

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化 薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)

北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源 周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)

利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布 刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)

兰州城区大气 PM_{2.5} 污染特征及来源解析 王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)

成都市西南郊区春季大气 PM_{2.5} 的污染水平及来源解析 林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)

中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征 刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)

固定源排放污染物健康风险评价方法的建立 陈强,吴焕波(1646)

北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试 胡月琪,邬晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)

南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价 王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金霞(1662)

CoCuMnO₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学 孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)

大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化 张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)

典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征 史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)

利用 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 示踪北京城区河流硝酸盐来源 赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)

柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析 王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)

三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)

亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究 王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)

平原河网典型污染物生物降解系数的研究 冯帅,李叙勇,邓建才(1724)

沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例 张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)

苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素 任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)

河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价 王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)

顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价 蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)

台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险 陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)

乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素 黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芙宁,张连凯,苏春田(1779)

岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例 王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)

广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素 黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)

基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(*Bacteroides*) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例 张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)

典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征 梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)

钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成 刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)

天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究 丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)

臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素 董秉直,张佳丽,何畅(1837)

污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析 程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)

HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学 郭俊元,王彬(1852)

放射性废水处理中吸附剂的势优势藻种筛选 李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)

微米 Fe₃O₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究 钱旭,王毅力,赵丽(1864)

间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能 宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)

不同灌溉方式对华北平原冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的影响 郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)

卫河新乡市区段春季溶解 CH₄ 与 N₂O 浓度特征 侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)

模拟气沉降对内蒙古克氏针茅草原 N₂O 排放的影响 杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)

土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制 曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)

黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局 高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)

耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响 史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)

北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险 赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)

准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析 刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)

纳米 TiO₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响 张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)

纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学 马少云,祝方,商执峰(1953)

低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响 宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)

粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响 黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)

萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析 王亚男,程立娟,周启星(1978)

高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响 郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)

磺胺抗性消长与堆肥进程的交互特征 林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)

《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)

兰州城区大气 PM_{2.5} 污染特征及来源解析

王新¹, 聂燕¹, 陈红¹, 王博², 黄韬³, 夏敦胜^{1*}

(1. 兰州大学资源环境学院, 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 3. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要: 为探究兰州城区 PM_{2.5} 的污染特征及其来源, 分别在兰州市城关区和西固区设置 PM_{2.5} 采样点, 于 2013 年 10 月 (非采暖期) 和 12 月 (采暖期) 采集样品并进行分析, 得到了 PM_{2.5} 及其 16 种化学组成的质量浓度. 结果表明, 兰州城区 PM_{2.5} 污染水平较高, 平均质量浓度为 129 μg·m⁻³. 样品无机元素平均质量浓度为: S > Ca > Fe > Al > Mg > Pb > Zn > Mn > Ti > Cu, 其中 S、Ca、Fe、Al 的质量浓度在 1 μg·m⁻³ 以上, 是主要元素组分; 样品各无机元素质量浓度表现为采暖期高于非采暖期, 城关区高于西固区. 样品水溶性离子平均质量浓度为: SO₄²⁻ > NO₃⁻ > NH₄⁺ > Cl⁻ > K⁺ > Na⁺, 其中 SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺ 的质量浓度在 10 μg·m⁻³ 以上, 是主要离子组分; 样品各水溶性离子质量浓度表现为采暖期高于非采暖期, 西固区高于城关区. 富集因子 (EF) 分析结果表明, 元素 Al、Ca、Mg、Ti 的 EF 值均小于 1 以自然来源为主; 元素 Cu、Pb、S、Zn 的 EF 值显著大于 10, 表明这 4 种元素在 PM_{2.5} 中高度富集, 且主要源于人为活动造成的污染. 主成分分析结果表明, 交通排放源、生物质燃烧源、土壤源和二次粒子对兰州城区大气 PM_{2.5} 贡献显著.

关键词: 兰州; PM_{2.5}; 污染特征; 富集因子; 主成分分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1619-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.05.004

Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM_{2.5} in Lanzhou City

WANG Xin¹, NIE Yan¹, CHEN Hong¹, WANG Bo², HUANG Tao³, XIA Dun-sheng^{1*}

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, College of Earth and Environment Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. College of Earth and Environment Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to understand the characteristics and sources of PM_{2.5} pollutant in Lanzhou City, two PM_{2.5} sampling sites were set up in Chengguan district and Xigu district, respectively. Samples were sampled during October (non-heating period) and December (heating period) 2013, and mass concentrations of PM_{2.5} and its 16 kinds of chemical components were analyzed. The results showed that the average mass concentration of PM_{2.5} during the sampling period was 129 μg·m⁻³. The sequence of mass concentrations of inorganic elements was: S > Ca > Fe > Al > Mg > Pb > Zn > Mn > Ti > Cu, while the mass concentrations of S, Ca, Fe, and Al, which were the major element compositions, exceeded 1 μg·m⁻³. The mass concentration of inorganic elements during heating period was higher than that during non-heating period, meanwhile, the mass concentration in Chengguan district was higher than that in Xigu district. The sequence of mass concentrations of water-soluble ions was: SO₄²⁻ > NO₃⁻ > NH₄⁺ > Cl⁻ > K⁺ > Na⁺, while the mass concentrations of SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, which were the main ion components, exceeded 10 μg·m⁻³. The mass concentration of water-soluble ions during heating period was higher than that during non-heating period, meanwhile, the mass concentration in Xigu district was higher than that in Chengguan district. The result of enrichment factor (EF) analysis showed that the EF values of Al, Ca, Mg and Ti were lower than 1, indicating the contribution of natural source, while the EF values of Cu, Pb, S and Zn were higher than 10, indicating the contribution of anthropogenic pollution. The result of principal component analysis showed that the sources of PM_{2.5} were mainly derived from traffic emission, biomass burning, soil and secondary particles.

Key words: Lanzhou; PM_{2.5}; pollution characteristics; enrichment factor; principal component analysis

随着城市工业化进程的加快,经济的快速增长以及汽车保有量的增加,我国各大城市大气污染的状态和性质也正发生着显著的变化.传统大气污染物 TSP 和 SO₂ 得到了很好地控制,而大气灰霾、雾霾等新型复合污染问题日趋严重^[1,2]. PM_{2.5} (particulate matter 2.5) 由于其粒径小,重量轻,可在大气中长时间滞留,亦可被大气环流输送到很远的地方,是形成大气区域复合型污染的主要原因^[2];

再者,由于 PM_{2.5} 具有较大的比表面积,容易富集大量有毒有害物质,且可通过呼吸道进入人体肺泡,从而导致严重的人类健康问题^[3]. 因此,PM_{2.5} 成为近年来大气环境研究的热点问题之一. 而有关城市大

收稿日期: 2015-11-30; 修订日期: 2015-12-26

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (lzujbky-2013-m03, lzujbky-2015-225)

作者简介: 王新 (1992 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为城市污染与环境磁学, E-mail: xwang_10@lzu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: dsxia@lzu.edu.cn

