

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 化学组成与来源的演变特征	陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 PM _{2.5} 组分差异	王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)
天津市采暖季不同气团来向 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析	邓文博, 刘文娟 (38)
北京市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染数值响应解析	刘添强 (48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单	田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征	王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性	吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 栗少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例	何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)
华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征	康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式中的应用	杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响	魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征	魏文淑, 祁建华, 常成 (127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子	黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征	徐秋鸿, 刘曙光, 姜厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性	秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估	何姝, 董慧岭, 任南琪 (180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价	王思瑞, 张坤峰, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险	郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素	吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例	黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)
渭河微塑料污染现状与风险评价	山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响	王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)
苦草叶表附和和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素	张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性	璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价	姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制	罗晓佼, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芸, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林 (303)
基于地理探测器的山西省 2000 ~ 2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析	邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究	徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性	胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)
四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素	刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析	陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪锦炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价	彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系	凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征	王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素	王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价	陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估	黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力	王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系	朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓妍, 韩新辉 (444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素	方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)
优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益	王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响	侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能	南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应	管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征	赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力	张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析	于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析	李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为	李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)
中国县城碳排放时空演变与异质性	宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移	向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)
中国 1991 ~ 2018 年突发环境事件时空特征及影响因素	余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应	张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)

天津市采暖季不同气团来向 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价

李立伟¹, 邓小文¹, 肖致美¹, 元洁¹, 杨宁^{1*}, 郭小龙^{2*}, 白宇¹

(1. 天津市生态环境监测中心, 天津 300191; 2. 天津滨海高新技术产业开发区城市管理和生态环境局, 天津 300450)

摘要: 为了解天津市采暖季 PM_{2.5} 中重金属的污染特征及健康风险, 使用 Xact-625 重金属在线分析仪于 2020 年 11 月至 2021 年 3 月对 PM_{2.5} 中的重金属元素进行连续采样, 分析 10 种重金属元素 (Pb、Cd、Cr、As、Zn、Mn、Co、Ni、Cu 和 V) 的污染特征, 利用 HYSPLIT 模型分析重金属元素的时空分布特征, 并结合美国 EPA 健康风险评价模型对重金属健康风险展开研究. 结果表明, 采样期间天津市 10 种重金属元素的总浓度平均值为 (261.56 ± 241.74) ng·m⁻³, Cr [折算 Cr(VI)] 和 As 元素高于《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 的年平均限值. 后向轨迹分析表明, 天津市主要受到来自西北部中距离气团 (1 号)、西北部长距离气团 (2 号)、西南部气团 (3 号) 和东北部气团 (4 号) 的影响. 不同气团来向重金属元素呈现不同的污染特征和健康风险, 3 号气团 PM_{2.5} 浓度、10 种重金属元素总浓度和 5 种重金属元素经呼吸途径暴露的终身致癌风险值之和均最高, 2 号气团 10 种重金属元素经呼吸途径暴露的非致癌风险值之和最高. 健康风险评价显示, Mn 元素对儿童存在一定的非致癌风险, Cr 和 As 元素对人体存在一定的致癌风险, 3 号气团的 Cd 元素亦存在一定的致癌风险.

关键词: PM_{2.5}; 采暖季; 重金属; 健康风险; 后向轨迹

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0030-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202204001

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM_{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin

LI Li-wei¹, DENG Xiao-wen¹, XIAO Zhi-mei¹, YUAN Jie¹, YANG Ning^{1*}, GUO Xiao-long^{2*}, BAI Yu¹

(1. Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300191, China; 2. Urban Management and Eco-Environment Bureau, Tianjin Binhai High-tech Area, Tianjin 300450, China)

Abstract: In order to explore the pollution characteristics and health risks of heavy metals in PM_{2.5} in Tianjin, heavy metal samples (Pb, Cd, Cr, As, Zn, Mn, Co, Ni, Cu, and V) in PM_{2.5} were analyzed from November 2020 to March 2021 using the Xact-625 heavy metal online analyzer. The spatial and temporal distribution characteristics were analyzed using the HYSPLIT model, and the health risks of heavy metals were analyzed using the US EPA risk assessment model. The results indicated that the average total concentration of the 10 heavy metal elements was (261.56 ± 241.74) ng·m⁻³, among which the concentrations of Cr [converted Cr(VI)] and As were higher than the annual average limit of the National Ambient Air Quality Standard (GB 3095-2012). According to the back trajectory results, the medium-distance transmissions from northwest areas (NO. 1), the long-distance transmissions from northwest areas (NO. 2), the transmissions from southwest areas (NO. 3), and the transmissions from northeast areas (NO. 4) were the major sources in Tianjin City. The heavy metals of different air masses presented different pollution characteristics and health risks; the concentration of PM_{2.5}, the total concentration of the 10 heavy metal elements, and the total carcinogenic risk of the five heavy metal elements of the NO. 3 air mass were the highest, whereas the total non-carcinogenic risk of the 10 heavy metal elements of the NO. 2 air mass was higher than that of the other two air mass. The health risk assessment showed that Mn posed non-carcinogenic risks to children, and Cr and As presented carcinogenic risk. Meanwhile, Cd of the NO. 3 air masses also presented carcinogenic risk.

