

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.11

第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征	沈吉, 曹念文(4743)
2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征	宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)
武汉市PM _{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析	张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)
郑州市某生活区大气PM _{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估	何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)
厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析	王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)
2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征	霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)
太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析	闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)
东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析	陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枳亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)
艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素	陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)
中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素	侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)
石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 刘永桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)
郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估	张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)
典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用	鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)
2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征	侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)
焦化厂建构筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险	赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)
中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价	杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)
岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素	原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)
长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送	吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)
望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价	徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)
不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响	陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 宣文怡, 黄亚文(4924)
合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价	陈娜, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)
三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征	杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)
丹江口水库氮磷内源释放对比	王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)
不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性	李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王琚(4962)
纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响	王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)
水生植物生物炭去除水体中氮磷性能	刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)
MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性	王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)
微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响	王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)
基于铁锰泥的除硝颗粒吸附剂制备及其比较	曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)
氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B	张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)
天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估	陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)
废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征	姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)
全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行	印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)
FeCl ₃ -生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀	魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)
污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响	李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)
厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征	宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)
基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响	陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文辉, 倪敏(5066)
太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析	李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)
土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例	王锐, 张风雷, 徐姝姝, 张永文(5082)
半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响	温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)
土壤调理剂对镉污染稻田修复效果	周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)
改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复	韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)
铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应	梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)
温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤	徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)
重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应	王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)
双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响	郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)
不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响	崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)
黄土高原地区两种土地利用方式CO ₂ 和N ₂ O排放特征	韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)
生物炭对华北平原4种典型土壤N ₂ O排放的影响	张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)
优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)
《环境科学》征订启事(4995)	
《环境科学》征稿简则(5039)	
信息(4782, 4979, 5056)	

郑州市某生活区大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估

何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社*

(郑州大学化学与分子工程学院, 环境科学研究院, 郑州 450001)

摘要: 为了研究郑州市某生活区大气重金属元素的污染特征, 对郑州市某生活区进行潜在生态风险和居民健康风险的评估, 利用武汉天虹 TH-16A 型大气颗粒物智能采样仪对郑州市某生活区大气 PM_{2.5} 样品进行采集, 并用波长色散 X 射线荧光光谱法 (ambient air determination of inorganic elements in ambient particle matter wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry, WD-XRF) 分析 17 种金属元素的质量浓度; 用富集因子法、主成分分析法对重金属的来源进行解析; 用生态风险指数法和美国环保署的健康风险评价法分别对 Cr、Cd、Cu、Zn、Ni、Pb 和 As 等元素的潜在生态风险、居民健康风险进行评估。结果表明, 富集因子 (enrichment factor, EF) 值较高的金属为 Cd、Sb、Pb 和 As, 其中 Cd 的富集因子值最高, 为 8 657.6; 郑州市某生活区金属元素的来源主要为地壳源/燃煤源、燃油源、垃圾燃烧源、冶金尘源和机动车排放源; Cd、Pb、Zn、As、Cu、Ni 和 Cr 的单因子潜在生态危害指数值分别为 70 420.2、255.3、204.6、71.5、36.9、24.0 和 5.1; 郑州市某生活区的 Cd、As 和 Cr 具有致癌风险, Cd 的危害最大; Mn 具有非致癌风险。

关键词: PM_{2.5}; 富集因子 (EF); 主成分分析 (PCA); 生态风险; 健康风险评价

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301 (2019) 11-4774-09 **DOI:** 10.13227/j.hjks.201905066

Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM_{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City

HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, JIN Meng-jie, HAN Shi-jie, ZHAO Jin-shuai, ZHANG Rui-qin, YAN Qi-she*

(Research Institute of Environmental Science, College of Chemistry and Molecular Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To study the pollution characteristics of atmospheric heavy metal elements in a living area of Zhengzhou City, assess the potential ecological risks, and determine risks to resident health in this city, the Wuhan Tianhong TH-16A Airborne Particles Intelligent Sampler was used to collect atmospheric PM_{2.5} in Zhengzhou City. The mass concentrations of 17 metal elements were analyzed by ambient air determination of inorganic elements by ambient particle matter wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry. The source of heavy metals was analyzed by the enrichment factor method and principal component analysis. The ecological risk index method and the US Environmental Protection Agency's health risk assessment method were used to evaluate the potential ecological risks and residents' health risks from Cr, Cd, Cu, Zn, Ni, Pb, As, and other elements. The results showed that metals with higher enrichment factor values were Cd, Sb, Pb, and As, and Cd had the highest enrichment factor value. The sources of metal elements in a living area of Zhengzhou City were mainly crust/burning coal, fuel, garbage burning, metallurgical dust, and vehicle emission. The single factor potential ecological hazard index values of Cd, Pb, Zn, As, Cu, Ni, and Cr were 70 420.2, 255.3, 204.6, 71.5, 36.9, 24.0, and 5.1, respectively. Cd, As, and Cr in a living area of Zhengzhou City posed a cancer risk, and Cd was the most harmful. Mn had a non-carcinogenic risk.

Key words: PM_{2.5}; enrichment factor (EF); principal component analysis (PCA); ecological risk analysis; health risk assessment

PM_{2.5} 是指空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物。其特点是体积小、比表面积大、活性强, 能够吸附大量的金属元素。而金属元素的不断累积给世界上许多城市都带来了严重的污染^[1]。金属元素种类繁多, 具有明显的细胞毒性、隐蔽性、持久性和生物累积性^[2], 它们可能会对生态系统^[3]和人类造成永久性伤害^[4-6]。严重影响人类的生活质量, 给人体带来难以预估的伤害。因此了解重金属的污染水平, 来源和危害十分重要。

近年来, 我国对大气颗粒物中的金属元素进行

了大量的研究。如李友平等^[7]和王晴晴等^[8]分别对成都市和佛山市 PM_{2.5} 中的金属元素的污染特征和来源进行了研究; 郭墨霞等^[9]和 Lin 等^[10]分别对山西省武乡县及苏州市的颗粒物中的痕量重金属进行了生态和健康风险分析; Hsu 等^[11]对中国台湾地区 PM_{2.5} 中金属元素的时空变化进行了详细分析。这

