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

2020
Vol.41 No.11
第41卷 第11期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第11期
2020年11月15日

目 次

中国工业源挥发性有机物排放清单 …… 梁小明，孙西勃，徐建铁，叶代启，陈来国(4767)
中国水泥排放清单及分布特征 …… 汤铃，薛晓达，伯鑫，郭静，王鹏，翟文慧，崔维庚，汪寿阳，李时蓓，董广霞(4776)
环境空气 $PM_{2.5}$ 化学组分监测数据审核指标的建立：以长三角地区为例 …… 张哲，乔利平，周敏，朱书慧，郭会琴，王红丽，楼晟荣，陶士康，陈长虹(4786)
南京江北新区大气颗粒物化学组分的粒径分布特征 …… 张毓秀，于兴娜，刘偲嘉，安俊琳，张程(4803)
郑州市 $PM_{2.5}$ 化学组分的季节变化特征及来源解析 …… 张剑飞，姜楠，段时光，孙有昌，郝祺，张瑞芹(4813)
山西大学城 $PM_{2.5}$ 中元素特征、来源及健康风险评估 …… 李雪梅，牟玲，田妹，郑利荣，李杨勇(4825)
2000～2019年中国 $PM_{2.5}$ 时空演化特征 …… 夏晓圣，汪军红，宋伟东，程先富(4832)
北京地区偏南风和偏东风条件下污染特征差异 …… 尹晓梅，乔林，朱晓婉，郭恒，刘湘雪，熊亚军(4844)
基于天气背景天津大气污染输送特征分析 …… 蔡子颖，杨旭，韩素芹，姚青，刘敬乐(4855)
基于天气分型的上甸子大气本底站臭氧污染气象条件 …… 吴进，李琛，马志强，孙兆彬，朱晓婉，董璠(4864)
基于环境空气中 VOCs 在线监测数据精准识别化工园区 VOCs 排放源 …… 孙佳宁，谢绍东(4874)
芜湖市大气挥发性有机物污染特征、大气反应活性及源解析 …… 高亢，章慧，刘梦迪，赵晓宇，吴婷，贾其娜(4885)
密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应 …… 张微微，李晓娜，王超，赵春桥，史瑞双(4895)
北京密云水库流域水体夏季 DOC 和 DIC 质量浓度及同位素组成初探 …… 陈吉吉，郭婧，徐蘇士，陶蕾，荆红卫(4905)
2009～2018年太湖湖泛强度变化及其影响因素 …… 辛华荣，朱广伟，王雪松，李骏，陆隽(4914)
雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征 …… 张宏鑫，吴亚，罗炜宇，陈雯，刘怀庆(4924)
基于多环境介质氮素和同位素的滦平盆地地下水硝酸盐来源示踪 …… 孙厚云，卫晓锋，贾凤超，李多杰，李健，李霞，殷志强(4936)
会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评价 …… 李军，邹胜章，梁永平，林永生，周长松，赵一(4948)
太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征 …… 张文浩，赵铎霖，王晓毓，郝强州，李喜梅，高鹏程(4958)
强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响 …… 连心桥，朱广伟，杨文斌，朱梦圆，许海(4970)
长江流域淡水生态系统内分泌干扰物、药物和个人护理品的风险排序 …… 苏超，崔严(4981)
嘉兴市城市河网区多环芳烃污染源解析及生态风险评价 …… 杨延梅，赵航晨，孟睿，何连生，赵昊，杜士林，丁婷婷(4989)
污水处理厂对漓江桂林市区河段淡水生物中微塑料累积的影响 …… 谢沅汕，张清科，张漓杉，钟山，刘俊勇，侯晓映，王华，冯静培，梁祖鸿，陈舞阳(4999)
村镇生活污水处理设施抗生素浓度分布规律 …… 卢亚楠，郭雅妮，王坤，陆伟东，王拓，柴玉峰，柳蒙蒙，钟慧，陈梅雪，魏源送(5008)
冬季小流域水体微生物多样性及影响因素 …… 朱金山，秦海兰，孙启耀，王宝珍，高润霞，郭锐利，李武斌(5016)
水库热分层期沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌脱氮的影响 …… 王彤，文刚，黄廷林，司凡，王晨旭，路林超，林薇(5027)
长三角地区 MBBR 泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析 …… 韩文杰，吴迪，周家中，何强，阚渝姣(5037)
类群划分方法对南亚热带水库夏季浮游植物群落与环境响应关系的影响 …… 郭芳，顾继光，赵剑，余华章，肖利娟(5050)
基于决策树的城市黑臭水体遥感分级 …… 李玲玲，李云梅，吕恒，徐杰，杨子谦，毕顺，许佳峰(5060)
纳米零价铁强化微生物电催化-厌氧膜生物组合反应器抗膜污染能力及其调控机制 …… 潘阳，牛承鑫，支忠祥，王建辉，陆雪琴，戴金金，甄广印，孙彤彤，康娜英(5073)
温度和基质浓度对厌氧氨氧化工艺中 N_2O 释放的影响 …… 王丝可，于恒，左剑恶(5082)
以污泥发酵液与尾水混合液为补给碳源的 A^2/O 污染物去除特性 …… 荣懿，邵劲博，于优城，石烜，金鹏康(5089)
不同停曝比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响 …… 张杰，劳会妹，李冬，魏子清(5097)
中温厌氧消化与高温厌氧消化对污泥重金属风险及稳定性的影响 …… 田中科，王芬，闫钊(5106)
基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价 …… 韩琳，徐夕博(5114)
再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险 …… 沈城，刘馥雯，吴健，黄沈发，王敏，黄波涛(5125)
有机改性蒙脱土对萘的吸附机制和影响因子 …… 侯静雯，施维林，高娟(5133)
硫酸亚铁和硝酸铁施用对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响 …… 李义纯，陈勇，唐明灯，李林峰，林晓扬，王艳红，许迪豪，艾绍英(5143)
叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响 …… 闫秀秀，徐应明，王林，陶雪莹，孙约兵，梁学峰(5151)
重金属固定细菌调控土壤铁氧化物阻控小麦 Cd 吸收效应 …… 王晓宇，韩辉(5160)
油-稻轮作模式下修复材料对土壤铜修复的持续性影响 …… 赵颖颖，李虹川，胡宏祥，薛中俊，刘娜，吴孟君(5168)
氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发的影响 …… 张薇，倪邦，许秀春，杨轩，孟凡乔(5176)
生物质炭影响下土壤呼吸温度敏感性及细菌群落结构的变化 …… 曹坤坤，张沙沙，胡学玉，黄洋(5185)
铜尾矿白羊草重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响 …… 贾彤，郭婷艳，王瑞宏，柴宝峰(5193)
典型水环境微生物源异嗅物研究进展 …… 张海涵，苗雨甜，黄廷林，刘凯文，刘祥，黄鑫，杨尚业，司凡，李程遥(5201)
广告：国家微生物科学数据中心 …… (前插)
《环境科学》征订启事(4785)　《环境科学》征稿简则(4947)　信息(5015，5124，5132)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第11期 2020年11月
Vol.41, No.11 Nov., 2020