Key words: PM_{2.5}; heating season; heavy metals; health risk; back trajectory

PM_{2.5} 是造成我国区域性污染的主要污染物之一, 因其对人体健康、大气能见度和辐射平衡具有重要影响而引起社会的广泛关注^[1~5]. 金属元素是 PM_{2.5} 中的重要组分 (占比一般为 1%~20%), 其中重金属元素 (如 Pb、As、Hg、Cd 和 Cr 等) 具有难降解、毒性大和易富集等特点, 其能够通过呼吸作用随 PM_{2.5} 直接进入人体的肺泡中并在人体内大量富集^[6,7]. 世界卫生组织国际癌症研究中心 (International Agency for Research on Cancer, IARC) 按毒性对重金属元素进行了分类, 其中确定致癌的重金属元素为 Ni、As、Co、Cd 和 Cr(VI) 等^[8]. 因此, 研究城市大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征和健康风险评价对改善生态环境和保护人类健康具有重要

的现实意义.

近年来, 城市大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征、来源和健康风险评价得到了较多研究^[9~23]. 如任万辉等^[11] 研究发现, 手-口途径摄入是沈阳大气 PM_{2.5} 中痕量重金属元素引发非致癌风险的主要途径, Pb 和 As 元素存在非致癌风险, Cr 元素对儿童存在致癌风险. 王鑫等^[13] 研究发现, 西安市冬季重污染期

收稿日期: 2022-04-01; 修订日期: 2022-04-19

基金项目: 天津市科技计划项目 (21YFNSN00200); 国家自然科学基金项目 (42177465); 天津市细颗粒物 and 臭氧污染协同防控综合解决方案研究项目 (DQGG202102); 中国工程院院地合作项目 (2020C0-0002)

作者简介: 李立伟 (1990~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气污染与环境健康, E-mail: llwabc2010@163.com

* 通信作者, E-mail: temc_air@126.com; xiaolongguo@163.com

间,Mn 元素具有较大的非致癌风险,Cr、As 和 Co 元素具有潜在致癌风险.刘建伟等^[19]研究发现,随着年龄的增长,PM_{2.5}载带重金属元素的致癌风险增加,且同一年龄人群中,女性致癌及非致癌风险均稍低于男性.以上研究主要通过手工采样和实验室分析方式得到 PM_{2.5} 中重金属元素的监测数据,较少通过在线监测的方式进行研究,且尚无对不同气团来向 PM_{2.5} 中重金属污染特征和健康风险的研究.

天津是京津冀区域核心城市之一,位于京津冀区域的中北部,是环渤海地区的经济中心,是京津冀区域典型工业城市,PM_{2.5} 污染较重^[24].同时,由于取暖导致更多的污染排放,冬季较其他季节具有更严重的污染.选取天津市为研究城市开展分析,对进一步了解我国北方城市采暖季重金属污染特征和健康风险程度具有重要意义.本研究通过对 2020 年 11 月至 2021 年 3 月大气 PM_{2.5} 中重金属元素进行在线监测,分析了采暖季大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征,利用后向轨迹模型分析重金属元素的时空分布特征,并结合健康风险评价模型估算不同气团来向重金属的健康风险,以期为天津市大气重金属污染防治提供依据.

1 材料与方法

1.1 观测场地

观测场地位于天津市南开区天津市生态环境监测中心 4 楼楼顶,距地面约 15 m,为天津市生态环境监测中心超级站.采样点周边为居住区和学校,北面 300 m 左右为主要交通线复兴路,监测时间为 2020 年 11 月 1 日至 2021 年 3 月 31 日.监测点位分布见图 1.

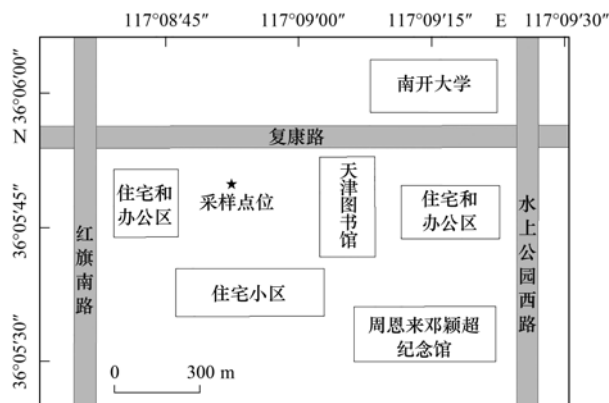


图 1 观测点位示意

Fig. 1 Location of the sampling site

1.2 采样及分析方法

PM_{2.5} 浓度采用美国 Thermo 公司 TEOM 1405F 监测,质量控制严格按照《环境空气颗粒物(PM₁₀和 PM_{2.5})连续自动监测系统运行和质控技术规范》

(HJ 817-2018)^[25]要求进行.

重金属在线分析仪采用河北先河环保科技股份有限公司的 Xact-625,滤纸为特氟龙(poly tetra fluoroethylene,PTFE)材质,并通过 X 射线荧光光谱(X-ray fluorescence,XRF)技术对沉积在纸带滤膜上的颗粒物进行无损分析.所含元素种类可以由测出的特征 X 射线与已知的各元素特征 X 射线能量值相对照识别.元素绝对含量可由式(1)计算得出:

$$\omega = N_i A / [n_0 \delta_i \varepsilon_i T N_0 \Omega / (4\pi)] \quad (1)$$

式中, N_i 为所测元素的一个特征峰计数(扣除本底后的峰面积), A 为该元素的原子量, n_0 为入射粒子数, δ_i 为特征 X 射线产生截面, i 为 KX 射线或 LX 射线, ε_i 为探测该特征峰处的效率, T 为该特征 X 射线在样品中的透射率, N_0 为阿伏伽德罗常数, Ω 为探测器对样品所张的立体角.