收稿日期: 2019-05-09; 修订日期: 2019-06-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0212400)

作者简介: 何瑞东 (1993 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境污染与防治, E-mail: heruidong@gs.zzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: Qisheyanzzu@163.com

些研究主要集中在金属元素的污染特征、来源解析以及生态风险和健康风险方面。

郑州市位于中国中部地区,是河南省的经济中心,近年来,随着经济的不断发展郑州市的环境污染问题日益严重。目前已有对郑州市大气颗粒物源解析的综合研究^[12],但却缺乏对金属元素的潜在生态风险和健康风险的评价。因此本研究不仅分析了郑州市生活区大气 PM_{2.5} 中 17 种金属元素的污染特征,还应用富集因子法和主成分分析法对它们的来源做了解析,并开创性地应用潜在生态风险指数法和美国环保署的健康风险评价法对郑州市某生活区大气 PM_{2.5} 中金属的潜在生态风险和健康风险做出了评价。潜在生态风险和健康风险的定量评价能够直接地表现出金属元素对环境和人体的危害程度。本研究的目的在于完善郑州市在金属研究方面的不足,以期对郑州市金属污染的治理提出建议,并且为制定居民的健康指南做出一定的贡献。

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样点按照环境空气采样说明 HJ664 的要求设置在郑州市中原区环境保护监测中心站。采样点周边无工业源,300 m 内分布有大型商场,周边多为小区家属院、医院、学校等学习生活场所。该采样点紧邻中原中路,距离该路约 25 m,交通繁忙,机动车较多。采样设备放置于郑州市中原区环境监测站四楼楼顶,距离地面约 20 m。采样时间为 2017 年 10 月、2018 年 1、4 和 7 月,每个样品的采样时长为 23 h,共采集到有效样品 113 个。使用武汉天虹 TH-16A 型大气颗粒物智能采样仪进行样品采集,采样流量固定为 16.7 L·min⁻¹,采样滤膜为直径 47 mm 的 Teflon 滤膜。采样前将滤膜放置在恒温恒湿(25℃ ± 0.5℃; 50% ± 2%)的环境中平衡 48 h 后,使用精度为 0.01 mg 的瑞士梅特勒-托利多公司生产的高精度天平(Mettler Toledo XS205)进行滤膜的称重工作。样品采集完成后,用酒精清洁过的镊子将滤膜取出并放置在编有号码的膜盒中。膜盒放置在上述相同环境中平衡 48 h,用上述天平对样品膜称重,并做好数据记录。最后将样品膜存放到冰箱中,温度设置为 -20℃,等待分析。

1.2 样品分析

采用德国布鲁克公司生产的 S8 TIGER 型波长散射 X 射线荧光光谱仪(XRF)分析 PM_{2.5} 中的 17 种金属元素。实验开始前,使用元素标准膜校准仪器。实验开始时,将 Teflon 膜放入样品杯中,为保

证样品膜的完整性,在其表面覆盖一层聚丙烯膜(Prolene Film 4.0 μm),防止样品或破碎的膜掉入样品室,损坏分析仪器。之后用样品杯压紧滤膜,用陶瓷刀剪掉多余的聚丙烯膜。由于仪器是下照式,放置时应将测量面朝下,同时按照编号顺序依次将样品杯放入仪器对应位置。为了减去样品膜对实验结果的影响设置空白膜实验进行对照,每批样品进行 3 个空白膜检测,空白膜检测方法同样品膜。为了监测实验仪器的稳定性,从每次测好的 10 张样品膜中抽取一张进行重复测定。

1.3 数据分析方法

1.3.1 富集因子分析法

富集因子法(enrichment factor, EF)以土壤或地壳为参比介质,根据其值分析元素的来源^[13],是定量评价大气颗粒物元素富集程度的重要指标,该法是由 Zoller 提出,计算公式为:

$$EF = \frac{(c_{\text{元素}}/c_{\text{参比}})_{\text{气溶胶}}}{(c_{\text{元素}}/c_{\text{参比}})_{\text{土壤}}} \quad (1)$$

式中,在气溶胶中 $c_{\text{元素}}$ 表示气溶胶中该元素的实测值,mg·kg⁻¹; $c_{\text{参比}}$ 表示气溶胶中参比元素的背景值,mg·kg⁻¹;在土壤中 $c_{\text{元素}}$ 表示土壤中该元素的背景值,mg·kg⁻¹; $c_{\text{参比}}$ 表示土壤中参比元素的背景值,mg·kg⁻¹。

1.3.2 主成分分析法

主成分分析(principal components analysis, PCA)法由 Hotelling 在 1933 年最先提出,是应用投影的方法实现数据的降维,在能够损失较少信息变量的前提下将多个信息指标转化成几个具有代表性的综合指标并对特定污染物的来源进行评估的方法^[14]。本研究利用 SPSS 21.0 软件中的方差极大旋转法进行主成分分析。

1.3.3 潜在生态风险评价

潜在生态风险指数是对重金属在环境中的毒性、迁移和转化等因素的综合考虑。本文采用瑞典地球化学家 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法(potential ecological risk index, RI)定性评价金属元素对周边环境的潜在生态风险^[15],计算公式为:

$$E_i = T_i \times \frac{c_i}{c_0} \quad (2)$$

$$RI = \sum E_i \quad (3)$$

式中, c_i 表示 PM_{2.5} 中金属元素的实测值,mg·kg⁻¹; c_0 表示金属元素的土壤背景值,mg·kg⁻¹; E_i 表示单因子潜在生态危害指数; T_i 表示金属元素的毒性系数; RI 表示多因子综合生态危害指数。各参数取值见表 1^[9]。

表 1 潜在生态风险等级参数表
Table 1 Potential ecological risk grade parameter table

项目	参数及分级				
E_i	<40	40~80	80~160	160~320	>320
RI	<65	65~130	130~260	260~520	>520
生态风险等级	无	轻微	中等	强	极强

