

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估 李晓晓,张强,邓建国,蒋靖坤,郝吉明(3095)

钢铁工业排放颗粒物中碳组成的特征 张进生,吴建会,马威,冯银厂(3102)

常州市大气 PM_{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析 顾爱军,刘佳澍,罗世鹏,毕承路,苏亚兰,叶招莲,盖鑫磊(3110)

兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源 尉媛丽,刘攀亮,于周锁,高宏,毛潇萱,马建民,黄韬(3120)

株洲市大气降尘中元素特征及来源分析 王世豪,张凯,柴发合,钟学才,周广柱,杨晴,柯馨姝(3130)

传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征 徐敏,何万清,聂磊,韩力慧,潘涛,石爱军(3139)

基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征 史纯珍,郝雪薇,申现宝,曹鑫悦,张伟,吴辉,姚志良(3146)

基于 wavelet-SVM 的 PM₁₀ 浓度时序数据预测 王平,张红,秦作栋,姚清晨,耿红(3153)

广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算 黄学良,张洲,杨威强,李晟,朱明,方华,何俊杰,陈俊文,万承浩,张艳利,刘国光,黄祖照,王宇骏,王新明(3162)

沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响 李鸿涛,祁建华,董立杰,高冬梅(3169)

典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价 芦会杰(3178)

杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,陈金汉,余波,周姗,张伟(3185)

黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征 聂明华,晏彩霞,杨毅,周俊良,刘敏(3192)

漓江地表水体有机碳来源 赵海娟,肖琼,吴夏,刘凡,苗迎,蒋勇军(3200)

夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响 吴飞红,蒲俊兵,李建鸿,张陶,李丽,黄思宇(3209)

城市不同功能区地表水重金属污染特性比较:以宁波为例 徐美娟,童桂华,孙丹,李建新,虞效益(3218)

地下水主要组分水化学异常识别方法对比:以柳江盆地为例 张小文,何江涛,彭聪,张昌延,倪泽华(3225)

人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析 李如忠,叶舟,高苏蒂,郑悦(3235)

长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义 刘军,臧家业,冉祥滨,赵晨英,刘季花,王小静(3243)

三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系 陈成龙,高明,木志坚,倪九派,祁乐(3254)

黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估:以羊圈沟坝系流域为例 鄂馨卉,汪亚峰,高扬,陈利顶,陈世博,陈维梁(3264)

新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制 李欢,李正魁,李爱民,周庆,王莹,潘咏(3273)

藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响 张大为,徐慧,王希,门彬,王东升,段晋明(3281)

汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析 向蓉,李巧玉,喻毅,张洪波,董聪聪,施军琼,吴忠兴(3290)

石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析 宋云龙,张金松,郭小雅,朱佳,王丽,陶益,张丽(3302)

不同湿地模型中根系微生物的多样性 王林,李冰,余家辉,朱加宾,朱健(3312)

北海湖微生物群落结构随季节变化特征 张雅洁,李珂,朱浩然,张洪勋(3319)

基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析 张海耿,宋红桥,顾川川,单建军,张宇雷,倪琦(3330)

高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析 孟婷,杨宏(3339)

基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理 韩松芳,金文标,涂仁杰,陈洪一(3347)

生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果 王愿珠,程鹏飞,刘德富,刘天中(3354)

微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水 刘春,周洪政,张静,陈晓轩,张磊,郭延凯(3362)

pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响 于德爽,周同,李津,王晓霞,吴国栋,王晓静(3369)

酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性 周正,林兴,王凡,顾澄伟,沈婧,袁砚,金润(3377)

模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性 康乃馨,朱能武,郭雯颖,何志心(3385)

采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程 王利君,李志华,韩冬,张天宇,杨成建(3393)

CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动 张婷,吴鹏,沈耀良,闫刚,徐乐中, Samwine Thomas(3399)

硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径 完颜德卿,黄勇,毕贞,刘沂,姚鹏程,张文静(3406)

不同 TOC/NH₄⁺-N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响 王凡,刘凯,林兴,周正,李祥,黄勇(3415)

盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响 谭潇,黄靓,杨平,涂弈州(3422)

CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略 孙延芳,韩晓宇,张树军,李星,曹相生(3429)

胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸(PFOS)的影响 刘鑫彤,尹华,彭辉,李浩榕,杨萍萍,曹雅娟(3435)

不同施肥方式下紫色土 N₂O 与 NO_x 的排放特征 胡磊,刘韵,朱波(3442)

地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响 张凯莉,郝庆菊,冯迪,石将来,石孝均,江长胜(3451)

模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响 张翠景,沈菊培,孙翼飞,王军涛,杨中领,韩红艳,张丽梅,万师强,贺正(3463)

长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征 徐白璐,钟文辉,黄欠如,秦红益,邓欢,韩成(3473)

施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响 郭安宁,段桂兰,赵中秋,唐仲,王扬扬,王伯勋(3483)

水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应 魏亮,汤珍珠,祝贞科,蔡观,葛体达,王久荣,吴金水(3489)

凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素 张彦军(3497)

西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义 王新,夏敦胜,王博,陈红,刘浩(3507)

小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd²⁺ 活性 张如玉,刘海波,邹雪华,庆承松,李梦雪,陈冬,陈天虎(3519)

交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响 汪婷,丁锐,黄丹妮,祝子逸,章军,叶怀庄,徐迎春,金永堂(3529)

外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响 杨萍萍,尹华,彭辉,唐少宇,卢妙,刘皓(3536)

中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价 刘巍,田金平,陈吕军(3544)

《环境科学》征稿简则(3280) 《环境科学》征订启事(3301) 信息(3353, 3472, 3535)

株洲市大气降尘中元素特征及来源分析

王世豪^{1,2}, 张凯^{2*}, 柴发合², 钟学才³, 周广柱¹, 杨晴^{1,2}, 柯馨姝²

(1. 山东科技大学化学与环境工程学院, 青岛 266590; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 株洲市环境监测中心站, 株洲 412000)

摘要: 为研究湖南省株洲市大气降尘中多种元素的分布特征以及来源, 于 2012 年 1~12 月对株洲市 12 个点的大气降尘样品进行采集并对其中 28 种元素的含量进行分析. 结果表明, 株洲市城区各采样点大气降尘年沉降量为 23.14~114.67 g·m⁻², 其中工业区和商住混合区年均值分别为 89.46 g·m⁻² 和 33.20 g·m⁻², 低于其它工业城市; 工业区和商住混合区降尘中分别有 10 种元素 (Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、Mn、Fe、Zn、Pb) 和 8 种元素 (Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、Fe、Zn) 含量大于 1 000 mg·kg⁻¹, 其中工业区 2 种重金属元素 (Zn、Pb) 含量超过 10 000 mg·kg⁻¹, 远高于地壳中的含量. 株洲市大气降尘主要来源为金属冶炼、地表扬尘、汽车尾气、建筑粉尘和与 Mo、Ba 元素相关的工业生产. 相关性分析、主因子分析和迁移特征分析表明降尘中 Mn、Fe、Co、Cu、Zn、As、Se、Ag、Cd、Sn、Sb、Tl、Pb 等 13 种元素主要来自株洲市工业区废气排放, 其中 Cu、Zn、As、Ag、Cd、Se 和 Pb 等 7 种元素污染严重, 工业区重金属元素含量是土壤背景值中含量的 7.4~4 079.4 倍, 商住混合区是土壤背景值的 3.6~1 413.4 倍, 背景比值最高的为 Cd 元素. 工业区的污染程度明显高于商住混合区.

