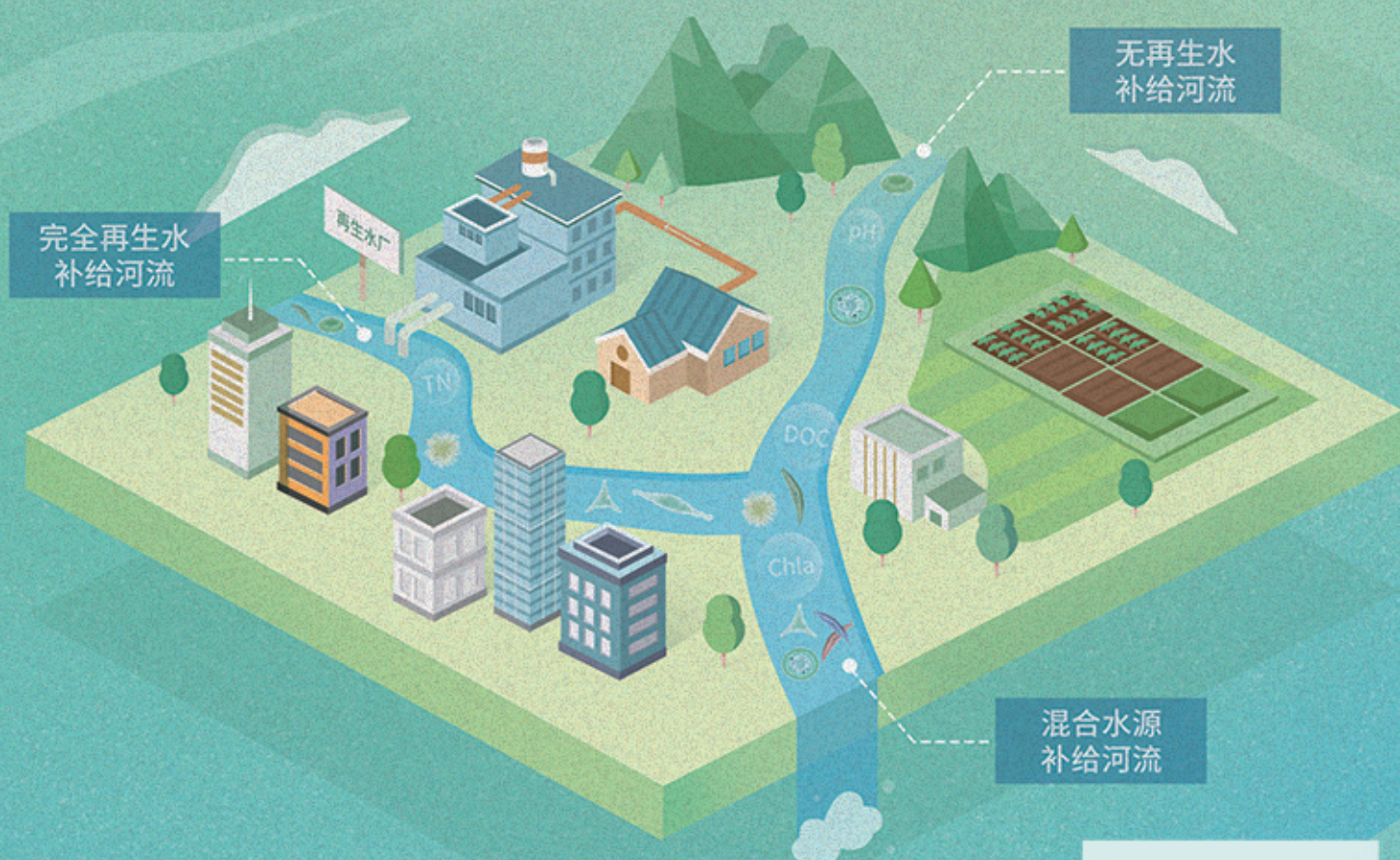


不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM _{2.5} 时空演变格局及其影响因素	张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)
中原城市群 PM _{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响	周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)
长株潭城市群 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析	刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)
张掖市城区大气细颗粒物 PM _{2.5} 的化学组成及来源解析	潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)
2018~2019年冬季天津和青岛 PM _{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估	赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)
青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析	孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)
2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势	赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)
海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征	谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)
基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别	杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)
郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析	齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)
兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析	杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)
地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估	刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)
缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征	李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)
废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测	严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)
长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送	刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱周, 冉祥滨 (5478)
澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析	郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)
小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系	肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)
磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化	张坤峰, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)
疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估	樊月婷, 昌盛, 张坤峰, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)
北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估	昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤峰, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)
平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因	孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)
三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响	张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)
不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环	刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)
2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析	谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)
乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价	杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)
生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制	苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)
不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)
锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用	高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)
KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除	徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)
改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI)的吸附机制	练建军, 郭洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)
桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI)	刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢领辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)
镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的去除	吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)
钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析	程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)
上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价	李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)
重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析	马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)
典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析	官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)
基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析	张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)
香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估	陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)
地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例	刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)
新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估	杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)
肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果	伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)
微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累	杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆, 赵鹏 (5769)
产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制	姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩辉 (5778)
硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制	高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)
巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响	王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性	竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)
添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响	赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)
基于g-C ₃ N ₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性	朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)
“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析	杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)
长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测	杨旭, 刘贤赵 (5850)
基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析	张涛, 郑钧文, 孙煜豪, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)
《环境科学》第43卷(2022年)总目录	(5873)
《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)	

2018 ~ 2019 年冬季天津和青岛 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征与健康风险评价

赵明升^{1,2}, 任丽红^{1*}, 李刚¹, 刘亚妮², 赵刚^{1,3}, 张佳浩¹, 高元官¹, 杨小阳¹

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050; 3. 华北理工大学矿业工程学院, 唐山 063210)

摘要: 于2018年12月18日至2019年1月22日在天津和青岛进行 $PM_{2.5}$ 样品采集, 利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定 $PM_{2.5}$ 中18种元素(Na、Mg、Al、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Se、Mo、Cd、Ba和Pb)浓度, 运用富集因子法讨论了元素的富集程度, 并评估了重金属的生态风险和健康风险。结果表明, 采样期间天津和青岛 $\rho(PM_{2.5})$ 平均值分别为 $(93.6 \pm 53.5) \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $(85.5 \pm 60.3) \mu g \cdot m^{-3}$; Zn是 $PM_{2.5}$ 中最主要的微量元素; 富集因子结果表明, Se、Cd、Zn、Pb、Mo、Cu和As元素富集程度高, 污染严重, 主要受人为活动的影响。在天津重金属的潜在生态风险大小依次为: Cd > Mo > Se > Pb > As > Cu > Zn > Ni > Cr > V, 在青岛重金属的潜在生态风险大小依次为: Cd > Se > Mo > As > Pb > Zn > Cu > Ni > Cr > V, Cd元素的贡献最大, 对天津和青岛生态风险的贡献率分别为67%和86%, 属于极高的风险等级。健康风险评价显示, 手口摄入是引起非致癌风险和致癌风险的主要暴露途径, 且儿童非致癌风险和致癌风险均高于成人, 天津和青岛的重金属对儿童的综合非致癌风险(HI)值分别为5.38和5.40, 对成人的HI值分别为1.04和1.02, 均高于1, 说明成人和儿童均存在明显的非致癌风险, 且以As和Pb的非致癌风险最大。重金属致癌风险(CR)值大小依次为: As > Cr > Pb, 其中As在天津和青岛的儿童中存在致癌风险, Cr和Pb存在潜在致癌风险。

关键词: $PM_{2.5}$; 重金属; 富集因子; 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(2022)12-5376-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205143

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of $PM_{2.5}$ Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019