1.3.4 对郑州市某生活区周边居民的健康风险评价
重金属元素主要通过口途径、呼吸吸入和皮肤接触进入到人体内，考虑到该区域居民接触金属元素的主要途径为呼吸吸入，所以只选择通过呼吸吸入进入人体的金属元素进行健康风险评价。计算公式为：

$$ADD \ \& \ LADD = \frac{(c \times IR \times EF \times ED)}{(BW \times AT)} \quad (4)$$

式中， c 表示金属元素实测浓度， $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； ADD 表示非致癌物质平均每天的暴露量， $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ； $LADD$ 表示致癌物质平均每天的暴露量， $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ；各参数取值见表 2^[16]。

表 2 暴露量公式计算参数值
Table 2 Exposure formula to calculate parameter values

参数	物理意义	单位	儿童取值	成人取值	
				男	女
IR	呼吸速率	$\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	8.6	16.6	13.5
EF	暴露频率	$\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	365	365	365
ED	暴露年限	a	18	18~72.4	18~77.4
BW	体重	kg	15	67.3	57.5
AT(致癌)	平均暴露时间	d	$365\cdot ED$	$365\cdot ED$	$365\cdot ED$
AT(非致癌)			$365\cdot 18$	$365\cdot 72.4$	$365\cdot 77.4$

Ni 和 As 的 $SF^{[9]}$ 取值分别为 4.2×10^1 、 6.0 、 8.4×10^{-1} 和 1.5×10^1 。

2 结果与讨论

2.1 郑州市某生活区大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征研究

通过对采样样品的分析，得到了郑州市某生活区大气 PM_{2.5} 中 17 种金属元素的浓度特征，地壳元素的浓度显著高于痕量金属元素的浓度，具体结果如表 3 所示；地壳元素浓度较高的分别是 K $[(1\ 879.5\pm 1\ 262.2)\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}]$ 和 Ca $[(1\ 078.2\pm 742.7)\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}]$ 。通过结合其他地壳元素在不同季节的浓度特征，发现郑州市生活区多数地壳元素如 Mg、Al、K 和 Ti 的浓度在春夏季显著高于秋冬季，这与郑州市自身气候特征有关，属于温带大陆性季风气候的郑州季节变化特征明显，春季天气干燥多风、夏季气温偏高多雨、秋季凉爽阳光、冬季严寒干燥^[19]。春季多风的天气导致土壤扬尘的逸散，并且多风的天气会将黄河的沙尘带向采样点附近，导

某元素的非致癌风险值 HQ 的计算公式为：

$$HQ = \frac{ADD}{RFD} \quad (5)$$

某元素的致癌暴露风险计算公式为：

$$ILCR = ADD \times SF \quad (6)$$

式中， RFD 为参考剂量， $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ，Cr、Cu、Zn、Mn 和 Pb 的 $RFD^{[17]}$ 的取值分别为 2.8×10^{-5} 、 4.0×10^{-2} 、 3.0×10^{-1} 、 1.4×10^{-5} 和 3.5×10^{-3} ；当 $HQ\leq 1$ 时，元素对人体的危害基本可以忽略不计； $HQ>1$ 时，对人体有非致癌风险。 $ILCR$ 为终生增量致癌风险，表示人群癌症发生的概率^[18]； SF 表示致癌倾斜因子， $[\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}]^{-1}$ ，Cr、Cd、

致 PM_{2.5} 中地壳元素浓度显著升高。通过分析其中 9 种重金属元素的浓度来研究它们的污染特征，发现它们具有明显的时间特征，如图 1 所示，其秋冬季浓度普遍高于春夏季。Cr、Ni、Zn、As 和 Pb 的浓度在冬季达到了最大值，这是因为冬季时 PM_{2.5} 污染状况严重，天气寒冷干燥，污染物不易扩散导致的，并且在冬季取暖季时居民用煤量增加同样会导致 As 和 Pb 的含量增加^[20]。Cd 的浓度不受季节变化影响，可能有一些固定的来源。有相关文献记载汽车刹车片的磨损是 Sb^[21] 的来源之一，且采样点在限行区域内，因此冬季 Sb 的浓度低于秋季，可能与郑州市在 2018 年 1 月 1 日实行的限行政策有关，可见郑州市政府的限行政策对金属的污染状况起到了很好地改善作用。

环境空气质量标准 GB 3095-2012 规定，空气中 Cd、As 和 Cr 的二级标准限值分别为 5、6 和 0.025 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ，而郑州市生活区 Cd、As 和 Cr 的年均浓度为 16.3、17.7 和 11.7 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ，分别超标 3、3 和 468 倍，但由于铬中毒仅因六价铬引起，且六

价格占总铬的 0.13^[22]，因此铬元素实际超标 60 倍。郑州市生活区的金属污染与 Cd、As 和 Cr 等元素密切相关，这些有毒金属的含量严重超标，对环境 and 人体都会造成严重危害。