为确保实验结果的准确,在仪器正常运行前进行气密性测试、流量校准、空白滤纸带测试、金属探棒测试和标准膜片校准.颗粒物粒径切割器对通过的大气进行采样并抽取到滤纸带上,采集的样品自动前进至检测位置,由 XRF 对选定的重金属元素进行分析.测量的同时,下一个样品的采集也同步进行,滤纸带前进(约 20 s)和日常自动质量检查时除外.重金属元素检测范围为 0 ~ 100 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,检测限接近 $\text{pg} \cdot \text{m}^{-3}$,最终得到 26 种重金属元素逐小时变化数据.本研究中主要选取 Pb、Cd、Cr、As、Zn、Mn、Co、Ni、Cu 和 V 等 10 种重金属元素进行分析.

气象参数(大气压、温度、相对湿度、风向和风速)采用 Vaisala WXT520 自动气象仪监测,边界层高度采用 Vaisala-CL31 云高仪监测.

1.3 研究方法

1.3.1 后向轨迹

气团的后向轨迹采用拉格朗日混合单粒子轨迹(hybrid single particle lagrangian integrated trajectory, HYSPLIT)模型^[26]绘制,该模型是美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmosphere Administration,NOAA)和澳大利亚气象局(Bureau of Meteorology Australia,BoM)在过去 20 年间联合研发的一种用于计算分析大气污染物输送和扩散轨迹的模型,具有处理多种气象要素输入场、多种物理过程 and 不同类型污染物排放源功能的较完整的输送、扩散和沉降模型,已被广泛应用于研究大气污染物的输送、扩散和沉降^[27].HYSPLIT 模型也被用于不同气团来向 PM_{2.5} 浓度^[28]、组分特征、来源^[29]和 VOCs 时空分布^[30]的研究中,且取得了较好效果.

本研究中,用于轨迹计算的气象场资料为

NOAA 的全球同化系统(global data assimilation system, GDAS)数据,空间分辨率为 1°,数据资料获取网址为 <ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/archives/gdas1>. 模拟高度为 500m,开始时间为每日 00:00 (UTC 时间为前日 16:00),后推 36 h,轨迹间隔 2 h.

1.3.2 重金属健康风险评价

采用美国环保署(Environmental Protection Agency, EPA)开发的健康风险评价模型对 PM_{2.5} 中的重金属经呼吸途径对儿童及成人产生的致癌与非致癌暴露风险展开评估,Cr、Cd、Co、Ni 和 As 具有致癌与非致癌风险,V、Pb、Zn、Cu 和 Mn 仅具有非

致癌风险. 暴露剂量 ADD_{inh} [mg·(kg·d)⁻¹] 和 LADD_{inh} [mg·(kg·d)⁻¹] 计算公式如下^[31]:

$$ADD_{inh} = \frac{c \times InhR \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (2)$$

$$LADD_{inh} = c \times CF \times (EF/AT) \times (InhR_{child} \times ED_{child}/BW_{child} + InhR_{adult} \times ED_{adult}/BW_{adult}) \quad (3)$$

式中,ADD_{inh}为重金属元素经过呼吸途径的日平均暴露剂量,[mg·(kg·d)⁻¹]; LADD_{inh}为致癌重金属元素经呼吸途径的终身日平均暴露剂量,[mg·(kg·d)⁻¹]; c 为重金属元素的浓度,(ng·m⁻³); 其它参数的具体含义及数值见表 1^[7,32].

表 1 健康风险暴露参数含义及取值

Table 1 Meaning and value of health risk exposure parameters

参数	意义	单位	儿童	成人
EF	暴露频率	d·a ⁻¹	365	365
ED	暴露年份	a	6	30
AT	平均暴露时间	d	365 × ED (非致癌) 365 × 18 (致癌)	365 × ED (非致癌) 365 × 75 (致癌)
BW	平均体重	kg	15.9	56.8
CF	单位转换	无量纲	1 × 10 ⁻⁶	1 × 10 ⁻⁶
InhR	呼吸速率	m ³ ·d ⁻¹	8.6	15.4

非致癌重金属元素可根据其暴露剂量计算非致癌风险,公式为:

$$HQ = ADD/RfD \quad (4)$$

式中,RfD 为参考剂量,[mg·(kg·d)⁻¹]; HQ 为非致癌风险值. 当 HQ ≤ 1 时,表示该元素非致癌风险可忽略不计;当 HQ > 1 时则表示该元素存在非致癌风险^[33].

对于致癌重金属元素,其终身致癌风险 ILCR 的计算公式为:

$$ILCR = LADD \times SF \quad (5)$$

式中,ILCR 表示癌症发生的概率,可接受或可容忍的风险是 10⁻⁶ ~ 10⁻⁴ (每 1 × 10⁴ ~ 100 × 10⁴ 人增加 1 位癌症患者)^[31]. 当 ILCR < 10⁻⁶ 时,致癌风险可忽略;当 ILCR 在 10⁻⁶ ~ 10⁻⁴ 之间时,有一定的致癌风险;当 ILCR > 10⁻⁴ 时,存在较高的致癌风险^[34]. SF 为致癌斜率因子,[(kg·d)·mg⁻¹]. 各重金属元素的参考剂量和致癌重金属元素的致癌斜率因子见表 2.