ZHAO Ming-sheng^{1,2}, REN Li-hong^{1*}, LI Gang¹, LIU Ya-ni², ZHAO Gang^{1,3}, ZHANG Jia-hao¹, GAO Yuan-guan¹, YANG Xiao-yang¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: $PM_{2.5}$ filter samples were collected in Tianjin and Qingdao from December 18, 2018 to January 22, 2019. The mass concentrations of 18 elements (Na, Mg, Al, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Ba, and Pb) were determined using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The enrichment factor was used to discuss the enrichment degree in $PM_{2.5}$. The ecological risk and health risk of heavy metals in $PM_{2.5}$ were evaluated. The results showed that the average concentrations of $PM_{2.5}$ in Tianjin and Qingdao were $(93.6 \pm 53.5) \mu g \cdot m^{-3}$ and $(85.5 \pm 60.3) \mu g \cdot m^{-3}$, respectively. Zn had the highest concentration among the trace elements. The enrichment factor results showed that the Se, Cd, Zn, Pb, Mo, Cu, and As elements were highly enriched and polluted, which were mainly affected by anthropogenic activities. The potential ecological risk indexes of heavy metals in Tianjin were as follows: Cd > Mo > Se > Pb > As > Cu > Zn > Ni > Cr > V; in Qingdao, the order was Cd > Se > Mo > As > Pb > Zn > Cu > Ni > Cr > V. Cd contributed most to the ecological risk, with 67% and 86%, respectively, in Tianjin and Qingdao, indicating an extremely strong risk level. The health risk assessment showed that oral and manual ingestion was the main exposure route causing non-carcinogenic and carcinogenic risks, and both the non-carcinogenic and carcinogenic risks in children were higher than those in adults. The comprehensive non-carcinogenic risk (HI) values of heavy metals in Tianjin and Qingdao were 5.38 and 5.40 for children and 1.04 and 1.02 for adults, with both higher than 1. This indicated that both adults and children had obvious non-carcinogenic risks, and As and Pb posed the highest non-carcinogenic risks. The order of carcinogenic risk (CR) of heavy metals was As > Cr > Pb. As posed carcinogenic risk in children in Tianjin and Qingdao, and Cr and Pb had potential carcinogenic risk.

Key words: $PM_{2.5}$; heavy metals; enrichment factor; ecological risk; health risk assessment

近年来, 由于工业和城市化的快速发展, $PM_{2.5}$ 污染已经成为世界范围内的一个主要环境问题^[1-5]。重金属是 $PM_{2.5}$ 的重要组成部分^[6], 虽然在颗粒物中的含量相对较低, 但其具有高毒性(特别是As、Cr、Cd和Ni)和持久性, 并会在生物体内累积, 当 $PM_{2.5}$ 中的重金属浓度超过临界阈值时, 它们会对人类健康和环境造成毒性影响^[7-12]。大气中的

重金属能够利用颗粒物等作为载体进入人体从而导致人体的机能损坏^[13], 人体过量接触 $PM_{2.5}$ 中的重金属可能导致呼吸道炎症、肺部疾病、心血管疾病甚

收稿日期: 2022-05-12; 修订日期: 2022-07-06

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2019YSKY-025); 国家自然科学基金项目(41705136)

作者简介: 赵明升(1998~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境监测与评价, E-mail: 2625905366@qq.com

* 通信作者, E-mail: renlh@caees.org.cn

至癌症的发生^[14~19]. 重金属元素可以通过植物叶片或树皮在环境中积累,或被土壤中的根系吸收,从而构成潜在的生态风险^[20~22].

目前,各种化学、毒理学和生态学方法已被用于评估重金属对环境的影响^[8~14],我国重金属的风险评估主要集中在颗粒物污染严重和存在大量工业排放的城市和地区^[23~25]. 在我国中西部城市的研究中发现,As 元素在西安、兰州、洛阳、郑州和乌鲁木齐表现出显著的致癌风险,且在冬季致癌风险最高^[7,24,26]. 卫星观测显示,我国东部的 PM_{2.5} 污染水平非常高^[27],同时由于人为因素影响,PM_{2.5} 中有毒金属的浓度远高于自然水平^[25]. 除采矿和冶炼工厂等周围地区外,城市土壤和街道灰尘中有毒金属的健康风险往往在可接受的水平内^[28]. 由于接触 PM_{2.5} 中重金属的主要暴露途径是手口、呼吸和皮肤接触^[14,26],并且暴露于多种元素的综合健康风险已经被证明超过了可接受的水平^[14,26,29]. 以往的研究大多只计算了呼吸途径的健康风险,但单一摄入途径的健康风险评价并不能代表暴露人群面临的全部健康风险^[30],并且很多研究大多集中在单个城市,而对多个城市同步开展的研究较少. 天津和青岛作为京津冀和山东半岛的重要港口城市,都是海上丝绸之路的重要战略支点,两者的社会经济发展状况较为接近. 近年来,经济的快速发展以及城市化进程的加快导致天津和青岛出现了严重的颗粒物污染,在 2017 年,天津和青岛全年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值分别为 $62 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $37 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[31,32],均超过国家环境空气质量二级标准($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[33].

本研究于 2018 ~ 2019 年冬季在天津和青岛同步开展 PM_{2.5} 滤膜样品的采集与分析,采用富集因子法探讨 18 种金属元素(Na、Mg、Al、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Se、Mo、Cd、Ba 和 Pb)的富集程度和污染水平,利用生态风险指数评价其环境影响和生态效应,并采用美国环保署(EPA)开发的健康风险评估模型对 PM_{2.5} 中的重金属进行健康评价,分别就手口摄入、呼吸吸入和皮肤接触这 3 种途径对儿童和成人产生的非致癌风险与致癌风险展开评估. 本研究旨在为科学评价相关城市 PM_{2.5} 中金属元素的生态风险和健康风险提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 采样点位概况

本研究在天津和青岛同步进行 PM_{2.5} 样品采集. 天津采样点位于天津大学卫津路校区内第 19 教学楼 4 楼楼顶($39^{\circ}06'59.63''\text{N}$, $117^{\circ}10'47.47''\text{E}$),采样口离地高度约 18 m,该采样点属于交通和居民的混

合区. 青岛采样点位于青岛市生态环境局崂山分局的崂山区子站($36^{\circ}06'23.23''\text{N}$, $120^{\circ}27'27.55''\text{E}$),采样口离地高度约 12 m,周边多为居民区,人为污染源较多.

1.2 样品采集和分析

天津和青岛两个采样点各使用一台 TH-16A 型天虹四通道环境空气颗粒物智能采样器,采样滤膜为直径 47 mm 的 Teflon 滤膜(美国 Millipore 公司),采样日期为 2018 年 12 月 18 日至 2019 年 1 月 22 日,每日采样时长为 23 h,采样时段为每日 10:00 至次日 09:00,两个点位同步采样,除去停电、恶劣天气和设备故障等原因分别采集有效样品数 33 个和 35 个.

采样前后将滤膜放置在温度为 $(20 \pm 2.5)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 $(50 \pm 5)\%$ 的恒温恒湿箱中平衡 48 h,并使用十万分之一分析天平(赛多利斯科学仪器有限公司)称量滤膜质量,装进干净的膜盒中备用. 剪取 1/2 滤膜样品置于 30 mL 洗净的聚四氟乙烯消解罐中,加入消解溶液(6 mL HNO₃、2 mL H₂O₂ 和 0.2 mL HF),常温预消解 45 min,按照程序升温进行微波消解(低温升到 120 $^{\circ}\text{C}$ 保持 3 min,持续升温到 170 $^{\circ}\text{C}$ 保持 10 min,最后升到 190 $^{\circ}\text{C}$ 保持 50 min). 将消解液转移至 PET 瓶,超纯水定容到 100 mL,样品静置避光保存. 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,美国 Agilent 公司)测定样品中 18 种元素(Na、Mg、Al、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Se、Mo、Cd、Ba 和 Pb)的浓度^[34]. 分析元素时,每 10 个样品进行一个空白膜,做平行样品和标准样品分析. 平行样品分析需保证相对误差小于 20%,标准样品回收率控制在 80% ~ 120% 之间,以减小误差对实验带来的影响.