表 3 郑州市某生活区 17 种重金属元素质量浓度与其他城市比较¹⁾/ng·m⁻³

元素	春季	夏季	秋季	冬季	上海 ^[23]	北京 ^[23]
Cr	8.5 ± 2.9	7.4 ± 0.2	12.7 ± 6.3	18.3 ± 14.2	49.3 ± 37.2	15.0 ± 10.0
Mn	100.6 ± 70.5	133.7 ± 128.7	190.3 ± 134.9	203.5 ± 182.1	51.90 ± 10.1	51.0 ± 28.0
Fe	1 193.4 ± 1 013.7	1 090.7 ± 1 033	1 628.8 ± 1 006	1 531.6 ± 1 127	740.50 ± 230.6	950.0 ± 260.0
Co	4.1 ± 1.2	3.6 ± 0.1	3.6 ± 0.8	4.0 ± 2.0	1.1 ± 0.1	0.8 ± 0.5
Mg	203.9 ± 129.1	164.6 ± 105.9	141.9 ± 83.9	175.2 ± 101.5	164.7 ± 70.6	236.0 ± 94.0
Al	1 129.4 ± 924.5	933.4 ± 483.1	921.7 ± 517.5	850.4 ± 496.3	177.5 ± 62.3	n. a.
K	848.5 ± 402.2	848.7 ± 456.0	1 086.2 ± 442.2	1 879.5 ± 1 262.2	1 701.1 ± 52.8	n. a.
Ca	1 078.2 ± 742.7	954.6 ± 531.8	1 059.8 ± 683.9	987.6 ± 646.6	457.9 ± 254.7	n. a.
Ti	71.9 ± 59.6	76.9 ± 72.5	35.3 ± 16.1	49.7 ± 27.7	655.6 ± 383.2	42.0 ± 25.0
V	9.4 ± 4.5	6.3 ± 4.7	5.3 ± 3.0	10.3 ± 6.1	5.2 ± 1.4	9.0 ± 6.0
Ni	11.9 ± 3.9	3.7 ± 2.7	5.2 ± 4.3	14.5 ± 4.9	n. a.	n. a.
Cu	27.5 ± 14.4	21.9 ± 11.5	31.9 ± 15.7	35.6 ± 21.6	52.5 ± 16.7	29.0 ± 19.0
Zn	147.1 ± 76.6	157.1 ± 71.7	251.8 ± 98.5	283.3 ± 179.9	423.7 ± 194.9	349.0 ± 154.0
As	15.3 ± 6.6	9.1 ± 4.9	20.7 ± 13.1	25.7 ± 17.4	28.0 ± 24.4	28.0 ± 19.0
Cd	16.2 ± 6.3	14.5 ± 5.8	16.5 ± 6.7	17.1 ± 8.3	5.0 ± 3.0	3.7 ± 1.9
Sb	9.9 ± 3.7	10.4 ± 6.9	16.2 ± 7.8	14.0 ± 10.6	16.1 ± 8.3	22.0 ± 5.0
Pb	72.6 ± 33.7	73.3 ± 25.7	117.6 ± 55.1	136.6 ± 78.9	294.1 ± 119.3	143.0 ± 117.0

1) n. a. 表示数据缺失；表内数值为平均值 ± 标准差 (mean ± SD)

2.2 郑州市某生活区大气 PM_{2.5} 中重金属的来源解析

2.2.1 PM_{2.5} 中金属元素富集因子的分析

应用富集因子和主成分分析结合的方式了解郑州市某生活区大气 PM_{2.5} 中金属元素的来源。计算富集因子时选取 Al 作为参比元素^[24]，富集因子计算结果如表 4 所示。在大气颗粒物中当元素的 EF < 10、10 < EF < 100 和 EF > 100 时分别表示该元素为轻微富集、中度富集和高度富集。轻微富集表明元素几乎不来源于人类活动，中度富集表明元素主要是人类活动影响，高度富集则说明元素全部来源于人类活动^[25]。17 种元素的年均富集因子如图 2 所示，从中可以看出处于高度富集状况的有 Zn、Cd、Sb 和 Pb 等元素，其中 Cd 的富集因子在 17 种元素中最高，为 8 657，Zn、Sb 和 Pb 的年均富集因子分别为 143.9、536.8 和 169.3，它们全部来源于人类活动；Cr、Mn、Ni、Cu 和 As 的年均富集因子值分别为 10.1、13.4、20.1、51.5 和 80.5，处于 10 ~ 100 之间，是中度富集状况，既受到人为来源的影响又受到自然源的影响；而 Fe、Mg、Al、K、Ca、Ti 和 V 的年均富集因子分别为 2.4、1.1、0.8、3.2、3.8、0.7 和 6.5，均小于 10，说明其主要受到自然源的影响，如土壤和扬尘等。金属的年均富集因子可以对不同金属的来源进行区分，对分析金属来源具有重要的指导意义。通过对金属在不同季节富集因子的分析，得出地壳元素在不同季节的富集

因子值变化不大，痕量金属元素在秋冬季的富集因子值大于春夏季。

表 4 郑州市某生活区金属元素在不同季节的富集因子值

Table 4 Enrichment factor values of metal elements in a living area of Zhengzhou City in different seasons				
元素	春季	夏季	秋季	冬季
Cr	7.1	6.2	10.6	15.5
Mn	9.3	8.4	17.2	18.5
Fe	2.1	1.9	2.8	2.8
Co	16.2	14.4	14.2	16.7
Mg	1.3	1.1	0.9	1.1
Al	0.8	0.8	0.8	0.7
K	2.3	2.3	2.9	5.1
Ca	4.6	3.7	3.5	3.3
Ti	0.9	0.8	0.5	0.7
V	5.8	3.9	3.2	13.2
Ni	11.9	6.9	9.8	51.8
Cu	26.9	32.2	87.2	57.9
Zn	100.9	107.8	172.8	194.4
As	69.4	41.5	94.3	116.9
Cd	8 509.9	7 596.5	9 712.1	8 811.9
Sb	417.1	436.4	680.1	613.6
Pb	142.3	143.6	230.3	160.8

2.2.2 郑州市某生活区大气 PM_{2.5} 中金属元素的主成分分析

通过对郑州市某生活区大气 PM_{2.5} 中金属元素的主成分分析，得出 5 种主要来源，结合富集因子对 5 种来源做如下分析，其中 17 种元素的年均富集因子如图 2 所示，主成分分析结果如表 5 所示。在主成分 1 中，元素载荷值较高的是 Fe、Mn、Al、

