

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域 PM_{2.5}时空演变过程 罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)

西安市 PM_{2.5}健康损害价值评估 魏国茹,史兴民 (3014)

河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析 江琪,王飞,孙业乐 (3022)

南京北郊秋季 PM_{2.5}碳质组分污染特征及来源分析 徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)

临安夏季霾和清洁天气 PM_{2.5}化学组成特征比较 梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)

盘锦市秋冬季节 PM_{2.5}中碳组分特征及来源解析 张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)

南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应 黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)

夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量 李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)

太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源 叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)

杭州地区大气 CO₂ 体积分数变化特征及影响因素 浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)

典型工业源 VOCs 治理现状及排放组成特征 景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)

地级市域工业 VOCs 排放源排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例 胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)

青霉素发酵尾气 VOCs 污染特征及健康风险评价 郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)

轻型汽油车尾气 OC 和 EC 排放因子实测研究 黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)

南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价 田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金凤,李慧明 (3118)

西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析 石栋奇,卢新卫 (3126)

三峡库区主要河流秋季 pCO₂ 及其影响因素 罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)

泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素 寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)

生物滞留对城市地表径流磷的去除途径 李立青,刘雨情,杨佳敏,王娟 (3150)

淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系 杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)

抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系 李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)

蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响 王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)

生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响 徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)

Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧氧化对苯二酚效能 张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)

Fe/Cu 双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制 李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)

铈酸盐改性钛酸纳米片对水中 Cd(II) 的吸附行为及机制 康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)

铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验 蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)

制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法 仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)

电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响 陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)

不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的 COD 需求 李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)

基质浓度对 ABR 反应器 SAD 协同脱氮除碳效能影响 张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)

采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除 付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)

间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性 高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)

基于高通量测序的 SBR 反应器丝状膨胀污泥菌群分析 洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)

纳米零价铁 (NZVI) 对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响 苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)

气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响 张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)

活性污泥胞外多聚物提取方法的比较 孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)

耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌 H97 的鉴定及其好氧反硝化特性 蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)

PFOS 前体物质 (PreFOs) 降解菌的分离鉴定及其降解特性 赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)

采油井场土壤微生物群落结构分布 蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)

铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征 王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)

广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险 郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)

邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析 杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)

成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素 李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)

塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性 赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)

塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系 安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)

高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制 唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)

施硼对水稻幼苗吸收和分泌硼的影响 朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)

不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析 胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)

南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估 赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)

三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析 程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)

人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性 时红蕾,王晓昌,李倩 (3434)

COD/SO₄²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响 强虹,李玉友,裴梦富 (3443)

果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征 何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)

曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 NH₃ 挥发的影响 庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)

《环境科学》征订启事(3141) 《环境科学》征稿简则(3202) 信息(3229, 3433, 3451)

太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源

叶艾玲¹, 程明超¹, 张璐¹, 何秋生^{1*}, 郭利利¹, 王新明²

(1. 太原科技大学环境与安全学院, 太原 030024; 2. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广州 510630)

摘要: 为了解太原市大气降水中溶解态重金属污染特征及来源, 采用干湿沉降自动采样器采集了太原市 2013~2015 年夏季 61 场降水样品, 使用 ICP-MS 测定了其中 12 种溶解态重金属, 并对其浓度水平、湿沉降通量及来源进行分析。结果表明, 太原市 2013~2015 年夏季降水 pH 值范围为 4.34~7.95, 降水量加权平均值为 5.37。溶解态重金属平均浓度为 236.931 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (范围 66.324~1 029.212 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 主要元素是 Zn 和 Fe, 占总浓度的 53.39%。12 种溶解态重金属的湿沉降总通量为 1.735 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 。降水中 Ba、Cu、Sr、Zn、As、Cd 和 Pb 的富集因子大于 100, 受到严重的人为源影响。PMF 模型分析表明太原市夏季降水中重金属的主要来源为钢铁冶金、燃煤源、机动车源和地面扬尘, 贡献率分别为 38.34%、23.06%、20.45% 和 18.15%。气团的后向轨迹分析表明西南气团和东南气团对太原市夏季降水贡献最大, 分别达到 38% 和 35%, 运城-临汾-晋中和晋城-长治-晋中的南部工业源污染应该引起重视。

关键词: 太原; 降水; 重金属; PMF 模型; 后向轨迹

中图分类号: X517 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3075-07 DOI: 10.13227/j.hjx.201710075

Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China

YE Ai-ling¹, CHENG Ming-chao¹, ZHANG Lu¹, HE Qiu-sheng^{1*}, GUO Li-li¹, WANG Xin-ming²

(1. School of Environment and Safety, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 2. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510630, China)

Abstract: To investigate the characteristics and sources of dissolved heavy metals in precipitation of Taiyuan, 61 precipitation samples were collected using an automated dry and wet sampler from 2013 to 2015 during summertime. The concentrations of 12 dissolved heavy metals were detected using ICP-MS, and wet deposition fluxes and sources were analyzed. The results showed that the pH ranged from 4.34 to 7.95, with a volume-weighted mean of 5.37. The mean concentration of the dissolved heavy metals was 236.931 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, with a range of 66.324 to 1 029.212 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Zn and Fe were the major components, together accounting for 53.39% of the total concentrations. The wet deposition fluxes of the 12 dissolved heavy metals reached 1.735 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$. The enrichment factors of Ba, Cu, Sr, Zn, As, Cd, and Pb were all in excess of 100, suggesting that these metals were seriously influenced by anthropogenic activities. Results from positive matrix factorization (PMF) indicated that steel smelting emissions, coal combustion, vehicle emissions, and crustal dusts were the major sources of heavy metals in the precipitation of Taiyuan City, with average contributions of 38.34%, 23.06%, 20.45%, and 18.15%, respectively. According to backward trajectory analysis, air masses from the southwest and southeast directions contributed the most to precipitation during summer in Taiyuan, with percentages of 38 and 35, respectively. The southern industrial areas located in the Yuncheng-Linfen-Jinzhong and Jincheng-Changzhi-Jinzhong regions should be paid more attention.

