于异常强变异,  $Zn$  和  $Pb$  属于强变异,  $Cd$  和  $Cu$  属于中等强度变异, 表明各重金属离散程度较高, 分布不均匀, 在不同点位的含量差异较大.

### 2.2 土壤重金属分布特征

图 2 是太原城区段汾河西岸河岸带土壤重金属含量分布. 整体来看, 6 种重金属的含量分布具有一定的规律性和相似性, 均沿河流方向降低. 具体来看, 重金属  $Cr$  和  $Zn$  呈递减的变化趋势,  $Pb$ 、 $Cd$  和  $Hg$  先减小后在三期段增加,  $Cu$  在一期段减小后增加, 但是降低幅度大于增加幅度. 6 种重金属含量的高值区均在研究区二期北延段, 高值在 C 断面. 该断面各样点重金属含量超过山西省土壤背景值的比率为 100%, 最小值约为背景值的 1.04 ~ 3.61 倍, 最大值约为背景值的 1.60 ~ 13.70 倍, 说明各重金属在该断面富集严重. 重金属  $Cd$ 、 $Hg$ 、 $Zn$  和

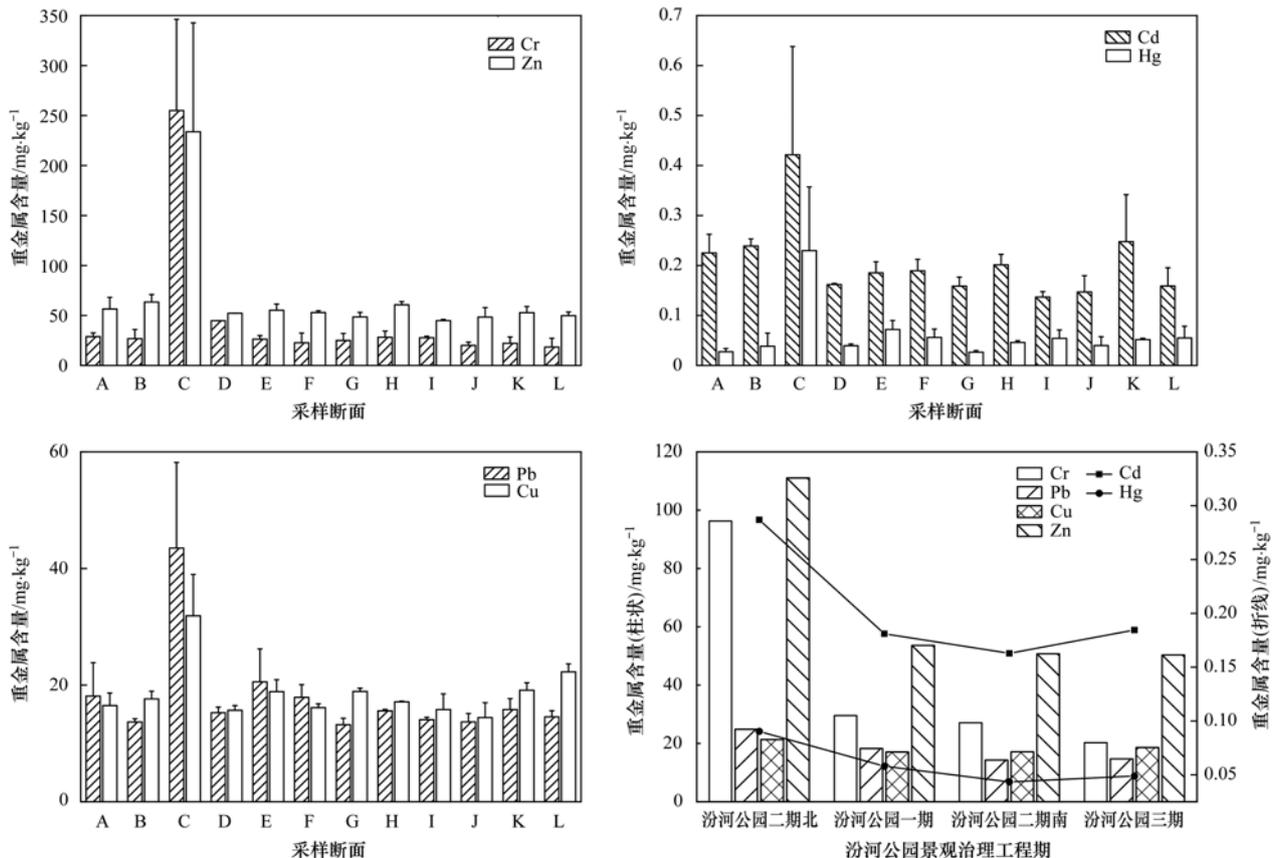
Pb 在二期南延段含量较低,其中 Cd 和 Zn 的低值在 I 断面,Hg 和 Pb 的低值在 G 断面. 重金属 Cr 和

Cu 在三期段含量较低,低值分别出现在 L 断面和 J 断面.