1.3 统计分析和模型计算

1.3.1 富集因子法

富集因子法用于研究 PM_{2.5} 中元素的富集程度以及判断、评价元素的污染水平,确定其主要来源是自然源还是人为源的普遍方法. 富集因子(EF_i)的计算公式为^[8,25]:

$$EF_i = \left(\frac{C_i}{C_{\text{ref}}} \right)_{\text{PM}_{2.5}} / \left(\frac{C_i}{C_{\text{ref}}} \right)_{\text{soil}} \quad (1)$$

式中, C_i 为研究元素的浓度, C_{ref} 为参比元素的浓度,单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $(C_i/C_{\text{ref}})_{\text{PM}_{2.5}}$ 和 $(C_i/C_{\text{ref}})_{\text{soil}}$ 分别为 PM_{2.5} 样品和土壤背景中研究元素与参比元素的比值;由于 Al 在土壤中性质比较稳定,人为污染较小且在 PM_{2.5} 中也普遍存在,故本研究选择 Al 为参比元素. 土壤背景中各元素浓度采用天津和青岛当地 A 层土壤元素背景值或基准值^[35,36].

若元素 EF 值大于 100,表明这些元素高度富集或超富集,且主要来自人为源;若 EF 值在 10~100 之间,表明这些元素主要来自包括地壳源和人为源在内的混合源,且人为源是主要的污染源,为中度富集;若 EF 值小于 10,为无富集或轻度富集,可认为该元素主要由土壤或岩石风化形成的尘埃进入大气造成,主要受地壳源的影响。

1.3.2 潜在生态风险评价

环境中重金属的高富集不仅破坏了自然生态系统的平衡,而且对微生物、植物、动物和人类都有毒害作用^[37]。生态风险评估被广泛用于评估一种或多种重金属污染所产生的环境影响^[38],潜在生态风险

指数(RI)被广泛用于评价颗粒物中重金属污染程度^[8,14,25]。计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i \times (C_i/C_{soil}^i) \tag{2}$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i \tag{3}$$

其中, E_r^i 为第 i 种金属的潜在生态风险系数, T_r^i 为第 i 种金属的毒性响应因子; C_i 为研究元素的浓度, C_{soil}^i 为研究元素在土壤背景中的浓度,单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 本文采用文献[14]推荐的毒性响应因子值:Se、Mo、Pb、As、Zn、Cu、V、Cr、Ni 和 Cd 的毒性响应因子分别为 1、18、5、10、1、5、2、2、5 和 30。潜在生态风险评价指标和等级划分如表 1 所示^[8,39]。

表 1 潜在生态风险分级

Table 1 Classification criteria of the potential ecological risk index

生态风险等级	I (低风险)	II (中等风险)	III (较高风险)	IV (高风险)	V (极高风险)
E_r^i	<40	40~80	80~160	160~320	>320
RI	<150	150~300	300~600	600~1200	>1200

1.3.3 健康风险评估

根据美国 EPA 的健康风险评价模型对大气颗粒物中重金属进行健康风险评估。由于行为和呼吸系统的差异,将受试者分为儿童(0~15 岁)和成人两组^[40]。分别计算了手口、呼吸和皮肤接触 3 种暴露途径中有毒金属的非致癌风险(HQ)和致癌风险(CR)。非致癌风险评估主要针对 V、Ni、Cr、Mo、As、Cu、Zn、Pb、Cd 和 Se 元素,致癌风险的研究中,对 As、Cr、Pb、Cd 和 Ni 元素进行致癌风险评估。由于缺乏相关的参数,对 Ni 和 Cd 元素仅计算呼吸暴露途径的致癌风险,就健康风险而言,Cr 为六价铬,其浓度计算为总铬的七分之一^[14,40]。

3 种途径的暴露量计算公式为^[14,26,40]:

$$CDI_{ing} = C_{ing} \times \frac{IngR \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} \tag{4}$$

$$EC_{inh} = C_{inh} \times \frac{ET \times EF \times ED}{AT_n} \tag{5}$$

$$DAD_{der} = C_{der} \times \frac{SA \times AF \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} \tag{6}$$

式中, CDI_{ing} 为化学物质经手口途径的日摄入量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$; EC_{inh} 为由呼吸吸入的接触浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; DAD_{der} 为经皮肤接触的皮肤吸收剂量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$; C_{inh} 为重金属元素在颗粒物中的浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; C_{ing} 和 C_{der} 为重金属元素在颗粒物中的含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 公式中其他参数的含义和取值如表 2 所示^[14]。

表 2 重金属健康风险评价计算参数含义和取值

Table 2 Definitions and values of calculated parameters for health risk assessment of heavy metals

参数	符号	单位	人群	
			儿童	成人
手口摄入量	IngR	$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	200	100
暴露频率	EF	$\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	180	180
暴露年限	ED	a	6	24
转换因子	CF	$\text{kg}\cdot\text{mg}^{-1}$	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}
人均体重	BW	kg	15	70
平均寿命	AT	d	ED × 365 (非致癌作用) 70 × 365 (致癌作用)	ED × 365 (非致癌作用) 70 × 365 (致癌作用)
暴露时间	ET	$\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$	24	24
平均寿命	AT_n	h	ED × 365 × 24 (非致癌作用) 70 × 365 × 24 (致癌作用)	ED × 365 × 24 (非致癌作用) 70 × 365 × 24 (致癌作用)
皮肤表面积	SA	cm^2	2 800	5 700
皮肤粘附因子	AF	$\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$	0.2	0.07
皮肤吸收因子	ABS		0.03 (As), 0.1 (Pb), 0.001 (Cd), 0.01 (其他元素)	

单个元素的非致癌风险(HQ)和致癌风险(CR)的计算公式如下^[14]：

$$\begin{aligned} HQ_{ing} &= CDI_{ing}/RfD_0 & (7) \\ HQ_{inh} &= EC_{inh}/(RfC_i \times 1\,000) & (8) \\ HQ_{der} &= DAD_{der}/(RfD_0 \times GIABS) & (9) \\ CR_{ing} &= CDI_{ing} \times SF_0 & (10) \\ CR_{inh} &= EC_{inh} \times IUR & (11) \\ CR_{der} &= DAD_{der} \times SF_0/GIABS & (12) \end{aligned}$$

综合非致癌风险(HI)和综合致癌风险(CRT)的计算公式分别为^[26]：

$$HI = \sum HQ_i \quad (13)$$

$$CRT = \sum CR_i \quad (14)$$

式中,RfD₀、RfC_i、GIABS、SF₀和IUR分别为口服参考剂量、吸入参考浓度、胃肠道吸收因子、口服斜率因子和吸入单位风险,参数取值如表3所示.当HQ≤1和HI≤1时,无非致癌风险.相反,HQ>1或者HI>1表明存在非致癌风险.当CR(CRT)<10⁻⁶时,认为不存在致癌风险;当10⁻⁶≤CR(CRT)≤10⁻⁴时,认为具有潜在致癌风险;当CR(CRT)>10⁻⁴时,认为存在致癌风险^[25].

表3 重金属参考剂量^[14]

Table 3 Reference doses of heavy metals

重金属种类	RfD ₀ /mg·(kg·d) ⁻¹	RfC _i /mg·m ⁻³	GIABS	SF ₀ /(kg·d) ⁻¹ ·mg ⁻¹	IUR /(μg·m ⁻³) ⁻¹
Se	5.00 × 10 ⁻³	2.00 × 10 ⁻²	1	— ¹⁾	—
Mo	5.00 × 10 ⁻³	4.00 × 10 ⁻⁴	1	—	—
Pb	3.50 × 10 ⁻³	3.52 × 10 ⁻³	1	0.008 5	0.000 012
As	3.00 × 10 ⁻⁴	1.50 × 10 ⁻⁵	1	1.5	0.004 3
Zn	3.00 × 10 ⁻¹	3.01 × 10 ⁻¹	1	—	—
Cu	4.00 × 10 ⁻²	4.02 × 10 ⁻²	1	—	—
V	7.00 × 10 ⁻³	1.00 × 10 ⁻⁴	0.026	—	—
Cr	3.00 × 10 ⁻³	1.00 × 10 ⁻⁴	0.025	0.5	0.084
Ni	2.00 × 10 ⁻²	9.00 × 10 ⁻⁵	0.04	—	0.000 26
Cd	0.001	1.5 × 10 ⁻⁵	0.025	—	0.001 8