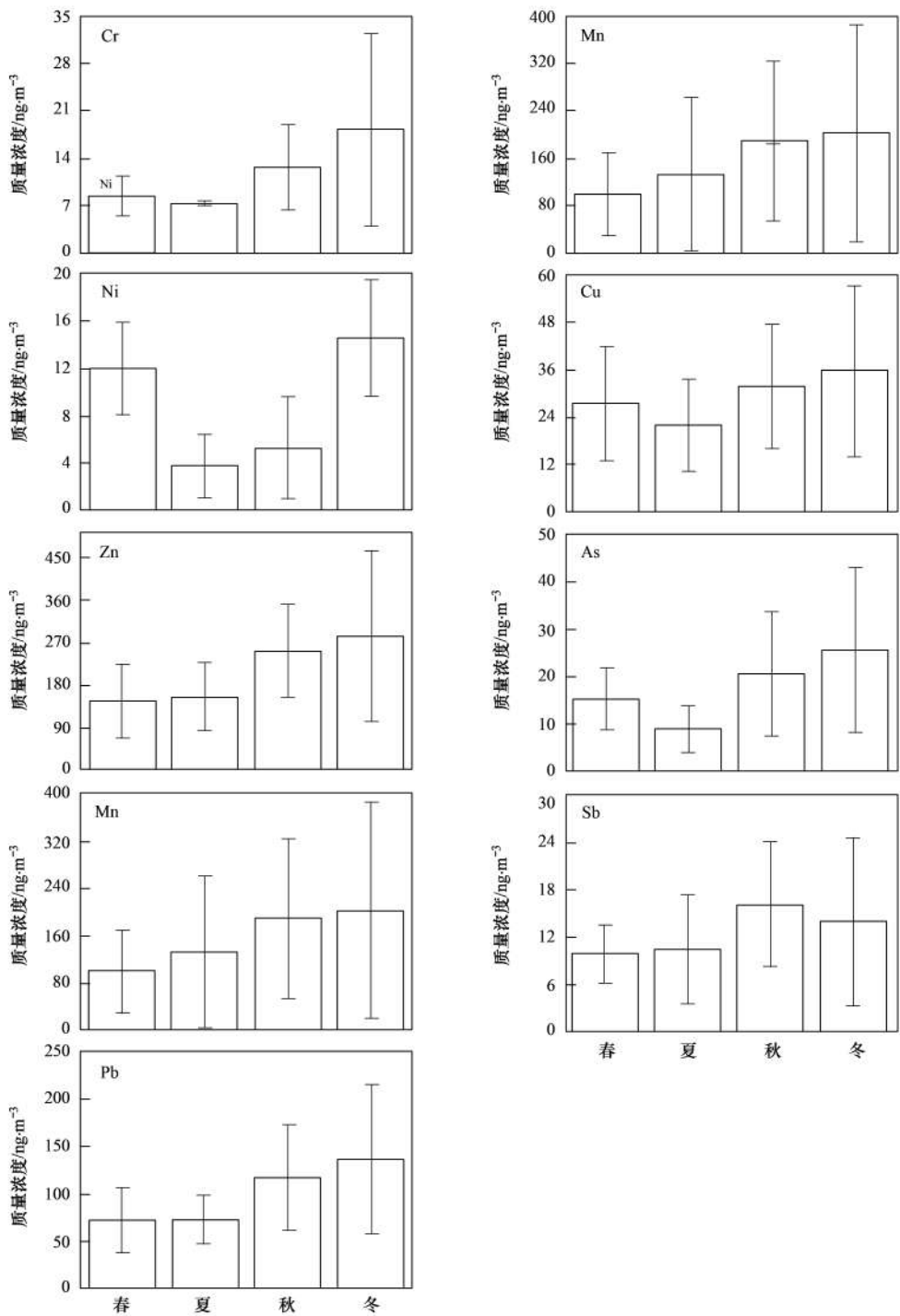


图1 9种金属元素在不同季节的质量浓度

Fig. 1 Mass concentration of nine metal elements in different seasons

K、Ti、As 和 Pb, 由富集因子可知他们的值除 As、Pb 外都小于 10, 受到自然来源的影响较多, 且 Al、Ti 是土壤源的代表性元素^[26], As、Pb 是燃煤源的代表性元素^[21], 它们在主成分 1 中的元素载荷值都较高, 因此主成分 1 主要是地壳源和建筑源; 在主成分 2 中, 元素载荷值较高的是 V、Ni, 这两种元素的富集因子在冬季大于 10, 受到人为来源的影响, 同时它们又是燃油的代表性元素^[21], 故主成分 2 可归为燃油源; 主成分 3 中 Zn 的载荷值较高, 它的富集因子大于 100, 属于高度富集且主要来源于人类活动, 由于它是垃圾焚烧的标示性元素^[27], 所以把主成分 3 归为垃圾焚烧源; 在主成分 4 中, Mn 和 Ni 的元素载荷值较高, 二者会在冶金过程中产生, 虽然该生活区域不存在金属冶炼厂, 但由于远距离大气传输的影响^[28], 可能导致 Mn 和 Ni 的累积, 因此把主成分 4 归类为冶金尘源; 在主成分 5 中, 元素载荷值较高的是 Sb, 它的富集因子值远大于 100, 主要受到人为活动的影响导致的, 由于

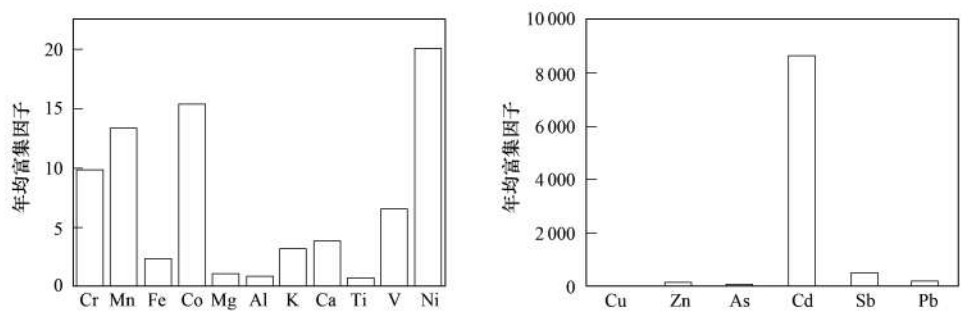


图2 郑州市某生活区 17 种金属元素的年均富集因子值

Fig. 2 Annual average enrichment factor values of 17 metal elements in a living area of Zhengzhou City

Sb^[21]的排放主要来自汽车刹车片的磨损,与机动车相关,所以把主成分 5 归为机动车源。

通过对该区域金属元素的来源分析,发现该区域元素主要来源是地壳源和燃煤源,这和该地区处于生活区、没有工厂的特征比较吻合,其次还受到垃圾焚烧的影响。由于该区域处于交通繁忙地段,因此机动车及燃油都会带来金属污染,政府在治理金属污染时要改变居民对燃煤的使用方式,减少煤炭使用,增加清洁能源的使用,并提出合理的机动车限行措施。