气 $PM_{2.5}$ 污染特征以及来源的研究,对有效控制城市空气污染有着重要的意义。

至今,在大气 $PM_{2.5}$ 污染特征方面,国内外学者通过深入研究已积累了大量数据^[4~12]. Salameh 等^[4]通过对欧洲 5 个地中海城市 $PM_{2.5}$ 为期 1 a 的监测,发现 $PM_{2.5}$ 浓度具有明显的季节性差异,各城市 $PM_{2.5}$ 浓度高值所在季节不一致,且在 $PM_{2.5}$ 浓度水平相近时其化学组成也显著不同;在我国 $PM_{2.5}$ 浓度普遍为冬季高夏季低, $PM_{2.5}$ 的日变化呈双峰型,高峰出现在早晚上下班时间段^[5,6],雷瑜等^[7]和 Shi 等^[8]还发现 $PM_{2.5}$ 有明显的周末效应;此外,针对城市不同功能区^[9]、不同垂直高度^[10]、室内外^[11]以及单颗粒^[12]等的 $PM_{2.5}$ 污染特征分析也有涉及. 而在 $PM_{2.5}$ 主要污染来源方面,学者们也进行了比较全面的研究^[13~24]. 目前用于 $PM_{2.5}$ 来源解析的方法主要为基于环境的受体模型,包括化学质量平衡法 (CMB)^[13,14]、正定矩阵因子分析法 (PMF)^[5,15]、主成分分析法 (PCA)^[16,17]、多元线性回归法 (MLR)^[16]、富集因子法 (EF)^[17] 和有机物示踪^[18]等. 国外学者 Gummeneni 等^[13]对印度海得拉巴的 $PM_{2.5}$ 使用 CMB 分析表明,其污染来源及贡献率依次为汽车尾气排放 31%、再悬浮颗粒 26%、燃烧 9%、工业 7% 和垃圾焚烧 6%; Karnae 等^[15]对德克萨斯州南部工业化沿海城市 Corpus Christi 的 $PM_{2.5}$ 进行了来源解析,通过 PMF 得出:二次硫酸盐为空气污染的最主要来源且贡献率为 30.4%; Vallius 等^[16]使用 PCA 和 MLR 法对芬兰赫尔辛基的大气 $PM_{2.5}$ 来源进行了分析,并且认为该方法在来源识别和估计源贡献率方面非常有用. 国内众多学

者应用不同受体模型分别对我国一些城市如西安^[5]、北京^[19]、天津^[20]、成都^[21]、青岛^[22]、乌鲁木齐^[23]等地的 $PM_{2.5}$ 进行详细源解析,识别出了对当地大气 $PM_{2.5}$ 有突出贡献的污染源类型.

兰州是甘肃省会城市,地处北纬 $36^{\circ}03'$,东经 $103^{\circ}40'$,位于陇西黄土高原的西部. 地势西南高,东北低,市区南北群山环抱,东西黄河穿城而过,形成了峡谷、盆地相间的狭长串珠形河谷. 兰州河谷盆地内气流闭塞,静风和逆温频率高,不利于内源污染物扩散,加上周边区域外源沙尘的输送,从而造成严重的大气污染^[24,25]. 学者们对兰州市大气颗粒污染物的研究已做过不少工作^[24~30],但目前,这些研究工作多偏重于总悬浮颗粒 (TSP)^[25]、降尘^[26,27]和飘尘^[28,29]等,仅少数学者对 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化做了分析^[30],缺少对兰州市大气 $PM_{2.5}$ 深入全面的研究,关于兰州大气 $PM_{2.5}$ 来源解析的研究尚未见报道. 为此本研究在采集和测试兰州城区大气 $PM_{2.5}$ 质量浓度、无机元素及水溶性离子的基础上,分析兰州城区大气 $PM_{2.5}$ 及其组分污染特征,并应用颗粒物源解析受体模型中富集因子法 (EF) 和主成分分析法 (PCA) 定性和半定量解析兰州城区大气 $PM_{2.5}$ 的主要来源,以期为制定兰州市大气污染防治规划提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

综合考虑兰州市主导风向、功能区分布、人口密度及环境敏感度等因素,选取城关区 (商业居民混合区) 兰州大学和西固区 (工业区) 兰苑宾馆作为 $PM_{2.5}$ 环境受体采样点 (图 1),采样高度分别为 10 m



图 1 兰州城区大气 $PM_{2.5}$ 采样点示意

Fig. 1 Sampling sites of $PM_{2.5}$ in Lanzhou City

和 12 m. 两采样点周围 2 km 内均无明显高大建筑物, 其中兰州大学点位靠近兰州交通主干道天水南路. 采样仪器为武汉市天虹仪表有限责任公司产 TH-150A 型智能中流量大气采样器, 流量 100 L·min⁻¹, 采用英国 Whatman φ90 mm 石英纤维滤

膜. 样品采集于 2013 年非采暖期(10 月)和采暖期(12 月), 每期各点位连续采集 7 d, 单次采样时间从当天 09:00 至次日 08:00, 同时记录大气压、平均温度和标况体积等气象条件(表 1), 共收集 PM_{2.5} 样品 28 个.

表 1 采样期间气象条件

Table 1 Meteorological conditions during sampling period

时间	地区	风速/m·s ⁻¹	温度/°C	相对湿度/%	大气压/kPa
非采暖期	城关区	0.10	11.90	47.85	84.98
	西固区	0.42	10.84	47.72	84.47
采暖期	城关区	0.11	-0.54	42.37	85.12
	西固区	0.36	-1.52	46.48	84.59

1.2 样品分析

PM_{2.5} 的质量浓度经采样前后滤膜的重量差和标况采样体积之比计算获得. 采样前后均将滤膜在恒温恒湿环境下放在干燥器中平衡 24 h 后称重, 分析天平的感量为 0.01 mg, 每张滤膜非连续称量 10 次取平均值.

对 PM_{2.5} 样品中 10 种无机元素和 6 种水溶性离子进行了分析. 无机元素包括 Al、Ca、Cu、Fe、Mg、Mn、Pb、S、Ti、Zn 等, 采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-OES, 型号 VISTA-MPX, 美国 Varian 公司); 水溶性离子包括 Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻ 等, 采用离子色谱仪(IC, 型号 Dionex ICS-1500, 美国 Dionex 公司). 以上实验在兰州大学资源环境学院完成.

1.3 源解析研究方法

富集因子法(enrichment factor, EF)由 Gorden 于 1974 年首先提出, 可用于研究气溶胶中元素的富集程度, 判断和评价大气气溶胶中元素的自然来源和人为来源. 其公式为:

$$EF = \frac{(c_i/c_R)_{\text{气溶胶}}}{(c'_i/c'_R)_{\text{地壳}}}$$

式中, c_i 为气溶胶中所研究的第 i 种元素的浓度; c_R 为气溶胶中选定的参比元素 R 的浓度; c'_i 为地壳中 i 元素的浓度; c'_R 为地壳中参比元素 R 的浓度. 当 $EF > 10$, 表明该元素被富集, 主要来源于人类活动导致的各种污染; $10 \geq EF > 1$, 说明颗粒物中该元素部分来源于人为污染, 部分来源于土壤; $EF \leq 1$, 则表明该元素主要来源于土壤或岩石风化产生的尘埃^[31].