山西大学城 $PM_{2.5}$ 中元素特征、来源及健康风险评估

李雪梅, 牟玲*, 田妹, 郑利荣, 李杨勇
(太原理工大学环境科学与工程学院, 太原 030024)

摘要: 为研究山西大学城 $PM_{2.5}$ 中元素的污染特征及来源,采用能量色散 X 射线荧光光谱仪(energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer, ED-XRF)对研究区域 2017 年 $PM_{2.5}$ 样品中 21 种元素进行分析,并对 Mn、Zn、Cu、Sb、Pb、Cr、Co 和 Ni 等重金属进行健康风险评估,同时采用主成分分析方法(principal component analysis, PCA)和正定矩阵因子分解法(positive matrix factorization, PMF)定量解析元素的主要来源. 结果表明, 2017 年山西大学城 $PM_{2.5}$ 中 21 种元素中 Ca 质量浓度最高,其次是 Si、Fe、Al、S、K 和 Cl,这 7 种元素占元素总质量浓度的 95.71%. 其中,Cr 元素浓度超过我国环境空气质量标准年平均浓度限值的 104 倍. 春季、夏季和冬季 $PM_{2.5}$ 中 Ca 质量浓度最高,而秋季 S 元素质量浓度最高. 对 3 类人群具有非致癌风险的元素均为 Mn,且风险大小依次为儿童 > 成年男性 > 成年女性; 具有可容忍致癌风险的元素为 Cr 和 Co,且风险大小为成年男性 > 成年女性 > 儿童. 山西大学城 $PM_{2.5}$ 中元素的主要来源包括:天然矿物粉尘和城市扬尘、燃煤和交通源.

关键词: $PM_{2.5}$; 元素; 健康风险评估; 主成分分析(PCA); 正定矩阵因子分解(PMF)
中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)11-4825-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202003011

Characteristics, Sources, and Health Risks of Elements in $PM_{2.5}$ in Shanxi University Town

LI Xue-mei, MU Ling*, TIAN Mei, ZHENG Li-rong, LI Yang-yong
(School of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to investigate the pollution characteristics and sources of elements in $PM_{2.5}$ in the Shanxi University Town in 2017, an energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer (ED-XRF) was used to analyze 21 kinds of elements in $PM_{2.5}$ samples. A health risk assessment was conducted for Mn, Zn, Cu, Sb, Pb, Cr, Co, and Ni. The main sources of elements were identified by the principal component analysis (PCA) and positive matrix factorization (PMF). The results found that, among the 21 kinds of elements in $PM_{2.5}$ in Shanxi University Town, the mass concentration of Ca was the highest, followed by Si, Fe, Al, S, K, and Cl. These seven elements accounted for 95.71% of the total element concentrations. The concentration of Cr exceeded the annual average concentration limit of ambient air quality standards in China by 104 times. The concentration of Ca in $PM_{2.5}$ was the highest in spring, summer, and winter, while in autumn the concentration of S was the highest. Mn was the element that had non-carcinogenic risks to the three population types, and the level of risks were in the order of children > adult men > adult women. Cr and Co had tolerable carcinogenic risks, and the risk levels were in the order of adult men > adult women > children. The main sources of elements in $PM_{2.5}$ in Shanxi University Town in 2017 were natural mineral dust, urban dust, coal combustion, and traffic.

Key words: $PM_{2.5}$; elements; health risk assessment; principal component analysis (PCA); positive matrix factorization (PMF)

随着我国工业化和城市化进程的不断加快,细颗粒物($PM_{2.5}$,空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物)引起的大气污染得到人们的高度关注[1,2]. $PM_{2.5}$ 污染不仅对环境空气质量,气候变化造成影响,还会严重威胁公众健康[3~5]. 流行病学和毒理学研究表明,长期暴露于高浓度的污染大气会增加呼吸和心脑血管疾病的发病率[6].

元素是 $PM_{2.5}$ 中重要的化学组分之一[7~9]. 明确 $PM_{2.5}$ 中元素分布特征对于准确识别其来源、传输途径以及对人体健康的影响具有重要意义[10]. 近年来,许多学者已对我国不同地区大气 $PM_{2.5}$ 中元素进行了研究[4,8,9,11~15]. 刘威杰等[15]的研究指出 $PM_{2.5}$ 中元素的组分特征及来源受城市地形、气象条件以及经济结构的共同影响,因此有必要针对不同区域进行系统研究.

山西省位于华北地区西部的黄土高原,是我国重要的能源重化工基地,其中吕梁、晋中、临汾和运城也是我国大气污染治理重点区域汾渭平原的主要城市. 目前,针对该区域大气 $PM_{2.5}$ 中元素的研究仅局限于太原市和运城市[2,16~20]. 近年来随着城乡结合区的迅速发展,晋中市榆次区已成为太原周边发展最为迅速的城乡结合区之一[21],同时也是山西省建设的省级高校新校区所在地. 明确该区域大气 $PM_{2.5}$ 中元素的污染水平、变化特征及来源,以期为有效改善该区域环境空气质量提供重要的数据

收稿日期: 2020-03-01; **修订日期**: 2020-05-18
基金项目: 国家自然科学基金项目(41502324); 山西重点研发计划项目(201903D311005); 山西省应用基础研究计划(201901D111065)
作者简介: 李雪梅(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气污染与防治,E-mail: lixuemei0654@link.tyut.edu.cn
* 通信作者,E-mail: muling@tyut.edu.cn

支撑.

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样点位于太原理工大学(明向校区)博睿楼楼顶(37.75°N、112.72°E),距地面约 12 m. 采样点周围无明显工业排放源,主要以学校为主,紧邻定阳路、文津街两条主干道. 采样时间为 2017 年,各个季节的采样时间为冬季(2017-01-03 ~ 2017-01-12、2017-02-28 ~ 2017-03-02)、春季(2017-04-26 ~ 2017-05-06)、夏季(2017-07-09 ~ 2017-07-18)和秋季(2017-10-11 ~ 2017-10-21),每个样品的采样时长为 24 h,共采集 41 个 $PM_{2.5}$ 样品. 采样仪器为青岛崂应 MH1200-A 型中流量颗粒物采样器,流量为 100 $L \cdot min^{-1}$,采样滤膜为 90 mm 的有机滤膜. 采样前将铝箔包裹的有机滤膜在 60℃ 的烘箱中烘 2 h,然后置于恒温恒湿环境中干燥平衡 72 h,再使用万分之一电子天平进行称重. 采样完成后,将富集 $PM_{2.5}$ 样品的滤膜再次干燥平衡 72 h 后称重. 最后将滤膜密封于滤膜盒并保存于 −20℃ 的冰箱中以待分析. 取同批次的空白滤膜进行相同处理后作为本实验空白分析. 采样期间记录每天的温度、湿度、风向和风速.