2 结果与讨论

2.1 浓度水平及分布特征

2020 年采暖季,天津市 ρ(PM_{2.5}) 的平均值为 (59 ± 47) μg·m⁻³,Pb、Cd、Cr、As、Zn、Mn、Co、Ni、Cu 和 V 等 10 种重金属元素的总浓度平均值为 (261.56 ± 241.74) ng·m⁻³,占 PM_{2.5} 的 0.44%. 各元素的浓度相差较大,按照浓度高低排序为:Zn >

表 2 重金属元素的参考剂量及致癌斜率因子取值¹⁾

Table 2 Reference doses and slope factors of heavy metals

元素	RfD/mg·(kg·d) ⁻¹	SF/(kg·d)·mg ⁻¹
Pb	3.5 × 10 ⁻³	—
Cd	5.71 × 10 ⁻⁶	6.3
Cr	2.86 × 10 ⁻⁵	42
As	1.23 × 10 ⁻⁴	15.1
Zn	3 × 10 ⁻¹	—
Mn	1.43 × 10 ⁻⁵	—
Co	3 × 10 ⁻³	9.8
Ni	2 × 10 ⁻²	0.84
Cu	4 × 10 ⁻²	—
V	7 × 10 ⁻³	—

1) “—”表示无数据

Mn > Pb > Cu > As > Cr > Ni > V > Cd > Co. 其中 ρ(Zn) 的平均值最高,达到 169.08 ng·m⁻³,占 10 种重金属元素总浓度的 64.6%. Zn 元素主要源于机动车尾气排放^[35],观测点位处于居住、文教区,机动车尾气排放可能是导致观测期间 Zn 元素含量高的原因. ρ(Pb)、ρ(Cd)、ρ(Cr) 和 ρ(As) 的平均值分别为 27.06、0.55、3.31 和 6.96 ng·m⁻³,其中,ρ(Pb) 和 ρ(Cd) 低于《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)^[36] 中 500 ng·m⁻³ 和 5 ng·m⁻³ 的限值,ρ(As) 高于《环境空气质量标准》中 6 ng·m⁻³ 的限值. 由于《环境空气质量标准》中以 Cr(VI) 作为标准限值依据,本研究参考 Brown 等^[37] 的研究,选取 1/6 作为 Cr(VI) 转换系数进行计算,天津市采暖季 ρ[Cr(VI)] 的平均值为 0.55 ng·m⁻³,高于《环境空

气质量标准》中 0.025 ng·m⁻³ 的限值. Cr 和 As 元素作为致癌重金属元素,可能会对周边居民的呼吸系统产生一定危害.

与国内其他典型城市采暖季(或冬季)大气 PM_{2.5} 中重金属元素浓度的对比结果见表 3. 除 As 元素外,天津市 2020 年采暖季主要重金属元素的浓度

均明显低于 2011 年. 天津市 10 种重金属元素的总浓度在 13 个国内城市中处于较低水平,其中 Cd、Co 和 Ni 元素的浓度显著低于其他城市,而 Zn 和 Mn 元素与其他城市差别不明显. 天津市较低的重金属元素浓度可能与近年来持续推进的大气污染防治措施显效有关.

表 3 天津市与国内典型城市采暖季(或冬季)PM_{2.5} 中重金属元素浓度比较¹⁾/ng·m⁻³

城市	Pb	Cd	Cr	As	Zn	Mn	Co	Ni	Cu	V	采样日期(年-月-日)	分析方法	文献
天津	27.06	0.55	3.31	6.96	169.08	34.32	0.05	1.47	18.22	0.59	2020-11-01 ~ 2021-03-31	Xact-625	本研究
新乡	75.37	5.87	9.09	8.92	205.11	57.93	2.59	10	24.15	1.63	2019-12-17 ~ 2020-01-15	ICP-AES	[9]
沈阳	58.4	1	6.6	11.2	206.4	36.1	—	2.1	9.4	—	2019-01-01 ~ 2019-01-31	Xact-625	[11]
太原	60.57	1.2	17.1	10.72	164.94	68.01	0.85	18.4	26.19	9.29	2018-01	ICP-MS	[12]
贵阳	20	0.77	6.2	7.1	34	18	0.17	2.9	8.8	0.43	2017-10 ~ 2018-02(冬季)	ICP-MS	[32]
郑州	62.55	2.64	—	10.67	97.63	41.48	0.37	—	30.89	—	2016-12 ~ 2017-01	ICP-MS	[16]
北京	71	1.39	1.17	8.29	407	—	1.31	4.19	40.6	4.92	2016-01-14 ~ 2016-12-31(采暖季)	ICP-AES	[19]
保定	158.91	2.95	3.86	10.78	231.48	38.64	1.08	7.48	99.62	1.64	2015-12-16 ~ 2016-01-14	ICP-MS	[10]
衡阳	60.8	2.2	68	4.9	156.9	69.4	—	42.1	763.6	—	2015-12-26 ~ 2016-01-03	ICP-MS	[21]
石家庄	118	7.96	14.2	147	—	66.2	—	2.21	—	—	2015-01-01 ~ 2015-12-31(冬季)	ICP-MS	[17]
珠海	101.9	—	6.8	—	263	42.4	1.6	7.4	36.2	10.2	2014-12-24 ~ 2015-01-24	ED-XRF	[18]
武汉	240.2	5.58	8.97	43.14	365.77	126	—	5.95	30.55	—	2012-08 ~ 2013-07(冬季)	ICP-MS	[23]
天津	101	1	23	3	1144	130	5	—	68	—	2011-11-15 ~ 2011-12-13	ICP-AES	[38]
西安	595	9	161	207	1958	121	—	18	55	—	2008-12-02 ~ 2009-02-24	ICP-AE	[22]

1) “—”表示无数据

2.2 不同气团来向浓度水平

本研究利用 36 h 后向轨迹模拟分析实验观测期间 500 m 高度处气团运输轨迹,将气团传输轨迹通过聚类分析得到 4 组主要传输轨迹,如图 2. 观测期间,气团主要来自西北部(1 号和 2 号)、西南部(3 号)和东北部(4 号). 其中,34% 的气团(1 号)来自西北方向的蒙古国,经内蒙古、河北和北京进入天津,其传输距离和移动速度中等; 15% 的气团(2 号)来自西北方向的西伯利亚地区,经蒙古国、内蒙古、河北和北京进入天津,其传输距离最长且移动速度较快; 42% 的气团(3 号)来自西南方向的河南地区,经河北进入天津,其传输距离较短、移动速度

较慢,不利于污染扩散; 9% 的气团(4 号)来自北部方向的内蒙古地区,经吉林、辽宁和河北进入天津,其传输距离和移动速度中等.