主成分分析法(principal component analysis, PCA)是一种基于统计特征的多维正交线性变换, 常用来对信号进行特征提取和对数据进行降维^[32]. 由于与污染源有关的变量之间存在着某种相关性,

在不损失主要信息的前提下, 可用少量有代表性的变量(主成分)来说明多个变量所提供的信息. 方法是根据组成成分之间的相关关系, 从全局变量数据中综合、归纳公因子, 计算出各个因子载荷, 根据因子载荷大小和污染源特征元素, 推断可能的污染源类型. 本研究中样品组成成分的相关性分析和主成分分析在统计分析软件 SPSS 19.0 中进行.

2 结果与分析

2.1 兰州城区大气 PM_{2.5} 质量浓度

表 2 为兰州城区 PM_{2.5} 及其化学组分质量浓度的统计结果, 整个采样期间兰州城区大气 PM_{2.5} 的质量浓度总体变化范围为 55 ~ 230 μg·m⁻³, 平均值 129 μg·m⁻³, 超出国家二级日标准(GB 3095-2012) 0.72 倍, 全部样品的超标率达 82%, 最大超标倍数 2.07. 非采暖期 PM_{2.5} 质量浓度变化范围为 73 ~ 170 μg·m⁻³, 平均值为 118 μg·m⁻³, 超标倍数 0.57; 采暖期 PM_{2.5} 质量浓度变化范围为 55 ~ 230 μg·m⁻³, 平均值为 141 μg·m⁻³, 超标倍数 0.87. 采暖期相对于非采暖期, PM_{2.5} 平均质量浓度变化范围更大, 质量浓度更高, 说明采暖期 PM_{2.5} 污染程度相对非采暖期更高, 且更容易受到气象和污染源等因素波动的影响.

2.2 兰州城区大气 PM_{2.5} 中无机元素质量浓度

兰州城区 PM_{2.5} 中 10 种无机元素质量浓度结果显示(表 2 和图 2), 采样期内 10 种无机元素质量浓度总值为 11.054 μg·m⁻³, 占 PM_{2.5} 质量的 8.552%; 各元素平均质量浓度大小[图 2(a)]为: S > Ca > Fe > Al > Mg > Pb > Zn > Mn > Ti > Cu, 其中元素 S、Ca、Fe 和 Al 的质量浓度在 1 μg·m⁻³ 以上, 四者质量浓度之和占样品元素总质量浓度的 86.177%, 是样品的主要元素组分. 元素 Mg、Pb、Zn 和 Mn 的质

量浓度在 $1 \sim 0.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,而 Ti、Cu 的浓度则在 $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下. 在时间上[图 2(b)],各无机元素质量浓度均表现为采暖期高于非采暖期;而在

空间上[图 2(c)和图 2(d)],非采暖期和采暖期间,除 S 以外,各无机元素质量浓度表现为城关区高于西固区的现象.

表 2 兰州城区 $\text{PM}_{2.5}$ 及其主要化学组分质量浓度统计

项目	非采暖期 $\rho/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		采暖期 $\rho/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		总体平均 $\rho/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	标准差 $\sigma/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	质量分数 $\omega/\%$
	范围	平均	范围	平均			
$\text{PM}_{2.5}$	73 ~ 170	118	55 ~ 230	141	129	47	
Na^+	0.144 ~ 2.112	0.907	0.598 ~ 2.623	1.441	1.174	0.627	0.908
NH_4^+	6.283 ~ 12.987	9.567	5.563 ~ 18.235	11.931	10.749	3.488	8.316
K^+	0.455 ~ 1.999	1.228	0.617 ~ 3.407	1.675	1.451	0.758	1.123
Cl^-	1.211 ~ 12.797	3.742	1.831 ~ 13.406	8.097	5.920	4.021	4.580
NO_3^-	5.329 ~ 17.805	11.558	3.860 ~ 30.602	14.618	13.088	6.651	10.126
SO_4^{2-}	9.618 ~ 19.140	14.689	5.940 ~ 28.986	16.235	15.462	5.842	11.962
Al	0.012 ~ 1.979	0.927	0.699 ~ 2.629	1.525	1.226	0.639	0.948
Ca	0.410 ~ 5.632	2.396	1.015 ~ 5.647	3.118	2.757	1.401	2.133
Cu	0.002 ~ 0.021	0.009	0.009 ~ 0.079	0.035	0.022	0.023	0.017
Fe	0.415 ~ 4.016	1.601	0.368 ~ 4.430	2.477	2.039	1.181	1.577
Mg	0.034 ~ 1.193	0.639	0.340 ~ 1.118	0.813	0.726	0.327	0.561
Mn	0.028 ~ 0.196	0.094	0.032 ~ 0.285	0.151	0.123	0.074	0.095
Pb	0.071 ~ 0.316	0.162	0.053 ~ 1.338	0.551	0.357	0.363	0.276
S	2.239 ~ 3.962	3.079	0.944 ~ 7.824	3.932	3.506	1.665	2.712
Ti	0.006 ~ 0.075	0.037	0.019 ~ 0.088	0.052	0.045	0.023	0.035
Zn	0.114 ~ 0.272	0.186	0.072 ~ 0.560	0.325	0.256	0.129	0.198
离子之和	24.961 ~ 59.559	41.690	21.680 ~ 90.689	53.997	47.843	21.388	37.015
元素之和	4.479 ~ 15.368	9.131	3.571 ~ 19.828	12.978	11.054	5.824	8.552

对比北京^[33]、杭州^[34]、长沙^[35]和香港^[36]的研究结果发现:这些城市 $\text{PM}_{2.5}$ 中无机元素质量浓度最高的均为 S,这可能与中国的煤烟型硫氧化物污染特征有关,这也表明兰州空气污染同样属于工业煤烟硫酸型污染;兰州城区 $\text{PM}_{2.5}$ 中有 6 种元素(Ca、Fe、Al、Mg、Pb、Mn)的质量浓度偏高,如 Ca 元素质量浓度兰州为 $2.757 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,高于北京的 $1.255 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,杭州的 $1.107 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,远高于长沙和香港的 $0.520 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.440 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;其他 4 种元素(S、Zn、Ti、Cu)的质量浓度在这些城市元素浓度之间或与其相当.

2.3 兰州城区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子质量浓度

兰州市 $\text{PM}_{2.5}$ 中 6 种水溶性离子质量浓度结果显示(表 2 和图 3),采样期内全市水溶性离子质量浓度总值为 $47.843 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量的 37.015%;各离子总体平均质量浓度[图 3(a)]依次为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Na}^+$,其中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 的质量浓度在 $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,三者质量浓度之和占离子总质量浓度的 82.140%,是样品的主要离子组分; Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 则小于 $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 时间上[图 3(b)],水溶性离子质量浓度呈现出采暖期高于非采暖期的现象;但同无机元素