Key words: Taiyuan; precipitation; heavy metals; positive matrix factorization (PMF); backward trajectory

近年来,重金属污染受到广泛关注。一方面重金属排放量大且难以降解,可长期存在于环境中,另一方面其毒性和生物累积性较强,会严重威胁生态系统的稳定与平衡^[1,2]。降水是大 气中重金属的主要去除方式。通过降水进入地表环境的重金属可以沿食物链传递,而其中的溶解态重金属更容易进入人体,对人体健康造成持久的危害^[3,4]。国外对大气降水中重金属研究较早,已形成了较为完善的监测体系^[5]。国内学者对降水中重金属的污染特征及来源也有报道。有研究表明,Al、Fe、Mn、Zn、Ba 等

是降水中的主要元素^[6,7],北京、唐山等城市降水中重金属含量高于成都、孝感等^[6-9];厦门、台湾等沿海城市大气降水受重金属污染程度较轻,其中 Mn、As、Cd、Pb 远低于贵阳、长春等内地城市^[10-13]。在不同的能源结构下,不同金属的来源贡

收稿日期: 2017-10-12; 修订日期: 2018-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172316, 41401584); 国家教育部重点项目(211026); 山西省回国留学人员科研资助项目(2011080)

作者简介: 叶艾玲(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气干湿沉降地球化学, E-mail: yeailing2015tyust@163.com

* 通信作者, E-mail: heqs@tyust.edu.cn

献存在差异,如胡健等^[12]报道了贵阳市大气降水中 Zn、Pb、Cu、Mn、Fe 的主要来源是燃煤和汽车尾气;福建省兴化湾降水中 Zn、Pb、Cu 和 Cd 主要来源于工业活动^[14],而唐山降水中 Zn、Pb、Cu、Mn、Fe 和 Cd 的污染则与钢铁冶炼和燃煤有关^[9]. 受降水量的影响,夏季重金属湿沉降通量通常高于其他季节^[5, 11].

太原市是我国的能源重化工基地,以煤电、炼焦、冶金等为主要产业,是大气污染最严重的城市之一. 已有研究报道了太原市降水中较高浓度的多环芳烃(PAHs)和水溶性离子,均受到本地燃煤排放和南部气团传输的共同影响^[15, 16]. 但目前对于太原地区降水中重金属的研究还鲜有报道. 本研究分析了太原市 2013~2015 年夏季降水中溶解态重金属的污染特征及来源,以期为太原市重金属污染防治提供一定的依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究采样点位于太原科技大学综合楼楼顶,距地面高度约为 50 m,周围没有高大建筑物和明显污染源(图 1). 采样使用德国 UNS130/E 降水降尘自动采样仪(Eigenbrodt),样品的采集和保存严格按照国家标准 GB 13580.2-1992《大气降水样品的采集与保存》执行. 每次采样前用去离子水将采样器漏斗和收集样品的聚乙烯塑料瓶洗净,防止降水样品受到污染. 本研究采集了 2013~2015 年 5~9 月的降水作为夏季样品,2013、2014 和 2015 年分别采集降水样品 22、17 和 22 个,收集降水量分别为 134.30、186.37 和 209.55 mm,均占到全年降水量的 60% 以上. 每次降水结束后,将样品在 1 h 内送回实验室分析.

1.2 样品处理与分析

取少量样品测定 pH 值(雷磁, PHS-3C),然后将剩余样品通过 0.45 μm 的微孔滤膜过滤,按照降水量取一定的滤液加入体积比为 1% 的超纯 HNO_3 ,于 4 $^{\circ}\text{C}$ 低温保存. 采用 ICP-MS(ICAP Q, Thermo Fisher Scientific, 德国)检测样品中 Al、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Sr、Cd、Ba 和 Pb 等 12 种元素浓度. 雾化室温度为 2.7 $^{\circ}\text{C}$,冷却器和雾化器流速分别为 14.00 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 1.08 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$. 标准曲线采用 5 点定标,相关系数 ≥ 0.999 . 元素的检测限分别为 Al (0.005 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), Cr (0.0002 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), Mn (0.00007 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), Fe (0.0003 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), Ni

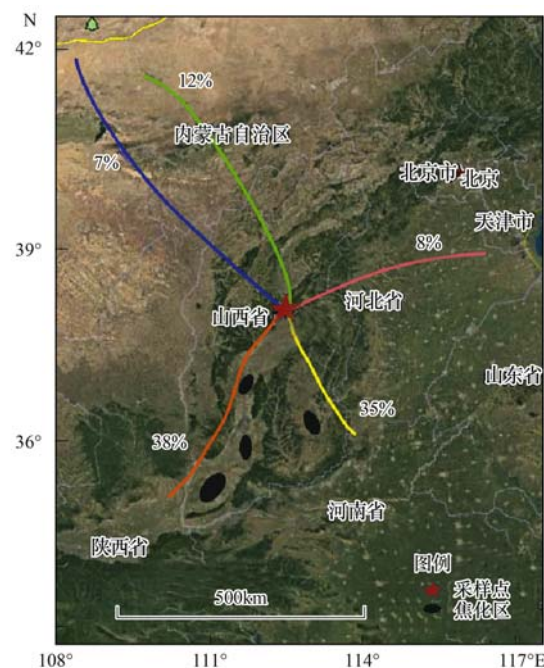


图 1 采样点及太原市夏季降水 48 h 气团后向轨迹图(500 m)