1.2 测试技术

大气 $PM_{2.5}$ 中的元素采用能量色散 X 射线荧光光谱仪(ED-XRF)进行分析. 分析前,采用美国 MicroMatter 公司的薄膜滤纸及 NIST2783 号标准物质进行仪器的校正. 将富集 $PM_{2.5}$ 的有机滤膜使用陶瓷剪刀裁剪 1/4 进行测试. 分析方法为 Air filter-20160817,该方法的原理是根据被激发后的能量峰的峰面积大小计算出各个元素的浓度. 为了保证仪器的稳定性和重现性,每 8 个样品做一次复检. 本研究共分析了 21 种元素,其中包括 8 种常量元素(Si、Al、Fe、Ca、Mg、Na、K、Ti)和 13 种痕量元素(Cl、Cr、Mn、Cu、Zn、Pb、S、Ba、V、Co、Ni、Rb、Sb).

1.3 质量保证与质量控制

样品测试前,检查 ED-XRF 的液氮水平、温度和压力等情况,并采用 NIST SRM 2783 号标准物质进行质量控制样分析. 样品测试完成后,任意挑选不少于 10% 的样品进行复检,对比两次测量结果,核对相对误差值,若大于 10% 则需要进行校正.

1.4 重金属元素健康风险评估方法

本研究采用美国环境保护署推荐的健康风险评估模型(US EPA, 2011),计算了通过呼吸吸入人体的重金属引起的致癌和非致癌风险[12]. 对 Mn、Zn、Cu、Sb、Pb、Cr、Co 和 Ni 进行了非致癌风险评估,计算公式为:

$$ADD/LADD = \frac{c \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

式中,ADD 表示非致癌元素正常平均日剂量,$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; LADD 表示致癌元素寿命平均日剂量,$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$; c 代表污染物浓度,$mg \cdot m^{-3}$; IR 代表呼吸频率,$m^3 \cdot d^{-1}$; EF 代表暴露频率,$d \cdot a^{-1}$; ED 代表暴露持续时间,a; BW 代表体重,kg; AT 代表平均暴露时间,d. 根据对中国人群的研究[12,22],各参数取值如表 1 所示.

表 1 健康风险评估(非致癌和致癌)计算公式参数取值

Table 1 Parameters of health risk assessment (non-carcinogenic and carcinogenic) calculation formulas

参数	儿童取值	成人取值	
		男	女
$IR/m^3 \cdot d^{-1}$	7.50	16.60	13.50
$EF/d \cdot a^{-1}$	365	365	365
ED/a	6	30	30
BW/kg	15.00	62.70	54.40
AT(非致癌)/d	365 × ED	365 × ED	365 × ED
AT(致癌)/d	365 × 70	365 × 70	365 × 70

非致癌风险的危险商 HQ 的计算公式为:

$$HQ = \frac{ADD}{RfD} \quad (2)$$

式中,RfD 代表非致癌金属的参考剂量,$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$. Mn、Zn、Cu、Sb、Pb、Cr、Co 和 Ni 的取值分别为 1.43×10^{-5}、3.00×10^{-1}、4.02×10^{-2}、1.40×10^{-5}、3.52×10^{-3}、2.86×10^{-5}、5.71×10^{-6} 和 2.06×10^{-2}[22,23]. 当 HQ > 1 时,表示元素对人体有非致癌风险; 当 HQ ≤ 1 时,表示非致癌金属的风险可能会降低,或者会被忽略[12,22].

本研究对 Pb、Cr、Co 和 Ni 进行了致癌风险评估. 终生癌症风险增量 ILCR 代表由致癌物引起的个人平均每年患癌的风险,计算公式为:

$$ILCR = LADD \times SF \quad (3)$$

式中,SF 表示致癌倾斜因子,$[mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}]^{-1}$. Pb、Cr、Co 和 Ni 的取值分别为 8.50×10^{-3}、42.00、9.80 和 0.84[22,23]. 当 $ILCR < 10^{-6}$ 时,表示元素产生的致癌风险可以忽略; 当 $1 \times 10^{-6} \leq ILCR \geq 1 \times 10^{-4}$ 时,表示可容忍的致癌风险; 当 $ILCR \geq 10^{-4}$ 时,表示不可容忍的致癌风险[12].

1.5 统计学方法

本研究采用软件 SPSS 25 对 $PM_{2.5}$ 中元素进行主成分分析(principal component analysis, PCA); 采用 EPA PMF 5.0 进行正定矩阵因子分解(positive matrix factorization, PMF).

2　结果与讨论

2.1　$PM_{2.5}$ 浓度及空气质量

图 1 为采样期间研究区域大气 $PM_{2.5}$ 浓度及空气质量指数(air quality index, AQI). 从中可知,采样点 $PM_{2.5}$ 浓度介于 18.00 ~ 165.00 $\mu g \cdot m^{-3}$ 之间,平均浓度为 71.05 $\mu g \cdot m^{-3}$,高于我国环境空气质量二级标准(35 $\mu g \cdot m^{-3}$)[24]. 其中,冬季 $PM_{2.5}$ 浓度最高(90.00 $\mu g \cdot m^{-3}$),其次是秋季(85.80 $\mu g \cdot m^{-3}$)和春季(66.60 $\mu g \cdot m^{-3}$),夏季浓度最低(41.80 $\mu g \cdot m^{-3}$),与我国其他城市 $PM_{2.5}$ 的季节变化一致(冬季最高,夏季最低)[1,3,12]. 与其他城市对比发现本研究中 $PM_{2.5}$ 浓度低于北京(102.45 $\mu g \cdot m^{-3}$)[12]和常州(108.30 $\mu g \cdot m^{-3}$)[3]等地区,且远低于太原市区 $PM_{2.5}$ 浓度(216.71 $\mu g \cdot m^{-3}$, 2012 年)[18],主要由于采样点位于城乡结合区,污染源较少. 采样期间榆次区空气质量以良为主,占总采样天数的 55.00%,轻度、中度和严重污染日分别占 30%、10% 和 5%. 其中,夏季空气质量均为良,主要由于夏季边界层高度和温度较高,降雨较多,有利于污染物的扩散和去除[3,11]. 以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的天数占到总采样天数的 50%,且以秋冬季节为主,主要由于本地污染源增加以及秋冬季节气象条件不利于大气污染物扩散. 春季的首要污染物以 PM_{10} 为主,较高的 AQI 值主要与春季土壤风沙较大导致 PM_{10} 污染较严重有关.