表 4 太原城区段汾河西岸河岸带土壤 pH 值及重金属含量统计

Table 4 Statistics of soil pH and heavy metal contents in the west bank of Fenhe River in Taiyuan urban section

项目	pH 值(无量纲)	Cd	Cr	Pb	Cu	Zn	Hg
最小值/mg·kg <sup>-1</sup>	7.76	0.11	13.19	12.42	11.82	39.62	0.02
最大值/mg·kg <sup>-1</sup>	8.35	0.55	310.97	54.08	36.64	308.12	0.31
平均值/mg·kg <sup>-1</sup>	8.11	0.21	44.65	18.09	18.61	67.27	0.06
标准差	0.14	0.09	67.30	9.02	4.99	56.74	0.06
变异系数	0.02	0.46	1.51	0.50	0.27	0.84	1.02
中值/mg·kg <sup>-1</sup>	8.10	0.19	27.25	15.32	17.36	53.21	0.05
山西省土壤背景值 <sup>[20]</sup> /mg·kg <sup>-1</sup>	—	0.102	55.3	14.7	22.9	63.5	0.023
点位超标率/%	—	100	8.11	51.35	13.51	16.22	94.59
土壤环境质量筛选值 <sup>[25]</sup> /mg·kg <sup>-1</sup>	>7.5	0.6	250	170	100	300	3.4
点位超标率/%	—	2.70	5.41	0	0	2.70	0
土壤环境质量管控值 <sup>[25]</sup> /mg·kg <sup>-1</sup>	>7.5	4.0	1300	1000	—	—	6.0
点位超标率/%	—	0	0	0	—	—	0
中国土壤背景值 <sup>[26]</sup> /mg·kg <sup>-1</sup>	8	0.074	53.9	23.6	20.0	67.7	0.040
点位超标率/%	48.65	100	8.11	13.51	21.62	13.51	64.86



A ~ C 属于汾河公园二期北, D ~ F 属于汾河公园一期, G ~ I 属于汾河公园二期南, J ~ L 属于汾河公园三期

图 2 太原城区段汾河西岸河岸带重金属含量水平分布

Fig. 2 Horizontal distribution of heavy metals in the west bank of Fenhe River in Taiyuan urban section

### 2.3 土壤重金属污染评价

#### 2.3.1 单因子污染指数与地累积指数评价

由表 5 可知, 6 种重金属单因子污染指数 ( $P_i$ ) 均值为: Hg (2.63) > Cd (2.02) > Pb (1.23) > Zn (1.06) > Cu (0.813) > Cr (0.807), Hg 和 Cd 表现为

轻度污染, Pb 和 Zn 表现为轻微污染, Cu 和 Cr 表现为无污染. 大部分土壤样品中 Cd、Cr、Pb、Zn 和 Hg 属于无~轻微污染水平, Cu 全部属于无~轻微污染水平, 仅 5.41% 的土壤样品受到 Cr 和 Hg 的重度污染 (图 3).

由地累积指数法评价结果可知(图4),6种重金属地累积指数( $I_{geo}$ )均值为:Hg(0.47) > Cd(0.33) > Pb(-0.39) > Zn(-0.7) > Cu(-0.9) > Cr(-1.46),Pb、Zn、Cu和Cr的 $I_{geo}$ 均值小于0,属于无污染状态,Hg和Cd的 $I_{geo}$ 均值在0~1之间,属于轻度污染状态.大部分土壤样品的重金属属于无~轻度的污染状态,仅5.41%的土壤样品受到重金属Hg的重度污染.

表5 土壤重金属污染统计<sup>1)</sup>

Table 5 Statistics of heavy metal pollution in soil

元素	$P_i$	$P_{iav}$	$I_{geo}$	$I_{geoav}$
Cd	1.08 ~ 5.43	2.02	-0.48 ~ 1.86	0.33
Cr	0.24 ~ 5.62	0.807	-2.65 ~ 1.91	-1.46
Pb	0.84 ~ 3.68	1.23	-0.83 ~ 1.29	-0.39
Cu	0.52 ~ 1.60	0.813	-1.54 ~ 0.09	-0.9
Zn	0.62 ~ 4.85	1.06	-1.27 ~ 1.69	-0.7
Hg	0.78 ~ 13.68	2.63	-0.94 ~ 3.19	0.47

1)  $P_{iav}$ 表示  $P_i$  平均值,  $I_{geoav}$  表示  $I_{geo}$  平均值

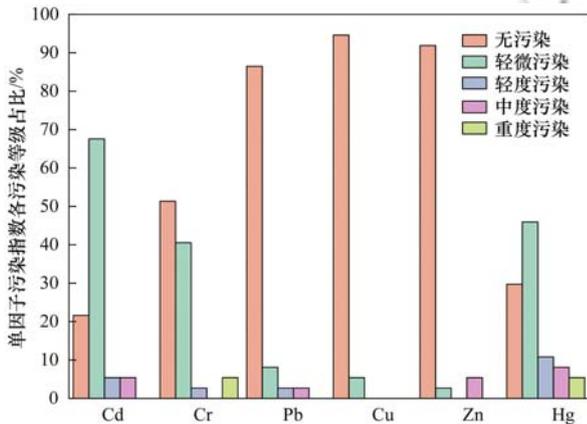


图3 土壤重金属单因子污染指数占比

Fig. 3 Proportion of single factor pollution index of heavy metals in soil

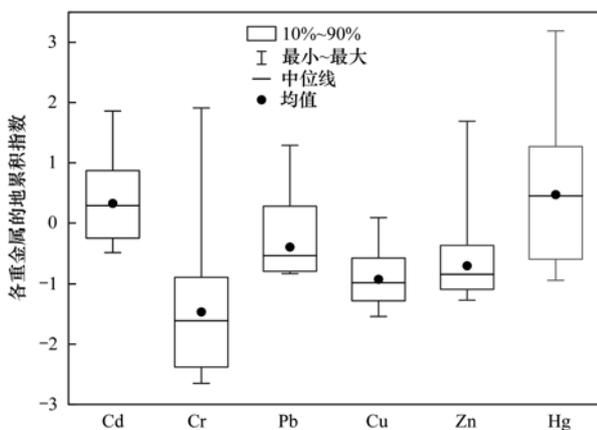


图4 土壤重金属地累积指数

Fig. 4 Geo-accumulation index of heavy metals in soil

### 2.3.2 潜在生态风险指数评价

研究区土壤重金属的平均单项潜在生态风险系数( $E_i$ )表现为:Hg(105.39) > Cd(60.47) > Pb(6.15) > Cu(4.06) > Cr(1.61) > Zn(1.06),重