不同气团来向 PM_{2.5} 和其中重金属元素的浓度如图 3 所示. 3 号气团的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的平均值最高,为 $(68 \pm 41) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,其次为 2 号气团 $[(55 \pm 65) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 、4 号气团 $[(55 \pm 43) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和 1 号气团 $[(51 \pm 42) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$. 不同于 PM_{2.5} 浓度,10 种重金属元素的总浓度平均值呈现 3 号气团 $[(299.04 \pm 242.90) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}] > 1$ 号气团 $[(252.71 \pm 252.66) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}] > 4$ 号气团 $[(213.14 \pm 186.98) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}] > 2$ 号气团

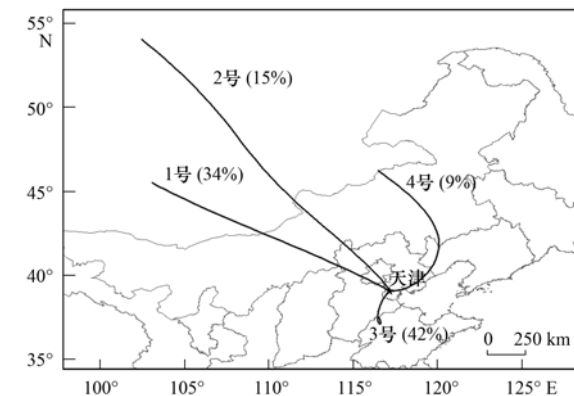


图 2 观测期间后向轨迹聚类分析(36 h,500 m)

Fig. 2 Cluster analysis of the backward trajectories during monitoring period (36 h, 500 m)

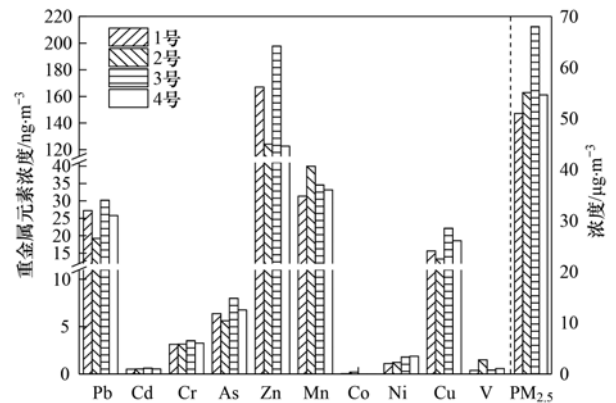


图 3 天津市采暖季不同气团来向重金属元素和 PM_{2.5} 浓度

Fig. 3 Concentration of heavy metals and PM_{2.5} of different air masses during heating season in Tianjin

[$(208.85 \pm 227.02) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$] 的变化趋势,其中,3号气团 Zn、Cu、Pb、As、Cr 和 Cd 等 6 种重金属元素的浓度最高,2 号气团 Mn、V 和 Co 元素的浓度最高,4 号气团 Ni 元素的浓度最高。

不同气团来向 $\text{PM}_{2.5}$ 和重金属污染特征的差异可能与其气象条件和气团途经区域污染来源不同有关(表 4)。3 号气团期间温度和湿度较高、风速和边界层高度较低,不利于污染物扩散^[39]且利于 SO_2 和 NO_x 等气态污染物的二次转化^[40],导致其具有较高的 $\text{PM}_{2.5}$ 和重金属元素总浓度。2 号气团期间风速较高、边界层高度较高,利于污染物扩散,重金属元素总浓度较低,但由于其经过沙源地,高风速带来的沙尘污染导致了较高的 $\text{PM}_{2.5}$;而 Mn 元素是自然源

的标志元素^[41],沙尘污染也带来了高浓度的 Mn 元素。1 号气团期间风速和边界层高度较低,不利于污染物扩散,但由于气团初始地空气质量较好, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低;1 号气团经过北京,机动车污染严重^[42],而 Zn 和 Pb 元素主要来自于机动车尾气排放^[35],高浓度的 Zn 和 Pb 元素导致 1 号气团重金属元素总浓度次高。4 号气团期间风速和边界层高度较高,利于污染物扩散,重金属元素总浓度较低,但由于其相对湿度较高,利于 SO_2 和 NO_x 等气态污染物的二次转化, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度略高;同时,由于 4 号气团途经河北唐山,该地区具有较多的冶金和电镀企业^[43],而 Ni 元素主要来自于冶金和电镀等工业污染^[44],因此,4 号气团 Ni 元素浓度最高。

表 4 天津市采暖季不同气团来向的气象条件

Table 4 Weather conditions of different air masses during heating season in Tianjin					
气团编号	大气压/hPa	气温/℃	相对湿度/%	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	边界层高度/m
1 号	1 026.4	2.5	38	1.5	535.1
2 号	1 023.7	2.4	33	1.8	651.6
3 号	1 024.9	5.7	51	1.3	518.6
4 号	1 021.9	6.3	53	1.7	641.1

2.3 不同气团来向健康风险评价

通过美国 EPA 健康风险评价模型计算得到天津市采暖季不同气团来向 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属经呼吸途径对儿童及成人的非致癌暴露风险值和终身致癌风险值(表 5 和图 4)。结果显示:Mn、Cr、As、Pb、Cd、Zn、Cu、V、Ni 和 Co 等 10 种重金属元素经呼吸途径对儿童及成人的非致癌暴露风险值之和表现为:2