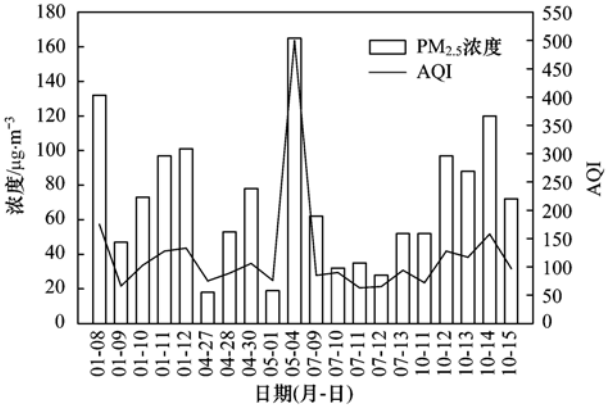

图 1　山西大学城大气 $PM_{2.5}$ 浓度及空气质量指数

Fig. 1　Atmospheric $PM_{2.5}$ concentration and air quality index in Shanxi University Town

2.2　$PM_{2.5}$ 中元素变化特征及来源解析

2.2.1　元素浓度变化特征

图 2 为研究区域 $PM_{2.5}$ 中 21 种元素的质量浓度. $PM_{2.5}$ 中元素总浓度为 21.77 $\mu g \cdot m^{-3}$,占 $PM_{2.5}$ 质量浓度的 30.63%. 其中 Ca 质量浓度最高(7.99 $\mu g \cdot m^{-3}$),占元素总浓度的 36.71%,其次是 Si(4.30 $\mu g \cdot m^{-3}$)、Fe(2.86 $\mu g \cdot m^{-3}$)、Al(1.96 $\mu g \cdot m^{-3}$)、S(1.72 $\mu g \cdot m^{-3}$)、K(1.13 $\mu g \cdot m^{-3}$)和 Cl(0.88 $\mu g \cdot m^{-3}$),这 7 种物质占元素总质量浓度的 95.71%. 致癌重金属 Pb 的浓度值(0.07 $\mu g \cdot m^{-3}$)低于我国环境空气质量标准年平均浓度限值(0.50 $\mu g \cdot m^{-3}$)[24]. 通常 $PM_{2.5}$ 中铬中毒由 Cr^{6+} 引起,且 Cr^{6+} 浓度占 Cr 元素浓度(0.02 $\mu g \cdot m^{-3}$)的 0.13[22],经换算得研究区域 Cr^{6+} 质量浓度为0.002 6 $\mu g \cdot m^{-3}$,远高于环境空气质量标准年平均浓度限值(0.000 025 $\mu g \cdot m^{-3}$)[24]. 山西大学城大气 $PM_{2.5}$ 中较高含量的 Cr 需引起高度重视.

有研究表明 Ca、Si、Fe 和 Al 为典型的地壳元

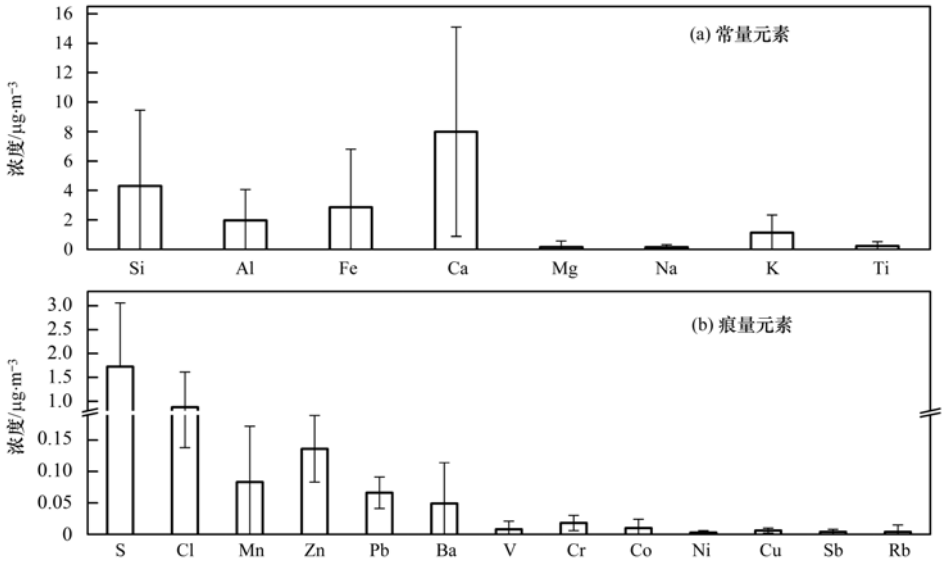

图 2　山西大学城 $PM_{2.5}$ 中元素的质量浓度

Fig. 2　Mass concentrations of elements in $PM_{2.5}$ in Shanxi University Town

素[3,5,10,11,25,26]. Ca 为建筑粉尘的特征标识物[11,14],本研究中 Ca 元素质量浓度远高于太原市[19,27],主要是由于采样点附近在建项目较多,受建筑粉尘影响较大. Fe 来源于道路粉尘和冶金工业尘[5,11,14,17]. 与 Ca 元素相同,本研究中的 Fe 元素浓度也远高于太原市[19,27]. 除来自悬浮粉尘和土壤外[10],K 还可通过生物质燃烧释放[26]. 与太原市相比[19,27],本研究中较高的 K 元素浓度可能与城乡结合区生物质燃烧活动相对较多有关.

2.2.2 元素的季节变化

元素在 4 个季节所占百分比如图 3 所示. 从中可知,Ca 为春季、夏季和冬季浓度最高的元素,分别占各季节元素总浓度的 38.25%、46.33% 和 33.33%. 相反,S 在秋季浓度最高,占该季节元素总浓度的 40.04%,主要由于秋季温度和太阳辐射高于冬季和春季,降雨少于夏季,导致 SO_2 向 SO_4^{2-} 的二次转化速率增大引起[13,28]. Cl 主要来源于燃煤、燃油和机动车排放[13]. 秋冬季节 Cl 元素所占比例分别为 10.47% 和 11.37%,远高于夏季(0.69%)和春季(1.12%),主要与秋冬季节燃煤排放的增多有关[14]. 另外,研究发现在春季元素的浓度水平为 Ca > Si > Fe > Al > K > S > Mg > Ti. 除 S 以外,其余 7 种元素均为地壳元素[1,3,5,10,11,25,26],进一步推断春季由于风速较大,受扬尘影响较大[10].