关键词: 大气降尘; 元素组成; 污染特征; 来源; 重金属; 株洲

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3130-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201609174

Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China

WANG Shi-hao^{1,2}, ZHANG Kai^{2*}, CHAI Fa-he², ZHONG Xue-cai³, ZHOU Guang-zhu¹, YANG Qing^{1,2}, KE Xin-shu²

(1. College of Chemical and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Zhuzhou Environment Monitoring Centre, Zhuzhou 412000, China)

Abstract: To study the concentration characteristics as well as sources of elements and heavy metal pollution in atmospheric dust fall in Zhuzhou City, 144 samples from 12 sites in the Zhuzhou urban area were collected from January to December in 2012 and 28 kinds of elements in the samples were analyzed. The results showed that the dust fall quantities of the industrial areas and mixed commercial and residential (MCR) areas were, respectively, 89.46 g·m⁻² and 33.20 g·m⁻² and the range of all sample points was 23.14-114.67 g·m⁻². There were 10 elements (Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Zn, Pb) in the industrial areas as well as 8 elements in the MCR areas, for which the contents greatly exceeded 1 000 mg·m⁻¹ in the atmospheric dust fall. The Zn and Pb contents exceeded 10 000 mg·kg⁻¹ in the dust fall of the industrial areas, which were far higher than those in the Earth's crust. The main sources of dust fall in Zhuzhou City were metal smelting, shallow ground dust, vehicle emissions, construction dust, and industrial production with specific elements (Mo, Ba). Correlation analysis, principal component analysis (PCA), and analysis of transportation characteristics showed that 13 elements (Mn, Fe, Co, Cu, Zn, As, Se, Ag, Cd, Sn, Sb, Tl, Pb) in dust fall mainly came from waste gas emissions of industrial areas in Zhuzhou, in which 7 heavy metal elements (Cu, Zn, As, Ag, Cd, Sb, Pb) caused serious pollution. The contents of heavy metals in the industrial areas were 7.4 to 4 079.4 times the contents defined in China soil elements background values, whereas those in the MCR areas were 3.6 to 1 413.4 times the soil background values. Cd was the highest background ratio element. The degree of contamination was clearly higher in the industrial areas than in the MCR areas.

Key words: atmospheric dust fall; elemental composition; pollution characteristics; sources; heavy metals; Zhuzhou City

大气降尘是指由重力自然沉降或降水冲刷到地面的颗粒物. 由于颗粒物的粒径不同, 其在空中停留的时间也不尽相同, 因而导致沉降区域和影响范围的明显差别. 通常来说, 当量直径大于 100 μm 的粗颗粒通常降落在源区附近的地表, 而直径小于 2.5 μm (PM_{2.5}) 的细颗粒可随气流输送到 1 000 km 以外的地区, 其影响范围远远超过粗颗粒物. 大气

降尘本身是有害物质, 其覆盖在绿叶表面会影响绿叶的光合作用^[1], 附着在景观、建筑表面对观瞻造

收稿日期: 2016-09-21; 修订日期: 2017-03-17

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项 (201109005); 国家自然科学基金项目 (41205093); 山东省自然科学基金项目 (ZR2013DM008)

作者简介: 王世豪 (1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境化学及污染机制, E-mail: imwangshihao@163.com

* 通信作者, E-mail: zhangkai@cras.org.cn

成一定影响. 同时大气降尘也可以运载其他污染物, 矿区、冶炼厂周围地表的降尘中重金属元素的含量明显高于其他地区^[2, 3]; 含酸性或碱性物质的降尘降落在土壤表面会使土壤性质发生改变^[4], 含酸性物质的降尘受潮后会使酸性物质浸出, 附着在岩石表面会加速岩石风化^[5]; 降尘还可以携带病菌和微生物, 对人体、牲畜的健康造成威胁^[6, 7]. 目前对于大气降尘中元素的研究在全国已广泛开展, Pan 等^[8]对中国华北 10 个地区的降尘研究发现, 降尘是农业用地表层土壤中微量元素的重要来源, 由降尘输入土壤的铜、铅、锌、镉、砷和硒与土壤中以上元素的生长量处于同一数量级. Chen 等^[9]对西安市降尘中重金属的含量进行分析, 结果显示西安市降尘中 Pb、Zn、Cu、Cr、Ni 和 Cd 的含量分别是陕西省土壤背景值的 20.5、6.6、2.9、2.4、1.4 和 83.0 倍. 张舒婷等^[10]对贵阳市降尘中重金属在不同空间高度下的含量进行了对比, 结果表明降尘中 Cd、Cu、Ni 和 Pb 的含量随楼层增高而增加, Cr 和 Zn 则随楼层增高而减小. 目前对于降尘的研究内容主要集中于某种或几种元素, 尤其是重金属和微量元素等方面, 对降尘中多种元素沉降规律和传输特点等方面的研究还相对较少.

株洲市位于湖南省东部偏北, 年均降水量 1 410 mm, 相对湿度 78%. 株洲市是湖南省著名的工业城市, 其工业发展始于 20 世纪 30 年代, 以有色金属冶炼、运输设备制造、化工原料加工等重工业为主, 多年的重工业生产对当地自然环境造成严重影响. 2008 年株洲成为我国两型社会(环境友好型和经济节约型)示范区, 环境质量明显好转, 但长期的重工业生产导致当地环境依旧存在不可忽视的污染问题. 本研究通过对株洲市大气降尘样品进行采集, 分析降尘中 28 种元素的沉降量和含量, 以此了解当地降尘的元素组成和元素污染状况, 进一步分析其迁移规律和人类活动对降尘元素组成的影响及可能的来源.

