

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 王洪强,贺千山,陈勇航,亢燕铭 (1215)

乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征 陆辉,魏文寿,崔彩霞,何清,王瑶 (1223)

典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布 吴辉,金军,王英,李明圆,何松洁,徐萌,孙一鸣 (1230)

某焦化厂周边大气 PM₁₀ 重金属来源及健康风险评价 董婷,李天昕,赵秀阁,曹素珍,王贝贝,马瑾,段小丽 (1238)

基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法 李润奎,赵彤,李志鹏,丁文军,崔晓勇,许群,宋现锋 (1245)

珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 孙成玲,谢绍东 (1250)

低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究 李华琴,何觉聪,陈洲洋,黎宝仁,黄倩茹,张再利,魏在山 (1256)

太子河流域莠去津的空间分布及风险评价 郑磊,张依章,张远,朱鲁生,王志强 (1263)

一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法 王燕,朱春刚,许笛,丁士明 (1271)

外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化 傅玲,赵凯,王国祥,欧媛,范娟,毛丽娜,张佳,韩睿明 (1278)

基于物理过程的矿区地下水污染风险评价 孙法圣,程品,张博 (1285)

重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 杨平恒,卢丙清,贺秋芳,陈雪彬 (1290)

重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究 蓝家程,杨平恒,任坤,陈雪彬,徐昕,胡宁 (1297)

苦草 (*Vallisneria spiralis*) 根系对沉积物中各形态磷的影响 李振国,王国祥,张佳,马久远,魏宏农,俞振飞 (1304)

循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究 彭剑峰,宋永会,袁鹏,张雪妍,胡小明 (1311)

不同环境因素下太湖中四环素的自然消减 段伦超,王凤贺,纪莹雪,张帆,赵斌,王国祥 (1318)

再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究 黄晶晶,汤芳,席劲璇,庞宇辰,胡洪营 (1326)

二级处理出水的 UV-TiO₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌复活试验 王西峰,龚昕,胡晓莲,任伯帜 (1332)

水中 C₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究 方华,沈冰冰,荆洁,陆继来,王媛 (1337)

XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染 赵应许,纵瑞强,高欣玉,谢慧君,殷永泉,梁爽 (1343)

纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究 付融冰 (1351)

共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响 王琪,刘辉,姜林,唐军 (1358)

硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究 吴宣,谭科艳,胡希佳,顾远,杨宏 (1366)

基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究 姜应和,刘佩炬,王磊,田中凯,刘小英 (1372)

模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 陈燕,黄芳,谢鑫源 (1377)

电活性生物膜介导 Cu²⁺ 生物还原的试验研究 刘毅,周顺桂,袁勇,刘志 (1384)

模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收 程丹,朱能武,吴平霄,邹定辉,邢翊佳 (1391)

填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因 何小松,余红,席北斗,崔东宇,潘红卫,李丹 (1399)

化学合成施氏矿物与 H₂O₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究 王鹤茹,宋永伟,徐峙辉,崔春红,周立祥 (1407)

处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究 杨娜,陈秀荣,林逢凯,黄华,章斐,赵骏,丁毅 (1414)

剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌群多样性的比较研究 董慧岭,季民 (1421)

锰氧化菌 *Aminobacter* sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究 晏平,姜理英,陈建孟,何智敏,肖少丹,蒋铁锋 (1428)

1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性 王弘宇,杨开,张倩,季斌,陈丹,孙宇翀,田俊 (1437)

碘普罗胺降解菌 *Pseudomonas* sp. I-24 共代谢降解性能研究 徐冰洁,高品,薛昱,何梦琦,吴凡 (1443)

利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化 张梦露,党志,伍凤姬,梁旭军,郭楚玲,卢桂宁,杨琛 (1449)

毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究 陈善佳,陈秀荣,闫龙,赵建国,章斐,江子建 (1457)

缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响 王珊,赵树欣,魏长龙,于水燕,史吉平,张保国 (1462)

微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响 王妮敏,邓琦,邹华,梁婵娟 (1468)

东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应 张巍巍,王光华,王美玉,刘晓冰,冯兆忠 (1473)

生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 吴丽,张高科,陈晓国,兰书斌,张德禄,胡春香 (1479)

老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响 陈丽红,刘征涛,方征,王晓南,王婉华 (1486)

土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议 赵晓军,陆泗进,许人骥,李伯苓,吴国平,魏复盛 (1491)

藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 柏建坤,王建力,李潮流,康世昌,陈鹏飞 (1498)

三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析 胥焘,王飞,郭强,聂小倩,黄应平,陈俊 (1502)

浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析 厉炯慧,翁珊,方婧,黄佳蕾,陆芳华,卢宇浩,张洪铭 (1509)