1) “—”表示没有相关数据

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5}及重金属浓度水平

天津和青岛采样期间 PM_{2.5} 和元素浓度的时间

变化分别见图1和图2.天津市ρ(PM_{2.5})范围为40.7~224.6 μg·m⁻³,ρ(PM_{2.5})平均值为(93.6±53.5) μg·m⁻³,与《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)^[33]相比,超标天数为17 d,超标率为52%,青

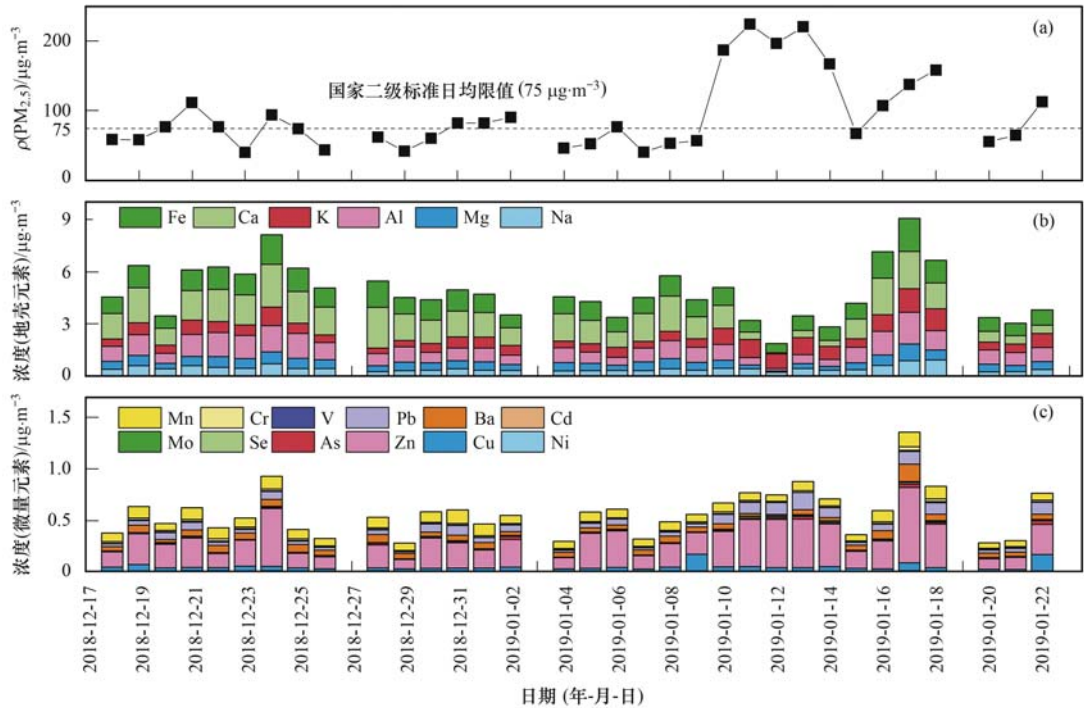


图1 天津 PM_{2.5} 和元素浓度变化

Fig. 1 Changes in PM_{2.5} and element concentrations in Tianjin

岛市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 范围为 $12.2 \sim 273.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为 $(85.5 \pm 60.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超标天数为 17 d, 超标率 49%. 由此说明天津和青岛 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度处于相对较高的污染水平. 与国内外城市或地区比较, 天津和青岛 2018 ~ 2019 年冬季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 水平

高于日本北九州^[14] ($21.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、厦门^[41] ($21.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、长江三角洲 ($68.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和珠江三角洲 ($50.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[42], 与沈阳^[43] ($85.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 相当, 低于郑州^[44] ($108.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和成都^[8] ($104.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

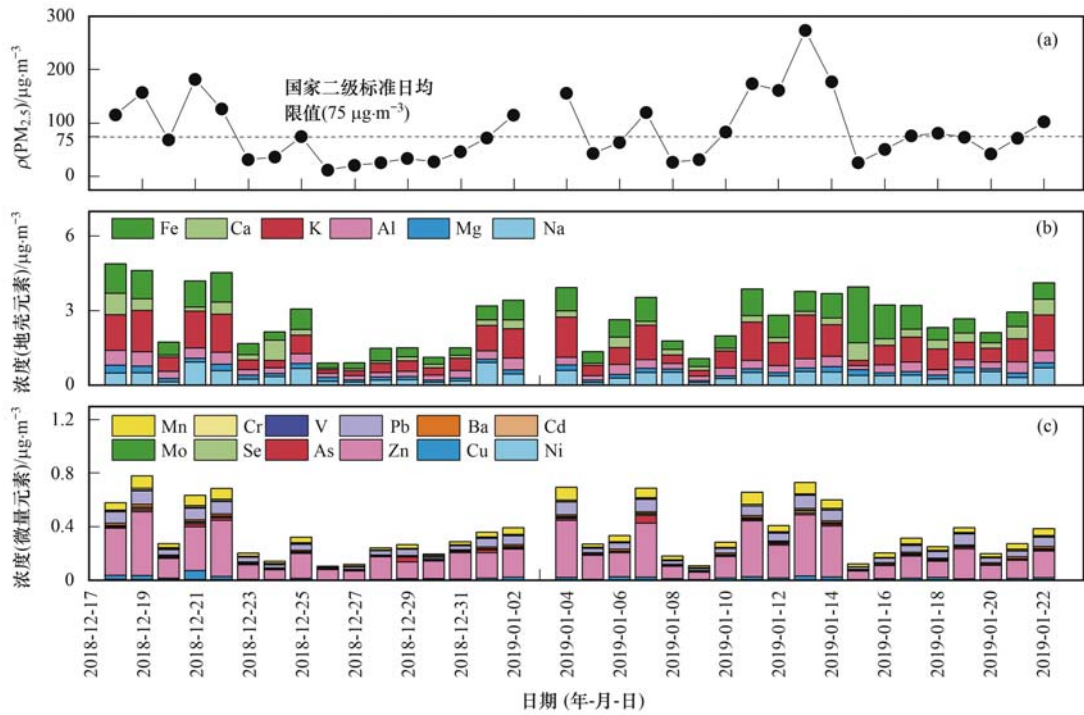


图2 青岛 $\text{PM}_{2.5}$ 和元素浓度变化
Fig. 2 Changes in $\text{PM}_{2.5}$ and element concentrations in Qingdao

2018 ~ 2019 年冬季天津 $\text{PM}_{2.5}$ 中元素浓度大小排序依次为: $\text{Ca} > \text{Fe} > \text{Al} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Ba} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{As} > \text{V} > \text{Se} > \text{Ni} > \text{Cd} > \text{Mo}$; 青岛市 $\text{PM}_{2.5}$ 中元素浓度大小排序依次为: $\text{K} > \text{Fe} > \text{Na} > \text{Al} > \text{Ca} > \text{Zn} > \text{Mg} > \text{Pb} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Ba} > \text{Cr} > \text{Se} > \text{Ni} > \text{V} > \text{Cd} > \text{Mo}$, 天津和青岛的 18 种元素累计浓度分别为 $5.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $3.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别占 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量分数为 5.8% 和 3.6%. 其中地壳元素 (Na、Mg、Al、K、Ca 和 Fe) 的浓度在天津和青岛分别为 $4.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $2.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占元素总量的质量分数为 89.5% 和 87.1%, 其他元素的浓度相对较低, 表明地壳元素是无机元素中的主导元素. 微量元素中以 $\rho(\text{Zn})$ 最高, 在天津和青岛分别为 $277.3 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $211.1 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别占微量元素总量的质量分数为 48.7% 和 58.1%, 在天津和青岛的 $\rho(\text{Pb})$ 分别为 $62.9 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $52.0 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别占元素总量的质量分数为 1.2% 和 1.7% (表 4), Zn 和 Pb 主要来源于工业铅锌冶炼, 表明铅锌冶炼对这两个城市的影响不容忽视.