属Hg具有强生态危害,Cd具有中等强度生态危害,其它4种重金属是轻微生态危害.由图5可知,研究区所有土壤样品中Cr、Pb、Cu和Zn均为轻微生态风险,Cd为轻微~很强生态风险,所占比例分别为10.81%、78.38%、8.11%和2.70%,以中等生态风险为主,所占比例远超过总土壤样品数的一半,Hg为轻微~极强生态风险,所占比例分别为10.81%、37.84%、45.95%、0%和5.41%,以中等生态风险和强生态风险为主,所占比例超过80%.以上结果表明,Hg和Cd是该区域主要的超标生态危害元素,可能会对当地的生态环境和人体健康带来危害.

研究区重金属的综合潜在生态风险指数(RI)平均值为178.75,处于中等强度生态危害水平,各样点重金属RI为80.35~750.34,以轻微和中等强度危害为主,有51.35%的土壤样品为轻微生态风险,43.21%的土壤样品为中等强度生态风险,5.41%样点为很强生态风险(表6).其中二期北延段C断面的C2和C3样点RI值分别为750.3和707.76,属于很强生态风险水平,生态危害最大.从重金属元素对RI的贡献率来看,Hg和Cd的贡献率分别为58.96%和33.83%,合计92.79%,表明研究区表层土壤重金属的潜在生态风险主要是由Hg和Cd引起,说明该区域土壤Hg和Cd污染较重,对环境生态危害最大,应多加管控.

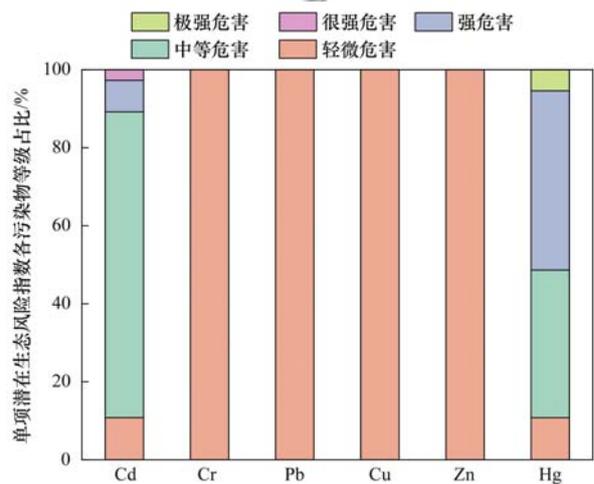


图5 土壤重金属单项潜在生态风险占比

Fig. 5 Proportion of single potential ecological risk of heavy metals in soil

### 2.4 土壤重金属的判源分析

Pearson相关性分析结果表明(表7),Zn与Pb和Cd呈极显著正相关,具有相似的污染源;Cd与Pb呈显著正相关,具有相似的污染源;Cr与Cd呈正相关,与Zn、Hg、Pb和Cu呈负相关,说明Cr有不同的污染源;Cu和Hg与其它重金属相关性较弱,可能有不同污染源.为了更加准确地识别重金属来

表 6 土壤重金属潜在生态风险指数统计

Table 6 Statistics of potential ecological risk index of heavy metals in soil

项目	$E_i$						RI
	Cd	Cr	Pb	Cu	Zn	Hg	
最小值	32.30	0.48	4.22	2.58	0.62	31.21	80.35
最大值	162.94	11.25	18.39	8.00	4.85	547.07	750.34
平均值	60.47	1.61	6.15	4.06	1.06	105.39	178.75
贡献率/%	33.83	0.90	3.44	2.27	0.59	58.96	—

表 7 太原城区段汾河河岸带土壤重金属含量 Pearson 相关系数<sup>1)</sup>

Table 7 Pearson correlation coefficient of heavy metal contents in riparian zone of Fenhe River in Taiyuan urban section

	Cr	Cu	Zn	Hg	Pb	Cd
Cr	1					
Cu	-0.270	1				
Zn	-0.039	0.225	1			
Hg	-0.301	0.245	0.091	1		
Pb	-0.005	0.233	0.655**	0.303	1	
Cd	0.031	0.226	0.607**	-0.079	0.414*	1

1) \*\*表示在 0.01 水平上显著相关, \*表示在 0.05 水平上显著相关

源,进一步用主成分分析和聚类分析对土壤中重金属进行分析。

用 SPSS 26.0 进行 KMO 检验和 Bartlett 球形检验 (KMO 为 0.623,  $P=0 < 0.05$ ),说明原始数据适合进行因子分析<sup>[30]</sup>。经最大正交旋转后,根据重金属的方差累积贡献率(表 8),截取特征值  $> 1$  的 2 个

表 8 土壤重金属特征值和累积贡献率

Table 8 Characteristic values and cumulative contribution rates of heavy metals in soil