号气团 > 3 号气团 > 4 号气团 > 1 号气团,而各类气团中重金属元素非致癌风险顺序为:Mn > Cr > As > Pb > Cd > Zn > Cu > V > Ni > Co;儿童 > 成人。除 Mn 元素外,其余元素 HQ 均小于 1,非致癌风险较小或可忽略,处于人体可接受范围内;Mn 元素对儿童存在一定的非致癌风险,Mn 元素主要来自交通污染,需加强对交通污染的控制。

表 5 天津市采暖季不同气团来向 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属元素经呼吸途径的非致癌风险值

Table 5 Non-carcinogenic risk values of heavy metals in $\text{PM}_{2.5}$ of different air masses during heating season in Tianjin										
元素	儿童					成人				
	1 号	2 号	3 号	4 号	采暖季	1 号	2 号	3 号	4 号	采暖季
Pb	4.2E-03	3.0E-03	4.7E-03	4.0E-03	4.2E-03	2.1E-03	1.5E-03	2.3E-03	2.0E-03	2.1E-03
Cd	9.0E-04	9.3E-04	1.1E-03	9.4E-04	1.0E-03	4.5E-04	4.7E-04	5.6E-04	4.7E-04	5.0E-04
Cr	5.9E-02	6.0E-02	6.7E-02	6.2E-02	6.3E-02	3.0E-02	3.0E-02	3.3E-02	3.1E-02	3.1E-02
As	2.8E-02	2.5E-02	3.5E-02	3.0E-02	3.1E-02	1.4E-02	1.2E-02	1.8E-02	1.5E-02	1.5E-02
Zn	3.0E-04	2.2E-04	3.6E-04	2.2E-04	3.0E-04	1.5E-04	1.1E-04	1.8E-04	1.1E-04	1.5E-04
Mn	1.2E+00	1.5E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.3E+00	5.9E-01	7.6E-01	6.6E-01	6.3E-01	6.5E-01
Co	5.3E-06	3.7E-05	1.8E-06	1.9E-06	8.6E-06	2.7E-06	1.9E-05	9.1E-07	9.7E-07	4.3E-06
Ni	3.0E-05	3.3E-05	4.8E-05	5.1E-05	4.0E-05	1.5E-05	1.6E-05	2.4E-05	2.5E-05	2.0E-05
Cu	2.1E-04	1.8E-04	3.0E-04	2.5E-04	2.5E-04	1.1E-04	9.0E-05	1.5E-04	1.3E-04	1.2E-04
V	2.8E-05	1.1E-04	3.2E-05	4.4E-05	4.5E-05	1.4E-05	5.7E-05	1.6E-05	2.2E-05	2.3E-05
合计	1.3E+00	1.6E+00	1.4E+00	1.4E+00	1.4E+00	6.4E-01	8.0E-01	7.1E-01	6.8E-01	7.0E-01

Cd、Cr、As、Co 和 Ni 等 5 种元素经吸入途径的终身致癌风险值之和表现为:3 号气团 > 4 号气团 > 1 号气团 > 2 号气团,而各类气团中重金属元素终身致癌风险顺序均表现为:Cr > As > Cd > Ni > Co。Cr 和 As 元素的终身致癌风险值均大于

10^{-6} 但小于 10^{-4} ,说明这 2 种元素对人体均存在一定的致癌风险。3 号气团 Cd 元素的终身致癌风险值略高于 10^{-6} ,其对人体也存在一定的致癌风险。其余元素终身致癌风险值均小于 10^{-6} ,其致癌风险可忽略。

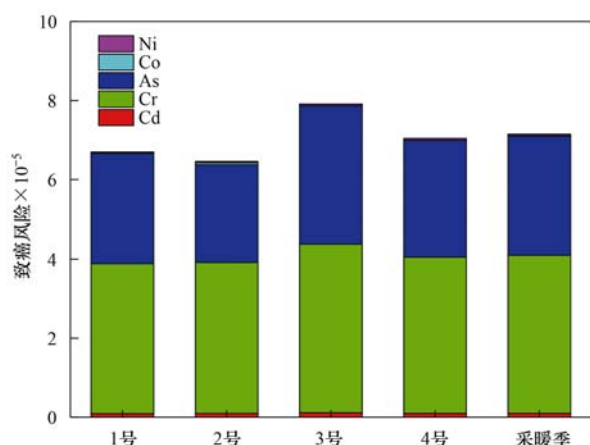


图4 天津市采暖季不同气团来向 PM_{2.5} 中重金属元素经呼吸途径的终身致癌风险值

Fig. 4 Carcinogenic risk value of heavy metals in PM_{2.5} of different air masses during heating season in Tianjin

3 结论

(1) 2020 年采暖季,天津市 Pb、Cd、Cr、As、Zn、Mn、Co、Ni、Cu 和 V 等 10 种重金属元素的总浓度平均值为 $(261.56 \pm 241.74) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,其中, Cr [折算 Cr(VI)] 和 As 元素高于《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)的年平均限值。

(2) 观测期间,天津市主要受到来自西北部中距离气团(1号)、西北部长距离气团(2号)、西南部气团(3号)和东北部气团(4号)的影响,各类气团占比分别为 34%、15%、42% 和 9%。

(3) 不同气团来向 PM_{2.5} 和重金属元素呈现不同的污染特征和健康风险。3 号气团 PM_{2.5} 浓度、10 种重金属元素的总浓度和 5 种重金属元素经呼吸途径暴露的终身致癌风险值之和均最高,2 号气团 10 种重金属元素经呼吸途径暴露的非致癌风险值之和最高。