表5 元素主成分分析结果

Table 5 Element principal component analysis results

元素	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5
Cr	0.49	-0.71	0.26	0.27	-0.08
Mn	0.81	-0.32	-0.03	0.21	-0.27
Fe	0.92	-0.05	-0.22	0.09	-0.15
Co	-0.21	0.22	0.22	0.41	0.09
Mg	0.73	0.36	-0.41	-0.06	-0.07
Al	0.89	0.29	-0.31	-0.12	0.02
K	0.90	0.18	-0.05	-0.19	-0.06
Ca	0.76	-0.09	-0.08	0.19	0.44
Ti	0.86	0.28	-0.33	-0.10	0.11
V	0.26	0.70	0.27	0.17	0.36
Ni	0.11	0.68	0.41	0.35	-0.25
Cu	0.58	-0.68	-0.05	0.09	-0.14
Zn	0.66	-0.15	0.60	-0.31	0.01
As	0.72	0.33	0.32	0.03	-0.34
Cd	0.31	-0.04	0.25	-0.76	0.28
Sb	0.43	-0.26	0.04	0.33	0.70
Pb	0.71	-0.10	0.52	-0.12	0.01
特征值	7.33	2.60	1.60	1.36	1.21
方差/%	43.09	15.31	9.36	7.97	7.12
累积方差/%	43.09	58.40	67.76	75.72	82.84
来源	地壳源/ 燃煤源	燃油源	垃圾 燃烧源	冶金 尘源	机动车 排放源

2.3 郑州市某生活区周边环境的潜在生态风险评估

重金属污染严重的区域不仅存在对人体的危害,对周边的生态环境同样具有一定的风险^[28]。通过对 Cr、Cd、Cu、Zn、Ni、Pb 和 As 的潜在生态风

险评价,可以发现不同的金属元素其单因子生态风险指数不同,在季节上也存在差异性。在该采样区域内 Cd > Pb > As > Cu > Zn > Ni > Cr,具体结果见表 6; Cd、Pb 和 As 的年均单因子生态风险分别为 70 420.2、255.3 和 204.6,这是引起该区域内生态风险的主要元素。相对于太原^[29]和天津^[30]的单因子生态风险值,太原和天津的单因子生态风险值具体结果见表 7,郑州市中原区的单因子生态风险值显著偏高,Cd、Pb 和 As 的存在导致该采样区域具有较高的生态风险值,所以 Cd、Pb 和 As 是治理该区域生态风险时必须关注的 3 个核心元素。其他金属元素的单因子生态风险值都很低,其引起的生态风险在该区域可以忽略不计。

Cd 的生态风险在其他城市同样存在,如在成都、太原和天津 Cd 的单因子生态风险指数分别为 8 697、1 203 和 933。这几者的数值都远大于 520,潜在生态风险极强。通过研究发现不同元素的生态风险与其所处的城市和季节都有关系。一般情况下秋冬季生态风险高于春夏季,但由于郑州市生活区春夏季某些元素的浓度较高,而 PM_{2.5} 的数值相对较低,导致金属元素春夏季的生态风险比秋冬季更高。

2.4 郑州市某生活区周边居民的健康风险评估

通过采用 USEPA 的有毒重金属健康评价模型,并结合中国人群的特点^[31],分别对儿童,成年男性和成年女性进行了金属的健康风险评价。健康风险评价包括致癌风险评价和非致癌风险评价。对 As、Cd 和 Ni 进行致癌风险评价,Cu、Zn、Pb 和 Mn 进行非致癌风险评价,Cr 元素同时进行致癌风险和非致癌风险评价^[9]。具体结果如表 8 和 9 所示;可知同种金属对人体的危害风险是儿童 > 成年男性 > 成年女性。这可能与儿童体质较弱,男性接触的环境较为复杂有关。在致癌风险方面,郑州市生活区的金属 As、Cd 和 Cr 对人体都有一定的致癌风险,其中 As 对儿童的 ILCR 值为 1.5×10^{-4} ,比对成年男性 (6.5×10^{-5}) 和成年女性 (6.0×10^{-5}) 的值高一

表 6 郑州市某生活区金属元素潜在生态风险数值

Table 6 Potential ecological risk values of metal elements in a living area of Zhengzhou City							
项目	Cr	Cd	Cu	Zn	Ni	Pb	As
春	5.5	96 337.8	59.5	38.6	23.8	277.1	267.1
夏	4.7	83 543.4	69	39.9	13.5	270.3	154.4
秋	4.3	56 736	99	33.9	10.1	230	186.6
冬	5.8	46 863	60	35.9	48.5	242.7	210.5
全年	5.1	70 420.2	71.5	36.9	24	255.3	204.6

表 7 其他城市金属元素潜在生态风险数值¹⁾

Table 7 Potential ecological risk values of metal elements in other cities								
地点	项目	Cr	Cd	Cu	Zn	Ni	Pb	As
太原 ^[29]	2012 年冬季	5.9	1 203.1	103.6	21.3	54.6	68	13.3
天津 ^[30]	2011 年冬季	5.7	933.3	84.3	86.8	—	141.8	20
成都 ^[9]	2014 年秋季	1.4	8 697	42.5	27.8	16.8	164.9	700

1) “—”文献中无记载

个数量级,是对人体危害最大的致癌金属. Cd 对儿童、成年男性和成年女性的 ILCR 值分别为 5.8×10^{-5} 、 2.5×10^{-5} 和 2.3×10^{-5} . 它们的值都介于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间,对人体具有较强的致癌风险. 而 Cr 对儿童、女性和男性的 ILCR 值分别为 4.0×10^{-5} 、 1.7×10^{-5} 和 1.5×10^{-5} ,其对人体的致癌风险小于 As 和 Cd,但同样需要关注. Ni 的 ILCR 值较小,不在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 范围内,对人体的致癌风险可以忽略不计. 在该采样区域内,金属的致癌风险顺序为 As > Cd > Cr > Ni. 该采样区域的非致癌风险中 Mn 对儿童 HQ 值为 6.3,对成年男性和成年女性的 HQ 值分别为 2.6 和 2.5, HQ 值远大于 1,对人体的非致癌风险是 5 种金属中最高的. Cu、Zn、Pb 和 Cr 对儿童、成年男性和成年女性的 HQ 值均小于 1,它们的 HQ 值排序均为 Cr > Pb > Zn > Cu,虽然这些单一金属不具有非致癌风险,但还是要注意它们的综合影响. 在该采样区域内儿童较成人会遭遇较高的非致癌风险,特别是 Mn 元素对儿

童的危害,对成年男性和成年女性的非致癌风险虽然低于儿童,但还是会对人体造成损害.