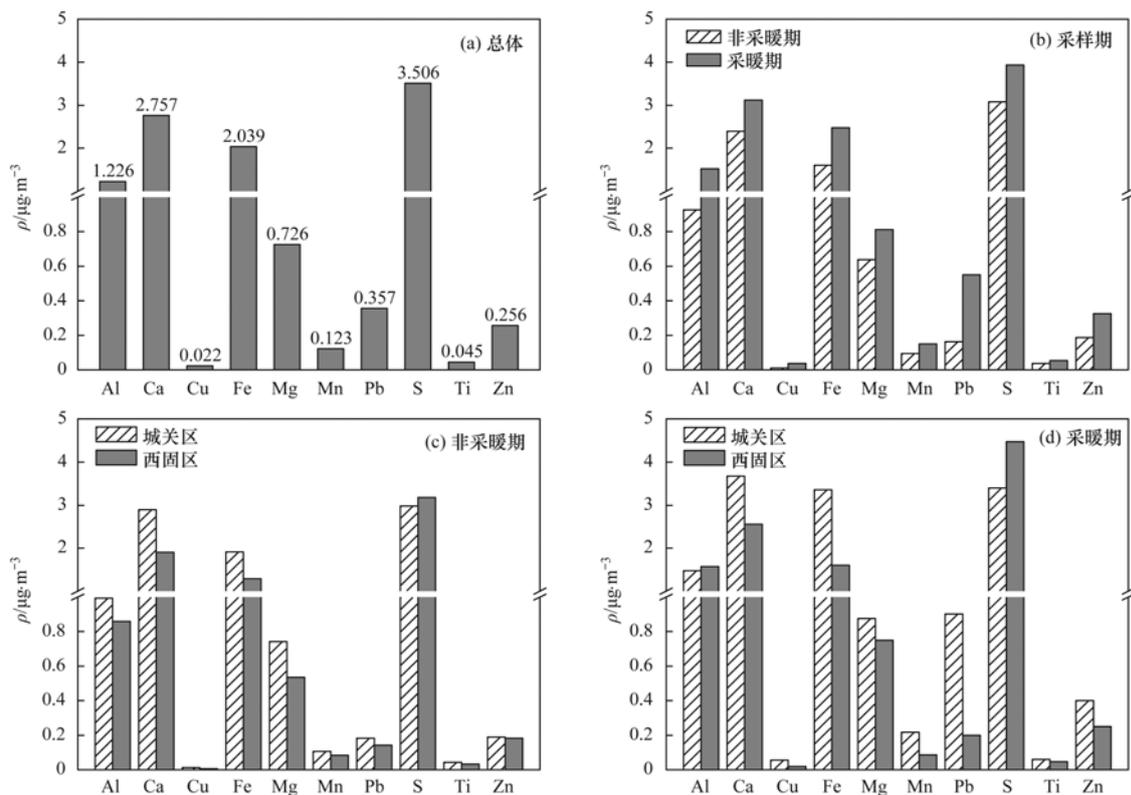
不同的是,在空间上[图 3(c)和图 3(d)],除 K^+ 以外,各水溶性离子质量浓度呈现出西固区高于城关区的现象.

对比西安^[5]、天津^[20]、北京^[33]、杭州^[34]和香港^[36]的研究结果发现:这些城市 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子含量最高的均为 SO_4^{2-} ,这同前面各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 中无机元素 S 含量最高的特征保持一致,再次反映了中国的煤烟型硫氧化物污染特征,也表明兰州空气属于工业煤烟硫酸型污染;将各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子浓度进行排序,兰州同其他城市显示出相近的变化趋势,离子浓度较高的均为: SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ .

3 讨论

3.1 兰州城区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征

兰州城区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度具有较为明显的时空变化特征. 在时间上,从非采暖期到采暖期 $\text{PM}_{2.5}$ 有明显的增加(表 2),这是由于采暖期间城市大量的烟煤和生物质等燃烧会排放出大量细小颗粒;加上采暖期气候较为寒冷,人们习惯于开车出行,道路拥挤程度增加,汽车尾气排放量加大;因此,导致空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度增加;另外,采暖期间

图 2 兰州城区 PM_{2.5} 中无机元素质量浓度Fig. 2 Mass concentration of inorganic elements in PM_{2.5} of Lanzhou City

城市大气层结稳定, 逆温现象频发, 气象条件不利于空气污染物的输送和扩散, 从而造成 PM_{2.5} 的累积. 在空间上, 非采暖期间, 城关区 PM_{2.5} 质量浓度 116 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 稍低于西固区的 120 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 值得注意的是, 城关区是兰州市的行政中心, 属于商业居民混合区, 而西固区是兰州市的核心工业区, 区内有中国石油兰州石化公司、兰州石油化工公司、西固热电厂等大中型企业, 这些工业生产活动会排放大量的 SO₂、NO₂、NMHC (非甲烷烃)、颗粒物以及废气^[37]; 王红磊等^[9] 在南京市的研究表明, PM_{2.1} 的质量浓度值在城市不同功能区之间差异很大, 为交通源 > 工业区 > 商业区 > 风景区, 而兰州市两功能区 PM_{2.5} 实际监测值相近与工业区应显著高出的普遍认知有所不同; 但是, 张成君等^[38] 在对兰州市大气降尘粒度特征的研究中也发现兰州市的各功能区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 组分的分布相似性较大, 并认为一方面反映出兰州市各功能区分布较为混乱, 工业区和生活区重复密集, 颗粒物为工业区和生活区共同贡献; 另一方面, 也表明兰州市 PM_{2.5} 由于能在大气中较长时间存在而产生混合. 在采暖期间, 城关区 PM_{2.5} 质量浓度 145 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 稍高于西固区的 136 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;

从非采暖期至采暖期, 城关区 PM_{2.5} 的质量浓度增加 0.25 倍, 而西固区仅增加 0.13 倍, 城关区相对西固区增加倍数更大; 分析气象条件 (表 1) 发现, 从非采暖期到采暖期, 大气温度和大气压在两城区变化幅度基本一致, 而风速在西固区有一定降低, 相对湿度在城关区更低; 前人研究表明^[39,40], 冬季风速低、相对湿度高时, 会导致颗粒物的积累; 这意味着采暖期间气象条件更利于城关区污染扩散, 会导致西固区污染累积, 而实际上城关区相对西固区 PM_{2.5} 质量浓度更大的增加则很可能指示了采暖期城关区更大的取暖燃煤和生物质使用量.

兰州城区大气 PM_{2.5} 中 10 种无机元素和 6 种水溶性离子的质量浓度在时间上 [图 2(b) 和图 3(b)] 均表现为采暖期高于非采暖期; 在空间上, 无机元素 (S 除外) 表现为城关区明显高于西固区 [图 2(c) 和图 2(d)]; 同无机元素不同的是, 水溶性离子 (K⁺ 除外) 在空间上呈现出西固区高于城关区的现象 [图 3(c) 和图 3(d)]. 无机元素和水溶性离子的质量浓度大小在时间上一致, 在空间上则相反; 这是因为无机元素和水溶性离子分别有不同的主要来源. 兰州市是中国西北地区重要的工业基地, 而西固区则是兰州市的核心工业区, 目前形成了以石油