(4) 经呼吸途径暴露的非致癌风险:儿童 > 成人,顺序为: Mn > Cr > As > Pb > Cd > Zn > Cu > V > Ni > Co,其中, Mn 元素对儿童存在一定的非致癌风险;经呼吸途径暴露的重金属元素终身致癌风险顺序为: Cr > As > Cd > Ni > Co,其中, Cr 和 As 元素对人体均存在一定的致癌风险,同时,3 号气团 Cd 元素对人体亦存在一定的致癌风险。

参考文献:

- [1] Pope III C A, Dockery D W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2006, 56(6): 709-742.
- [2] Guo T J, Wang Y Y, Zhang H G, et al. The association between ambient PM_{2.5} exposure and the risk of preterm birth in China: a retrospective cohort study[J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 1453-1459.
- [3] Fan F Y, Lei Y L, Li L. Health damage assessment of

particulate matter pollution in Jing-Jin-Ji region of China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(8): 7883-7895.

- [4] Wang X Y, Zhang R H, Yu W. The effects of PM_{2.5} concentrations and relative humidity on atmospheric visibility in Beijing[J]. Journal of Geophysical Research, 2019, 124(4): 2235-2259.
- [5] 吴兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 等. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降[J]. 热带气象学报, 2007, 23(1): 1-6.
- [6] Wu D, Deng X J, Bi X Y, et al. Study on the visibility reduction caused by atmospheric haze in Guangzhou area[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2007, 23(1): 1-6.
- [7] 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 等. 上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5224-5233.
- [8] Luo R R, Dai H X, Zhang Y H, et al. Exposure levels, sources, and health risks of heavy metal components of PM_{2.5} in housewives in rural Shanghai[J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5224-5233.
- [9] Zhang J Z, Zhou X H, Wang Z, et al. Trace elements in PM_{2.5} in Shandong province: source identification and health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2018, 621: 558-577.
- [10] Coglianor V J, Baan R, Straif K, et al. Preventable exposures associated with human cancers[J]. JNCI: Journal of the National Cancer Institute, 2011, 103(24): 1827-1839.
- [11] 刘恒嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 等. 新乡市大气 PM_{2.5} 携带金属元素季节分布、来源特征与健康风险[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4140-4150.
- [12] Liu H J, Jia M K, Liu Y L, et al. Seasonal variation, source identification, and health risk of PM_{2.5}-bound metals in Xinxiang[J]. Environmental Science, 2021, 42(9): 4140-4150.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 王志磊, 刘效峰, 张姝婷, 等. 太原市及周边采暖季大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及来源解析[J]. 太原理工大学学报, 2021, 52(3): 382-390.
- [18] Wang Z L, Liu X F, Zhang S T, et al. Pollution characteristic and source analysis of heavy metals in atmospheric PM_{2.5} during heating season in Taiyuan and surrounding area[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2021, 52(3): 382-390.
- [19] 王鑫, 肖舜, 董治宝, 等. 西安重度以上污染天气 PM_{2.5} 重金属污染特征与健康风险[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 10-19.
- [20] Wang X, Xiao S, Dong Z B, et al. Pollution characteristics and health risk of heavy metals in PM_{2.5} in severely polluted weather in Xi'an, China[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 10-19.
- [21] 方波, 曾豪, 张磊, 等. 曹妃甸采暖期和非采暖期 PM_{2.5} 中不