Fig. 1 Location of the sampling site and 48-h air mass backward trajectories for precipitation at the level 500 m above ground during summer in Taiyuan City

(0.004 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), Cu (0.0002 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), Zn (0.0003 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), As (0.0006 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), Sr (0.00002 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), Cd (0.00009 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), Ba (0.0002 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 Pb (0.008 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). 所有元素加标回收率均在 85%~105% 之间. 用 100 mL 去离子水(电阻率: 18.2 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$) 冲洗采样漏斗并收集到聚乙烯塑料瓶中,进行空白试验,测定的空白样中各金属浓度均低于检测限.

2 结果与讨论

2.1 降水 pH 及重金属浓度水平

太原市 2013~2015 年夏季降水 pH 值变化范围为 4.34~7.95, 54.10% 的降水 pH 值范围在 5.6~7 之间,呈弱酸性(图 2). 2013~2015 年降水量加权平均 pH 值分别为 5.21、5.72 和 5.29,高于上海(4.68)^[17]和广州(4.34)^[18]等南方城市,低于北京(6.00)^[19]和西安(5.83)^[20]等北方城市,太原市作为北方的重工业城市,夏季降水受到酸性物质的污染.

表 1 给出了太原市 2013~2015 年夏季降水中重金属浓度和湿沉降通量. 12 种溶解态重金属总浓度平均值为 236.931 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,变化范围为 66.324~1029.212 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 2013、2014 和 2015 年夏季平均浓度分别为 346.242、184.325 和 180.227

$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 其中, Zn 是浓度最高的元素, 平均值为 $63.346 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 其次为 Fe 和 Ba, 浓度分别为 $63.136 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $40.440 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 3 种金属对总浓度的贡献分别为 26.74%、26.65% 和 17.07%. 浓度最低的元素是 Cd, 平均浓度仅为 $0.285 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 2013~2015 年夏季重金属的湿沉降总通量平均值为 $1.735 \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 变化范围为 $0.043 \sim 18.133 \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$. Zn、Fe 和 Ba 的沉降通量最高, 分别为 0.507 、 0.434 和 $0.266 \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 占总沉降

通量的 29.21%、25.00% 和 15.32%. Cd 的沉降通量最低, 仅为 $0.002 \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$. 与台湾、厦门等港口城市相比, 太原市夏季降水中溶解态 Zn、Fe、Mn、Ba、Cu 和 Cd 的沉降通量与厦门接近, 但明显高于台湾彭佳屿岛^[11, 13]. 与重庆市^[5] 夏季降水中溶解态和颗粒态重金属总沉降通量相比, 除 Cu、Pb、As 和 Cr 以外, 太原市夏季降水中其他溶解态重金属沉降通量均高于重庆市, 表现了极高的夏季降水重金属污染负荷.

表 1 太原市 2013~2015 年夏季降水重金属浓度和湿沉降通量

Table 1 Heavy metal concentrations and wet deposition fluxes in the precipitation during summers of 2013-2015 in Taiyuan City

| 元素 | 浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ | | | | 沉降通量/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ | | | |
|----|-------------------------------------|---------|---------|---------|------------------------------------------------------|--------|--------|-------|
| | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 平均值 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 平均值 |
| Al | 29.456 | 16.912 | 12.937 | 19.768 | 0.286 | 0.199 | 0.185 | 0.223 |
| Cr | 2.047 | 1.177 | 0.931 | 1.385 | 0.010 | 0.012 | 0.008 | 0.010 |
| Mn | 35.536 | 20.922 | 13.828 | 23.429 | 0.148 | 0.180 | 0.107 | 0.145 |
| Fe | 81.869 | 54.428 | 53.112 | 63.136 | 0.389 | 0.516 | 0.398 | 0.434 |
| Ni | 2.911 | 2.491 | 1.502 | 2.301 | 0.013 | 0.025 | 0.012 | 0.017 |
| Cu | 4.321 | 2.277 | 2.305 | 2.968 | 0.020 | 0.021 | 0.018 | 0.020 |
| Zn | 112.307 | 45.292 | 32.439 | 63.346 | 0.853 | 0.360 | 0.306 | 0.507 |
| As | 2.100 | 1.419 | 2.136 | 1.885 | 0.009 | 0.013 | 0.014 | 0.012 |
| Sr | 21.133 | 14.998 | 14.773 | 16.968 | 0.079 | 0.121 | 0.075 | 0.092 |
| Cd | 0.325 | 0.291 | 0.239 | 0.285 | 0.002 | 0.003 | 0.002 | 0.002 |
| Ba | 52.319 | 23.484 | 45.518 | 40.440 | 0.247 | 0.206 | 0.344 | 0.266 |
| Pb | 1.918 | 0.634 | 0.507 | 1.020 | 0.011 | 0.006 | 0.007 | 0.008 |
| 总和 | 346.242 | 184.325 | 180.227 | 236.931 | 2.068 | 1.662 | 1.475 | 1.735 |