1 材料与方法

1.1 采样时间与地点

结合株洲市城市建设规划, 在株洲市共设置 12 个采样点(图 1、表 1), 并划分为工业区、商住混合区(混合区), 采样点数分别为工业区 3 个(S2、S3、S7), 混合区 9 个(S1、S4、S5、S6、S8、S9、S10、S11、S12). S2 湖南吴华化工、S3 湖南经仕集团和 S7 海利化工这 3 个采样点位于株洲清水塘工业园

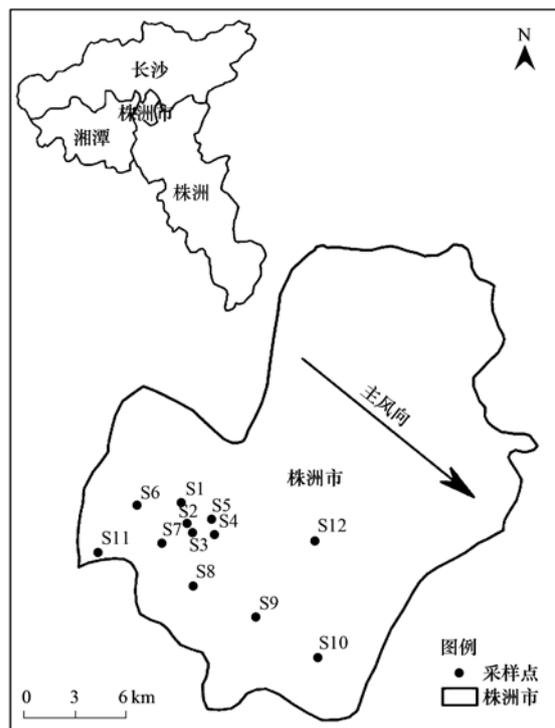


图 1 株洲市采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Zhuzhou

表 1 株洲市大气降尘采样点布设

Table 1 Sampling sites of atmospheric deposition in Zhuzhou

点位号	采样点名称	位置说明
S1	株冶医院	临近工业区, 办公楼楼顶
S2	湖南吴华化工	大型化工厂内, 厂房楼顶
S3	湖南经仕集团	大型化工厂内, 厂房楼顶
S4	株洲八中	化工厂侧风向, 教学楼楼顶
S5	石峰区政府	工业区侧风向, 办公楼楼顶
S6	株洲十二中	工业区上风向, 教学楼楼顶
S7	海利化工	大型化工厂内, 厂房楼顶
S8	体育中心	工业区下风向, 办公楼楼顶
S9	天台山庄	工业区下风向商住区, 办公楼楼顶
S10	建宁中学	市区边缘居民区, 教学楼楼顶
S11	河西污水处理厂	市区边缘居民区, 办公楼楼顶
S12	株洲四中	市区边缘居民区, 教学楼楼顶

区内, 本文视其为工业区采样点. 其它站点在工业区外, 周边以文教、商业、办公、住宅为主, 本文视为混合区. 其中 S1 株冶医院、S9 天台山庄、S12 株洲四中为株洲市大气环境自动监测子站, 具有城市代表性. 为了了解工业区上下风向和侧风向大气降尘和其中元素沉降量和含量水平及差异, 在工业区周边布设了 S4(侧风向)、S5(侧风向)、S6(上风向)、S8(下风向)等采样点. 为了了解大气降尘和其中元素沿主风向沉降量和含量递减率, 沿主风向布设了 S6、S7、S8、S9 和 S10, 共 5 个采样点. 样品采集期间株洲市行政区东部还未开发, 因此只在西

部市区进行样品采集. 采样点概况见表 1. 采样时间为 2012 年 1 ~ 12 月.

1.2 样品采集与分析方法

本试验样品采集所用的降尘缸为《环境空气降尘的测定重量法》(GB/T 15265-94)里规定的内径为 (15 ± 0.5) cm, 高为 30 cm 的圆筒形降尘缸. 每个采样点放置 3 个降尘缸, 在缸内加入 80 mL 乙二醇, 以占满缸底为准. 每月月底收集一次当月样品, 收集样品时先将降水及降尘倒入塑料瓶中, 降尘缸中剩余的样品用定量去离子水冲洗后转移至塑料瓶, 塑料瓶口密封保存并记录使用的去离子水的体积. 采集的样品在实验室中使用混合纤维微孔滤膜进行抽滤做固液分离处理. 具体操作为将所需滤膜置于干燥箱中烘干(温度 100°C)并在干燥器中平衡 48 h 以上, 使用十万分之一天平进行称重. 用干燥好的滤膜对降尘样品进行抽滤, 将抽滤后的滤膜再次放入烘箱烘 1 h (100°C)并在干燥器中平衡 48 h 以上, 进行称重, 两次称重的质量差为降尘的质量.

将抽滤后的固体部分放入高压反应釜中, 加入 6 mL HNO_3 (65%)、2 mL H_2O_2 (40%)、0.1 mL HF (30%)^[8, 11]. 在烘箱中 (185°C) 消解成液体后定容至 50 mL. 每 20 个样品做一次平行试验, 一次平行试验 3 个平行样品. 用 ICP-MS (Agilent 7700x 型) 分别测定抽滤后样品液体部分和固体部分中 Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Sr、Mo、Ag、Cd、Sb、Pb 共 28 种元素的含量. 采用标准加入法测定各元素的回收率均在 95% ~ 105% 之间, 平行试验各元素含量相对标准误差均小于 2%.

2 结果与讨论

2.1 大气降尘和降尘中元素基本特征

对株洲市大气降尘的沉降量和降尘中元素含量进行分析, 结果表明: 株洲市各采样点大气降尘年沉降量为 $23.14 \sim 114.67 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 其中工业区和混合区年均沉降量分别为 $89.46 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $33.20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. 同一功能区降尘中不同元素含量的差异较大(图 2), 工业区 Be、Co、Ni、Se、Mo、Ag、Tl、Th、U 等 9 种元素含量的平均值和中值均低于 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在大气降尘中含量较低, 其中 Be 元素含量最低, 含量平均值和中值分别为 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; V、Cr、Cu、As、Sr、Cd、Sn、Sb、Ba 等 9 种元素的含量平均值和中值介于 $100 \sim 1000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、Mn、Fe、Zn、Pb 等 10 种元素含量平

均值和中值大于 $1000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中 Al、Fe、Zn 元素含量平均值和中值以及 Pb 元素的平均值超过 $10000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Al、Fe、Ca、Na、K、Mg 属于组成地壳的主要元素, 共占地壳组成的 23.1%; Zn 和 Pb 元素在地壳中的含量较少, 占地壳组成的不足 1%^[12, 13]. 降尘中 Zn 和 Pb 元素远高于地壳中的含量, 属于株洲市降尘中非自然来源的元素.