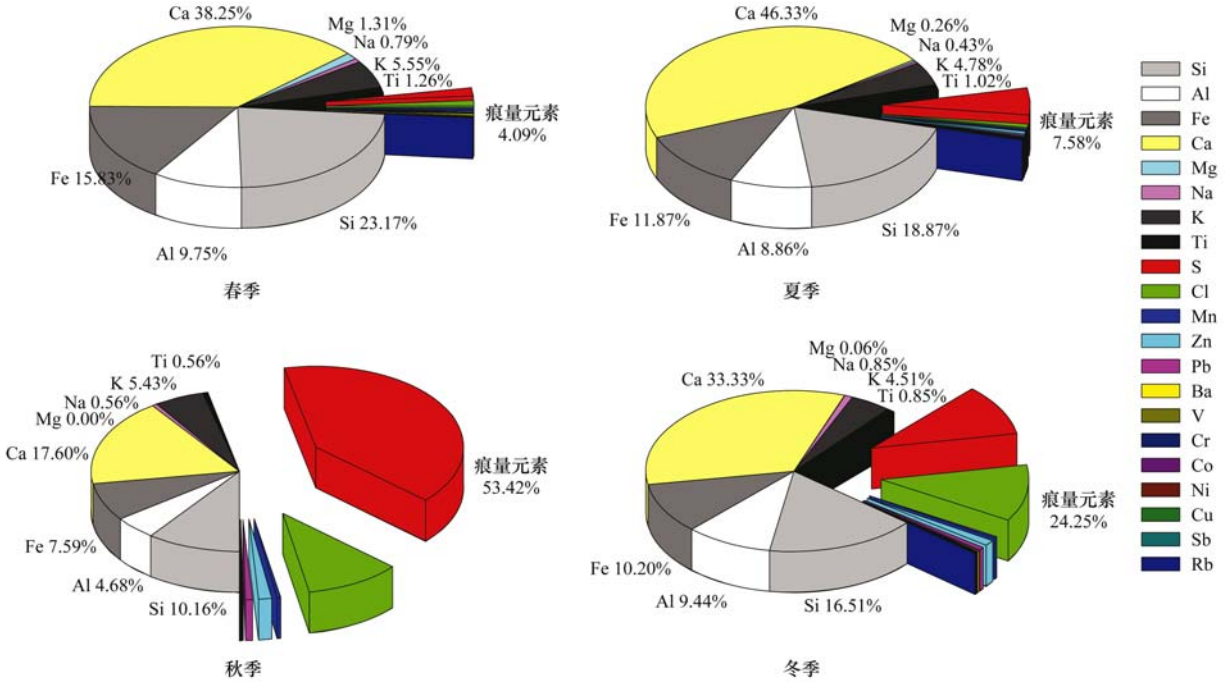

图 3 山西大学城不同季节 $PM_{2.5}$ 中元素百分含量

Fig. 3 Percentage of elements in $PM_{2.5}$ in Shanxi University Town in different seasons

2.2.3 重金属元素健康风险评估

本研究采用 USEPA 的健康风险评估模型,分别对儿童、成年男性和成年女性进行健康风险评价,结果见表 2.

重金属元素对 3 类人群的非致癌风险水平由高到低均为 Mn > Co > Cr > Sb > Pb > Zn > Cu > Ni,与我国其他地区的研究结果一致[22,29]. 每种元素对人体的危害风险均表现为儿童 > 成年男性 > 成年女性,这与儿童与成人相比体质较弱以及男性接触的社会环境较为复杂有关[22]. 在致癌风险方面,山西

表 2 重金属元素对不同人群的致癌风险(ILCR)和非致癌风险(HQ)

Table 2 Carcinogenic risk (ILCR) and non-carcinogenic risk (HQ) of heavy metals to different populations

项目	HQ			ILCR		
	儿童	成人(男)	成人(女)	儿童	成人(男)	成人(女)
Mn	2.90E+00	1.54E+00	1.44E+00	—	—	—
Zn	2.27E-04	1.20E-04	1.13E-04	—	—	—
Cu	7.46E-05	3.96E-05	3.71E-05	—	—	—
Sb	1.43E-01	7.57E-02	7.09E-02	—	—	—
Pb	9.38E-03	4.97E-03	4.66E-03	2.41E-08	6.37E-08	5.97E-08
Cr	3.15E-01	1.67E-01	1.56E-01	3.24E-05	8.57E-05	8.02E-05
Co	8.76E-01	4.64E-01	4.34E-01	4.20E-06	1.11E-05	1.04E-05
Ni	7.28E-05	3.85E-05	3.61E-05	1.08E-07	2.86E-07	2.68E-07

大学城大气 $PM_{2.5}$ 中的重金属 Cr 和 Co 会对 3 类人群产生可容忍的致癌风险（$1\times10^{-6}\leqslant ILCR<1\times10^{-4}$），并且 Cr 的致癌风险大于 Co，而 Ni 和 Pb 的致癌风险可忽略（$ILCR<10^{-6}$）. 对比发现本研究中 Ni 的致癌风险小于天津（5.32×10^{-6}）[23]. 与非致癌风险评价结果相反，重金属元素对成年男性的致癌风险最大，其次是成年女性，对儿童的致癌风险最小.

2.2.4　元素来源解析

通过对该区域大气 $PM_{2.5}$ 中元素的主成分分析得到了 3 个因子（见图 4），这 3 个因子解释了 90.94% 的总方差. 主成分 1 载荷为 70.80%，除 Cr 元素载荷为 0.71，Cu 元素载荷为 0.83 外，其他元素（Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Fe、Ti、Mn、Ba、V、Co、Ni 和 Rb）载荷均大于 0.90. 如前所述，Ca、Si、Fe 和 Al 均为典型的地壳元素[3,5,10,11,25,26]. Na、Mg、K、Ti、Mn、Ba、V、Co、Ni、Cu、Rb 和 Cr 也可能来源于天然矿物粉尘和城市扬尘[1~3,5,6,10,11,25,26]. 因此，主成分 1 被认为是天然矿物粉尘和城市扬尘来源. 主成分 2 载荷为 14.50%，其中负载最高的元素为 Cl（0.95），其次是 Pb（0.93）和 Zn（0.89）. Cl 是燃煤、燃油和机动车排放的特征标识物[14]. 有研究表明，Pb 和 Zn 也与交通排放和工业燃煤有关[1~3,5,6,11,13,25]. 因此主成分 2 为煤燃烧和交通排放. 主成分 3 的方差贡献率为 5.64%，元素 Sb 的相关系数最高（0.65）. Sb 通常以添加剂（Sb_2S_3）的形式加入到刹车片中，可作为非废气排放交通源（制动衬片，离合器和轮胎的磨损）的示踪元素[22,23,30,31]. 因此，因子 3 代表非尾气排放的交通源.

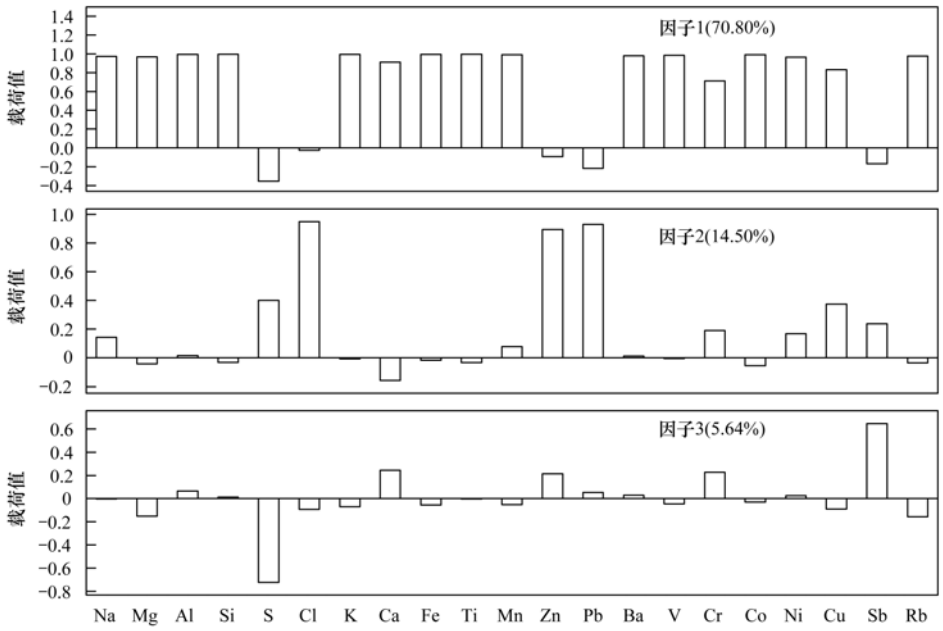

图 4　山西大学城 $PM_{2.5}$ 中元素主成分分析结果

Fig. 4　Principal component analysis results of elements in $PM_{2.5}$ in Shanxi University Town