2.2 重金属时间变化特征

图 2 显示了太原市 2013~2015 年夏季降水中溶解态重金属的组成及其沉降通量. 重金属的湿沉降通量受到降水量的影响, 12 种重金属沉降通量最高值出现在 2013 年 6 月 20 日, 达到 $18.133 \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 其次是 2015 年 9 月 11 日, 达到 $7.569 \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 两天降水量分别高达 26.15 mm 和 43.60 mm; 沉降通量最低值出现在 2015 年 6 月 22 日, 仅为 $0.043 \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 降水量为 0.16 mm. 本研究中, 重金属的湿沉降通量与降水量呈正相关(见表 2), 相关系数从 0.387 (Mn) 变化到

0.801 (Cr). 重金属湿沉降通量变化趋势还受金属浓度的影响, 两者呈现正相关(表 2). 2014 年 9 月 16 日降水量高达 21.07 mm, 沉降通量为 $1.398 \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 而在 2014 年 9 月 23 日, 降水量为 11.87 mm, 但沉降通量却高于 9 月 16 日, 达到 $4.175 \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 主要由于 2014 年 9 月 23 日重金属浓度高于 9 月 16 日. 此外, 高风速有助于大气污染物的扩散, 对大气中重金属有稀释作用, 本研究中重金属湿沉降通量与风速呈负相关 ($R = -0.323, P < 0.1$) (表 2), 与先前的研究结果一致^[14].

表 2 重金属湿沉降通量与降水量、重金属浓度和风速的相关系数¹⁾

Table 2 Correlations of heavy metal wet deposition fluxes with precipitation amount, heavy metal concentrations and wind speed

| 项目 | 湿沉降通量 | | | | | | | | | | | |
|----|----------|----------|----------|---------|---------|---------|-----------|----------|-----------|---------|---------|-----------|
| | Al | Cr | Mn | Fe | Ni | Cu | Zn | As | Sr | Cd | Ba | Pb |
| 降水 | 0.402 * | 0.801 * | 0.387 * | 0.786 * | 0.753 * | 0.624 * | 0.461 * | 0.543 * | 0.476 * | 0.465 * | 0.727 * | 0.435 * |
| 浓度 | 0.705 * | 0.178 | 0.211 | 0.318 | 0.217 | 0.195 | 0.682 ** | 0.326 | 0.127 | 0.295 | 0.276 | 0.476 * |
| 风速 | -0.312 * | -0.297 * | -0.310 * | -0.270 | -0.302 | -0.291 | -0.329 ** | -0.289 * | -0.331 ** | -0.229 | -0.257 | -0.327 ** |

1) * * 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

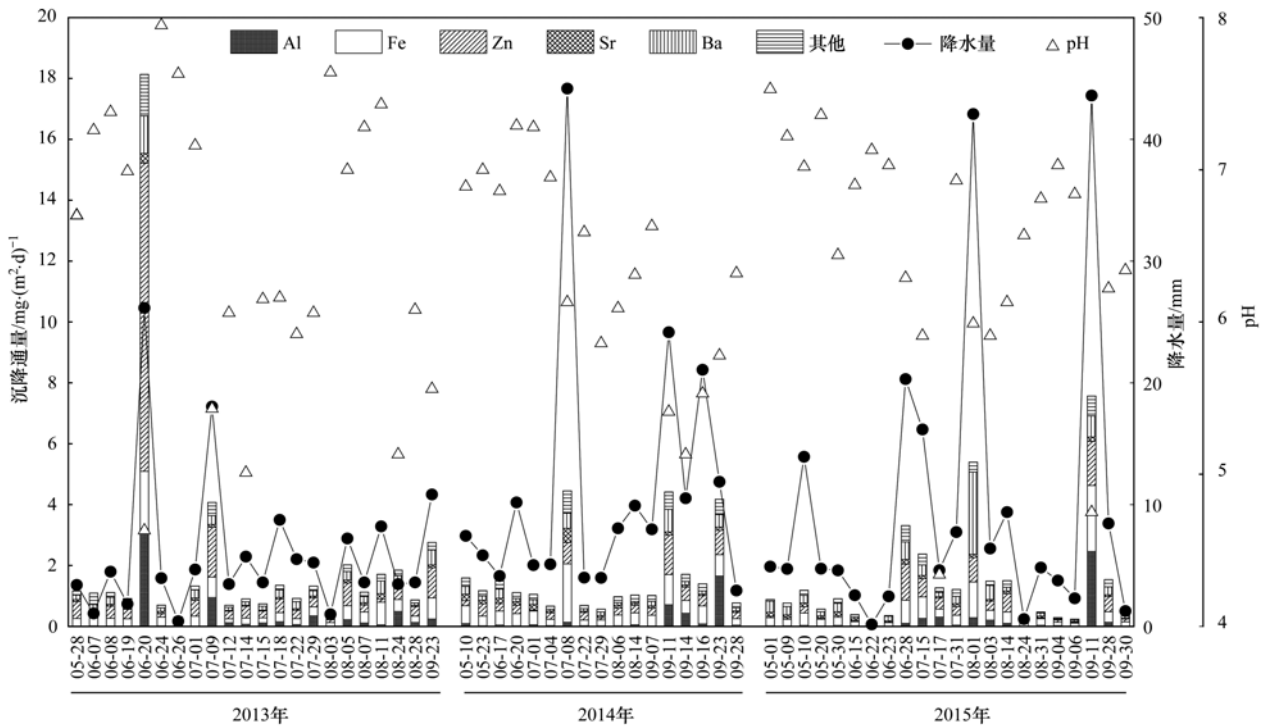


图2 采样期间溶解态重金属湿沉降通量与 pH 值、降水量变化

Fig. 2 Variations of dissolved heavy metals deposition fluxes, pH and precipitation amount during the sampling period