西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征 张海珍,唐宇力,陆骏,周虹,徐芸茜,陈川,赵赞,王美娥 (1516)

生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价 解惠婷,张承中,徐峰,李海凤,田振宇,唐琛,刘文彬 (1523)

上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 诸葛祥真,毕春娟,陈振楼,张焕焕,倪玮怡 (1531)

SDBS/Na⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响 唐颖,李航,朱华玲,田锐,高晓丹 (1540)

稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究 赵述华,陈志良,张太平,潘伟斌,彭晓春,车融,欧英娟,雷国建,周鼎 (1548)

藻类水体 Cd²⁺ 毒性快速监测新方法研究 段静波,刘文清,张玉钧,赵南京,殷高方,肖雪,余晓娅,方丽 (1555)

用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究 龙峰,施汉昌,王洪臣,盛建武 (1561)

Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO₃⁻ 吸附性能的研究 钟琼,李欢 (1566)

污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨 廖晓勇,陶欢,阎秀兰,赵丹,林龙勇,李尤 (1576)

城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展 杨孟,李凤英,刁一伟,吴丹 (1586)

水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展 张灿,刘文君,张明露,田芳,杨毅,安代志 (1597)

六价铬细菌还原的分子机制研究进展 李斗,赵由才,宋立岩,尹雅洁,王洋清,徐中慧 (1602)

农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 魏源送,郁达伟,曹磊 (1613)

《环境科学》征稿简则(1427) 《环境科学》征订启事(1497) 信息(1383, 1390, 1398, 1560)

乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征

陆辉¹, 魏文寿^{1*}, 崔彩霞², 何清¹, 王瑶³

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002; 2. 新疆气象台, 乌鲁木齐 830002; 3. 中国科学院新疆生态与地理研究所公共技术服务中心, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 为初步了解乌鲁木齐东南郊降雪的化学组成特征和污染信息, 利用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 对 2012 年 2 月 21 ~ 23 日降雪中的 22 种可溶性金属元素浓度进行了测定, 并通过扫描电镜能谱技术 (SEM/EDX) 研究了降雪中悬浮态颗粒物的形态和元素组成, 结果表明, 此次降雪中重金属含量偏高, 其中 Se、As、Cd 富集因子分别为 124.65、57.69 和 36.70, 具有较明显的煤烟型污染特征; 后向轨迹聚类分析也表明该时期采样点近地面主要受其西南方向燃煤火电排放烟尘的影响. 电镜观察观测结果显示降雪中悬浮态颗粒主要有 3 种形态, 主要以燃煤飞灰和矿物颗粒为主, 烟尘集合体大多数为老化或吸湿后形成的较粗的密实颗粒, 表明乌鲁木齐东南郊冬季大气中的悬浮态颗粒物主要来自燃煤飞灰和不可溶土壤矿物.

关键词: 降雪; 重金属; ICP-MS; SEM/EDX; 来源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1223-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.04.002

Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi

LU Hui¹, WEI Wen-shou¹, CUI Cai-xia², HE Qing¹, WANG Yao³

(1. Urumqi Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China; 2. Xinjiang Weather Observatory, Urumqi 830002, China; 3. Service Center of Public Technology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, China Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: In order to understand the composition and potential pollution of metal elements in precipitation in the southeastern suburb of Urumqi on February 21 to 23, 2012, soluble elements were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS); in addition, energy spectrum and morphological analysis were made for insoluble particulates. The results showed that the content of toxic heavy metals in snowfall was a little high; and the enrichment factors of Se, As and Cd were 124.65, 57.69 and 36.70, respectively, showing a typical coal pollution characteristic. The back trajectory cluster analysis suggested that the coal fly ash of snowfall mainly induced by air masses originated from the coal-fire power plant in the Southwestern sampling site. Morphology analyses conducted under a scan electron microscope demonstrated fly ash coming from coal burning process and irregular mineral are in the majority of insoluble particulates in snowfall, soot aggregates were compact, when the soot was wetted (the hygroscopic behaviour), and the morphology changed further. Insoluble particulates of the southeastern suburb of Urumqi were coal fly ash and insoluble soil minerals.

Key words: snowfall; heavy metal; ICP-MS; SEM/EDX; source apportionment

随着工业发展、城市人口密集、煤炭和石油等化石燃料消耗量的迅猛增长, 大气环境质量也日趋恶化. 大量重金属污染物被带入大气, 它们和其它污染物一起吸附在大气颗粒物上, 通过大气运动在全球范围内传输并最终通过干、湿沉降 (大气降水)^[1] 持续、大量地输入到地表环境中, 对生态系统中的生物地球化学循环造成影响^[2].