采用正定矩阵因子分解模型（PMF）解析得到 4 个因子（图 5）. 因子 1 对元素 Mg 和 Rb 的贡献值最高，且对除 S、Cl、Zn、Pb 和 Sb 以外的每种元素也都有较高的贡献，同 PCA 解析得到的因子 1 一致，判断为天然矿物粉尘和城市扬尘来源. 该因子对山西大学城大气 $PM_{2.5}$ 中元素的贡献率最高（49.50%）. 因子 2 对元素 Sb 的贡献值最高，对 Cr 和 Ba 等元素也具有较高的贡献. Sb 和 Ba 都可通过机动车刹车及轮胎的磨损释放到大气中[7,22,23,30,31]，因此判断因子 2 为非尾气排放的交通源. 因子 3 对 Cl、Zn 和 Pb 有较高的贡献值. 如上所述 Cl、Zn 和 Pb 来源于煤燃烧和交通排放，因此判断因子 3 为煤燃烧和交通排放源. 因子 4 对山西大学城大气 $PM_{2.5}$ 中元素的贡献率最低（5.30%），其中元素 S 的贡献值最高. S 主要来源于含硫煤的燃烧[13]，因此判断因子 4 为燃煤源. 应用 PMF 计算得到的重金属来源解析结果，与 PCA 基本一致.

刘旭辉等[16]对 2016 年太原市 $PM_{2.5}$ 中重金属的来源分析表明，燃煤、钢铁冶金和机械工业是 $PM_{2.5}$ 中重金属的主要来源，其次是机动车排放、沙尘、地面扬尘和水泥尘. 刘喆等[19]针对 2017 ~ 2018 年太原市城区的研究表明，非采暖季 $PM_{2.5}$ 中金属及类金属的主要来源为土壤扬尘、建筑扬尘及冶金扬尘，而在采暖季生物质燃烧源贡献增大. 与太原市相比，城市扬尘对山西大学城大气 $PM_{2.5}$ 中元素的含量影响较大，需进一步强化对该区域城市扬尘的综合

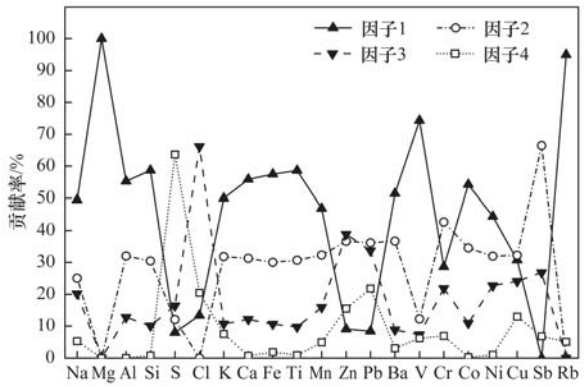

图 5 山西大学城 $PM_{2.5}$ 中元素正定矩阵因子分解结果

Fig. 5 Positive matrix factorization results of elements in $PM_{2.5}$ in Shanxi University Town

整治.

3 结论

(1)山西大学城 $PM_{2.5}$ 中 21 种元素中 Ca 质量浓度最高,其次是 Si、Fe、Al、S、K 和 Cl,这 7 种元素占元素总质量浓度的 95.71%. 其中,Cr 元素浓度超过我国环境空气质量标准年平均浓度限值的 104 倍. 春季、夏季和冬季 $PM_{2.5}$ 中 Ca 质量浓度最高,而秋季 S 元素质量浓度最高.

(2)重金属元素健康风险评估结果表明,研究区域 $PM_{2.5}$ 中具有非致癌风险的元素为 Mn,且每种元素对人体的危害均表现为儿童 > 成年男性 > 成年女性;会对人体产生可容忍的致癌风险的元素为 Cr 和 Co,且 Cr 的致癌风险大于 Co. 与非致癌风险不同,重金属元素对人体的致癌风险表现为成年男性 > 成年女性 > 儿童.

(3)主成分分析和正定矩阵因子分析结果表明,山西大学城 $PM_{2.5}$ 中元素主要来源包括:天然矿物粉尘和城市扬尘、燃煤和交通源.

参考文献:

[1] Liu P P, Zhang Y L, Wu T T, *et al*. Acid-extractable heavy metals in $PM_{2.5}$ over Xi'an, China: seasonal distribution and meteorological influence [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(33): 34357-34367.

[2] Liu K K, Shang Q M, Wan C Y, *et al*. Characteristics and sources of heavy metals in $PM_{2.5}$ during a typical haze episode in rural and urban areas in Taiyuan, China [J]. Atmosphere, 2018, **9**(1): 2.

[3] Ye Z L, Liu J S, Gu A J, *et al*. Chemical characterization of fine particulate matter in Changzhou, China, and source apportionment with offline aerosol mass spectrometry [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, **17**(4): 2573-2592.

[4] Zhang B Y, Zhou T, Liu Y, *et al*. Comparison of water-soluble inorganic ions and trace metals in $PM_{2.5}$ between online and offline measurements in Beijing during winter[J]. Atmospheric Pollution Research, 2019, **10**(6): 1755-1765.

[5] Galon-Negru A G, Olariu R I, Arsene C. Size-resolved measurements of $PM_{2.5}$ water-soluble elements in Iasi, north-eastern Romania: seasonality, source apportionment and potential implications for human health [J]. Science of the Total Environment, 2019, **695**: 133839.

[6] Jena S, Perwez A, Singh G. Trace element characterization of fine particulate matter and assessment of associated health risk in mining area, transportation routes and institutional area of Dhanbad, India[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, **41**(6): 2731-2747.

[7] 吴志成. 济南城区大气 $PM_{2.5}$ 中痕量元素的来源及健康风险研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
Wu Z C. Research of $PM_{2.5}$-bound trace elements in urban site in Ji'nan: source apportionment and health risks[D]. Ji'nan: Shandong University, 2016.

[8] 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.

[9] 闫广轩, 张朴真, 黄海燕, 等. 郑州-新乡冬季 $PM_{2.5}$ 中元素浓度特征及其源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2027-2035.
Yan G X, Zhang P Z, Huang H Y, *et al*. Concentration characteristics and source analysis of $PM_{2.5}$ during wintertime in Zhengzhou-Xinxiang[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2027-2035.

[10] Shaltout A A, Boman J, Hassan S K, *et al*. Elemental composition of $PM_{2.5}$ aerosol in a residential-industrial area of a Mediterranean megacity [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2020, **78**(1): 68-78.

[11] Liu J W, Chen Y J, Chao S H, *et al*. Emission control priority of $PM_{2.5}$-bound heavy metals in different seasons: a comprehensive analysis from health risk perspective[J]. Science of the Total Environment, 2018, **644**: 20-30.