成分	初始特征值			提取荷载平方和载入			旋转荷载平方和载入		
	特征值	方差/%	累积方差/%	特征值	方差/%	累积方差/%	特征值	方差/%	累积方差/%
1	2.318	38.638	38.638	2.318	38.638	38.638	2.186	36.438	36.438
2	1.444	24.061	62.700	1.444	24.061	62.700	1.576	26.261	62.700
3	0.860	14.339	77.038	—	—	—	—	—	—
4	0.674	11.229	88.268	—	—	—	—	—	—
5	0.429	7.157	95.424	—	—	—	—	—	—
6	0.275	4.576	100.000	—	—	—	—	—	—

表 9 土壤重金属主成分因子荷载

Table 9 Principal component factor load of heavy metals in soil

重金属	成分矩阵		旋转成分矩阵	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Cr	-0.195	0.730	0.104	-0.749
Cu	0.515	-0.428	0.309	0.594
Zn	0.850	0.275	0.890	0.077
Hg	0.344	-0.688	0.049	0.768
Pb	0.711	0.413	0.816	-0.104
Cd	0.817	0.088	0.787	0.236

### 3 讨论

#### 3.1 重金属含量及评价

从重金属含量来看,太原城区段汾河西岸河岸带土壤中 Cd、Pb、Zn 和 Hg 的平均值高于山西省土壤背景值(表 4),Cr 和 Cu 的平均值低于背景值,这

主因子探讨重金属的来源,前两个主成分累积贡献率达 62.7%,基本能够代表数据所包含的信息。第一主因子(PC1)的方差贡献率为 36.44%,Zn、Pb 和 Cd 具有较大的正荷载(表 9),分别为 0.890、0.816 和 0.787,且其区域变异性较大,说明污染主要由人类活动所致。第二主因子(PC2)的方差贡献率为 26.26%,Hg 和 Cu 具有较大的正荷载,分别为 0.768 和 0.594,说明 Hg 和 Cu 具有相同来源。重金属 Cr 在第一主因子中的正荷载较小,在第二主因子中是负荷载,为了判断其来源与其它重金属是否相似,根据重金属的 Pearson 相关系数进行聚类分析,结果如图 6 所示,6 种重金属聚为 3 类:①Zn-Pb-Cd; ②Cu-Hg; ③Cr,这与主成分分析结果一致,由此可以得出 Zn、Pb 和 Cd 具有相同污染源;Cu 和 Hg 具有相同污染源;Cr 与其它重金属污染源不同。

与贾佳瑜等<sup>[15]</sup>研究的汾河流域下游农田土壤重金属含量结果一致。太原市地处山西“煤海”中部,矿物资源丰富,煤矿、铁矿最多,已形成以能源、冶金、机械、化工产业为主的工业体系,在工矿业生产中产生的废气通过大气干湿沉降进入土壤,产生的固体废弃物在填埋及堆积过程中,受到自然因素和人为因素的共同影响,使得所含重金属从岩石圈进入水圈,进而在整个圈层中循环,导致 Cd、Pb 和 Hg 含量较高<sup>[31]</sup>。研究区西部紧邻交通干线,机动车数量多,汽车尾气,汽车机件间,车轮与路面磨损,润滑油、金属部分的摩擦和燃料燃烧等均能释放出 Cd、Pb 和 Zn<sup>[32,33]</sup>。此外,汾河两岸拥有肥沃的土地,便利的灌溉条件,农业生产活动也会导致 Zn、Cd 和 Pb 含量较高。虽然 Cd、Pb、Zn 和 Hg 的平均

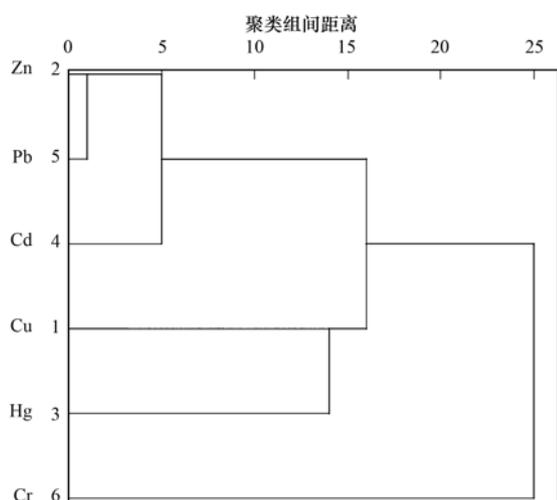


图 6 重金属聚类分析树状图

Fig. 6 Tree diagram of cluster analysis of heavy metals

含量高于山西省土壤背景值,但是结合重金属生态效应、环境效应计算的单项潜在生态风险指数结果可知,Cr、Pb、Cu 和 Zn 是轻微生态风险,仅 Cd 和 Hg 具有较高的生态风险,为中等~很强生态风险和中等~极强生态风险,这与董苗等<sup>[34]</sup>研究的汾河临汾段污灌区土壤重金属污染评价结果一致.单因子污染指数结果显示,有 5.41% 的土壤样品受到 Cd 和 Hg 的重度污染,地累积指数结果显示,有 5.41% 的土壤样点 Hg 富集最为严重,应引起重视.