2013~2015年夏季降水中重金属总浓度和沉降通量均呈下降趋势(表1)。除Cu、As和Ba在2015年浓度高于2014年外,其他元素浓度逐年下降。Zn是降水中的主要元素,2013、2014和2015年夏季降水中Zn的沉降通量分别为0.853、0.360和0.306 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,与2013年相比,Zn在2014年和2015年下降比例分别达到57.8%和64.1%。2013~2015年太原市夏季降水量分别为134.30、186.37和209.55 mm,呈递增趋势,而重金属总沉降通量在年度间却呈现下降趋势,与太原市近年来对工业和能源结构的调整使污染物排放量降低有关^[21]。

2.3 重金属来源分析

采用富集因子法初步判断降水中重金属的自然来源和人为来源^[12]。Al是地壳中普遍存在的元素,在采集的降水样品中浓度也较为稳定。本研究以Al为参考元素,计算公式如下:

$$EF = (c_i/c_{Al})_{\text{降水}} / (c_i/c_{Al})_{\text{地壳}} \quad (1)$$

式中,EF为元素的富集因子, c_i 为元素的浓度($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。

一般地,根据富集程度,元素可以分为3类:轻度富集($EF < 10$),元素主要来源于自然源;中度富集($10 < EF < 100$),元素受到自然源和人为源的共同影响;高度富集($EF > 100$),元素主要来自人为

源^[22, 23]。

图3显示了太原市2013~2015年夏季降水中溶解态重金属的富集因子。Fe的富集因子低于10,属于轻度富集,主要来源于自然源;Cr、Mn和Ni的富集因子介于10~100之间,属于中度富集,受到自然源和人为源的共同影响;Cu、Ba、Sr、Pb、Zn、As和Cd的富集因子大于100,呈现高度富集,表明受到严重的人为活动的影响。该结果与彭玉龙等^[5]、李月梅等^[9]及张亚爽^[13]对重庆、唐山和厦门的研究报道一致,表明Zn和Cd是降水中受到人为污染较为严重的元素。

采用EPA PMF 5.0软件对降水中重金属的来源

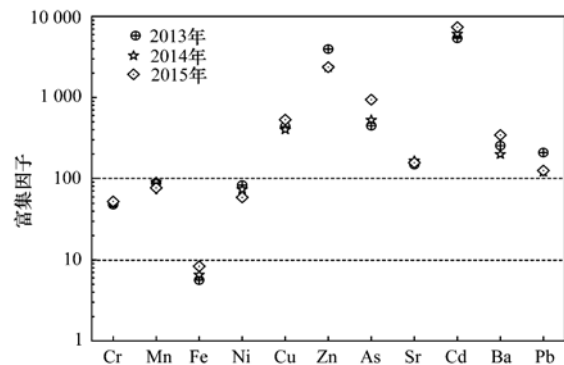


图3 降水中重金属的富集因子

Fig. 3 Enrichment factors of heavy metals for all precipitation samples

进行定量分析,参与分析的化学组分包括 Al、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Sr、Cd、Ba 和 Pb 这 12 种元素,最终得出 4 个因子合理解释金属的污染来源. 残差值介于 $-3 \sim 3$ 之间,所有元素的信噪比都为 4,且相关系数均大于 0.8,解析结果较好,如图 4 所示.

因子 1 以 Zn 和 Ba 为主,对重金属的贡献率为 20.45%,是机动车源. Zn 和 Ba 广泛用于汽车轮胎和刹车片中,同时 Zn 又是机动车润滑油的主要添加剂^[24, 25]. 太原市机动车保有量从 2013 年到 2015 年以 10.5% ~ 13.5% 的年平均增长率增长,到 2015 年达到 112.29 万辆^[26],机动车排放对重金属的贡

献不可忽视. 因子 2 对重金属的贡献最大,达到 38.34%,主要富集在 Mn、Ni 和 Pb 等元素上,与金属加工和冶炼等工业活动有关,是钢铁冶金等排放源^[27]. 因子 3 中 Al 和 Fe 负荷较高,对降水中重金属的贡献率为 18.15%. Al 和 Fe 是地壳中广泛存在的元素^[27, 28],可认定为地面扬尘. 因子 4 中 Cr、Mn、As 和 Pb 的贡献显著,贡献率为 23.06%,是煤燃烧的主要排放物且 As 常作为煤燃烧的示踪物^[29],可确定该因子为燃煤源. 综上所述,太原市夏季降水中重金属来源贡献最大的为钢铁冶金,其次为煤燃烧、机动车排放及地面扬尘.