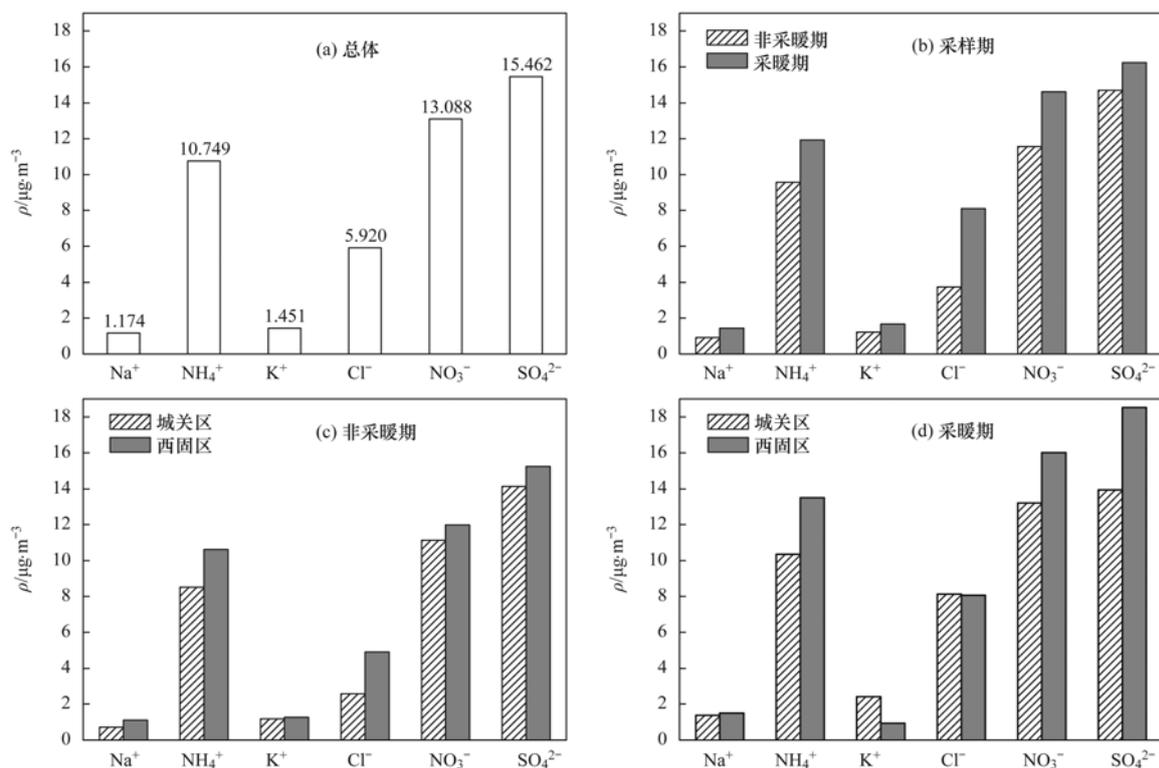


图3 兰州城区 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子质量浓度

Fig. 3 Mass concentrations of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ of Lanzhou City

化工、能源、装备制造和新材料“三大板块”为支柱的工业体系,区内有中国石油兰州石化公司、兰州石油化工公司、西固热电厂等大中型企业^[37],韦春^[41]对兰州市西固区环境空气质量的污染特征研究发现,受中国石油兰州石化分公司、兰州炼油化工总厂和兰化等企业的工艺尾气影响, SO_2 、 NO_2 、 C_nH_m 、 NH_3 和 H_2S 等污染物日均浓度在西固工业区为最高;而 SO_2 、 NO_2 和 NH_3 等在光照条件下会发生光化学反应转化为 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 等二次离子^[21],由于 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 三者质量浓度之和占离子总质量浓度的 82.140%,因此西固区这 3 种离子的高值会直接导致西固区 $PM_{2.5}$ 中的水溶性离子浓度一直处于较高的水平。

组分 S 和 K^+ 同其它无机元素和水溶性离子在空间上表现相反. 采样期内无机元素 S 的质量浓度在西固区更高(表 2 和图 2),对组分 S 和 SO_4^{2-} 的线性拟合结果(图 4)显示,在西固区 S 和 SO_4^{2-} 的相关性高达 0.942,而城关区 S 和 SO_4^{2-} 的相关性仅为 0.660,表明在西固区 S 和 SO_4^{2-} 有基本一致的来源,因此,元素 S 在西固区的高值也是由于其工业生产活动排放以及及与 SO_4^{2-} 之间的相互转化所致. 采样期内水溶性离子 K^+ 的质量浓度在城关区较高(表 2

和图 3), K^+ 在 $PM_{2.5}$ 中占的比例分别为非采暖期间:城关区 1.03%,西固区 1.05%;采暖期间:城关区 1.66%,西固区 0.69%. 可见,城关区 K^+ 浓度的高值主要取决于采暖期内 K^+ 排放量的急剧增大, K^+ 是生物质燃烧排放物的主要成分^[42],也表明城关区在采暖期内有更大量的生物质使用量。

另外,根据颗粒物中水溶性离子 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的质量浓度比可以判断固定污染源和流动污染源的相对重要性^[43], $[NO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ 比值越高,说明流动污染源对大气中离子贡献量越大. 一般情况下,汽油、柴油燃烧排放的 $[NO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ 值为 8~13,燃煤排放的 $[NO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ 值为 1~2,由于含硫煤的广泛使用,我国大气颗粒物中 $[NO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ 值通常较低(小于 1)^[44]. 兰州城区大气 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的比值(表 3),采样期总体平均值为 0.84,这说明兰州城区 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的贡献以燃煤烟尘等固定源为主;其中非采暖期比值在城关区和西固区均为 0.79,说明在非采暖期间城关区和西固区的固定源与流动源对 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的贡献基本一致;而采暖期在城关区和西固区该比值均有不同程度的增大,说明在采暖期间,兰州城区 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子在以燃煤烟尘等固定源

为主的前提下,汽车尾气排放等流动源的贡献有所增加,这可能是由于采暖期气候较为寒冷,人们习惯于开车出行,使道路拥挤程度增加,汽车尾气排放量也加大造成。

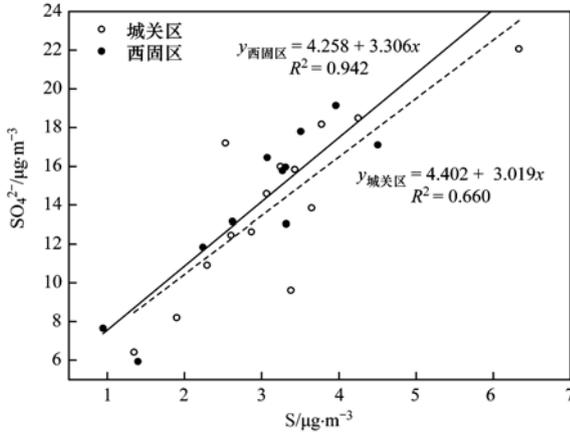


图4 兰州城区 PM_{2.5} 中 S 和 SO₄²⁻ 的线性拟合

Fig. 4 Linear fitting between S and SO₄²⁻ of PM_{2.5} in Lanzhou City

表3 兰州城区 PM_{2.5} 中 [NO₃⁻]/[SO₄²⁻] 比值

Table 3 The [NO₃⁻]/[SO₄²⁻] ratio of PM_{2.5} in Lanzhou City

项目	非采暖期	采暖期	总体
城关区	0.79	0.95	0.87
西固区	0.79	0.86	0.83
平均	0.79	0.90	0.84

3.2 兰州城区大气 PM_{2.5} 来源解析

大气气溶胶中元素的富集因子可用于判断和评价元素的自然来源和人为来源,对兰州城区大气 PM_{2.5} 中 10 种无机元素的富集因子值计算结果见图 5,各元素背景值取自甘肃省平均土壤背景值^[45],S 取土壤丰度值^[46]. 国际上多选用 Al、Fe、Si 作参比元素,Fe 在兰州市地壳中大量存在,且在大气颗粒物中的浓度水平相对稳定,故本研究选用 Fe 作为参比元素. 兰州城区大气 PM_{2.5} 中各元素的富集因子 (EF) 大小范围在非采暖期和采暖期、城关区和西固区基本上保持一致. 由图 5 可知,除 Al、Ca、Mg、Ti 的 EF 值小于 1 为自然来源以外,其他元素的 EF 值都大于 1; Mn 的 EF 值处于 1 ~ 10 之间,表明 Mn 元素部分来源于人为污染,部分来源于土壤; 元素 Cu、Pb、S、Zn 的 EF 值显著大于 10,表明这 4 种元素在 PM_{2.5} 中的富集程度相当高,主要源于人为活动造成的污染. 这 4 种主要人为来源的元素中,Zn 和 Cu 可来自于轮胎、刹车片和润滑油^[16,47],Pb 是机动车排放物的重要标志^[20,21],S 主要来自大量的工业燃煤; 其中 Cu、Pb 和 S 的 EF 值在城关区和西固