### 3.2 重金属污染分布特征

掌握重金属污染的分布特征是鉴别土壤高污染区以及污染来源的有效手段<sup>[35]</sup>,沿着河流方向,土壤重金属含量降低,Pb、Cd 和 Hg 先减小后在三期段增加,Cu 在一期段减小后增加,Cr 和 Zn 一直减小.整体来看,太原市的主风向为偏北风,冬季多西北风,夏季多东南风,研究区位于太原市的中南部,处于下风向,而太原市的北郊是重工业聚集地,许多工矿业聚集于此,该区域也有成片的耕地农田和散点分布的农村居民点,使得重金属在研究区北部富集严重<sup>[36-38]</sup>.研究区中部是城区居民点,人流、车流量较大,各种生活垃圾、供暖、交通运输等均会使得重金属含量增加,并且沿着西山、东山散点分布许多工业企业,使得研究区中部重金属含量高于南部<sup>[38]</sup>.因此,沿着河流方向,重金属含量降低. Pb、Cd 和 Hg 在三期段增加,是由于其在城区段最南部,分布有大量耕地农田,沿河流走向也分布有工矿类企业,农业活动、煤炭燃烧、金属冶炼、机械制造、电镀、蓄电池、合金、油漆和塑料等均会导致 Pb、Cd 和 Hg 含量增加. Cu 在一期段减小后增加,但是在二期段和二期南延段之间增加不明显,这是由于研究区紧邻交通干线,车辆燃油和轮胎磨损等均会

使得 Cu 积累,一期是较早的城区居民点,人流量和车流量较大,Cu 的累积量也相对较大,但是一期段景观治理早,植被景观营造较早,使得 Cu 粉在空气中被截留,导致 Cu 在一期段土壤中累积量减少,使得 Cu 在一期段和二期南延段之间增加不明显. 6 种重金属的高值区均在二期北延段,高值在 C 断面.太原市北部(二期北延段)是较早的农村居民点和耕地农田区,许多工矿业聚集于此,使得该区域重金属含量较高<sup>[36-38]</sup>. C 断面表层土壤重金属含量较高是由于该断面周边分布有重型机械厂和钢铁厂<sup>[39]</sup>,生产过程中产生的粉尘、废气会通过大气沉降、雨水淋溶在土壤中富集,使得重金属在该断面表层含量较高.同时,该断面西侧紧邻交通干线,各采样点地被植物覆盖度较低,多落叶乔木,地表多裸露,相较于其它断面植物对重金属的阻隔吸附作用相对降低<sup>[40,41]</sup>,易使重金属更多地在该断面土壤表层富集,造成土壤表层重金属含量较高.

### 3.3 重金属污染来源解析

土壤表层重金属超标常常是土壤母质与人为活动共同影响的结果.从重金属元素的相关性分析、主成分分析和聚类分析结果来看,第一主成分(PC1)的贡献率 36.44%,Zn、Pb 和 Cd 具有较高的正荷载,分别为 0.890、0.816 和 0.787.一般来说,Zn、Pb 和 Cd 之间较高的相关性可能暗示了人类活动对土壤中重金属的影响<sup>[42,43]</sup>.汽车尾气排放是土壤中 Pb 的重要来源,特别是重型车辆行驶时,会导致大量 Pb 排放,Zn 常作为汽车轮胎硬度添加剂、抗氧化剂和润滑油洗涤剂,均会产生含 Zn 的粉尘进入土壤<sup>[44]</sup>.汽车轮胎与地面磨损会产生含 Cd 颗粒物,通过大气干湿沉降和扬尘在土壤中累积.研究区北部和南部分布有大量耕地农田,有研究表明,农业活动是 Zn 的重要来源,污水灌溉和化肥等农用物质的不合理施用会带来 Zn、Cd 和 Pb 的长期积累,农业生产过程中使用以柴油或汽油为主要燃料的农用机械,其尾气排放所造成的土壤 Pb 污染亦不可忽视<sup>[45,46]</sup>.太原市除煤矿、铁矿最多外,铅矿和锌矿含量也较多,矿的开采、冶炼和电镀等矿业活动中产生的粉尘和废气会通过大气沉降和雨水淋溶在土壤中富集,增加土壤中 Zn、Pb 和 Cd 的含量<sup>[30]</sup>.此外,Zn 和 Cd 易受到人类活动的影响,降雨径流、生活污水以及工业废水中含有大量的 Zn 和 Cd,河岸带土壤易受到来自于地表径流的“二次污染”<sup>[47]</sup>.由此,可以认为 PC1 主要指交通运输、农业活动和矿业活动.第二主成分(PC2)的贡献率为 26.26%,Hg 和 Cu 具有较大的正荷载,分别为 0.768 和 0.594. Hg 是燃煤排放的标志物,在大气中有较强的稳定性

和可移动性,一定气压条件下能在大气中存在半年到两年之久<sup>[48,49]</sup>。太原市工矿业发达,煤藏储量居全省第七位,采矿冶炼、火力发电、石油化工企业、城市供暖以及生活垃圾焚烧等排放的废气 Hg 和 Cu 均可通过大气干湿沉降进入土壤,并且多数工业企业对燃煤有较大需求<sup>[50~52]</sup>。由此,可以认为 PC2 主要指工业生产。此外,Cu 在 PC1 和 PC2 中均有较高的正荷载(表 9),分别为 0.309 和 0.594,说明 Cu 的来源较为复杂,受 PC1 和 PC2 这两种主成分的影响,一部分来源于工业生产活动,一部分来源于交通运输和农业活动。Cr 的来源与其他重金属不同,有研究表明<sup>[53,54]</sup>,土壤中的 Cr 受人类活动的影响较小,主要来源于成土母质及地质活动,虽然本研究中 Cr 的变异性较大,有 8.11% 的土壤样点超过山西省土壤背景值,但其均值未超过背景值,单因子污染指数和地累积指数评价结果为无污染水平,个别样点 Cr 富集严重是由于电镀、冶金、制革等工业生产活动会使用含有 Cr 的原料,大量的铬渣被排入环境,生产过程中产生的“三废”通过大气干湿沉降进入土壤环境<sup>[55]</sup>。由此,可以认为研究区土壤中的 Cr 主要受成土母质和工业生产活动的影响。