世界卫生组织 (WHO) 给出大气环境中 V、Pb、Mn、Ni、As 和 Cd 的指导值分别为 1 000、500、150、

表4 天津和青岛 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属浓度和质量分数

Table 4 Heavy metal concentrations and mass fraction in $\text{PM}_{2.5}$ of Tianjin and Qingdao

元素	天津		青岛	
	浓度平均值	质量分数	浓度平均值	质量分数
Na *	0.4	0.45	0.4	12.94
Mg *	0.5	0.49	0.2	5.12
Al *	0.9	0.95	0.3	10.31
K *	0.7	0.71	0.9	27.28
Ca *	1.4	1.44	0.3	9.36
Fe *	1.1	1.14	0.7	23.29
V	5.9	0.01	2.8	0.09
Cr	14.7	0.02	8.0	0.26
Mn	89.0	0.10	42.0	1.35
Ni	4.7	0.01	3.0	0.10
Cu	40.9	0.04	14.6	0.47
Zn	277.3	0.30	211.1	6.80
As	10.3	0.01	10.8	0.35
Se	5.4	0.01	5.5	0.18
Mo	1.8	0.00	1.0	0.03
Cd	2.0	0.00	1.8	0.06
Ba	55.0	0.06	10.7	0.34
Pb	62.9	0.07	52.0	1.67

1) “*”表示该元素的浓度单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其余为 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 质量分数单位为%

25、6.6 和 $5 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[41]. 我国《环境空气质量标准》

(GB 3095-2012) 对 Cr(VI) 也给出了相应的参考浓度限值, 为 $0.025 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 按照 Cr(VI) 占所测 Cr 浓度的七分之一计算^[40], 天津和青岛 $\rho[\text{Cr(VI)}]$ 均值分别为 $2.1 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.1 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 均超过我国 GB 3095-2012 Cr(VI) 的参考浓度限值, 分别是我国 GB 3095-2012 Cr(VI) 参考浓度限值的 84.4 倍和 45.6 倍, 表明天津和青岛 Cr(VI) 的污染严重; 另外 As 是最危险的致癌元素之一, 在天津和青岛的浓度分别为 $10.3 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $10.8 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 均高于 WHO 给出的指导值.

2.2 富集因子分析

天津和青岛采样期间 PM_{2.5} 中各元素的富集因子(EF) 计算结果见图 3. 从中可知, 天津和青岛 PM_{2.5} 中 V、K、Fe、Mg、Ca、Na 和 Ba 在天津和青岛 EF 值在 1~10 之间, 为轻度富集水平, 说明这些元素主要受地壳等自然源的影响. Mn、Ni 和 Cr 元素

在天津和青岛 EF 值均在 10~100 之间, 为中度富集水平, 表明这些元素主要来自包括地壳源和人为源在内的混合源, 且人为源是主要的污染源. Se、Cd、Zn、Pb、Mo、Cu 和 As 在天津 EF 值分别为 5 428.2、858.8、389.6、308.2、184.9、137.3 和 107.9, 在青岛 EF 值分别为 11 957.9、5 677.7、998.2、497.9、439.5、181.3 和 341.1, 均大于 100, 为高度富集甚至超富集水平, 说明这些元素受人为污染严重. Se 和 As 主要来源于燃煤源, Zn 和 Cd 是垃圾焚烧的特征元素, Zn 也可能来自冶金尘, 机动车轮胎磨损也会释放 Zn, Pb 主要来自机动车尾气, Cu 既有可能来自冶金尘也可能来自垃圾焚烧^[8,41,44]. 由此可以说明, 与冬季供暖有关的燃煤尘源、与冶金有关的工业尘源、与机动车排放相关的交通源对天津和青岛城区 PM_{2.5} 的污染造成比较严重的影响.

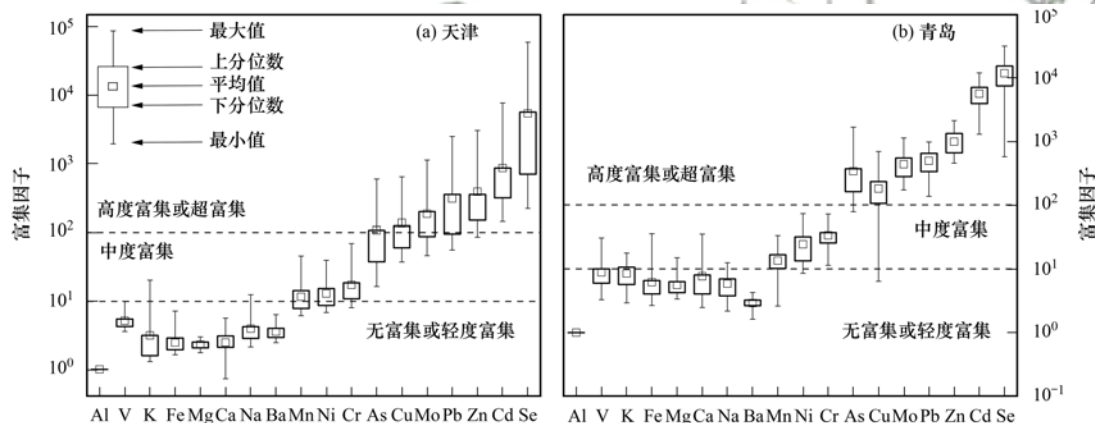


图 3 PM_{2.5} 中各元素富集因子

Fig. 3 Enrichment factors of each element in PM_{2.5}

2.3 潜在生态风险评估

PM_{2.5} 中含有大量具有毒性或持久毒性的有害重金属, 对人体的危害较大. 选取 V、Ni、Cr、Mo、As、Cu、Zn、Pb、Cd 和 Se 共 10 种有毒重金属元素进行潜在生态风险评价, 结果见表 5. 在天津重金属的潜在生态风险大小依次为: Cd > Mo > Se > Pb > As > Cu > Zn > Ni > Cr > V; 在青岛重金属的潜在生态风险大小依次为: Cd > Se > Mo > As > Pb > Zn > Cu > Ni > Cr > V. Cd、Se 和 Mo 在天津和青岛均表现为极高潜在生态风险(均大于 320), 其中 Cd 元素的潜在风险最大, 在天津和青岛的潜在生态风险指数值分别为 2 243 和 9 145, 对综合生态风险的贡献率分别为 67% 和 86%, 这与 Cd 的毒性系数和生物可吸收利用性相关, 使 Cd 在生态系统中更容易富集, 从而对生态系统造成较高的潜在风险^[38], 该结果与邯郸、东莞和厦门的研究结果类似^[45].

除此之外, As 在青岛的 E_r^i 值为 168, 表现为高

潜在风险, 而在天津 E_r^i 值为 93, 为较高潜在风险; Pb 在天津和青岛的 E_r^i 值在 80~160 之间, 均表现为较高潜在风险; 除 Pb 和 As 外, Cu 在天津 E_r^i 值为 88, 也表现为较高潜在风险; Zn 和 Cu 在青岛的 E_r^i 值在 40~80 之间, 为中等潜在风险; V、Cr、Ni 和 Zn(天津)的 E_r^i 值均小于 40, 为低潜在风险, 引起的环境风险较小, 贡献可以忽略. 天津和青岛的综合生态风险 RI 值分别为 3 492 和 10 612, 均远大于 1 200, 表明存在极强的潜在生态风险, 说明天津和青岛重金属的综合生态风险非常高, 应当引起重视.

2.4 人类健康风险评价

本节介绍了 2018~2019 年冬季天津和青岛两个城市儿童和成人通过手口摄入、呼吸吸入和皮肤接触这 3 种暴露途径接触空气中的 PM_{2.5} 而产生的非致癌和致癌健康风险的结果, 3 种暴露途径的综合非致癌风险(HI)和综合致癌风险(CRT)计算结果见图 4.