混合区 Mn、Fe、Cu、Zn、As、Ag、Cd、Sn、Sb、Pb 等 10 种元素的含量相比工业区均有明显下降, 下降比率介于 33.8% ~ 68.5%; Mg、Al、K 元素的含量有所升高, 上升比率为 10.6% ~ 35.6%; 其他元素与工业区降尘中的含量接近.

株洲市混合区与工业区降尘中元素含量对比可以看出, 混合区降尘中含量下降的元素以重金属元素为主, 含量增加的元素以地壳中的主要组成元素为主, 说明混合区与工业区相比其降尘的组成受非自然来源元素的影响减少, 砂土、扬尘等自然物质所占的比例增加.

2.2 降尘中元素污染特征

2.2.1 背景比值分析

为进一步了解工业区与混合区降尘中元素的含量分布特点, 判断降尘中元素的来源与污染情况, 将降尘中元素含量与湖南省土壤元素背景值中元素含量进行对比分析, 其比值定义为“背景比值”^[14]. 将计算后的比值进行统计分析, 结果表明(表 2), 工业区大气降尘中 Be、Mg、Al、K、Ti、V、Ba 等 7 种元素的背景比值在 0.4 ~ 1.5 之间, 与土壤背景值基本相同; Na、Ca、Cr、Mn、Sr、等 5 种元素的背景比值在 2.1 ~ 3.6 之间, 说明存在一定程度的污染; Cu、Zn、As、Se、Ag、Cd、Tl、Pb 等 8 种元素的背景比值在 7.4 ~ 4079.4 之间. 其中比值最高的为 Cd 元素, 且除 As、Se 外均为重金属元素, 说明工业区内存在严重的重金属污染. 与工业区相比, 混合区内的降尘中重金属元素(Cu、Zn、Ag、Cd、Tl、Pb)和类金属元素 As、Se 的背景比值在 3.6 ~ 1413.4 之间, 明显低于工业区但除 Tl 外依然污染严重; Na、Ca、Cr、Mn、Sr 等 5 种元素的背景比值为 1.7 ~ 3.6, 与工业区相比背景比值略有下降; 混合区其他元素背景比值与工业区基本相同.

2.2.2 富集因子分析

富集因子(EF)是判断污染源、定量评价污染程度的常用方法. 其计算方法为:

$$EF = \frac{C_m/C_n}{X_m/X_n}$$

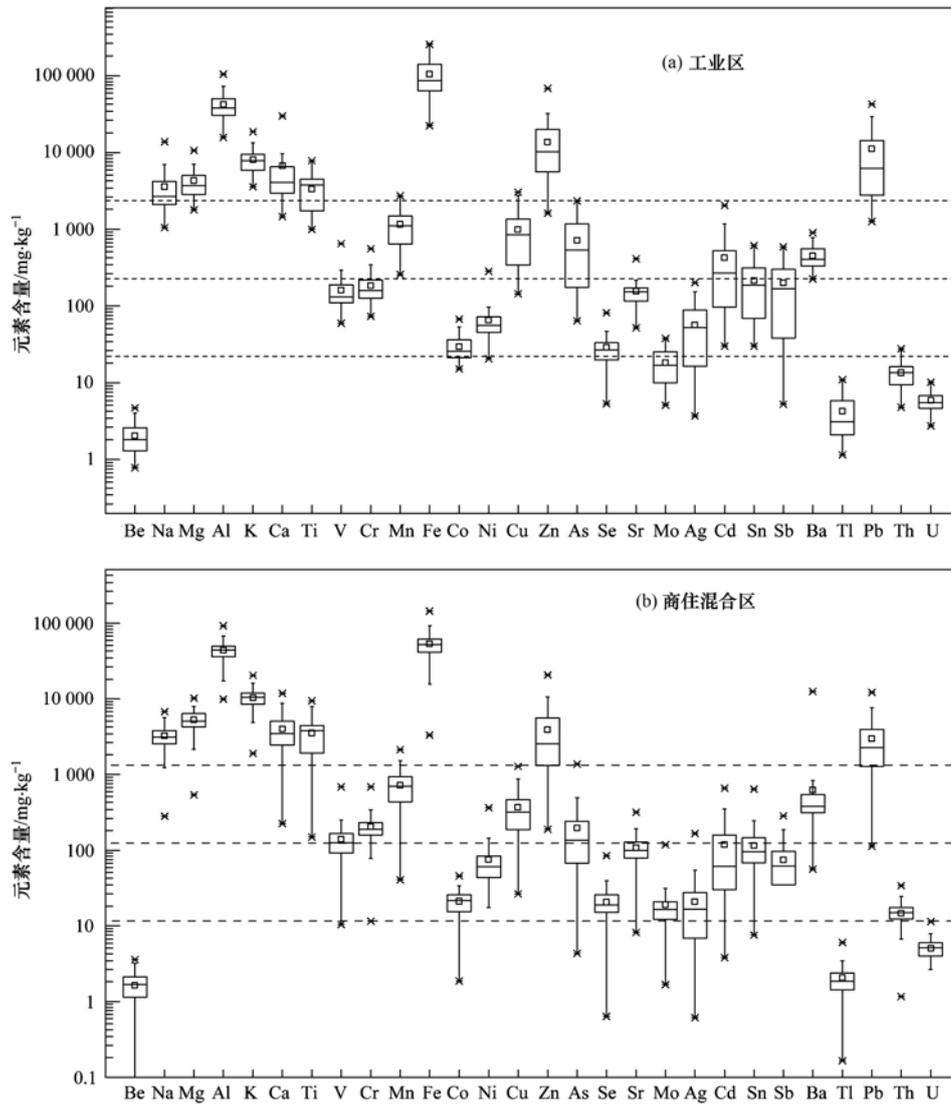


图2 工业区和商住混合区降尘中元素分布特征

Fig. 2 Element distribution characteristics in dust fall of the industrial areas and mixed commercial and residential areas