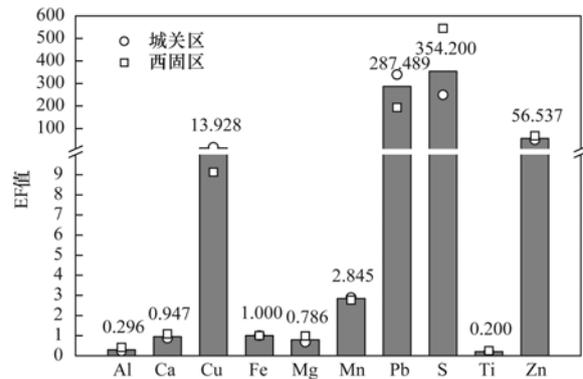


图5 兰州城区 PM_{2.5} 中各无机元素富集因子

Fig. 5 Enrichment factor of inorganic elements in PM_{2.5} during sampling period in Lanzhou City

区有较大变化,Cu 和 Pb 的 EF 值在城关区高于西固区,S 则相反;说明在兰州大气 PM_{2.5} 中,来自机动车源排放物的污染在城关区较西固区更严重,而来自工业燃煤的污染在西固区较城关区更严重。

从兰州城区大气 PM_{2.5} 中各组成成分间的相关性(表 4)可见,第一,Al、Ca、Fe、Mg、Ti 这 5 种元素的相关性很好,两两之间的相关系数在 0.681 ~ 0.956 之间,表明其可能有共同的来源. 第二,K、Cu、Mn、Pb、Zn,两两之间的相关系数在 0.806 ~ 0.981 之间,可能来源于同一污染源;其中 K 和 Mn 的相关系数为 0.920,Pb 和 Cu 的相关系数为 0.981,呈现尤其高的相关性,来自同一污染源的可能性更大. 第三,NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻、S,两两之间的相关系数在 0.632 ~ 0.935 之间,可能来自同一污染源。

兰州城区大气 PM_{2.5} 主成分分析结果见表 5,对 PM_{2.5} 中 16 种组分进行方差最大化旋转后得到因子矩阵,影响兰州城区大气 PM_{2.5} 的来源主要有 3 组,累积方差贡献率为 90.583%。

主成分 1 对应的特征值最大,解释了原有变量 53.075% 的方差. 该主成分与 K⁺、Cu、Fe、Mn、Pb、Zn 的因子负载比较大(0.717 ~ 0.974),元素相关性分析(表 4)表明 K⁺ 和 Mn 相关系数为 0.91,Pb 和 Cu 的相关系数为 0.98,可能分别来自同一污染源. 由于生物质材料在燃烧过程中会产生大量的 K⁺^[42]; Pb 是汽车尾气排放的典型代表物,尽管目前普遍采用无铅汽油,但在原油中还是含有少量的铅,汽车燃油排放还是大气中 Pb 元素的主要污染源,另外刹车磨损过程亦会产生 Pb 颗粒^[20,21]; Zn 通常作为橡胶轮胎的添加剂,可能由于汽车轮胎磨损而存在^[47]; Cu 可来自柴油机或车辆制动器的磨

表 4 兰州城区 PM_{2.5} 组成成分间的相关矩阵¹⁾Table 4 Correlation matrix among PM_{2.5} components in Lanzhou City

	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Al	Ca	Cu	Fe	Mg	Mn	Pb	S	Ti	Zn
Na ⁺	1															
NH ₄ ⁺	0.747 *	1														
K ⁺	0.552 *	0.217	1													
Cl ⁻	0.829 *	0.730 *	0.506 *	1												
NO ₃ ⁻	0.843 *	0.754 *	0.390	0.761 *	1											
SO ₄ ²⁻	0.506 *	0.728 *	0.098	0.568 *	0.665 *	1										
Al	0.771 *	0.491 *	0.437	0.663 *	0.662 *	0.122	1									
Ca	0.525 *	0.165	0.632 *	0.402	0.416	(0.133)	0.798 *	1								
Cu	0.357	0.079	0.852 *	0.482	0.219	(0.013)	0.415	0.579 *	1							
Fe	0.490 *	0.125	0.804 *	0.475	0.341	(0.097)	0.681 *	0.916 *	0.809 *	1						
Mg	0.543 *	0.166	0.494 *	0.387	0.407	(0.133)	0.850 *	0.927 *	0.421	0.810 *	1					
Mn	0.498 *	0.144	0.920 *	0.520 *	0.349	0.002	0.544 *	0.776 *	0.899 *	0.943 *	0.645 *	1				
Pb	0.316	0.095	0.842 *	0.454	0.172	0.032	0.320	0.473	0.981 *	0.729 *	0.320	0.857 *	1			
S	0.562 *	0.752 *	0.155	0.614 *	0.632 *	0.935 *	0.259	(0.070)	0.109	0.009	(0.068)	0.096	0.152	1		
Ti	0.598 *	0.270	0.619 *	0.484 *	0.480 *	(0.056)	0.892 *	0.956 *	0.564 *	0.883 *	0.947 *	0.742 *	0.464	0.028	1	
Zn	0.656 *	0.405	0.827 *	0.689 *	0.553 *	0.223	0.677 *	0.695 *	0.850 *	0.834 *	0.586 *	0.892 *	0.806 *	0.328	0.705 *	1

1) * 表示在 0.01 置信度水平(双侧)上显著相关; 括号内表示数值为负

表 5 兰州城区 PM_{2.5} 因子负载矩阵¹⁾Table 5 Factor loading matrix of PM_{2.5} in Lanzhou City