3 结论

- (1)富集因子和主成分分析相结合,郑州市生活区的 17 种金属元素大部分受到人为活动的影响,其来源主要分为 5 个部分,分别是地壳源/燃煤源、燃油源、垃圾燃烧源、冶金尘源和机动车排放源.
- (2)郑州市某生活区有毒金属元素的单因子生态风险排序为 Cd > Pb > As > Cu > Zn > Ni > Cr,其中 Cd 的存在导致该区域生态风险骤增,在治理金属对环境产生的危害时要把重心放在 Cd 污染上.
- (3)郑州市某生活区有毒金属对人类的致癌风险中 As 对儿童的致癌风险是最高的为 1.5×10^{-4} ,对男性和女性的风险较低分别为 6.5×10^{-5} 和 6.0×10^{-5} ;而 Cd 对儿童的致癌风险为 5.8×10^{-5} ,其次是男性为 2.5×10^{-5} ,女性为 2.3×10^{-5} ;Cr 对人类具有轻微的致癌风险, Ni 的致癌风险可以忽略不计. 而非致癌风险中, Mn 的存在对人体的伤害最高,其他如 Cu、Zn、Pb 和 Cr 对人体不具有非致癌风险. 不管是致癌风险还是非致癌风险金属对人体的伤害都是儿童 > 成年男性 > 成年女性.

参考文献:

[1] Nagarajan R, Jonathan M P, Roy P D, *et al.* Enrichment pattern of leachable trace metals in roadside soils of Miri City, Eastern Malaysia [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **72** (6): 1765-1773.

[2] Zhang J, Hua P, Krebs P. Influences of land use and antecedent dry-weather period on pollution level and ecological risk of heavy metals in road-deposited sediment [J]. Environmental Pollution, 2017, **228**: 158-168.

[3] Kusin F M, Rahman M S A, Madzin Z, *et al.* The occurrence and potential ecological risk assessment of bauxite mine-impacted water and sediments in Kuantan, Pahang, Malaysia [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24** (2):

表 8 有毒金属元素对不同人群的致癌风险

Table 8 Carcinogenic risks of toxic metal elements in different populations				
项目	As	Cd	Ni	Cr
儿童	1.5×10^{-4}	5.8×10^{-5}	5.8×10^{-6}	4.0×10^{-5}
成年男性	6.5×10^{-5}	2.5×10^{-5}	3.0×10^{-6}	1.7×10^{-5}
成年女性	6.0×10^{-5}	2.3×10^{-5}	2.8×10^{-6}	1.5×10^{-5}

表 9 有毒金属元素对不同人群的非致癌风险

Table 9 Non-carcinogenic risks of toxic metal elements in different populations					
项目	Cr	Cu	Zn	Mn	Pb
儿童	2.4×10^{-1}	2.5×10^{-4}	4.0×10^{-4}	6.3	1.6×10^{-2}
成年男性	1.0×10^{-1}	1.0×10^{-4}	1.7×10^{-4}	2.6	7.1×10^{-3}
成年女性	9.8×10^{-2}	9.0×10^{-5}	1.6×10^{-4}	2.5	6.7×10^{-3}