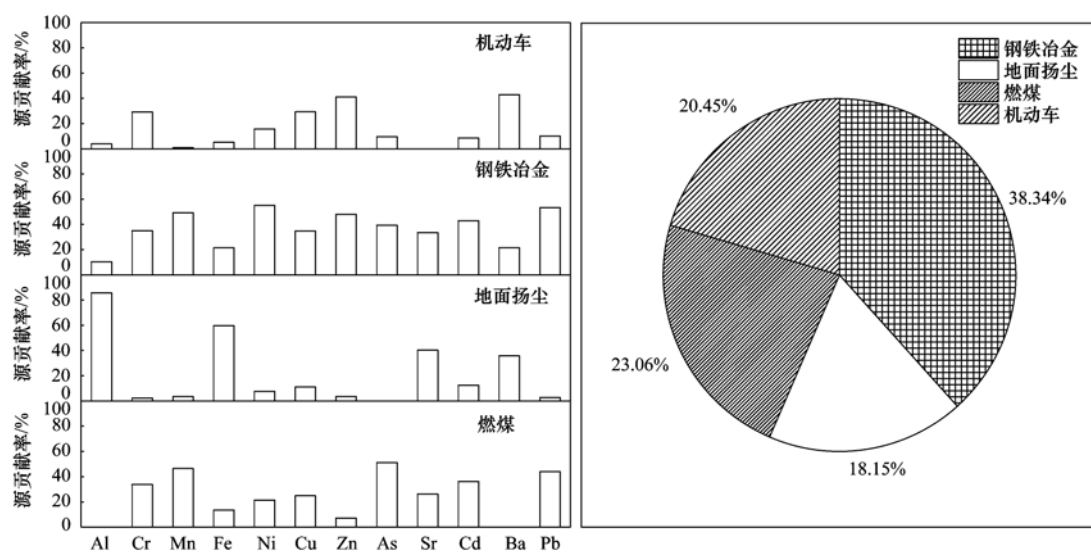


图 4 降水中溶解态重金属的来源因子及贡献

Fig. 4 Source factors and contributions of dissolved heavy metals for all precipitation samples

2.4 气团后向轨迹

气团传输会将污染物或清洁空气带到本地,影响本地降水量及降水化学组成^[15]. 本研究运用后向轨迹模型(HYSPLIT)对太原市 2013 ~ 2015 年夏季 61 场降水做了降水云团 500 m 高度 48 h 的分析(见表 3). 太原市夏季降水气团主要来自西南和东南方向,降水次数达 44 次,降水量达到 379.51 mm,占到总降水量的 72%;西北和东北气团为太原市夏季带来的降水量较小,分别为 94.66 mm 和 56.05 mm. 2013 ~ 2015 年太原市夏季 61 场降水加权平均 pH 值为 5.37,有 10 场降水 pH 值在 5.6 以下,其中有 7 场来源于东南方向(pH = 5.07),3 场来源于西南方向(pH = 5.58);西北和东北气团带来的降水 pH 值较大,分别为 5.96 和 6.12. 太原市夏季降水主要受南部气团影响,且污染较为严重.

不同方向的气团对降水中重金属组分的贡献存在差异,受东南气团和西南气团影响的降水中金属沉降通量高于西北和东北气团. 结合气团后向轨迹可知(图 1),太原市降水气团主要来自西南气团,占气团总数的 38%,该气团经过山西省的主要煤焦区域(临汾、孝义、介休等)到达太原,对金属 Al、Cr、Zn、As 和 Ba 的贡献最大,分别占到 38.35%、34.89%、39.83%、40.30% 和 40.86%(表 3). 有 35% 的气团来自东南方向,该气团轨迹经过晋城、长治和晋中等地,对金属沉降通量贡献较大,如 Mn (33.81%)、Ni (34.09%)、Cu (33.83%)、Cd (35.90%) 和 Pb (41.17%) 等,与途经的大型火力发电厂如阳城电厂、漳泽电厂等有关. 太原市夏季降水受北部气团的影响较小,且气团较为清洁^[30],西北气团和东北气团分别占到 19% 和 8%,对重金属沉降通量的贡献相对较低.

表 3 不同方向气团降水 pH 值和金属湿沉降通量/ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$
 Table 3 Contribution of pH and wet deposition fluxes of heavy metals in precipitation
 from air masses of four typical transport pathways/ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$

| 元素 | 东南 | | 西南 | | 东北 | | 西北 | |
|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 通量 | 贡献/% | 通量 | 贡献/% | 通量 | 贡献/% | 通量 | 贡献/% |
| Al | 0.269 | 33.85 | 0.304 | 38.35 | 0.094 | 11.83 | 0.127 | 15.97 |
| Cr | 0.009 | 26.49 | 0.012 | 34.89 | 0.006 | 16.17 | 0.008 | 22.45 |
| Mn | 0.179 | 33.81 | 0.137 | 25.95 | 0.114 | 21.62 | 0.098 | 18.62 |
| Fe | 0.457 | 27.79 | 0.506 | 30.77 | 0.360 | 21.89 | 0.321 | 19.54 |
| Ni | 0.021 | 34.09 | 0.016 | 26.07 | 0.011 | 18.23 | 0.014 | 21.61 |
| Cu | 0.024 | 33.83 | 0.019 | 26.43 | 0.013 | 17.97 | 0.016 | 21.76 |
| Zn | 0.427 | 26.13 | 0.650 | 39.83 | 0.219 | 13.44 | 0.336 | 20.60 |
| As | 0.014 | 28.92 | 0.020 | 40.30 | 0.007 | 14.41 | 0.008 | 16.37 |
| Sr | 0.097 | 28.05 | 0.099 | 28.69 | 0.082 | 23.72 | 0.068 | 19.54 |
| Cd | 0.003 | 35.90 | 0.002 | 27.15 | 0.001 | 17.17 | 0.002 | 19.77 |
| Ba | 0.274 | 27.80 | 0.403 | 40.86 | 0.123 | 12.50 | 0.186 | 18.83 |
| Pb | 0.011 | 41.17 | 0.008 | 29.04 | 0.003 | 11.30 | 0.005 | 18.49 |
| 降水次数/次 | 21 | | 23 | | 5 | | 12 | |
| 降水量/mm | 178.35 | | 201.16 | | 56.05 | | 94.66 | |
| pH | 5.07 | | 5.58 | | 6.12 | | 5.96 | |

3 结论

(1) 太原市 2013 ~ 2015 年夏季降水 pH 值范围为 4.34 ~ 7.95, 降水量加权平均 pH 值为 5.37. 太原市夏季降水中 12 种溶解态重金属浓度变化范围为 66.324 ~ 1 029.212 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 236.931 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 主要元素是 Zn 和 Fe, 占总浓度的 53.39%. 12 种溶解态重金属的湿沉降总通量为 1.735 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$.