湿清除作为气溶胶粒子的主要清除机制, 维持着大气中气溶胶粒子源、汇之间的平衡, 是大气自净最重要的过程之一^[3]. 同时, 溶解性重金属主要通过大气湿沉降进行全球范围的传输^[4], 并进入食物链逐级富集, 从而对人体健康造成持久威胁^[5,6].

已有研究^[7-9]表明降水的化学成分主要取决于局地排放, 污染物输送, 海平面高度和水滴大小. 降水化学组分在很大程度上反映其大气颗粒物污染的特征, 因而湿清除过程研究对理解当地和区域污染尤为关键.

乌鲁木齐市是新疆维吾尔自治区的首府, 是全

收稿日期: 2013-08-20; 修订日期: 2013-10-30

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (IDM201201); 科技部公益性行业科研专项 (GYHY201106007); 新疆气象局青年基金项目 (201129); 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室开放基金项目 (XJDX0909-2012-17)

作者简介: 陆辉 (1980 ~), 女, 博士, 主要研究方向为大气环境与沙尘气溶胶, E-mail: luhui1008@163.com

* 通讯联系人, E-mail: weiwsh@idm.cn

疆的政治、经济、科技文化中心和南北疆的交通枢纽. 随着社会经济的发展, 燃煤、工业粉尘排放及交通运输均对城市大气环境造成了巨大压力. 市区三面环山, 大气扰动受阻, 造成了较厚的逆温层. 特殊的山谷地形, 不利的气象条件, 使得其冬季采暖期风速全年最小, 极易出现阴雾天气, 加之冬季严寒漫长和大量燃煤污染物的排放, 造成乌鲁木齐市采暖期大气污染十分严重^[10,11]. 近年来, 对乌鲁木齐市的土壤^[12]、大气颗粒物^[10,13~15]、道路沙尘^[16]等重金属的污染特征和污染源解析已有很多研究, 而本研究主要从大气湿沉降的角度入手, 选取 2012 年 2 月 21~23 日乌鲁木齐南郊的一次降雪过程, 运用 ICP-MS 分析技术对降雪样品进行可溶性金属元素测定, 并辅助 SEM/EDX 技术初步研究融雪水中悬浮态颗粒物的形貌特征. 从而通过对降雪中重金属污染物的分析为乌鲁木齐冬季采暖期大气污染物的环境分布及来源研究提供重要基础资料和实验依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

降雪采样点位于乌鲁木齐市天山区国家基本气象观测站观测场内(43°47'N, 87°39'E, 海拔 935.0 m), 该采样点四周相对开阔, 无高大建筑, 对乌鲁木齐市区气候和环境条件具有较好的代表性.

1.2 样品采集

此次降雪过程自 2012 年 2 月 21 日 23:43 时持续至 23 日 06:19 时, 降雪量为 13 mm. 共采集到 2 个降雪样品, 分别为 21 日 23:43 时至 22 日 08:00 时(R1, 降雪量 4 mm, pH 5.80, 电导率 40.0 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)和 22 日 08:00 时至 23 日 06:19 时(R2, 降雪量 9 mm, pH 6.33, 电导率 37.3 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). 降雪样品采集及保存按照文献^[17]执行, 样品采集后立即取一部分融雪水测定 pH 值(上海雷磁, DDS-307)和电导率(上海雷磁, PHS-3B), 取近 2/3 融雪水经 0.45 μm 孔径的混合纤维素滤膜滤去其中悬浮态颗粒后注入聚乙烯瓶保存(滤膜另置保存), 剩余 1/3 融雪水滴加 HNO_3 (优级纯)酸化, 使得样品中硝酸的质量分数为 1%, 样品测定前置于冰箱 4℃ 保存.

大气总悬浮颗粒物(TSP)样品采集主要为满足大气成分业务需要, 每旬进行 2 次采样, 总悬浮颗粒物采集严格按标准执行^[18]. 由于缺乏降雪前期 TSP 同步采样对比观测, 故选择 21 日 08:30 至 22 日 06:30 时采集的 TSP 样品测定作为降雪前期大气元素

浓度背景参考值.

1.3 样品分析

将能通过孔径 0.45 μm 滤膜的部分称为水中可过滤态成分, 阻留在滤膜上的部分称为悬浮态成分, 金属总量是不经过滤的水样经消解后测得的金属含量, 应是可过滤金属与不可过滤的金属之和. 因此, 同一样品, 融雪水中金属含量的测定, 过滤和不经过滤的结果有很大差异, 过滤可能引起痕量金属的损失^[19].

通过孔径 0.45 μm 滤膜的融雪水中含有 0.45 μm 以下的颗粒物及细微的胶体粒子, 选择 HNO_3 - H_2O_2 -HF 的消解酸体系, HF 能破坏硅酸盐矿物, 溶解出矿物颗粒晶格中包裹的部分金属元素, 从而获得较好的回收率^[20].