表 5 $PM_{2.5}$ 中重金属潜在生态风险指数

Table 5 Potential ecological risk index of heavy metals in $PM_{2.5}$

位置	项目	Cd	Se	Mo	Pb	As	Zn	Cu	V	Cr	Ni	RI 值
天津	E_r^i	2343	367	412	136	93	39	88	2	5	9	3492
	污染级别	极高	极高	极高	较高	较高	低	较高	低	低	低	极高
青岛	E_r^i	9145	648	403	133	168	53	51	1	3	6	10612
	污染级别	极高	极高	极高	较高	高	中等	中等	低	低	低	极高

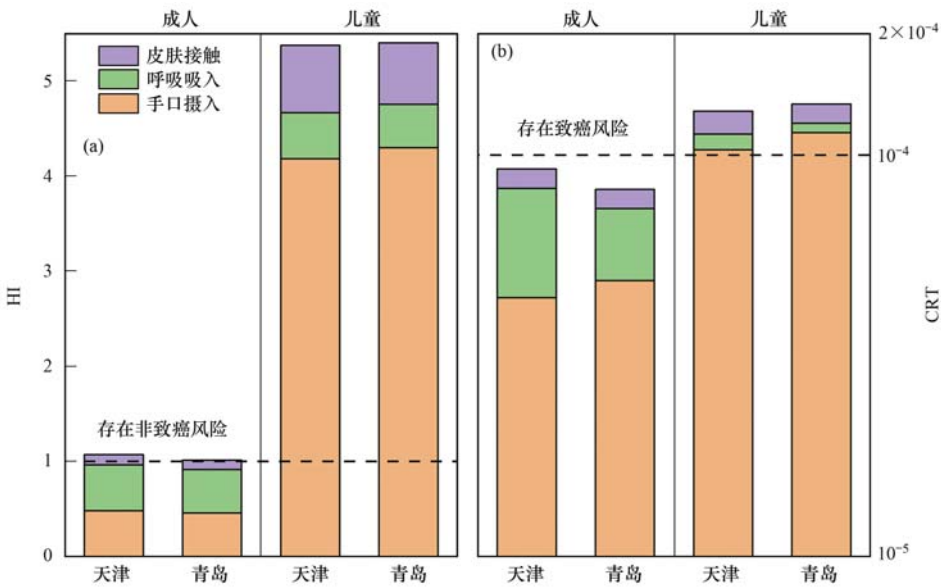


图 4 多元素综合非致癌风险 (HI) 和综合致癌风险 (CRT)

Fig. 4 Multi-element combined non-carcinogenic risk and combined carcinogenic risk

天津和青岛儿童的 HI 值分别为 5.38 和 5.40, 成人的 HI 值分别为 1.04 和 1.02, 成人和儿童 HI 值均高于可接受水平 ($HI = 1$), 均存在明显的非致癌风险; 天津和青岛儿童 CRT 值分别为 1.28×10^{-4} 和 1.34×10^{-4} (均大于 10^{-4}), 而成人 CRT 值均在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间, 说明重金属对天津和青岛的儿童存在着显著的致癌风险, 而对成人存在潜在的致癌风险. 在天津和青岛重金属对儿童的非致癌风险和致癌风险均明显高于成人, 说明长期暴露在这样的环境中对儿童健康的危害更大.

重金属通过 3 种暴露途径对成人造成的非致癌和致癌风险大小依次为: 手口摄入 > 呼吸吸入 > 皮肤接触, 儿童为: 手口摄入 > 皮肤接触 > 呼吸吸入. 天津和青岛成人经手口摄入的非致癌风险占综合非致癌风险的 47% 和 45%, 儿童的占 78% 和 80%; 成人经手口摄入的致癌风险占综合致癌风险的 48% 和 59%; 儿童的占 80% 和 85%, 说明手口摄入是造成儿童和成人非致癌和致癌风险的主要途径, 这与西安和日本北九州的研究结果一致^[14,46]. 手口摄入和皮肤接触对儿童造成的非致癌风险和致癌风险明显高于成人, 可能与儿童经常通过手口接触, 身体未完全发育成熟, 对 $PM_{2.5}$ 中的重金属更加敏感有

关^[47]. 此外, 由于儿童异食癖和爬行行为, 儿童预计会有更高的摄入量, 因此, 儿童通过手口摄入的实际风险可能高于成人^[6]. 而呼吸暴露则表现为成人的非致癌和致癌风险明显高于儿童. 呼吸暴露在成人非致癌风险中的贡献率分别为 46% 和 45%, 而在儿童中贡献率仅为 9% 和 8%, 主要是由于成人和儿童暴露时长的差异, 使空气中的有毒颗粒物在肺部的积累程度不同^[29].

单元素的非致癌和致癌风险结果如图 5. As 和 Pb 元素的 HQ 值最大, 天津和青岛的 As 元素在儿童中的 HQ 值分别为 2.42 和 2.77, Pb 在儿童中的 HQ 值分别为 1.26 和 1.14, 天津和青岛的 As 和 Pb 元素对儿童的非致癌风险均大于 1, 说明 As 和 Pb 元素在儿童中具有明显的非致癌风险. 其他元素在成人和儿童的 HQ 值均在可接受水平内, 均无非致癌风险. 单元素的综合致癌风险顺序为: As > Cr > Pb, As 在天津和青岛儿童中的 CR 值分别为 1.03×10^{-4} 和 1.18×10^{-4} , 说明 As 在儿童中存在致癌风险; Cr 和 Pb 这两种元素在儿童和成人中的 CR 值均在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间, 表现均存在潜在的致癌风险; Ni 和 Cd 只计算了呼吸途径的致癌风险, 儿童和成人 CR 值均小于 10^{-6} , 在可接受水平内.

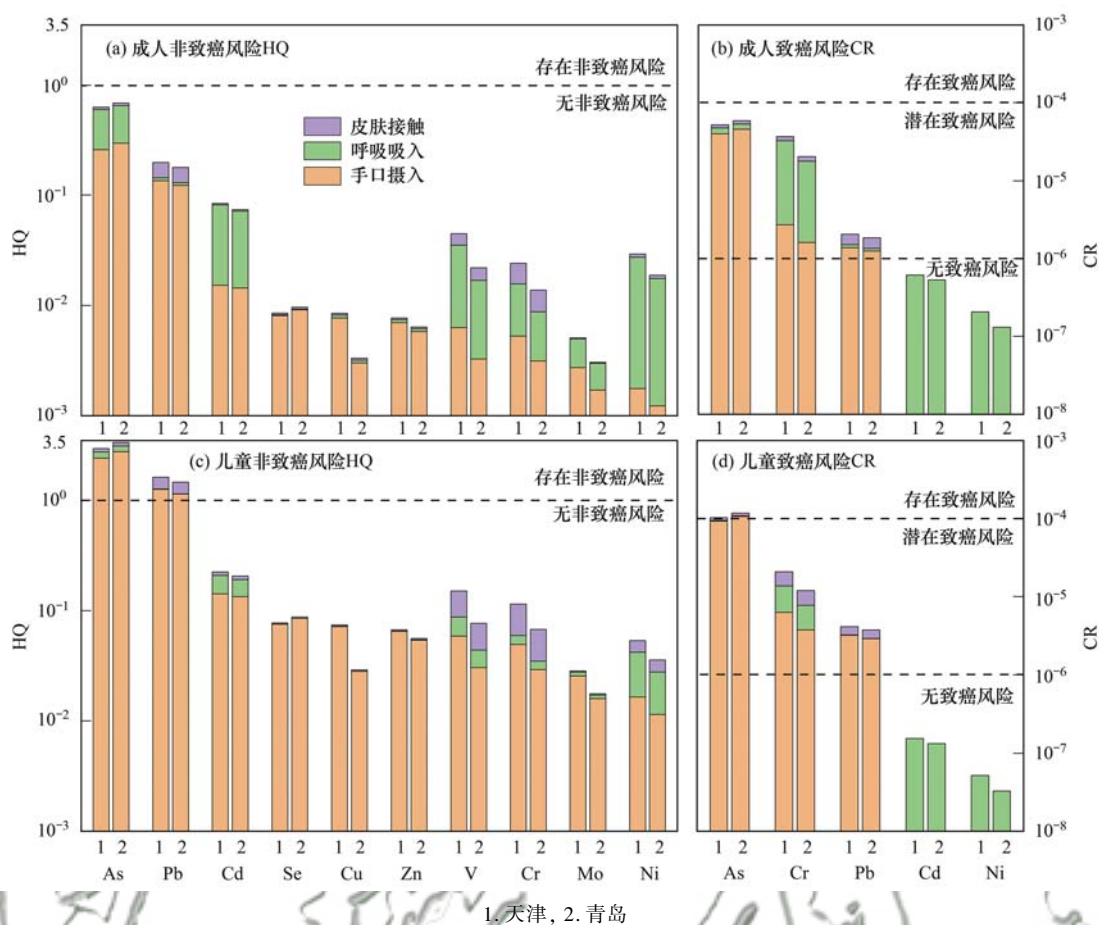


图5 特定元素的非致癌风险(HQ)和致癌风险(CR)