(2) 太原市夏季降水中 Zn 和 Cd 呈现高度富集特征, 受到人为活动的影响较大. PMF 解析结果显示 12 种重金属的最大来源为钢铁冶金, 贡献率达 38.34%, 其次是燃煤源和机动车源, 分别贡献了 23.06% 和 20.45%, 地面扬尘贡献最小, 占 18.15%.

(3) 西南气团和东南气团对太原市夏季降水的贡献最大, 分别为 38% 和 35%. 两类气团经过的焦化和煤电工业区对太原市重金属湿沉降影响较大, 区域的联防联控应该是今后重金属污染的主要改善措施.

参考文献:

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

[2] Agnan Y, Séjalon-Delmas N, Probst A. Comparing early twentieth century and present-day atmospheric pollution in SW France: a story of lichens[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **172**: 139-148.

[3] Connan O, Maro D, Hébert D, *et al.* Wet and dry deposition of particles associated metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Hg) in a rural wetland site, Marais Vernier, France [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **67**: 394-403.

[4] 林静, 张健, 杨万勤, 等. 岷江下游五通桥段小型集水区大气降水中 pH 值对重金属含量的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(4): 1419-1427.

Lin J, Zhang J, Yang W Q, *et al.* Effect of pH on heavy metal concentrations in the precipitation of a small catchment at the downstream (Wutongqiao section) of Minjiang river[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(4): 1419-1427.

[5] 彭玉龙, 王永敏, 覃蔡清, 等. 重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2490-2496.

Peng Y L, Wang Y M, Qin C Q, *et al.* Concentrations and deposition fluxes of heavy metals in precipitation in core urban areas, Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2490-2496.

[6] Pan Y P, Wang Y S. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(2): 951-972.

[7] 王华, 马宁, 杨晓静, 等. 成都市雨水中的重金属特征[J]. *地球与环境*, 2010, **38**(1): 49-53.

Wang H, Ma N, Yang X J, *et al.* Heavy metal characteristics of rainwater in Chengdu [J]. *Earth and Environment*, 2010, **38**(1): 49-53.

[8] 徐宏林, 李定远, 杨军, 等. 湖北省云梦县重金属元素大气干湿沉降通量初探[J]. *资源环境与工程*, 2015, **29**(6): 816-821.

Xu H L, Li D Y, Yang J, *et al.* Preliminary study on flux of atmospheric dry and wet deposition of heavy metal elements in Yunmeng County, Hubei Province [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2015, **29**(6): 816-821.

[9] 李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 等. 华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源[J]. *环境科学*, 2012, **33**(11): 3712-3717.