表2 株洲市大气降尘中元素统计¹⁾

Table 2 Statistics of elements in atmospheric dust fall of Zhuzhou City

元素	背景值 /mg·kg ⁻¹	工业区 背景比值	混合区 背景比值	元素	背景值 /mg·kg ⁻¹	工业区 背景比值	混合区 背景比值
Be	2.19	0.9	0.8	Zn	72	184.6	71.4
Na	1 700	2.3	1.9	As	14	53.1	17.6
Mg	4 000	1.0	1.3	Se	0.329	87.1	65.8
Al	85 500	0.5	0.5	Sr	44	3.6	2.6
K	18 600	0.4	0.5	Mo	/	/	/
Ca	1 300	4.4	3.6	Ag	0.108	539.4	225.4
Ti	6 298	0.5	0.6	Cd	0.106	4 079.4	1 413.4
V	105.4	1.5	1.3	Sn	/	/	/
Cr	71.4	2.3	2.9	Sb	/	/	/
Mn	459	2.5	1.7	Ba	383	1.2	1.6
Fe	/	/	/	Tl	0.61	7.4	3.6
Co	14.6	2.1	1.5	Pb	26	450.3	141.9
Ni	31.9	2.1	2.3	Th	/	/	/
Cu	25	40.1	17.4	U	/	/	/

1) 背景值标注“/”的为土壤元素背景值中未统计的元素

式中, C_m 、 X_m 分别为样品和土壤背景中待分析元素的含量, C_n 、 X_n 分别为样品和土壤背景中参比元素的含量. 当 $EF < 2$ 时认为不存在富集, 主要来源为自然源; $2 \leq EF < 5$ 时认为存在轻微富集; $5 \leq EF < 20$ 时认为存在中度富集, 人类活动作用明显; $20 \leq EF < 40$ 认为存在较强富集; $EF \geq 40$ 时认为存在严重富集, 该元素主要来源于人类活动^[15]. 参比元素通常选择 Si、Al、Fe、Ti 等地壳中含量较高、受人类活动影响小的元素作为参比元素^[16]. 本研究选择 Ti 作为参比元素, 土壤背景来源为湖南省土壤背景值^[17], 共计算降尘中 22 种元素的 EF 值(Fe、Mo、Sn、Sb、Th、U 元素无当地土壤背景值), 计算结果见表 3.

结果表明, 株洲市工业区和混合区存在富集的元素种类以及元素之间相对富集情况基本相同. 混合区与工业区 Be、Al、K 元素 EF 值小于 2, 不存在富集, 主要来源于地壳; Na、Mg、V、Cr、Mn、Co、

Ni、Ba 等 8 种元素的 EF 值介于 2.0 ~ 5.2, 存在轻微富集, 主要来源于地壳, 受到人类活动的轻微影响. Sr、Ca、Tl 元素 EF 值介于 4.6 到 13.4 (Sr 在混合区为 4.6, 其他均大于 5), 存在中度富集, 说明受自然源与人类生产生活等人为源共同影响; 工业区 Cu、As、Se、Zn、Pb、Ag 和 Cd 元素的 EF 值大于 40, 存在严重富集, 受工业生产排放人类活动污染严重, 其中 Pb、Ag、Cd 元素 EF 值分别超过 800、900 和 10 000, 远高于其他元素, 存在严重污染. 混合区 Cu、As 元素的 EF 值分别为 31.0 和 31.4, 存在较强富集; Zn、Se、Pb、Ag、Cd 存在严重富集. 经过以上结果分析, 株洲市大气降尘中 Be、Al、K、Na、Mg、V、Cr、Mn、Co、Ni、Ba 元素受人为活动影响较小, 主要来自自然源; Sr、Ca、Tl 元素受一定的人为活动影响; Cu、As、Se、Zn、Pb、Ag、Cd 元素受人为生产生活影响较大, 其中应当以工业区生产排放为主.

表 3 降尘中各元素 EF 值

Table 3 Enrichment factor value of elements in the dust fall

元素	EF 值		元素	EF 值	
	工业区	商住混合区		工业区	商住混合区
Be	1.8	1.4	Cu	75.4	31.0
Na	4.0	3.3	Zn	362.6	127.4
Mg	2.0	2.4	As	97.5	31.4
Al	0.9	0.9	Se	166.5	117.4
K	0.8	1.0	Sr	6.8	4.6
Ca	9.8	6.4	Ag	996.5	402.2
V	2.9	2.4	Cd	10 089.4	3 341.5
Cr	4.9	5.2	Ba	2.2	2.8
Mn	4.8	3.0	Hg	422.1	175.1
Co	3.8	2.7	Tl	13.4	6.5
Ni	3.9	4.1	Pb	813.6	253.2

2.2.3 与其他城市比较

通过背景比值和富集因子分析, 认为株洲市大气降尘中 Cu、As、Se、Zn、Pb、Ag、Cd 存在明显污染, 将株洲市大气降尘的沉降量和存在明显污染的元素与其他城市或工业区进行对比以研究具体的污染情况(表 4), 由于其他城市对 Se、Ag 元素的分析较少, 因此不进行对比. 结果表明, 株洲市大气降尘全年沉降量明显低于参比的工业城市或工业区, 但株洲市大气降尘中重金属元素含量远高于参比地区. 5 种元素仅在株洲市混合区大气降尘中的含量已明显高于参比的工业城市及工业区, 工业区污染更加严重, 大气降尘中 Zn、Cd、Pb 元素的含量高出席比地区 10 倍以上.

2.3 相关性分析

为研究株洲市大气降尘中元素尤其是污染元素的来源, 对测定的 28 种元素进行相关性分析^[2, 27], 由于并不符合正态分布, 因此采用 Spearman 相关分析. 根据分析结果, 28 种元素在 0.01 置信水平上可分为 3 类(表 5), 第 1 类为 Be、Mn、Fe、Co、Cu、Zn、As、Se、Mo、Ag、Cd、Sn、Sb、Tl、Pb, 相互之间存在显著相关; 第 2 类为 Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、Cr、Ni、Th 元素; 第 3 类元素为 V、Sr、Ba、U. 可以看出第 1 类元素主要为金属元素包括多种有毒重金属元素, 混合区比工业区含量明显下降的 10 种元素都在此类. 根据背景比值和富集因子对工业区和混合区降尘中元素含量的分析, 认为第 1 类元素可

能主要来源于工业排放; 第 2 类元素主要为地壳元素, 混合区比商业区含量升高的 3 种元素 (Mg、Al、K) 都在此类, 背景比值较小 (< 1.8), EF 富集较弱

($EF < 5$), 因此认为此类元素主要来源于居民生活和扬尘等自然源; 第 3 类元素可能受工业生产、居民生活等多种来源共同影响。

表 4 株洲市与其他城市大气降尘量及元素含量比较¹⁾

Table 4 Comparison of elemental content and dust fall quantity between Zhuzhou City and other cities