[12] Gao Y, Ji H B. Microscopic morphology and seasonal variation of health effect arising from heavy metals in $PM_{2.5}$ and PM_{10}: one-year measurement in a densely populated area of urban Beijing [J]. Atmospheric Research, 2018, **212**: 213-226.

[13] 刘可可, 张红, 刘桂建. 合肥市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素组成特征及重污染成因分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3415-3420.
Liu K K, Zhang H, Liu G J. Elemental composition characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10}, and heavy pollution analysis in Hefei[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3415-3420.

[14] 张红, 黄勇, 宋浩冉, 等. 铜陵市冬春季 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中元素特征及来源分析[J]. 装备环境工程, 2019, **16**(6): 92-98.
Zhang H, Huang Y, Song H R, *et al*. Characteristics and sources of elements in PM_{10} and $PM_{2.5}$ during spring and winter in Tongling city[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, **16**(6): 92-98.

[15] 刘威杰, 石明明, 程铖, 等. 夏季大气 $PM_{2.5}$ 中元素特征及源解析: 以华中地区平顶山-随州-武汉为例[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 23-30.
Liu W J, Shi M M, Cheng C, *et al*. Characteristics and sources of elements in $PM_{2.5}$ during summer for three typical cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, central China[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 23-30.

[16] 刘旭辉，郭建娥，马利刚，等. 2016 年太原市空气 $PM_{2.5}$ 中重金属元素来源分析[J]. 预防医学论坛，2017，**23**(8)：564-567.
Liu X H, Guo J E, Ma L G, *et al*. Analysis on source of heavy metal elements in $PM_{2.5}$, Taiyuan city, 2016[J]. Preventive Medicine Tribune, 2017, **23**(8): 564-567.

[17] 刘素，马彤，杨艳，等. 太原市冬季 $PM_{2.5}$ 化学组分特征与来源解析[J]. 环境科学，2019，**40**(4)：1537-1544.
Liu S, Ma T, Yang Y, *et al*. Chemical composition characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ during winter in Taiyuan[J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1537-1544.

[18] 吕佳莉，李萌，解静芳，等. 太原城区 $PM_{2.5}$ 重金属元素季节变化及形态分析[J]. 环境科学与技术，2016，**39**(4)：126-131.
Lv J L, Li M, Xie J F, *et al*. Seasonal variation and chemical speciation analysis of heavy metal pollution in $PM_{2.5}$ from urban area of Taiyuan[J]. Environmental Science & Technology, 2016, **39**(4): 126-131.

[19] 刘喆，刘柳，杨一兵，等. 太原市城区大气 $PM_{2.5}$ 中元素污染特征及其来源解析[J]. 光谱学与光谱分析，2019，**39**(5)：1593-1598.
Liu Z, Liu L, Yang Y B, *et al*. Characteristics and sources analysis of element in ambient $PM_{2.5}$ in Taiyuan city[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, **39**(5): 1593-1598.

[20] 武媛媛. 运城市大气细颗粒物($PM_{2.5}$)化学组成特征研究[D]. 太原：太原理工大学，2017.
Wu Y Y. Chemical composition characteristics of fine particulate matter ($PM_{2.5}$) in Yuncheng[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.

[21] Mu L, Tian M, Zheng L R, *et al*. Characterisation and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon in an urban-rural fringe area of Taiyuan, China[J]. Environmental Chemistry, 2019, **16**(3): 187-196.

[22] 何瑞东，张轶舜，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.

[23] 张启钧，吴琳，方小珍，等. 天津典型道路环境 $PM_{2.5}$ 中重金属的粒径分布及健康风险评价[J]. 环境污染与防治，2019，**41**(10)：1202-1206.
Zhang Q J, Wu L, Fang X Z, *et al*. Particle size distribution and health risk assessment of heavy metals in $PM_{2.5}$ in typical road environment in Tianjin[J]. Environmental Pollution and Control, 2019, **41**(10): 1202-1206.

[24] GB 3095-2012，环境空气质量标准[S].

[25] Bi C L, Chen Y T, Zhao Z Z, *et al*. Characteristics, sources and health risks of toxic species (PCDD/Fs, PAHs and heavy metals) in $PM_{2.5}$ during fall and winter in an industrial area[J]. Chemosphere, 2020, **238**: 124620.

[26] Xu J W, Martin R V, Henderson B H, *et al*. Simulation of airborne trace metals in fine particulate matter over North America[J]. Atmospheric Environment, 2019, **214**: 116883.

[27] 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.

[28] Mu L, Zheng L R, Liang M S, *et al*. Characterization and source analysis of water-soluble ions in atmospheric particles in Jinzhong, China[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2019, **19**(11): 2396-2409.

[29] 莫招育，杜娟，刘慧琳，等. 桂林市冬季大气 $PM_{2.5}$ 中重金属污染物健康风险评估[J]. 环境监测管理与技术，2019，**31**(4)：23-27.
Mo Z Y, Du J, Liu H L, *et al*. Health risk assessment of heavy metals in atmospheric $PM_{2.5}$ during winter in Guilin[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2019, **31**(4): 23-27.

[30] Juda-Rezler K, Reizer M, Maciejewska K, *et al*. Characterization of atmospheric $PM_{2.5}$ sources at a Central European urban background site[J]. Science of the Total Environment, 2020, **713**: 136729.

[31] Yatkin S, Gerboles M, Belis C A, *et al*. Representativeness of an air quality monitoring station for $PM_{2.5}$ and source apportionment over a small urban domain[J]. Atmospheric Pollution Research, 2020, **11**(2): 225-233.