Fig. 5 Non-carcinogenic and carcinogenic risks of specific elements

3 结论

(1) 天津和青岛 2018 年冬季采样期间 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值分别为 $(93.6 \pm 53.5) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(85.5 \pm 60.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别为我国二级标准日均限值 ($75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 的 1.2 倍和 1.1 倍, 世界卫生组织标准值 ($25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 的 3.7 倍和 3.4 倍. 天津和青岛的 18 种金属累计浓度分别为 $5.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $3.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别占 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的质量分数为 5.8% 和 3.6%, 其中地壳元素 (Na、Mg、Al、K、Ca 和 Fe) 的浓度在天津和青岛分别为 $4.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $2.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别占 18 种元素总量的质量分数为 89.5% 和 87.1%, 表明地壳元素是无机元素中的主导元素; 微量元素均为 $\rho(\text{Zn})$ 最高, 在天津和青岛分别为 $277.3 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $211.1 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别占微量元素总量的质量分数为 48.7% 和 58.1%.

(2) 富集结果表明, 天津和青岛 $\text{PM}_{2.5}$ 中 Se、Cd、Zn、Pb、Mo、Cu 和 As 元素的 EF 值均大于 100, 为高度富集甚至超富集水平, 说明这些元素受人为污染严重; Mn、Ni 和 Cr 元素在天津和青岛的 EF 值均在 10 ~ 100 之间, 为中度富集水平, 表明这

些元素主要来自包括地壳源和人为源在内的混合源, 且人为源是主要的污染源; V、K、Fe、Mg、Ca、Na 和 Ba 在天津和青岛 EF 值在 1 ~ 10 之间, 为轻度富集水平, 说明这些元素主要受地壳等自然源的影响.

(3) Cd、Se 和 Mo 在天津和青岛均表现为极高潜在生态风险 (均大于 320), 其中 Cd 元素的潜在风险最大, 在天津和青岛的潜在生态风险指数值分别为 2 243 和 9 145, 对综合生态风险的贡献率分别为 67% 和 86%. 天津和青岛的综合生态风险 RI 值分别为 3 492 和 10 612, 均远大于 1200, 表明存在极强的潜在生态风险.

(4) 手口摄入是引起非致癌风险和致癌风险的主要途径; 天津和青岛儿童的 HI 值分别为 5.38 和 5.40, 成人的 HI 值分别为 1.04 和 1.02, 成人和儿童 HI 值均高于可接受水平 ($\text{HI} = 1$), 在天津和青岛均存在明显的非致癌风险; 天津和青岛儿童 CRT 值分别为 1.28×10^{-4} 和 1.34×10^{-4} (大于 10^{-4}), 而成人 CRT 值均在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间, 说明对儿童存在着显著的致癌风险, 而对成人存在潜在的致癌风险. As 在天津和青岛儿童中 HQ 值分别为 2.42 和

2.77,且对儿童的CR值分别为 1.03×10^{-4} 和 1.18×10^{-4} ,说明As在儿童中既存在非致癌风险又存在致癌风险,除As外,Pb在儿童中也具有一定的非致癌风险;不同人群对比发现,儿童的非致癌风险和致癌风险均明显高于成人。

参考文献:

- [1] Soleimani M, Amini N, Sadeghian B, *et al.* Heavy metals and their source identification in particulate matter ($PM_{2.5}$) in Isfahan City, Iran [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **72**: 166-175.
- [2] 尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 等. 2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1011-1023.
- Yin X M, Li Z M, Xiong Y J, *et al.* Contribution assessment of meteorology conditions and emission change for air quality improvement in Beijing during 2014-2017 [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1011-1023.
- [3] 张子睿, 刘哲, 戴璐泓, 等. 2017年厦门金砖会晤期间气象因素与管控措施对空气质量的影响[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(11): 4464-4471.
- Zhang Z R, Liu Z, Dai L H, *et al.* The influence of meteorological factors and control measures on air quality during the 2017 Xiamen BRICS summit [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(11): 4464-4471.
- [4] Zhang Y, Shuai C Y, Bian J, *et al.* Socioeconomic factors of $PM_{2.5}$ concentrations in 152 Chinese cities: decomposition analysis using LMDI [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **218**: 96-107.
- [5] Li Y, Liao Q, Zhao X G, *et al.* Premature mortality attributable to $PM_{2.5}$ pollution in China during 2008-2016: underlying causes and responses to emission reductions [J]. *Chemosphere*, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127925.
- [6] Nirmalkar J, Haswani D, Singh A, *et al.* Concentrations, transport characteristics, and health risks of $PM_{2.5}$ -bound trace elements over a national park in central India [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **293**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112904.
- [7] 雷文凯, 李杏茹, 张兰, 等. 保定地区 $PM_{2.5}$ 中重金属元素的污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 38-44.
- Lei W K, Li X R, Zhang L, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in $PM_{2.5}$ collected in Baoding [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 38-44.
- [8] 杨怀金, 杨德容, 叶芝祥, 等. 成都西南郊区春季 $PM_{2.5}$ 中元素特征及重金属潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4490-4503.
- Yang H J, Yang D R, Ye Z X, *et al.* Characteristics of elements and potential ecological risk assessment of heavy metals in $PM_{2.5}$ at the southwest suburb of Chengdu in spring [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4490-4503.
- [9] 段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 等. 开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2972-2980.
- Duan H J, Cai X Q, Ruan X L, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and its health risk of surface dusts from parks of Kaifeng, China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2972-2980.
- [10] 张丹龙, 方风满, 姚有如, 等. 淮南市不同功能区叶面尘和地表灰尘中重金属分布特征、来源及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(9): 3322-3332.
- Zhang D L, Fang F M, Yao Y R, *et al.* Distribution, sources and health risk assessment of heavy metals in foliar and surface dust of different functional areas of Huainan city [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(9): 3322-3332.
- [11] Li H H, Chen L J, Yu L, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of human exposure to oral bioaccessibility of heavy metals via urban street dusts from different functional areas in Chengdu, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **586**: 1076-1084.
- [12] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, *et al.* Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(4): 726-733.
- [13] Li X, Yan C Q, Wang C Y, *et al.* $PM_{2.5}$ -bound elements in Hebei Province, China: pollution levels, source apportionment and health risks [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150440.
- [14] Zhang X, Eto Y, Aikawa M. Risk assessment and management of $PM_{2.5}$ -bound heavy metals in the urban area of Kitakyushu, Japan [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **795**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148748.
- [15] 董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 等. 扬州市 $PM_{2.5}$ 中重金属来源及潜在健康风险评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 540-547.
- Dong S H, Xie Y, Huangfu Y Q, *et al.* Source apportionment and health risk quantification of heavy metals in $PM_{2.5}$ in Yangzhou, China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 540-547.
- [16] 胡子梅, 王军, 陶征楷, 等. 上海市 $PM_{2.5}$ 重金属污染水平与健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(12): 3399-3406.
- Hu Z M, Wang J, Tao Z K, *et al.* Pollution level and health risk assessment of heavy metals in $PM_{2.5}$, Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(12): 3399-3406.
- [17] 齐剑英, 张海龙, 方建德, 等. 垃圾焚烧设施周边环境空气重金属分布特征及呼吸暴露风险[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(S1): 113-118.
- Qi J Y, Zhang H L, Fang J D, *et al.* Characterization of airborne particulate metals in the surroundings of a municipal solid waste incinerator (MSWI) in the Nanshan Shenzhen and health risk assessment via inhalation exposure [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(S1): 113-118.
- [18] 姚青, 韩素芹, 蔡子颖. 天津采暖期大气 $PM_{2.5}$ 中重金属元素污染及其生态风险评价[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(9): 1596-1600.
- Yao Q, Han S Q, Cai Z Y. The pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in $PM_{2.5}$ during heating season in Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(9): 1596-1600.
- [19] Joseph T, Dubey B, McBean E A. Human health risk assessment from arsenic exposures in Bangladesh [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **527-528**: 552-560.
- [20] Gwenzi W, Mangori L, Danha C, *et al.* Sources, behaviour, and environmental and human health risks of high-technology rare earth elements as emerging contaminants [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.235.
- [21] 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 等. 北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4051-4059.
- Xiong Q L, Zhao W J, Li D J, *et al.* Enrichment levels and comprehensive pollution assessment of dust heavy metals in winter