地点	年份	降尘量	Cu	Zn	As	Cd	Pb	文献
株洲工业区	2012	89.46	992.4	13 734.6	718.3	424.7	11 130.3	本研究
株洲商住混合区	2012	33.2	394.7	4 287.8	214	130.7	3 194.7	本研究
宝鸡市	2013	/	84.1	567	/	3.8	584	[18]
兰州市	2010	/	82.2	369.2	/	4.3	130.3	[19]
青岛市	2009	/	142.1	2 295.6	13.2	1.3	240	[20]
石家庄市	2008	/	74.9	1 020	14.9	4.4	140	[21]
哈尔滨市	2008	/	104.9	370.8	23.5	1.5	117.2	[22]
嫩松平原南部	2007	489	49	277.3	12.3	1.0	58.5	[23]
济南市	2006	/	65.7	380	9.5	2.1	110.8	[24]
南京居民区	2005	105.6	215	875	9.82	4.47	459	[25]
葫芦岛工业区	2009	/	264.4	5 271	/	72.8	533.2	[3]
平顶山工业区	2008	/	91.2	677.8	132	5.3	403.9	[26]
南京工业区	2005	189.8	278	974	12.2	2.8	425	[25]

1) 降尘量单位为 $g \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$, 元素含量单位为 $mg \cdot kg^{-1}$

表 5 降尘中元素含量的 Spearman 相关性 ($n = 132$)¹⁾

Table 5 Spearman correlation of elemental content in dust fall ($n = 132$)

类别	元素
1	Be、Mn、Fe、Co、Cu、Zn、As、Se、Mo、Ag、Cd、Sn、Sb、Tl、Pb
2	Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、Cr、Ni、Th
3	V、Sr、Ba、U

1) 同类元素在 0.01 置信水平上显著相关

2.4 降尘中元素来源分析

为研究株洲市大气降尘中各元素的具体来源, 对降尘中 28 种元素的含量进行了主成分分析. 主成分分析可以对数据有效地进行降维处理, 常用于环境研究中的多变量统计. 在规定“特征值 > 1 ”的条件下共提取出 6 个主成分 (表 6), 其累计总方差为 80.1%^[15, 28-30], 经最大公差旋转后得到的因子矩阵见表 6.

因子 1 主要由 Mn、Fe、Co、Cu、Zn、As、Se、Ag、Cd、Sn、Sb、Tl、Pb 构成; 因子 2 主要由 Be、Na、Al、K、Ti、Th、U、Sr 构成; 因子 3 主要构成元素为 V、Cr、Ni; 因子 4 主要构成元素为 Mg、Ca; 因子 5 主要元素为 Mo; 因子 6 主要元素为 Ba.

根据统计结果, 因子 1 主要为重金属元素, 与相关性分析中第一类元素类似, 主要来源于冶金行业的生产排放以及燃煤排放^[15], 与当地存在以有色金属冶炼为主的大型工业区的实际情况相符; 因子 2 与相关性分析中第二类元素类似, 主要为地壳组成中的主要元素, 主要来源于人类活动、土壤扬尘以

表 6 元素主成分分析结果

Table 6 Statistical results of principal component analysis of elements

元素	因子					
	1	2	3	4	5	6
Be	0.00	0.82	0.03	0.32	-0.09	-0.02
Na	-0.14	0.75	-0.04	-0.25	-0.02	-0.13
Mg	-0.22	0.61	0.16	0.53	0.26	0.09
Al	-0.25	0.88	0.12	0.12	0.18	0.01
K	-0.36	0.74	0.16	0.10	0.36	-0.01
Ca	0.14	0.33	-0.05	0.79	-0.26	0.05
Ti	-0.08	0.83	0.27	-0.10	0.02	0.32
V	0.21	0.44	0.65	0.01	-0.16	-0.16
Cr	0.00	0.37	0.63	0.15	0.41	0.15
Mn	0.77	0.10	0.14	0.40	0.21	0.06
Fe	0.76	-0.04	-0.02	-0.17	0.18	0.02
Co	0.83	0.23	0.14	0.04	0.25	0.00
Ni	-0.01	0.13	0.82	-0.06	0.08	0.08
Cu	0.94	-0.17	-0.04	0.11	0.05	-0.01
Zn	0.89	-0.18	0.00	0.27	-0.07	-0.04
As	0.91	-0.02	0.03	-0.09	-0.12	0.02
Se	0.65	0.49	0.21	-0.29	-0.13	0.00
Sr	0.27	0.65	-0.04	0.13	-0.16	0.35
Mo	0.34	0.14	0.14	-0.24	0.65	-0.03
Ag	0.93	-0.07	0.05	-0.15	-0.08	-0.05
Cd	0.85	-0.27	-0.01	0.23	0.04	-0.07
Sn	0.90	-0.03	0.24	-0.11	0.00	-0.07
Sb	0.83	-0.08	-0.03	-0.20	0.03	0.09
Ba	-0.03	0.08	0.05	0.05	0.01	0.95
Tl	0.79	-0.06	-0.17	0.11	0.03	0.04
Pb	0.88	-0.20	-0.12	0.17	-0.03	0.04
Th	-0.22	0.87	0.31	0.07	0.08	-0.03
U	0.25	0.73	0.29	0.20	0.00	-0.01

及远距离输送的尘埃等; 因子 3 主要来源于汽车尾

气排放以及道路扬尘的混合来源^[31]; 因子 4 的主要来源为建筑粉尘、水泥等; 因子 5 和因子 6 的主要来源可能为与该元素相关的工业生产排放。

2.5 降尘中元素迁移特征分析

为进一步确定降尘中重金属元素的来源和迁移特征, 根据株洲市常年主导风向为西北-东南方向的特点^[32], 选取从工业区辐射向外并处于主导风向直线上的 4 个采样点(图 1, S7、S8、S9、S10)进行元素含量分析。将相邻两个采样点中距离工业区较远点与较近点降尘中某元素含量的差值定义为较远点该元素的绝对下降量, 差值占工业区(S7)降尘中该元素含量的百分比定义为相对下降量。对采样点大气降尘中 28 种元素含量的下降量进行对比, 并按照主因子分析的结果进行分类(图 3)。结果表明, 随采样点与工业区距离的增加, 因子 1 中的元素(Mn、Fe、Co、Cu、Zn、As、Se、Ag、Cd、Sn、Sb、Tl、Pb)在降尘中的含量不断降低, 且元素含量下降速率随与工业区距离的增加呈明显下降趋势。因子 1 中元素的含量在 S8(距离工业区约 3 km)下降速率最快, 相对下降量在 36.6%~69.8%之间, 在 S9(距离