- Li Y M, Pan Y P, Wang Y S, *et al.* Chemical characteristics and sources of trace metals in precipitation collected from a typical industrial city in northern China [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(11): 3712-3717.
- [10] 杨忠平, 卢文喜, 龙玉桥, 等. 长春市城区大气湿沉降中重金属及 pH 值调查[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2009, **39**(5): 887-892.
Yang Z P, Lu W X, Long Y Q, *et al.* Current situation of pH and wet deposition of heavy metals in precipitation in Changchun city, China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, **39**(5): 887-892.
- [11] Cheng M C, You C F, Lin F J, *et al.* Sources of Cu, Zn, Cd and Pb in rainwater at a subtropical islet offshore northern Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(11): 1919-1928.
- [12] 胡健, 张国平, 刘丛强. 贵阳市大气降水中的重金属特征[J]. *矿物学报*, 2005, **25**(3): 257-262.
Hu J, Zhang G P, Liu C Q. The characteristics of heavy metals in rain water in Guiyang city, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2005, **25**(3): 257-262.
- [13] 张亚爽. 东南沿海典型港口城市大气降水中的重金属[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(3): 131-135.
Zhang Y S. Heavy metals in atmospheric precipitation from a typical seaport in Southern China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(3): 131-135.
- [14] 龚香宜, 祁士华, 吕春玲, 等. 福建省兴化湾大气重金属的干湿沉降[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(6): 31-34.
Gong X Y, Qi S H, Lv C L, *et al.* Atmospheric deposition of heavy metals to Xinghua Bay, Fujian Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, **19**(6): 31-34.
- [15] 张啸. 太原市雨水中 PAHs 的污染特征及来源分析[D]. 太原: 太原科技大学, 2014.
- [16] 郭晓方, 崔阳, 王开扬, 等. 近 3 年太原市夏季降水的化学特征研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 388-395.
Guo X F, Cui Y, Wang K Y, *et al.* Chemical characteristics of 3-year atmospheric precipitation in summer, Taiyuan [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 388-395.
- [17] 艾东升, 郑祥民, 周立旻, 等. 近 2 年上海市夏季降水地球化学特征研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(9): 2002-2009.
Ai D S, Zheng X M, Zhou L M, *et al.* Geochemical character of precipitation in summer of Shanghai 2008-2009 [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(9): 2002-2009.
- [18] Huang D Y, Xu Y G, Peng P A, *et al.* Chemical composition and seasonal variation of acid deposition in Guangzhou, South China: comparison with precipitation in other major Chinese cities [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(1): 35-41.
- [19] Yang F, Tan J, Shi Z B, *et al.* Five-year record of atmospheric precipitation chemistry in urban Beijing, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(4): 2025-2035.
- [20] 田晶, 沈振兴, 张琨, 等. 西安市春、夏季大气降水的化学组成和来源分析[J]. *西安交通大学学报*, 2011, **45**(5): 108-113.
- Tian J, Shen Z X, Zhang K, *et al.* Chemical composition and potential sources of water-soluble compounds in atmospheric precipitation in Xi'an in spring and summer [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, **45**(5): 108-113.
- [21] 山西省环境保护厅. 2012-2014 山西省环境状况公报[EB/OL]. <http://www.sxhb.gov.cn/hjzkgb/index.jhtml>, 2013-2015.
- [22] Guo J M, Kang S C, Huang J, *et al.* Trace elements and rare earth elements in wet deposition of Lijiang, Mt. Yulong region, southeastern edge of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Environmental Science*, 2017, **52**: 18-28.
- [23] Kara M, Dumanoglu Y, Altioik H, *et al.* Seasonal and spatial variations of atmospheric trace elemental deposition in the Aliaga industrial region, Turkey [J]. *Atmospheric Research*, 2014, **149**: 204-216.
- [24] Gao J J, Tian H Z, Cheng K, *et al.* Seasonal and spatial variation of trace elements in multi-size airborne particulate matters of Beijing, China: mass concentration, enrichment characteristics, source apportionment, chemical speciation and bioavailability [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **99**: 257-265.
- [25] Weerasundara L, Amarasekara R W K, Magana-Arachchi D N, *et al.* Microorganisms and heavy metals associated with atmospheric deposition in a congested urban environment of a developing country: Sri Lanka [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **584-585**: 803-812.
- [26] 太原市统计局. 太原统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2014-2016.
- [27] 王琴, 张大伟, 刘保献, 等. 基于 PMF 模型的北京市 PM_{2.5} 来源的时空分布特征[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(10): 2917-2924.
Wang Q, Zhang D W, Liu B X, *et al.* Spatial and temporal variations of ambient PM_{2.5} source contributions using positive matrix factorization [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(10): 2917-2924.
- [28] Xing J W, Song J M, Yuan H M, *et al.* Atmospheric wet deposition of dissolved trace elements to Jiaozhou Bay, North China: fluxes, sources and potential effects on aquatic environments [J]. *Chemosphere*, 2017, **174**: 428-436.
- [29] Shi G, Teng J, Ma H, *et al.* Metals and metalloids in precipitation collected during CHINARE campaign from Shanghai, China, to Zhongshan Station, Antarctica: spatial variability and source identification [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, **29**(6): 760-774.
- [30] Pu W W, Zhao X J, Shi X F, *et al.* Impact of long-range transport on aerosol properties at a regional background station in Northern China [J]. *Atmospheric Research*, 2015, **153**: 489-499.

CONTENTS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years | LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i> (3003) |
| Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City | WEI Guo-ru, SHI Xing-min (3014) |
| Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province | JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le (3022) |
| Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing | XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i> (3033) |
| Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an | LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i> (3042) |
| Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City | ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (3051) |
| Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing | HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun (3057) |
| Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer | LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (3067) |
| Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China | YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3075) |
| Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou | PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i> (3082) |
| Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources | JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i> (3090) |
| Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City | HU Xu-ru, HU Xiao-yu, WANG Can (3096) |
| Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production | GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i> (3102) |
| Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles | HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun (3110) |
| Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing | TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i> (3118) |
| Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China | SHI Dong-qí, LU Xin-wei (3126) |
| pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors | LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue (3134) |
| Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River | KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i> (3142) |
| Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems | LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i> (3150) |
| Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai | YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i> (3158) |
| Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake | LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i> (3168) |
| Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface | WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i> (3179) |
| Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland | XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i> (3187) |
| Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone | ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i> (3194) |
| Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate | LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i> (3203) |
| Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets | KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i> (3212) |
| Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter | CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (3222) |
| Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing | ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i> (3230) |
| Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell | LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i> (3240) |
| COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations | LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i> (3247) |
| Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor | ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (3254) |
| Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor | FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i> (3262) |
| Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration | GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i> (3271) |
| Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing | HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i> (3279) |
| Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion | SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang (3286) |
| Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process | ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i> (3297) |
| Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge | SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping (3306) |
| Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97 | CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i> (3314) |
| Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil | ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i> (3321) |
| Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site | CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i> (3329) |
| Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam | WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i> (3339) |
| Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi | GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i> (3349) |
| Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City | YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (3358) |
| Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain | LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3365) |
| Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin | ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3373) |
| Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin | AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (3382) |
| Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil | TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (3391) |
| Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings | ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i> (3400) |
| Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland | HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i> (3409) |
| Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China | ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i> (3418) |
| Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors | CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (3426) |
| Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces | SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian (3434) |
| Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues | QIANG Hong, LI Yu-yu, PEI Meng-fu (3443) |
| Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application | HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i> (3452) |
| Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure | PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i> (3460) |