#### 4 结论

(1) 太原城区段汾河西岸河岸带土壤质量总体良好,但存在一定程度的富集现象,其中 Cd 和 Hg 富集作用最为明显,土壤样品点位超标率均在 90% 以上,但均低于土壤环境质量管控值。重金属 Cr、Pb、Cu 和 Zn 为轻微生态风险水平,Cd 为轻微~很强生态风险水平,Hg 为轻微~极强生态风险水平。

(2) 沿河流方向,太原城区段汾河西岸河岸带土壤重金属含量降低,6 种重金属的高值区均在研究区二期北延段,高值在 C 断面。

(3) 太原城区段汾河西岸河岸带土壤重金属来源可分为三类:①Zn、Pb 和 Cd 具有同源性,主要受交通运输、农业生产活动和矿业活动等人为源的影响;②Hg 和 Cu 的污染源主要受人类活动的影响,人为源主要为工业生产活动,并且 Cu 的污染来源较为复杂,在一定程度上也受交通运输和农业活动的影响;③Cr 除受成土母质影响外,还受工业生产活动的影响。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Drobnik T, Greiner L, Keller A, *et al.* Soil quality indicators-From soil functions to ecosystem services [ J ]. *Ecological Indicators*, 2018, **94**: 151-169.
- [ 2 ] 钱新锋,沈国清. 苏南河网地区河岸带土壤重金属污染生态风险评价[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2012, **35**(4): 78-83.
- [ 3 ] Qian X F, Shen G Q. Heavy metal concentrations and pollution assessment of riparian soils along river network of South Jiangsu region [ J ]. *Journal of Nanjing Normal University ( Natural Science Edition)*, 2012, **35**(4): 78-83.
- [ 3 ] 张家泉,李秀,张全发,等. 大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 194-201.
- [ 3 ] Zhang J Q, Li X, Zhang Q F, *et al.* Transportation and risk assessment of heavy metal pollution in water-soil from the riparian zone of Daye Lake, China [ J ]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 194-201.
- [ 4 ] 吴昆伦. 土壤重金属污染的治理及修复途径探究[J]. *南方农业*, 2020, **14**(23): 217-218.
- [ 5 ] 李冬林,金雅琴,张纪林,等. 秦淮河河岸带典型区域土壤重金属污染分析与评价[J]. *浙江林学院学报*, 2008, **25**(2): 228-234.
- [ 5 ] Li D L, Jin Y Q, Zhang J L, *et al.* Heavy metal soil pollution in the Qinhuai River riparian zone [ J ]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2008, **25**(2): 228-234.
- [ 6 ] 张凤凤,李土生,卢剑波. 河岸带净化水质及其生态功能与恢复研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(S2): 459-464.
- [ 6 ] Zhang F F, Li T S, Lu J B. Purification, ecological and restoration functions of riparian zone [ J ]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(S2): 459-464.
- [ 7 ] 李睿华,管运涛,何苗,等. 河岸荆三棱带改善河水水质的中试研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(6): 1198-1203.
- [ 7 ] Li R H, Guan Y T, He M, *et al.* Pilot-scale study on riparian *Scirpus yagara ohw* zone improving water quality of river [ J ]. *Environmental Science*, 2007, **28**(6): 1198-1203.
- [ 8 ] 薛占金,秦作栋,孟宪文. 2010 年汾河流域土地退化经济损失评估[J]. *水土保持通报*, 2014, **34**(3): 295-299.
- [ 8 ] Xue Z J, Qin Z D, Meng X W. Evaluation of economic loss by land degradation in Fenhe River basin in 2010 [ J ]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, **34**(3): 295-299.
- [ 9 ] Roach A C. Assessment of metals in sediments from Lake Macquarie, New South Wales, Australia, using normalisation models and sediment quality guidelines [ J ]. *Marine Environmental Research*, 2005, **59**(5): 453-472.
- [ 10 ] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils [ J ]. *Environmental Pollution*, 2001, **114**(3): 313-324.
- [ 11 ] 郭翠花,王应刚,任艳萍,等. 太原市地表土汞含量的分布特征[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 1996, **19**(3): 339-344.
- [ 11 ] Guo C H, Wang Y G, Ren Y P, *et al.* The distribution characteristics of Hg-element content in the surface soil in Taiyuan [ J ]. *Journal of Shanxi University ( Natural Science Edition)*, 1996, **19**(3): 339-344.
- [ 12 ] 张乃明,李保国,胡克林. 太原污灌区土壤重金属和盐含量的空间变异特征[J]. *环境科学学报*, 2001, **21**(3): 349-353.
- [ 12 ] Zhang N M, Li B G, Hu K L. Spatial variabilities of heavy metals and salt contents in soils of Taiyuan sewage irrigation region [ J ]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, **21**(3): 349-353.
- [ 13 ] 刘勇,张红,尹京苑. 汾河太原段土壤中 Hg、Cr 空间分布与污染评价[J]. *农业工程学报*, 2008, **24**(5): 57-60.
- [ 13 ] Liu Y, Zhang H, Yin J Y. Pollution assessment and spatial distribution of soil Hg and Cr in the Taiyuan area of the Fenhe River [ J ]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, **24**(5): 57-60.