项目	总体			城关区			西固区			
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC4
Na ⁺	0.221	0.478	0.765	0.652	0.523	0.380	0.495	0.668	0.486	0.004
NH ₄ ⁺	(0.048)	0.105	0.900	0.408	0.118	0.775	0.293	0.860	(0.027)	(0.128)
K ⁺	0.879	0.261	0.131	0.833	0.384	0.310	0.105	0.102	0.973	(0.111)
Cl ⁻	0.368	0.274	0.773	0.845	0.235	0.287	0.401	0.746	0.118	0.282
NO ₃ ⁻	0.077	0.379	0.830	0.181	0.484	0.622	0.354	0.750	0.288	0.235
SO ₄ ²⁻	(0.042)	(0.319)	0.887	0.024	(0.165)	0.972	(0.254)	0.873	0.048	0.344
Al	0.198	0.854	0.422	0.476	0.809	0.094	0.920	0.353	0.081	0.100
Ca	0.407	0.882	(0.039)	0.290	0.901	(0.070)	0.990	0.033	0.071	(0.059)
Cu	0.955	0.203	0.066	0.945	0.235	0.157	0.583	0.547	(0.318)	0.460
Fe	0.717	0.665	(0.047)	0.655	0.722	(0.027)	0.977	0.070	0.117	0.078
Mg	0.209	0.950	(0.025)	0.105	0.975	(0.096)	0.977	0.025	0.161	0.038
Mn	0.883	0.427	0.034	0.826	0.509	0.114	0.676	0.095	0.569	0.360
Pb	0.974	0.064	0.044	0.964	0.126	0.112	(0.064)	0.571	(0.162)	0.763
S	0.081	(0.215)	0.905	0.348	(0.045)	0.918	(0.118)	0.923	0.029	0.233
Ti	0.368	0.903	0.082	0.342	0.924	0.072	0.993	0.072	0.038	(0.014)
Zn	0.787	0.414	0.344	0.843	0.395	0.255	0.643	0.362	0.169	0.557
特征值	8.492	4.022	1.979	10.379	3.128	1.584	8.621	3.921	1.581	0.759
方差贡献/%	53.075	25.139	12.369	64.870	19.551	9.899	53.882	24.508	9.881	4.742
累积方差贡献/%	53.075	78.214	90.583	64.870	84.421	94.320	53.882	78.390	88.271	93.013
污染源	交通/生物 质燃烧	土壤	二次粒子	交通/生物 质燃烧	土壤	二次粒子	土壤	二次粒子	生物质 燃烧	交通

1) 黑体字表示数值在 0.5 以上; 括号内表示数值为负

损^[16]. 因此主成分 1 代表了生物质燃烧和交通排放混合源.

主成分 2 贡献了总方差的 25.139%, 该主成分与 Al、Ca、Fe、Mg、Ti 具有较好的相关性, 因子负载分别为 0.854、0.882、0.665、0.950、0.903. 其中元素 Al、Ca、Fe、Mg 既可来自土壤, 也可来自建

筑排放, 而元素 Ti 则是典型的土壤源排放物; 由元素相关性(表 4)可知, 土壤源代表元素 Ti 和 Ca、Mg 的相关系数为 0.95、0.94, 大于建筑源标识元素 Ca 和 Mg 之间的相关系数 0.92, 表明 Ca、Mg 和 Ti 是同一来源; 富集因子分析也表明这几种元素在 PM_{2.5} 中都没有明显富集, 为自然来源. 因此可以推

断主成分 2 是土壤源。

主成分 3 贡献了总方差的 12.369%, 该主成分与 Na⁺、NH₄⁺、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、S 具有良好的相关性, 其中, NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻、S 的因子负载为 0.900、0.830、0.887、0.905, 代表了二次污染粒子。NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 是由于 NO_x 和 SO₂ 在空气中被氧化形成硝酸、硝酸盐或硫酸盐后形成, NH₄⁺ 则是由 NH₃ 与大气形成的二次污染物硝酸或硫酸反应生成^[21]; 而 NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 S 这 4 种二次离子的前体物在兰州部分来源于西固区工业生产中化石燃料燃烧排放; 此外, 兰州大气 PM_{2.5} 中 [NO₃⁻]/[SO₄²⁻] 比值为 0.84, 说明汽车尾气排放等流动源对兰州市 PM_{2.5} 中离子也有部分贡献。因此将主成分 3 视为二次污染粒子。

兰州市两功能区的 PM_{2.5} 主成分分析结果分别为: 城关区有 3 组主成分, 累积负荷为 94.32%, 各主成分的特征值 (方差贡献) 分别为 10.379 (64.870)、3.128 (19.551)、1.584 (9.899), 3 组主要污染源依次为: 汽车尾气/生物质燃烧源、土壤源和工业排放源; 西固区有 4 组主成分, 累积负荷为 93.013%, 各主成分的特征值 (方差贡献) 分别为 8.621 (53.882)、3.921 (24.508)、1.581 (9.881)、0.759 (4.742), 4 种主要污染源依次为: 土壤源、工业排放源、生物质燃烧源和汽车道路源。兰州大气 PM_{2.5} 在城关区和西固区的污染源贡献有所差异, 城关区以汽车尾气和生物质燃烧源为主, 而西固区以土壤和二次粒子来源为主。

4 结论

(1) 2013 年 10 月和 12 月监测期间, 兰州市大气 PM_{2.5} 污染比较严重, 平均质量浓度为 129 μg·m⁻³, 超过国家二级标准 (75 μg·m⁻³) 0.72 倍。采暖期内 PM_{2.5} 平均质量浓度明显高于非采暖期, 采暖期 PM_{2.5} 浓度的增加大部分由城关区 PM_{2.5} 浓度的增加所致, 可能指示了采暖期内城关区更大的燃煤使用量。

(2) 采样期内兰州市大气 PM_{2.5} 中无机元素质量浓度总值为 11.054 μg·m⁻³, 占 PM_{2.5} 质量的 8.552%, 各无机元素平均浓度为: S > Ca > Fe > Al > Mg > Pb > Zn > Mn > Ti > Cu, 其中 S、Ca、Fe、Al 的浓度在 1 μg·m⁻³ 以上, 是主要的元素组分。各无机元素浓度表现为采暖期高于非采暖期, 城关区高于西固区。

(3) 采样期内兰州市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子质量浓度总值为 47.843 μg·m⁻³, 占 PM_{2.5} 质量的 37.015%, 各水溶性离子平均浓度为: SO₄²⁻ > NO₃⁻ > NH₄⁺ > Cl⁻ > K⁺ > Na⁺, 其中 SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺ 的浓度在 10 μg·m⁻³ 以上, 是主要离子组分。各水溶性离子浓度表现为采暖期高于非采暖期, 西固区高于城关区。样品中 [NO₃⁻]/[SO₄²⁻] 比值平均为 0.84, 说明燃煤烟尘等固定源对兰州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的贡献大于机动车尾气等流动源。

(4) 富集因子分析结果表明, 除 Al、Ca、Mg、Ti 的 EF 值小于 1 为自然来源外, 其他元素的 EF 值都大于 1, 主要源于人为污染。其中元素 Cu、Pb、S、Zn 的 EF 值显著大于 10, 表明这 4 种元素在 PM_{2.5} 中的富集程度相当高, 主要源于人为活动造成的污染。主成分分析结果表明, 兰州市大气 PM_{2.5} 有 3 组主要的污染源, 分别为: 交通排放/生物质燃烧混合源、土壤源和工业排放源; 城关区以汽车尾气和生物质燃烧源为主, 而西固区以土壤和二次粒子来源为主。

参考文献:

- [1] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 257-269.
- [2] 吴丹, 于亚鑫, 夏俊荣, 等. 我国灰霾污染的研究综述[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(S2): 295-304.
- [3] 郭新彪, 魏红英. 大气 PM_{2.5} 对健康影响的研究进展[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1171-1177.
- [4] Salameh D, Detournay A, Pey J, et al. PM_{2.5} chemical composition in five European Mediterranean cities: a 1-year study [J]. Atmospheric Research, 2015, 155: 102-117.
- [5] Wang P, Cao J J, Shen Z X, et al. Spatial and seasonal variations of PM_{2.5} mass and species during 2010 in Xi'an, China [J]. Science of the Total Environment, 2015, 508: 477-487.
- [6] 李珊珊, 程念亮, 徐峻, 等. 2014 年京津冀地区 PM_{2.5} 浓度时空分布及来源模拟[J]. 中国环境科学, 2015, 35(10): 2908-2916.
- [7] 雷瑜, 张小玲, 唐宜西, 等. 北京城区 PM_{2.5} 及主要污染气体“周末效应”和“假日效应”研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1520-1528.
- [8] Shi M N, Wu H C, Zhang S H, et al. Weekly cycle of magnetic characteristics of the daily PM_{2.5} and PM_{2.5-10} in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, 98: 357-367.
- [9] 王红磊, 朱彬, 康汉青, 等. 南京市城市不同功能区 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度的季节变化特征[J]. 气象科学, 2012, 31(S): 16-23.
- [10] 杨龙, 贺克斌, 张强, 等. 北京秋冬季近地层 PM_{2.5} 质量浓度垂直分布特征[J]. 环境科学研究, 2005, 18(2): 23-28.
- [11] Zhu Y H, Yang L X, Meng C P, et al. Indoor/outdoor relationships and diurnal/nocturnal variations in water-soluble ion and PAH concentrations in the atmospheric PM_{2.5} of a business office area in Jinan, a heavily polluted city in China [J]. Atmospheric Research, 2015, 153: 276-285.

- [12] 赵承美, 邵龙义, 侯聪, 等. 元宵节期间北京 $PM_{2.5}$ 单颗粒的物理化学特征[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(4): 1004-1012.
- [13] Gummeneni S, Yusup Y B, Chavali M, *et al.* Source apportionment of particulate matter in the ambient air of Hyderabad city, India[J]. Atmospheric Research, 2011, **101**(3): 752-764.
- [14] Stone E, Schauer J, Quraishi T A, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of fine and coarse particulate matter in Lahore, Pakistan [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(8): 1062-1070.
- [15] Karnae S, John K. Source apportionment of fine particulate matter measured in an industrialized coastal urban area of South Texas[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(23): 3769-3776.
- [16] Vallius M, Lanki T, Tiittanen P, *et al.* Source apportionment of urban ambient $PM_{2.5}$ in two successive measurement campaigns in Helsinki, Finland [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(5): 615-623.
- [17] Khare P, Baruah B P. Elemental characterization and source identification of $PM_{2.5}$ using multivariate analysis at the suburban site of North-East India[J]. Atmospheric Research, 2010, **98**(1): 148-162.
- [18] Zheng M, Cass G R, Schauer J J, *et al.* Source apportionment of $PM_{2.5}$ in the southeastern United States using solvent-extractable organic compounds as tracers [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(11): 2361-2371.
- [19] Lv B L, Zhang B, Bai Y Q. A systematic analysis of $PM_{2.5}$ in Beijing and its sources from 2000 to 2012 [J]. Atmospheric Environment, 2016, **124**(Part B): 98-108.
- [20] 李伟芳, 白志鹏, 史建武, 等. 天津市环境空气中细粒子的污染特征与来源[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(4): 394-400.
- [21] 张智胜, 陶俊, 谢绍东. 成都城区 $PM_{2.5}$ 季节污染特征及来源解析[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(11): 2947-2952.
- [22] 李秀镇, 盛立芳, 徐华, 等. 青岛市大气 $PM_{2.5}$ 元素组成及来源研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1438-1445.
- [23] 王敬, 毕晓辉, 冯银厂. 乌鲁木齐市重污染期间 $PM_{2.5}$ 污染特征与来源解析[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(2): 113-119.
- [24] Feng X Y, Wang S G. Influence of different weather events on concentrations of particulate matter with different sizes in Lanzhou, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, **24**(4): 665-674.
- [25] Chu P C, Chen Y C, Lu S H, *et al.* Particulate air pollution in Lanzhou China[J]. Environmental International, 2008, **34**(5): 698-713.
- [26] 杨丽萍, 陈发虎. 兰州市大气降尘污染物来源研究[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(4): 499-502.
- [27] Xia D S, Chen F H, Bloemendal J, *et al.* Magnetic properties of urban dustfall in Lanzhou, China, and its environmental implications [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(9): 2198-2207.
- [28] 余晔, 夏敦胜, 陈雷华, 等. 兰州市 PM_{10} 污染变化特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 22-28.
- [29] Fan J, Yue X Y, Jing Y, *et al.* Online monitoring of water-soluble ionic composition of PM_{10} during early summer over Lanzhou City[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, **26**(2): 353-361.
- [30] Wang S G, Feng X Y, Zeng X Q, *et al.* A study on variations of concentrations of particulate matter with different sizes in Lanzhou, China [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(17): 2823-2828.
- [31] 毕木天. 关于富集因子及其应用问题[J]. 环境科学, 1984, **5**(5): 68-70.
- [32] 张媛, 张燕平. 一种 PCA 算法及其应用[J]. 微机发展, 2005, **15**(2): 67-68, 72.
- [33] Duan F K, He K B, Ma Y L, *et al.* Concentration and chemical characteristics of $PM_{2.5}$ in Beijing, China: 2001-2002 [J]. Science of the Total Environment, 2006, **355**(1-3): 264-275.
- [34] 包贞, 冯银厂, 焦荔, 等. 杭州市大气 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染特征及来源解析[J]. 中国环境监测, 2010, **26**(2): 44-48.
- [35] 杨天智. 长沙市大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 化学组分特征及来源解析[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [36] Ho K F, Cao J J, Lee S C, *et al.* Source apportionment of $PM_{2.5}$ in urban area of Hong Kong[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, **138**(1): 73-85.
- [37] 付金杯. 兰州市西固化工园区大气环境容量变动及总量控制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [38] 张成君, 胡轶鑫, 钱韵砚. 兰州市冬季大气沉降尘粒度特征及来源解析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2007, **42**(6): 39-44.
- [39] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 418-427.
- [40] 陈雷华, 余晔, 陈晋北, 等. 2001-2007 年兰州市主要大气污染物污染特征分析[J]. 高原气象, 2010, **29**(6): 1627-1633.
- [41] 韦春. 兰州市西固区域环境空气质量的污染特征[J]. 环境监测管理与技术, 2008, **20**(3): 28-30.
- [42] Duan F K, Liu X D, Yu T, *et al.* Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(9): 1275-1282.
- [43] Yao X H, Chan C K, Fang M, *et al.* The water-soluble ionic composition of $PM_{2.5}$ in Shanghai and Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(26): 4223-4234.
- [44] 古金霞, 吴丽萍, 霍光耀, 等. 天津市 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子污染特征及来源分析[J]. 中国环境监测, 2013, **29**(3): 30-34.
- [45] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [46] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007. 101-102.
- [47] Duan J C, Tan J H. Atmospheric heavy metals and arsenic in China: situation, sources and control policies [J]. Atmospheric Environment, 2013, **74**: 93-101.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojingong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorfii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@cees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@cees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行