- 1306-1321.
- [4] 史建武, 李泽正, 孙座锐, 等. 昆明城区大气 PM_{2.5} 中重金属浓度水平与健康风险研究[J]. 安全与环境学报, 2018, **18**(2): 795-800.
- Shi J W, Li Z Z, Sun Z R, *et al.* Specific features of heavy metal pollutant residue in PM_{2.5} and analysis of their damage level for human health in the urban air of Kunming[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, **18**(2): 795-800.
- [5] 杜金花, 张宜升, 何凌燕, 等. 深圳某地区大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征及健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2012, **29**(9): 838-840.
- [6] 魏敏, 冯海艳, 杨忠芳. 北京市大气颗粒物中 Cd 的地球化学分布特征及其生态风险评估[J]. 现代地质, 2012, **26**(5): 983-988.
- Wei M, Feng H Y, Yang Z F. The distribution characteristics and ecological risk assessment of Cd in atmospheric particulate matter of Beijing[J]. Geoscience, 2012, **26**(5): 983-988.
- [7] 李友平, 刘慧芳, 周洪, 等. 成都市 PM_{2.5} 中有毒重金属污染特征及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(7): 2225-2232.
- Li Y P, Liu H F, Zhou H, *et al.* Contamination characteristics and health risk assessment of toxic heavy metals in PM_{2.5} in Chengdu[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(7): 2225-2232.
- [8] 王晴晴, 谭吉华, 马永亮, 等. 佛山市冬季 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(8): 1384-1391.
- Wang Q Q, Tan J H, Ma Y L, *et al.* Characteristics of heavy metals in PM_{2.5} during winter in Foshan City[J]. China Environmental Science, 2012, **32**(8): 1384-1391.
- [9] 郭翌霞, 耿红, 张晋宏, 等. 山西省武乡县城大气 PM_{2.5} 痕量重金属的生态和健康风险分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1004-1013.
- Guo Z X, Geng H, Zhang J H, *et al.* Ecological and health risks of trace heavy metals in atmospheric PM_{2.5} collected in Wuxiang Town, Shanxi province[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1004-1013.
- [10] Lin M L, Gui H R, Wang Y, *et al.* Pollution characteristics, source apportionment, and health risk of heavy metals in street dust of Suzhou, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(2): 1987-1998.
- [11] Hsu C Y, Chiang H C, Chen M J, *et al.* Ambient PM_{2.5} in the residential area near industrial complexes: spatiotemporal variation, source apportionment, and health impact[J]. Science of the Total Environment, 2017, **590-591**: 204-214.
- [12] 杨婧, 郭晓爽, 滕曼, 等. 我国大气细颗粒物中金属污染特征及来源解析研究进展[J]. 环境化学, 2014, **33**(9): 1514-1521.
- Yang J, Guo X S, Teng M, *et al.* A review of atmospheric fine particulate matter associated trace metal pollutants in China[J]. Environmental Chemistry, 2014, **33**(9): 1514-1521.
- [13] Zhang Y Y, Ji X T, Ku T T, *et al.* Heavy metals bound to fine particulate matter from northern China induce season-dependent health risks: a study based on myocardial toxicity[J]. Environmental Pollution, 2016, **216**: 380-390.
- [14] 焦荔, 沈建东, 姚琳, 等. 杭州市大气降尘重金属污染特征及来源研究[J]. 环境污染与防治, 2013, **35**(1): 73-76, 80.
- Jiao L, Sh J d, Yao L, *et al.* Pollution characteristics and sources of heavy metals in atmospheric dustfall of Hangzhou[J]. Environmental Pollution and Control, 2013, **35**(1): 73-76, 80.
- [15] Lin Q, Liu E F, Zhang E L, *et al.* Spatial distribution, contamination and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Erhai Lake, a large eutrophic plateau lake in southwest China[J]. CATENA, 2016, **145**: 193-203.
- [16] 王珊珊, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 厦门市大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 地球与环境, 2017, **45**(3): 336-341.
- Wang S S, Yu R L, Hu G R, *et al.* Pollution characteristic and health risk of heavy metals in PM_{2.5} of Xiamen City, China[J]. Earth and Environment, 2017, **45**(3): 336-341.
- [17] 王伟, 孔少飞, 刘海彪, 等. 南京市春节前后大气 PM_{2.5} 中重金属来源及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(7): 2186-2195.
- Wang W, Kong S F, Liu H B, *et al.* Sources and risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} around 2014 spring festival in Nanjing[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(7): 2186-2195.
- [18] 冯利红, 赵岩, 李建平, 等. 天津市大气重污染天气下细颗粒物中重金属污染特征及健康风险评估[J]. 中华疾病控制杂志, 2018, **22**(11): 1164-1167, 1172.
- Feng L H, Zhao Y, Li J P, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in fine particles with different levels of air pollution in Tianjin[J]. Chinese Journal of Disease Control & Prevention, 2018, **22**(11): 1164-1167, 1172.
- [19] Geng N B, Wang J, Xu Y F, *et al.* PM_{2.5} in an industrial district of Zhengzhou, China: chemical composition and source apportionment[J]. Particuology, 2013, **11**(1): 99-109.
- [20] 徐静, 李杏茹, 张兰, 等. 北京城郊 PM_{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2501-2509.
- Xu J, Li X R, Zhang L, *et al.* Concentration and ecological risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} collected in urban and suburban areas of Beijing[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2501-2509.
- [21] Zhang N N, Cao J J, Xu H M, *et al.* Elemental compositions of PM_{2.5} and TSP in Lijiang, southeastern edge of Tibetan Plateau during pre-monsoon period[J]. Particuology, 2013, **11**(1): 63-69.
- [22] 戴塔根, 罗莹华, 梁凯. 重金属在不同粒径 PM₁₀ 中的含量与形态[J]. 地球科学与环境学报, 2006, **28**(4): 87-91.
- Dai T G, Luo Y H, and Liang K. Contents and form of heavy metal in PM₁₀ of different diameters[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, **28**(4): 87-91.
- [23] 徐宏辉, 王跃思, 温天雪, 等. 北京市大气气溶胶中金属元素的粒径分布和垂直分布[J]. 环境化学, 2007, **26**(5): 675-679.
- Xu H H, Wang Y S, Wen T X, *et al.* Size distributions and vertical distributions of metal elements of atmospheric aerosol in Beijing[J]. Environmental Chemistry, 2007, **26**(5): 675-679.
- [24] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, **12**(4): 12-19.
- Wei F S, Chen J S, Wu Y Y, *et al.* Study on the background contents on 61 elements of soils in China[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 1991, **12**(4): 12-19.
- [25] Tan J H, Duan J C, Ma Y L, *et al.* Source of atmospheric heavy metals in winter in Foshan, China[J]. Science of the Total Environment, 2014, **493**: 262-270.
- [26] 杨杨. 珠三角地区建筑施工扬尘排放特征及防治措施研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [27] 陈江, 费勇, 马鑫雨, 等. 燃煤与垃圾焚烧灰中细颗粒物

- PM_{2.5}的重金属元素风险评价[J]. 中国粉体技术, 2016, **22** (2): 104-107.
- Chen J, Fei Y, Ma X Y, *et al.* Risk assessment on heavy metal elements of fine particulate matter PM_{2.5} in fly ash origin from coal and waste incineration [J]. China Powder Science and Technology, 2016, **22**(2): 104-107.
- [28] 王申博, 余飞, 燕启社, 等. 典型背景区大气颗粒物中元素粒径分布特征[J]. 环境科学与技术, 2017, **40**(6): 133-140.
- Wang S B, Yu F, Yan Q S, *et al.* Size distributions of elements in atmospheric particulates of the typical background region[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **40**(6): 133-140.
- [29] 李丽娟, 温彦平, 彭林, 等. 太原市采暖季 PM_{2.5}中元素特征及重金属健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4431-4438.
- Li L J, Wen Y P, Peng L, *et al.* Characteristic of elements in PM_{2.5} and health risk assessment of heavy metals during heating season in Taiyuan[J]. Environmental Science, 2014, **35**(12): 4431-4438.
- [30] Xu H M, Ho S S H, Cao J J, *et al.* A 10-year observation of PM_{2.5}-bound nickel in Xi'an, China: effects of source control on its trend and associated health risks [J]. Scientific Reports, 2017, **7**: 41132.
- [31] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册-成人卷[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2018年11月1日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续17次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-rui, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)