- [14] 王竞, 李宁, 党晋华, 等. 汾河中上游农田土壤重金属含量特征及来源解析[J]. 山西科技, 2019, **34**(3): 26-30.  
Wang J, Li N, Dang J H, *et al.* The heavy metal content characteristics and source analysis of farmland soil in the upper and middle reaches of Fenhe River [J]. Shanxi Science and Technology, 2019, **34**(3): 26-30.
- [15] 贾佳瑜, 刘小芳, 赵勇钢, 等. 汾河流域下游农田土壤重金属空间分布特征与污染评价[J]. 干旱区资源与环境, 2021, **35**(8): 132-137.  
Jia J Y, Liu X F, Zhao Y G, *et al.* Spatial distribution characteristics and assessment of heavy metal pollution in farmland soils in the lower reaches of Fenhe river basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, **35**(8): 132-137.
- [16] 刘广敏, 杨秀云, 甄志磊, 等. 太原汾河公园水质现状评价[J]. 林业调查规划, 2020, **45**(4): 109-113.  
Liu G M, Yang X Y, Zhen Z L, *et al.* Evaluation of water quality in Taiyuan Fenhe Park [J]. Forest Inventory and Planning, 2020, **45**(4): 109-113.
- [17] 闫丽娟. 太原市城市绿地土壤养分分布特征研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2019.
- [18] 南江江. 汾河三期工程生态治河建设设计分析[J]. 山西水利, 2018, **34**(9): 30-31, 34.
- [19] Huang L L, Rad S, Xu L, *et al.* Heavy metals distribution, sources, and ecological risk assessment in Huixian Wetland, South China [J]. Water, 2020, **12**(2), doi: 10.3390/w12020431.
- [20] 史崇文, 赵玲芝, 郭新波, 等. 山西土壤元素背景值及其特征[J]. 华北地质矿产杂志, 1994, **9**(2): 188-196.  
Shi C W, Zhao L Z, Guo X P, *et al.* Background values of soil elements in Shanxi and their distribution feature [J]. Journal of Geology & Mineral Resources North China, 1994, **9**(2): 188-196.
- [21] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. GeJournal, 1969, **2**(3): 108-118.
- [22] Ji Y Q, Feng Y C, Wu J H, *et al.* Using geoaccumulation index to study source profiles of soil dust in China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(5): 571-578.
- [23] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [24] 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.
- [25] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准[S].
- [26] 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.
- [27] Wang H Y, Lu S G. Spatial distribution, source identification and affecting factors of heavy metals contamination in urban-suburban soils of Lishui city, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, **64**(7): 1921-1929.
- [28] 孙文贤, 牛晓音, 郑家文, 等. 高青县设施农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2021, **35**(3): 17-23.  
Sun W X, Niu X Y, Zheng J W, *et al.* Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in greenhouse farmland soil in Gaoqing County [J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2021, **35**(3): 17-23.
- [29] 贾中民. 渝西北土壤重金属污染特征、源解析与生态健康风险评价[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [30] 王乔林, 宋云涛, 王成文, 等. 滇西地区土壤重金属来源解析及空间分布[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(8): 3693-3703.  
Wang Q L, Song Y T, Wang C W, *et al.* Source identification and spatial distribution of soil heavy metals in western Yunnan [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(8): 3693-3703.
- [31] Larocque A C L, Rasmussen P E. An overview of trace metals in the environment, from mobilization to remediation [J]. Environmental Geology, 1998, **33**(2): 85-91.
- [32] 纪小凤, 郑娜, 王洋, 等. 中国城市土壤重金属污染研究现状及展望[J]. 土壤与作物, 2016, **5**(1): 42-47.  
Ji X F, Zheng N, Wang Y, *et al.* Heavy metal contamination of urban soils in China: recent advances and prospects [J]. Soils and Crops, 2016, **5**(1): 42-47.
- [33] 马建华, 李剑. 郑汴公路路尘、路沟底泥和路旁土壤重金属分布[J]. 西南交通大学学报, 2008, **43**(2): 285-291.  
Ma J H, Li J. Spatial distribution and contamination of heavy metals in road dust, sediment in roadside ditch and roadside soils along Zhengzhou-Kaifeng Highway [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, **43**(2): 285-291.
- [34] 董苗, 高燕, 张永清. 汾河临汾段污灌区土壤重金属污染评价[J]. 河南农业科学, 2014, **43**(9): 72-78.  
Dong M, Gao Y, Zhang Y Q. Pollution assessment of heavy metal in sewage irrigation region of Fen River in Linfen area [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2014, **43**(9): 72-78.
- [35] 郑江鹏, 矫新明, 方南娟, 等. 江苏近岸海域沉积物重金属来源及风险评价[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(4): 1514-1522.  
Zheng J P, Jiao X M, Fang N J, *et al.* Sources and risk assessment of heavy metals in sediments in Jiangsu coastal areas [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(4): 1514-1522.
- [36] 马小红, 苏永红, 林菲, 等. 太原市土地利用/覆被变化及驱动因素研究[J]. 生态科学, 2021, **40**(3): 201-210.  
Ma X H, Su Y H, Lin F, *et al.* Land use/cover change and its driving factors in Taiyuan City [J]. Ecological Science, 2021, **40**(3): 201-210.
- [37] 李晓荣. 基于RS和GIS的太原市主城区扩展及影响因素研究[D]. 临汾: 山西师范大学, 2018.
- [38] 刘亚文. 工业转型与城市空间结构的互动——以太原市为例[A]. 见: 规划创新; 2010中国城市规划年会论文集[C]. 重庆: 重庆出版社, 2010. 1272-1283.
- [39] 吕晓倩, 张银龙. 城市攀缘植物对大气颗粒物的吸附效果及重金属累积研究[J]. 中国园林, 2020, **36**(12): 101-105.  
Lü X Q, Zhang Y L. Deposition of particular matter and accumulation of heavy metal on six climbing plants [J]. Chinese Landscape Architecture, 2020, **36**(12): 101-105.
- [40] Yan X X, An J, Yin Y C, *et al.* Heavy metals uptake and translocation of typical wetland plants and their ecological effects on the coastal soil of a contaminated bay in Northeast China [J]. Science of the Total Environment, 2022, **803**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149871.
- [41] 彭小东, 阿丽亚·拜都热拉, 刘丽, 等. 常见绿化树种对重金属的富集效应评价[J]. 新疆农业科学, 2021, **58**(8): 1558-1567.  
Peng X D, Aliya B, Liu L, *et al.* Evaluation of enrichment effect of common greening tree species on expressway [J]. Xinjiang