工业区约 7 km)的相对下降量在 7.8%~29.5%之间, 在 S10(距离工业区约 11 km)下降速率最低, 相对下降量除 Co 外均在 7.2%~19.7%之间(Co 为 -5.2%)。因子 2 中的元素(Be、Na、Al、K、Ti、Th、U、Sr)在 S8 的下降量除 Sr 外均为负值, 说明在该处含量有所上升, 相对下降量在 -81%~-19.1%(Sr 为 25.7%), 在 S9 下降量变化较少, 相对下降率为 -13.2%~16%, 在 S10 有明显下降, 相对下降率为 24.5%~43.2%。因子 3、因子 4 中的元素(V、Cr、Ni、Mg、Ca)在 S8 的相对下降量均为负值, 在 S9 各元素相对下降量差距较大; 在 S10 因子 4 的 Mg、Ca 元素沉降速率减小, 相对下降率为 8.3%和 7.2%, 因子 3 中的 V、Cr、Ni 元素相对下降量分别为 68.6%、52.5%、-57.8%。

综上所述, 因子 1 中的 13 种元素为相关性分析中的第一类元素, 包含了混合区相比工业区质量含量下降的 10 种元素, 这些元素在降尘中的含量随离工业区距离的增加呈明显降低趋势, 说明这些元素主要来源于工业区废气排放。其中 Cu、As、Se、Zn、Pb、Ag、Cd 为污染最重的 7 种元素。

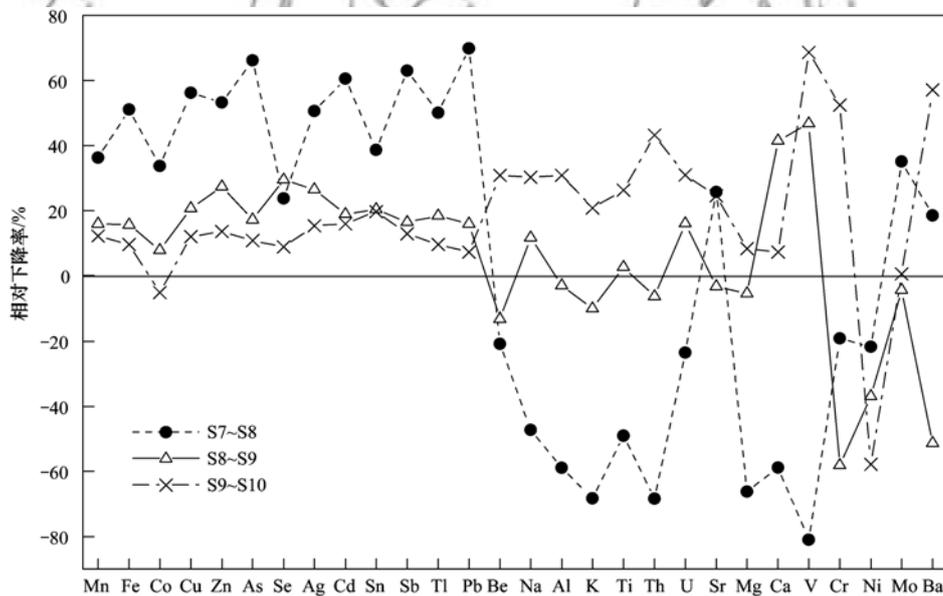


图 3 降尘中元素相对下降量

Fig. 3 Relative declining quantity of elements in the dust fall

3 结论

(1) 株洲市工业区和商住混合区大气降尘年均沉降量分别为 $89.46 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $33.20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 低于其它工业城市或工业区。株洲市工业区与商住混合区降尘中元素含量的差异明显, 商住混合区相比工业区 10 种元素(Mn、Fe、Cu、Zn、As、Ag、Cd、Sn、

Sb、Pb)的含量均有明显下降, 3 种元素(Mg、Al、K)的含量明显上升, 其他元素与工业区降尘中的含量接近, 无明显差异。

(2) 株洲市工业区和商住混合区降尘中 Cu、Zn、As、Ag、Cd、Se 和 Pb 为主要污染元素, 工业区污染程度明显高于商住混合区。工业区以上 7 种元素降尘中含量是背景点的 7.4~4079.4 倍, 商住混

合区是背景点的 3.6 ~ 1413.4 倍, Cd 为背景比值最高的元素。

(3) 株洲市大气降尘主要来源为金属冶炼, 地表扬尘、汽车尾气、建筑粉尘和 Mo、Ba 元素相关的工业生产, 其中 Mn、Fe、Co、Cu、Zn、As、Se、Ag、Cd、Sn、Sb、Tl 和 Pb 等 13 种元素主要来源于株洲市西北部工业区的废气排放。

参考文献:

- [1] 李巧云, 关振寰, 殷芙蓉, 等. 浮尘对冬小麦叶片光合作用及细胞膜透性的影响[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(8): 1387-1391.
Li Q Y, Guan Z H, Yin F R, *et al.* Effects of suspended dust on the photosynthesis and the membrane permeability of winter wheat leaves[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(8): 1387-1391.
- [2] 杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 等. 新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评估[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2453-2461.
Yang C, Tiyp T, Hou Y J, *et al.* Assessment of heavy metals pollution and its health risk of atmospheric dust fall from east part of Junggar Basin in Xinjiang[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2453-2461.
- [3] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, *et al.* Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(4): 726-733.
- [4] Haapala H, Goltsova N, Pitulko V, *et al.* The effects of simultaneous large acidic and alkaline airborne pollutants on forest soil[J]. *Environmental Pollution*, 1996, **94**(2): 159-168.
- [5] 屈建军, 张伟民, 王旭东. 敦煌莫高窟大气降尘的初步观测研究[J]. 甘肃环境研究与监测, 1992, **19**(3): 8-12.
- [6] 吴东辉, 胡克, 王云, 等. 长春市“2000-04-07”远源沙尘湿沉降携带细菌研究[J]. 中国沙漠, 2003, **23**(6): 652-655.
Wu D H, Hu K, Wang Y, *et al.* Study on bacterium carried by remote sandstorm “00-04-07” with wet-descending in Changchun City, Jilin Province[J]. *Journal of Desert Research*, 2003, **23**(6): 652-655.
- [7] 段魏魏, 娄恺, 曾军, 等. 塔克拉玛干沙尘暴源区空气微生物群落的代谢特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 26-31.
Duan W W, Lou K, Zeng J, *et al.* Metabolic characteristics of air microbial communities from sandstorm source areas of the Taklamakan desert[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(1): 26-31.
- [8] 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.
- [9] Chen Y, Zhao J Q, Yang W J, *et al.* Assessment of heavy metal pollution of dustfall in Xi'an City, Northwest China [A]. In: *International Conference on Advanced Materials Science and Environmental Engineering*[C]. Chiang Mai, Thailand, 2016.
- [10] 张舒婷, 李晓燕, 陈思民. 贵阳市不同空间高度灰尘和重金属沉降通量[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(6): 1630-1637.
Zhang S T, Li X Y, Chen S M. Vertical characteristics of deposition fluxes of dust and heavy metals of Guiyang City[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(6): 1630-1637.
- [11] 杨勇杰, 刘俊卿, 狄一安, 等. 青藏高原不同粒径大气颗粒物元素分析[J]. 环境化学, 2013, **32**(6): 968-973.
Yang Y J, Liu J Q, Di Y A, *et al.* Determination of trace elements in the particulate matters of different size from Tibetan plateau[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(6): 968-973.
- [12] Ahrens L H. *Distribution of the elements in our planet*[M]. New York: McGraw-Hill, 1965.
- [13] Mason B. *Principles of geochemistry*[J]. *Soil Science*, 1952, **74**(3): 262.
- [14] 熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 等. 北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2735-2742.
Xiong Q L, Zhao W J, Guo X Y, *et al.* Distribution characteristics and source analysis of dustfall trace elements during winter in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2735-2742.
- [15] Han Y M, Du P X, Cao J J, *et al.* Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355**(1-3): 176-186.
- [16] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. *Environmental Geology*, 2000, **39**(6): 611-627.
- [17] 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.
- [18] 黄战胜, 刘小娟, 王向锋. 宝鸡市大气降尘中重金属污染特征[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2014, **34**(2): 54-57.
Huang Z S, Liu X J, Wang X F. Characteristics of heavy metal pollution of atmospheric dustfall in Baoji[J]. *Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science)*, 2014, **34**(2): 54-57.
- [19] 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 等. 兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评估[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1021-1028.
Li P, Xue S Y, Wang S L, *et al.* Pollution evaluation and health risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Lanzhou[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 1021-1028.
- [20] 张春荣, 吴正龙, 田红, 等. 青岛市区大气降尘重金属的特征和来源分析[J]. 环境化学, 2014, **33**(7): 1187-1193.
Zhang C R, Wu Z L, Tian H, *et al.* Characteristics and sources analysis of heavy metals in atmospheric dust of Qingdao[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(7): 1187-1193.
- [21] 崔那涛, 栾文楼, 李随民, 等. 石家庄市大气降尘重金属元素来源分析[J]. 中国地质, 2012, **39**(4): 1108-1115.
Cui X T, Luan W L, Li S M, *et al.* An analysis of the sources of heavy metals in atmospheric dustfall of Shijiazhuang City[J]. *Geology in China*, 2012, **39**(4): 1108-1115.
- [22] 汤洁, 韩维峥, 李娜, 等. 哈尔滨市城区大气重金属沉降特征和来源研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(11): 3087-3091.
Tang J, Han W J, Li N, *et al.* Multivariate analysis of heavy metal element concentrations in atmospheric deposition in Harbin City, Northeast China[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(11): 3087-3091.
- [23] 李延生. 黑龙江省松嫩平原南部大气降尘地球化学特征

- [J]. 物探与化探, 2011, **35**(4): 536-540.
- Li Y S. Geochemical characteristics of atmospheric dust in southern Songnen Plain, Heilongjiang Province[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2011, **35**(4): 536-540.
- [24] 庞绪贵, 王晓梅, 代杰瑞, 等. 济南市大气降尘地球化学特征及污染端元研究[J]. 中国地质, 2014, **41**(1): 285-293.
- Pang X G, Wang X M, Dai J R, *et al.* Geochemical characteristics and pollution sources identification of the atmospheric dust-fall in Jinan city[J]. Geology in China, 2014, **41**(1): 285-293.
- [25] 倪刘建, 张甘霖, 阮心玲, 等. 南京市不同功能区大气降尘的沉降通量及污染特征[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(1): 2-6.
- Ni L J, Zhang G L, Ruan X L, *et al.* The flux and pollution character of dust-fall in different functional zones of Nanjing[J]. China Environmental Science, 2007, **27**(1): 2-6.
- [26] 刘章现, 王国贞, 郭瑞, 等. 河南省平顶山市大气降尘的化学特征及其来源解析[J]. 环境化学, 2011, **30**(4): 825-831.
- Liu Z X, Wang G Z, Guo R, *et al.* Characteristics and source analysis of elements in dustfall in Pingdingshan City [J]. Environmental Chemistry, 2011, **30**(4): 825-831.
- [27] 刘巍, 杨建军, 汪君, 等. 准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1938-1945.
- Liu W, Yang J J, Wang J, *et al.* Contamination assessment and sources analysis of soil heavy metals in opencast mine of east Junggar basin in Xinjiang[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1938-1945.
- [28] Khlystov A, Zhang Q, Jimenez J L, *et al.* *In situ* concentration of semi-volatile aerosol using water-condensation technology[J]. Journal of Aerosol Science, 2005, **36**(7): 866-880.
- [29] Luo Q Q, Xian X F, Chen G C, *et al.* Water soluble components of PM₁₀ in Chongqing, China [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2005, **24**(2): 155-157.
- [30] Li X D, Wai O W H, Li Y S, *et al.* Heavy metal distribution in sediment profiles of the Pearl River estuary, South China[J]. Applied Geochemistry, 2000, **15**(5): 567-581.
- [31] 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.
- [32] Zhang K, Chai F H, Zheng Z L, *et al.* Characteristics of atmospheric particles and heavy metals in winter in Chang-Zhu-Tan City clusters, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, **26**(1): 147-153.



CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated $MgCl_2$ Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i>	(3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i>	(3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $PM_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i>	(3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i>	(3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-bao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i>	(3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i>	(3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i>	(3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i>	(3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i>	(3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i>	(3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie	(3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i>	(3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i>	(3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i>	(3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i>	(3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i>	(3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i>	(3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i>	(3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i>	(3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i>	(3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i>	(3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i>	(3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i>	(3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll a and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i>	(3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i>	(3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i>	(3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i>	(3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong	(3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i>	(3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i>	(3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i>	(3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i>	(3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i>	(3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i>	(3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i>	(3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, LI Zhen, <i>et al.</i>	(3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i>	(3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i>	(3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i>	(3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo	(3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i>	(3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i>	(3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i>	(3473)
Effects of $CaCO_3$ Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i>	(3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun	(3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i>	(3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i>	(3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i>	(3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(3544)