HUANJING KEXUE Vol. 41 No. 11
Environmental Science (monthly) Nov. 15, 2020

CONTENTS

Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory in China ····· LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, XU Jian-tie, *et al.* (4767)
Contribution of Emissions from Cement to Air Quality in China ····· TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, *et al.* (4776)
Audit Indicators and Suggested Ranges for Data Validation of Chemical Components in Ambient $PM_{2.5}$: A Case Study of the Yangtze River Delta ····· ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, *et al.* (4786)
Size Distribution of Particulate Chemical Components in Nanjing Jiangbei New Area ····· ZHANG Yu-xiu, YU Xing-na, LIU Si-jia, *et al.* (4803)
Seasonal Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Zhengzhou ····· ZHANG Jian-fei, JIANG Nan, DUAN Shi-guang, *et al.* (4813)
Characteristics, Sources, and Health Risks of Elements in $PM_{2.5}$ in Shanxi University Town ····· LI Xue-mei, MU Ling, TIAN Mei, *et al.* (4825)
Spatio-temporal Evolution of $PM_{2.5}$ Concentration During 2000-2019 in China ····· XIA Xiao-sheng, WANG Jun-hong, SONG Wei-dong, *et al.* (4832)
Differences in Pollution Characteristics Under the Southerly and Easterly Wind in Beijing ····· YIN Xiao-mei, QIAO Lin, ZHU Xiao-wan, *et al.* (4844)
Transport Characteristics of Air Pollution in Tianjin Based on Weather Background ····· CAI Zi-ying, YAN Xu, HAN Su-qin, *et al.* (4855)
Influence of Meteorological Conditions on Ozone Pollution at Shangdianzi Station Based on Weather Classification ····· WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, *et al.* (4864)
Accurate Identification of Ambient VOCs Emission Sources in an Industrial Park Using On-Line Monitoring Data ····· SUN Jia-ning, XIE Shao-dong (4874)
Characteristics, Atmospheric Reactivity, and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Wuhu ····· GAO Kang, ZHANG Hui, LIU Meng-di, *et al.* (4885)
Water Quality Response to Landscape Pattern at Different Spatial Scales in Baihe River in the Upper Reaches of the Miyun Reservoir ··· ZHANG Wei-wei, LI Xiao-na, WANG Chao, *et al.* (4895)
Concentration and Carbon Isotope Composition of DOC and DIC in the Miyun Reservoir Watershed in Summer ····· CHEN Ji-ji, GUO Jing, XU Su-shi, *et al.* (4905)
Variation and Driving Factors of Black Water Event Intensity in Lake Taihu During 2009 to 2018 ····· XIN Hua-rong, ZHU Guang-wei, WANG Xue-song, *et al.* (4914)
Hydrogeochemical Investigations of Groundwater in the Lingbei Area, Leizhou Peninsula ····· ZHANG Hong-xin, WU Ya, LUO Wei-yu, *et al.* (4924)
Source of Groundwater Nitrate in Luanping Basin Based on Multi-environment Media Nitrogen Cycle and Isotopes ····· SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, JIA Feng-chao, *et al.* (4936)
Metal Distributions and Human Health Risk Assessments on Waters in the Huixian Karst Wetland, China ····· LI Jun, ZOU Sheng-zhang, LIANG Yong-ping, *et al.* (4948)
Absorption and Three Dimensional Fluorescence Spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve ····· ZHANG Wen-hao, ZHAO Duo-lin, WANG Xiao-yu, *et al.* (4958)
Effect of Heavy Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Rivers at River-net Plain ····· LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, *et al.* (4970)
Risk Ranking of Endocrine Disrupting Compounds, Pharmaceuticals, and Personal Care Products in the Aquatic Environment of the Yangtze River Basin ····· SU Chao, CUI Yan (4981)
Sources and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Jiaxing River Network ····· YANG Yan-mei, ZHAO Hang-chen, MENG Rui, *et al.* (4989)
Impact of a Sewage Treatment Plant on the Accumulation of Microplastics in Freshwater Organisms in the Lijiang River of the Guilin Urban Section ····· XIE Yuan-shan, ZHANG Qing-ke, ZHANG Li-shan, *et al.* (4999)
Distribution of Antibiotic Concentration in Domestic Wastewater Treatment Facilities in Villages and Towns ····· LU Ya-nan, GUO Ya-ni, WANG Kun, *et al.* (5008)
Microbial Diversity and Influencing Factors in a Small Watershed in Winter ····· ZHU Jin-shan, QIN Hai-lan, SUN Qi-yao, *et al.* (5016)
Characteristics of Organic Matter in Sediments During the Thermal Stratification of a Reservoir and Effects on an Aerobic Denitrifier ····· WANG Tong, WEN Gang, HUANG Ting-lin, *et al.* (5027)
Microbial Diversity Analysis of WWTPs Based on Hybrid-MBBR Process in a Low Temperature Season in the Yangtze River Delta ····· HAN Wen-jie, WU Di, ZHOU Jia-zhong, *et al.* (5037)
Effects of Phytoplankton Classifications on the Relationship Between Phytoplankton Community and Environment in Summer Subtropical Reservoirs, Southern China ····· GUO Fang, GU Ji-Guang, ZHAO Jian, *et al.* (5050)
Remote Sensing Classification of Urban Black-odor Water Based on Decision Tree ····· LI Ling-ling, LI Yun-mei, LÜ Heng, *et al.* (5060)
Enhanced Membrane Anti-fouling Ability of Anaerobic Membrane Bioreactor Equipped with Bio-electrochemical System Using Nano-zero-valent Iron and Its Regulation Mechanism ····· PAN Yang, NIU Cheng-xin, ZHI Zhong-xiang, *et al.* (5073)
Effects of Temperature and Substrate Concentration on N_2O Release of ANAMMOX Process ····· WANG Si-ke, YU Heng, ZUO Jian-e (5082)
Characteristics of Nutrient Removal in a Pilot-scale A^2/O with Mixture of Sludge Fermentation Liquor and Tail Water as External Carbon Source ····· RONG Yi, SHAO Jin-bo, YU You-cheng, *et al.* (5089)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Operation of a Continuous-Flow Reactor with Partial Nitrification Granules ····· ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, *et al.* (5097)
Effects of Mesophilic Anaerobic Digestion and Thermophilic Anaerobic Digestion on the Risk and Stability of Heavy Metals in Sludge ····· TIAN Zhong-ke, WANG Fen, YAN Zhao (5106)
Quantitative Evaluation of Human Health Risk of Heavy Metals in Soils Based on Positive Matrix Factorization Model and Geo-statistics ····· HAN Lin, XU Xi-bo (5114)
Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in the Soil of Redevelopment Industrial Sites ····· SHEN Cheng, LIU Fu-wen, WU Jian, *et al.* (5125)
Investigating Adsorption of Naphthalene to Organo-Modified Montmorillonites and Influencing Factors ····· HOU Jing-wen, SHI Wei-lin, GAO Juan (5133)
Effects of Ferrous Sulfate and Ferric Nitrate on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System ····· LI Yi-chun, CHEN Yong, TANG Ming-deng, *et al.* (5143)
Effects of Intercropping of *Brassica chinenesis* L. and *Tagetes patula* L. on the Growth and Cadmium Accumulation of Plants ····· YAN Xiu-xiu, XU Ying-ming, WANG Lin, *et al.* (5151)
Effects of Heavy Metal-immobilizing Bacteria on Reducing Wheat Uptake Cd by Regulation Soil Iron Oxides ····· WANG Xiao-yu, HAN Hui (5160)
Sustained Effects of Remediation Materials on Soil Copper Remediation Under Oil-Rice Rotation ····· ZHAO Ying-ying, LI Hong-chuan, HU Hong-xiang, *et al.* (5168)
Impacts of Nitrogen Application on Ammonia Volatilization During Maize Season in Northern China ····· ZHANG Wei, NI Bang, XU Xiu-chun, *et al.* (5176)
Effect of Biochar on Changes of the Temperature Sensitivity of Soil Respiration and Bacterial Community Structure ····· CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, *et al.* (5185)
Effects of Heavy Metal Contents on Phyllosphere and Rhizosphere Fungal Communities for *Bothriochloa ischaemum* in Copper Tailings Area ····· JIA Tong, GUO Ting-yan, WANG Rui-hong, *et al.* (5193)
Advances in Microbe-Derived Taste and Odor Compounds in Typical Aquatic Ecosystems ····· ZHANG Hai-han, MIAO Yu-tian, HUANG Ting-lin, *et al.* (5201)