- Agricultural Sciences, 2021, **58**(8): 1558-1567.
- [42] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, **67**(7): 971-984.  
Lu J S, Zhang Z L, Liu Y, *et al.* Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao City[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, **67**(7): 971-984.
- [43] Lv J S, Zhang Z L, Li S, *et al.* Assessing spatial distribution, sources, and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of the Nansi Lake, Eastern China [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014, **299**(3): 1671-1681.
- [44] 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 等. 太汾河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5073-5081.  
Li W D, Cui Y X, Zeng C C, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in farmland soils in the Taige Canal Valley [J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5073-5081.
- [45] 李梦婷, 沈城, 吴健, 等. 快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险[J]. 环境科学, 2021, **42**(10): 4889-4896.  
Li M T, Shen C, Wu J, *et al.* Content and ecological risks of heavy metals in soil with different land uses in a rapidly urbanizing area [J]. Environmental Science, 2021, **42**(10): 4889-4896.
- [46] 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 等. 南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 909-916.  
Chen J L, Li R Y, Xie X J, *et al.* Distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in greenbelt soils of Nanjing City [J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 909-916.
- [47] 张菊, 陈诗越, 邓焕广, 等. 山东省部分水岸带土壤重金属含量及污染评价[J]. 生态学报, 2012, **32**(10): 3144-3153.  
Zhang J, Chen S Y, Deng H G, *et al.* Heavy metal concentrations and pollution assessment of riparian soils in Shandong Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(10): 3144-3153.
- [48] 吕建树, 何华春. 江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2853-2864.  
Lü J S, He H C. Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in the soils of the Jiangsu coast [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2853-2864.
- [49] 郭晓东, 孙岐发, 赵勇胜, 等. 珲春盆地农田重金属分布特征及源解析[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(9): 1875-1883.  
Guo X D, Sun Q F, Zhao Y S, *et al.* Distribution and sources of heavy metals in the farmland soil of the Hunchun basin of Jilin Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(9): 1875-1883.
- [50] 解惠婷, 张承中, 徐峰, 等. 生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1523-1530.  
Xie H T, Zhang C Z, Xu F, *et al.* Distribution and assessment of mercury in the ambient soil of a municipal solid waste incinerator [J]. Environmental Science, 2014, **35**(4): 1523-1530.
- [51] 严冬. 辽河流域典型河流水体重金属分布特征、健康风险及来源解析[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2020.
- [52] 刘春英, 吴梦莹, 檀斯园, 等. 鄱阳湖区土壤重金属空间分布特征及来源分析[A]. 见: 第十届重金属污染防治技术及风险评估研讨会论文集[C]. 长沙: 中国环境科学学会, 2020. 57-70.
- [53] 周艳, 陈楷, 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估[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.
- [54] Fan S X, Wang X D, Lei J, *et al.* Spatial distribution and source identification of heavy metals in a typical Pb/Zn smelter in an arid area of northwest China [J]. Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal, 2019, **25**(7): 1661-1687.
- [55] 于元赫, 吕建树, 王亚梦. 黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2865-2874.  
Yu Y H, Lü J S, Wang Y M. Source identification and spatial distribution of heavy metals in soils in typical areas around the Lower Yellow River [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2865-2874.

## CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Urban Area of Beijing .....	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM <sub>2.5</sub> Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model .....	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM <sub>2.5</sub> and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018 .....	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM <sub>2.5</sub> in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence .....	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem .....	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM <sub>2.5</sub> Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City .....	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM <sub>2.5</sub> Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan .....	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM <sub>2.5</sub> in the Winter of Zhengzhou .....	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Zibo City .....	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM <sub>2.5</sub> in Chengde .....	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China .....	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain .....	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology .....	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity .....	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China .....	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030 .....	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation .....	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis .....	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert .....	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin .....	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin .....	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River .....	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen .....	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments .....	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City .....	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake .....	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication .....	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology .....	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm .....	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin .....	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake .....	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake .....	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment .....	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River .....	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPS) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River .....	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments .....	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period .....	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir .....	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake .....	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO <sub>2</sub> -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes .....	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Catalyzed by Magnetic Mn <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> .....	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite .....	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material .....	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates .....	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors .....	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions .....	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area .....	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil .....	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils .....	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem .....	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field .....	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers .....	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil .....	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain .....	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain .....	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland .....	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China .....	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)