- 同重金属元素污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(12): 2785-2793.
- Fang B, Zeng H, Zhang L, *et al.* Characteristics and health risk assessment of different heavy metals in PM_{2.5} during heating period and non-heating period in CaoFeidian[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(12): 2785-2793.
- [15] 魏青, 陈文怡, 金麟先. 枣庄市大气 PM_{2.5} 重金属元素健康风险评价及污染来源解析[J]. 中国粉体技术, 2020, **26**(6): 69-78.
- Wei Q, Chen W Y, Jin L X. Health risk assessment and source analysis of heavy metal elements in PM_{2.5} in Zaozhuang city[J]. China Powder Science and Technology, 2020, **26**(6): 69-78.
- [16] 闫广轩, 张朴真, 王晨, 等. 郑州市采暖期与非采暖期 PM_{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(8): 2811-2820.
- Yan G X, Zhang P Z, Wang C, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of heavy metals of PM_{2.5} in heating and non-heating period in Zhengzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(8): 2811-2820.
- [17] 张芳源, 冯福民, 李建国, 等. 石家庄市大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2019, **36**(7): 612-615.
- Zhang F Y, Feng F M, Li J G, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} in Shijiazhuang[J]. Journal of Environment and Health, 2019, **36**(7): 612-615.
- [18] 杨毅红, 贾燕, 卞国建, 等. 珠海市郊区大气 PM_{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1553-1561.
- Yang Y H, Jia Y, Bian G J, *et al.* Elemental characteristics and health risk assessment of heavy metals in atmospheric PM_{2.5} in a suburb of Zhuhai city[J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1553-1561.
- [19] 刘建伟, 晁思宏, 陈艳姣, 等. 北京市不同年龄人群 PM_{2.5} 携带重金属的健康风险[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(4): 1540-1549.
- Liu J W, Chao S H, Chen Y J, *et al.* Health risk of PM_{2.5}-bound heavy metals for different age population in Beijing, China [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(4): 1540-1549.
- [20] 张城瑜, 王丽涛, 纪尚平, 等. 邯郸市大气 PM_{2.5} 中元素特征及健康风险评价[J]. 环境工程, 2018, **36**(7): 144-148.
- Zhang C Y, Wang L T, Ji S P, *et al.* Characteristic of elements in PM_{2.5} and health risk assessment of heavy metals in Handan [J]. Environmental Engineering, 2018, **36**(7): 144-148.
- [21] 田蓉, 刘迎云, 陈攀, 等. 衡阳城区 PM_{2.5} 中重金属污染水平及健康风险[J]. 环境工程, 2017, **35**(9): 127-130.
- Tian R, Liu Y Y, Chen P, *et al.* Health risks and pollution level of heavy metals in PM_{2.5} in Hengyang city[J]. Environmental Engineering, 2017, **35**(9): 127-130.
- [22] Zhang R P, Lei Y L, Ren H R, *et al.* Seasonal variation and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} during winter and summer over Xi'an, China[J]. Atmosphere, 2017, **8**(5), doi: 10.3390/atmos8050091.
- [23] Zhang F, Wang Z W, Cheng H R, *et al.* Seasonal variations and chemical characteristics of PM_{2.5} in Wuhan, central China[J]. Science of the Total Environment, 2015, **518-519**: 97-105.
- [24] 中华人民共和国生态环境部. 2017 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/201805/P020180531534645032372.pdf>, 2022-04-01.
- [25] HJ 817-2018, 环境空气颗粒物(PM₁₀和PM_{2.5})连续自动监测系统运行和质控技术规范[S].
- [26] Draxler R, Stunder B, Rolph G, *et al.* Hysplit user's guide[EB/OL]. <http://ready.arl.noaa.gov/hysplitusersguide/S000.htm>, 2022-04-01.
- [27] Yerramilli A, Dodla V B R, Challa V S, *et al.* An integrated WRF/HYSPLIT modeling approach for the assessment of PM_{2.5} source regions over the Mississippi Gulf Coast region[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2015, **5**(4): 401-412.
- [28] 孔珊珊, 刘厚凤, 陈义珍. 基于后向轨迹模式的北京市 PM_{2.5} 来源分布及传输特征探讨[J]. 中国环境管理, 2017, **9**(1): 86-90.
- Kong S S, Liu H F, Chen Y Z. Discussion on the source distribution and transmission characteristics of PM_{2.5} in Beijing based on backward trajectory model [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2017, **9**(1): 86-90.
- [29] 史旭荣, 温杰, 田瑛泽, 等. 天津不同气团来向 PM_{2.5} 中组分和污染源贡献的季节变化[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(7): 2406-2414.
- Shi X R, Wen J, Tian Y Z, *et al.* Seasonal patterns of PM_{2.5} sources and chemical composition from different air mass directions in Tianjin [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(7): 2406-2414.
- [30] 张涛, 王新明, 周炎, 等. 利用 HYSPLIT 模型研究珠三角地区 VOCs 时空分布特征[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(10): 4216-4223.
- Zhang T, Wang X M, Zhou Y, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of VOCs in the Pearl River Delta region using HYSPLIT model[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(10): 4216-4223.
- [31] Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund, volume I: human health evaluation manual (part F, supplemental guidance for inhalation risk assessment) [R]. Washington: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, Environmental Protection Agency, 2009.
- [32] 郑灿利, 范雪璐, 董炯, 等. 贵阳市秋冬季 PM_{2.5} 中重金属污染特征、来源解析及健康风险评估[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(6): 1376-1383.
- Zheng C L, Fan X L, Dong X, *et al.* Characteristics, Sources and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} collected between autumn and winter in Guiyang city [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(6): 1376-1383.
- [33] Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, U. S. Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund: volume I: human health evaluation manual (Part E, supplemental guidance for dermal risk assessment) [R]. Washington: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, U. S. Environmental Protection Agency, 2004.
- [34] 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.
- [35] 闫丽娜, 左昊, 张聚全, 等. 石家庄市大气 PM₁、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中重金属元素分布特征及来源的对比研究[J]. 地学前缘, 2019, **26**(3): 263-270.
- Yan L N, Zuo H, Zhang J Q, *et al.* Comparative study on the distribution characteristics and sources of heavy metal elements in PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀ in Shijiazhuang City [J]. Earth Science Frontiers, 2019, **26**(3): 263-270.

- [36] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [37] Brown R J C, van Aswegen S, Webb W R, *et al.* UK concentrations of chromium and chromium (VI), measured as water soluble chromium, in PM₁₀ [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **99**: 385-391.
- [38] 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.
- [39] 肖致美, 蔡子颖, 李鹏, 等. 2020 年春节期间天津市重污染天气污染特征分析[J]. *环境科学学报*, 2020, **40** (12): 4442-4452.
Xiao Z M, Cai Z Y, Li P, *et al.* Characterization of heavy air pollution events during the 2020 Spring Festival in Tianjin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40** (12): 4442-4452.
- [40] Liu P F, Zhao C S, Göbel T, *et al.* Hygroscopic properties of aerosol particles at high relative humidity and their diurnal variations in the North China Plain[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11** (7): 3479-3494.
- [41] Nguyen Q T, Skov H, Sørensen L L, *et al.* Source apportionment of particles at Station Nord, North East Greenland during 2008-2010 using COPREM and PMF analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13** (1): 35-49.
- [42] 安欣欣, 曹阳, 王琴, 等. 北京城区 PM_{2.5} 各组分污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2022, **43** (5): 2251-2261.
An X X, Cao Y, Wang Q, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in urban area of Beijing [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (5): 2251-2261.
- [43] 段文娇, 郎建垒, 程水源, 等. 京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 PM_{2.5} 影响[J]. *环境科学*, 2018, **39** (4): 1445-1454.
Duan W J, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Air pollutant emission inventory from iron and steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its impact on PM_{2.5} [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (4): 1445-1454.
- [44] Song Y, Xie S D, Zhang Y H, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in Beijing using principal component analysis/absolute principal component scores and UNMIX[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **372** (1): 278-286.



CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)