- in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4051-4059.
- [22] Lee P K, Choi B Y, Kang M J. Assessment of mobility and bio-availability of heavy metals in dry depositions of Asian dust and implications for environmental risk [J]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 1411-1421.
- [23] 何瑞东, 张铁舜, 陈永阳, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4774-4782.
- He R D, Zhang Y S, Chen Y Y, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and ecological and health risk assessment of atmospheric PM_{2.5} in a living area of Zhengzhou city [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4774-4782.
- [24] 邢琼予, 戴启立, 毕晓辉, 等. 我国中西部典型城市 PM_{2.5} 中痕量金属的时空分布特征和健康影响 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(2): 574-582.
- Xing Q Y, Dai Q L, Bi X H, *et al.* Temporal-spatial variation and health effects of trace metals in PM_{2.5} in four central-western cities of China [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 574-582.
- [25] 李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 等. 华中地区冬季灰霾天气下 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4593-4601.
- Li X Y, Mao Y, Chen Z L, *et al.* Characteristics and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} under winter haze conditions in central China: a case study of Huanggang, Hubei Province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4593-4601.
- [26] 曲光辉, 孙俊幸, 王申博, 等. 郑州市大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 1706-1715.
- Qu G H, Sun J P, Wang S B, *et al.* Pollution characterization, source identification, and health risks of atmospheric particle-bound heavy metals in PM_{2.5} in Zhengzhou City: based on high-resolution data [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1706-1715.
- [27] van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, *et al.* Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2010, **118**(6): 847-855.
- [28] Betha R, Balasubramanian R. Emissions of particulate-bound elements from stationary diesel engine: characterization and risk assessment [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(30): 5273-5281.
- [29] Moryani H T, Kong S, Du J, *et al.* Health risk assessment of heavy metals accumulated on PM_{2.5} fractioned road dust from two cities of Pakistan [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**, doi: 10.3390/ijerph17197124.
- [30] 高世林, 杨莉, 董书舟, 等. 南京市 PM_{2.5} 时空分布特征和对居民健康的影响 [J]. *江苏科技信息*, 2017, (22): 73-75.
- Gao S L, Yang L, Dong S Z, *et al.* Spatial and temporal distribution of PM_{2.5} in Nanjing and its impact on residents' health [J]. *Jiangsu Science & Technology Information*, 2017, (22): 73-75.
- [31] 天津市生态环境局. 2017 天津市环境状况公报 [EB/OL]. http://sthj.tj.gov.cn/YWGWZ7406/HJZL9827/HJZKGB866/TJSLNHJZKGB6653/202108/t0210830_5567848.html, 2022-07-05.
- [32] 青岛市生态环境局. 2017 年青岛市环境状况公报 [EB/OL]. <http://mbee.qingdao.gov.cn:8082/m2/zwgk/view.aspx?n=4d8d0fc9-9b19-4a5c-bb96-7d174aeea3ce>, 2022-07-05.
- [33] Zhao X X, Zhao X J, Liu P F, *et al.* Pollution levels, composition characteristics and sources of atmospheric PM_{2.5} in a rural area of the North China Plain during winter [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **95**: 172-182.
- [34] HJ 657-2013, 空气和废气 颗粒物中铅等金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法 [S].
- [35] 庞绪贵, 代杰瑞, 喻超, 等. 山东省 17 市土壤地球化学基准值 [J]. *山东国土资源*, 2019, **35**(1): 36-45.
- Pang X G, Dai J R, Yu C, *et al.* Soil geochemical reference value of 17 cities in Shandong Province [J]. *Shandong Land and Resources*, 2019, **35**(1): 36-45.
- [36] 成杭新, 李括, 李敏, 等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值 [J]. *地学前缘*, 2014, **21**(3): 265-306.
- Cheng H X, Li K, Li M, *et al.* Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, **21**(3): 265-306.
- [37] Chen H B, Chen Z B, Chen Z Q, *et al.* Calculation of toxicity coefficient of potential ecological risk assessment of rare earth elements [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020, **104**(5): 582-587.
- [38] 武振晓, 闫珊珊, 薛凡利, 等. 邯郸市冬季大气 PM_{2.5} 中金属元素空间污染特征及生态风险评价 [J]. *中国环境监测*, 2021, **37**(1): 76-86.
- Wu Z X, Yan S S, Xue F L, *et al.* Spatial pollution characteristics and ecological risk assessment of metal elements in PM_{2.5} in winter in Handan City [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(1): 76-86.
- [39] Zhi M K, Zhang X, Zhang K, *et al.* The characteristics of atmospheric particles and metal elements during winter in Beijing: size distribution, source analysis, and environmental risk assessment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **211**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.111937.
- [40] Behrooz R D, Kaskaoutis D G, Grivas G, *et al.* Human health risk assessment for toxic elements in the extreme ambient dust conditions observed in Sistan, Iran [J]. *Chemosphere*, 2021, **262**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127835.
- [41] 肖思晗, 蔡美君, 李香, 等. 厦门港大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3404-3415.
- Xiao S H, Cai M J, Li X, *et al.* Characterization and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} in Xiamen port [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3404-3415.
- [42] Xie J W, Jin L, Cui J L, *et al.* Health risk-oriented source apportionment of PM_{2.5}-associated trace metals [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114655.
- [43] 任万辉, 李云丹, 苏枫枫, 等. 沈阳市大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征、来源解析及健康风险评价 [J]. *环境化学*, 2021, **40**(4): 1029-1037.
- Ren W H, Li Y D, Su C C, *et al.* Pollution characteristics, source apportionment and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} in Shenyang [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(4): 1029-1037.
- [44] 姚森, 王乾恒, 薛妍, 等. 郑州市冬季大气 PM_{2.5} 金属元素来源及健康风险评价 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2329-2335.
- Yao S, Wang Q H, Xue Y, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of metal elements in ambient PM_{2.5} in the winter of Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2329-2335.
- [45] 温先华, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 大气颗粒物中重金属生态风

- 险评价与源解析[J]. 广东微量元素科学, 2014, 21(7): 11-19.
- Wen X H, Hu G R, Yu R L, *et al.* Ecological risk and source analysis of heavy metals in total suspended particulates [J]. Guangdong Trace Elements Science, 2014, 21(7): 11-19.
- [46] 袁宏林, 杨梦妮, 张颖, 等. 西安市冬季大气颗粒物中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境工程, 2019, 37(1): 176-181.
- Yuan H L, Yang M N, Zhang Y, *et al.* Assessment of pollution characteristics and health risks of heavy metals in winter atmospheric particulate matters in Xi'an [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(1): 176-181.
- [47] Özkaynak H, Glen G, Cohen J, *et al.* Model based prediction of age-specific soil and dust ingestion rates for children[J]. Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 2022, 32(3): 472-480.

欢迎订阅 2023 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA); Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA); Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS); Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i>	(5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning	(5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i>	(5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i>	(5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i>	(5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu	(5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i>	(5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i>	(5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i>	(5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i>	(5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i>	(5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i>	(5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i>	(5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i>	(5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i>	(5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i>	(5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i>	(5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i>	(5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i>	(5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i>	(5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i>	(5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i>	(5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i>	(5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i>	(5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i>	(5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i>	(5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i>	(5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i>	(5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i>	(5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i>	(5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qi, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i>	(5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i>	(5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i>	(5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i>	(5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i>	(5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i>	(5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i>	(5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i>	(5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i>	(5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i>	(5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i>	(5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i>	(5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i>	(5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i>	(5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i>	(5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin	(5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao	(5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i>	(5861)