与以往研究有所不同, 为了比较过滤和未经过滤, 消解和未经消解融雪水中金属含量的差别, 本实验取 2 份 5 mL 经过滤融雪水(R I、R II)和 5 mL 未经过滤融雪水(R III)进行分别处理. R II、R III 依次加入 5 mL HNO_3 、3 mL H_2O_2 和 1.5 mL HF(优级纯)^[21], 轻轻摇动消解罐, 放置 1 h 进行预消解, Mars 微波消解仪(美国 CEM, HP500). 消解程序设置为三步消化: 5 min 爬升到 120℃ 保持 5 min, 5 min 爬升 180℃ 保持 10 min, 5 min 爬升 220℃ 保持 10 min 加热消化^[22], 超纯水(美国 Millipore, Milli-Q)定容 50 mL 容量瓶; 空白及 TSP 样品消解方法同上, 消解后定容 100 mL 容量瓶. 利用电感耦合等离子体质谱 ICP-MS(美国 Perkin-Elmer, ELAN DRC II)测定了 22 种可溶性元素(Pb、Cd、Cr、As、Tl、Mn、Bi、Ni、Zn、Cu、Mo、Be、Se、V、Co、Ba、Mg、Al、Si、Ti、K、Ca、Fe、Sr)浓度. 整个实验过程进行严格的质量控制, 平行样相对标准偏差在 0.65%~4.65% 之间.

利用扫描电镜(德国 Zeiss, SUPRA 55VP)观察滤膜上悬浮态颗粒, X 射线能谱仪(德国 Bruker, X-flash-sdd-5010)测试悬浮态颗粒物元素成分, 电压为 20 kV, 收集时间为 60 s. 对 R1、R2 滤膜上悬浮态单颗粒物进行扫描电镜 X 射线能谱观测和识别, 每张滤膜随机采集 50 个能谱点.

2 结果与讨论

2.1 降雪前期污染物浓度变化

自 2 月 9~21 日降雪前期, 乌鲁木齐南郊持续阴雪(0.0~0.3 mm 微到小量降雪)或阴雾天气, 大气层结稳定, 逆温层深厚, 污染物不断积聚增加. 21

日 PM_{10} 、 SO_2 浓度分别为 $187.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $166.88 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超过 24 h 平均 2 级浓度限值 ($150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), NO_2 浓度为 $54.03 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 低于国家一级浓度限值 ($80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[23].

比较 21 日、22 日 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_1 、 SO_2 及 NO_2 的浓度变化, 22 日降雪期间, 除 NO_2 外, PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_1 、 SO_2 浓度降幅明显, 分别为 71.2%、69.6%、68.8%、59.9%.

2.2 金属元素变化及来源解析

降雪前期 TSP 样品中金属元素浓度较高, 除 Mn 外, 其含量均高于土壤参考值 0.80 ~ 461.09 倍, 其中 Bi、Pb、Be、Zn 分别为 10.98、16.54、13.70、19.69, Se、Cd、As 为 61.60、127.51、461.09 倍.

降雪前大气中大量金属元素富集在颗粒物上, 当降雪发生时富集在颗粒物上的重金属随着冲刷过程进入到降雪中. 比较过滤 (R I) 和未经过滤 (R III), 消解 (R II、R III) 和未经消解融雪水 (R I) 中金属含量的差别 (表 1), R II 中除 Zn、Cd、Bi 元素浓度略小于 R I 外 (考虑样品中颗粒物的差异), 其它元素均远大于 R I, 其中 Al 元素浓度是 R I 的 458.9 倍. R II、R III 元素浓度在量级上是一致的, 差异远远小于 R I 和 R II, 说明 R II 虽过滤去除了粗 ($>0.45 \mu\text{m}$) 悬浮颗粒物, 但地壳元素和人为源元素可能在细颗粒 ($<0.45 \mu\text{m}$) 中存在富集, 因此 R II、R III 元素浓度值差异不大. 已有研究表明^[24], 微量金属的粒径分布随着元素的不同而变化, 在不同的地方也会有差别, 但基本上都呈双模态分布, 最大峰在亚微米, 第二个峰在粗粒子. 地壳元素 Ca、Mg、Fe、K、Al、Ti 等一般以氧化物的形态存在于粗模态中^[25], 高温过程 (如燃烧过程) 产生的气溶胶粒径通常在亚微米级以下^[26]. 降雪样品 R II、R III 中的元素浓度也印证了金属元素在不同粒径颗粒物种均有不同的富集, 其在细颗粒物中的含量要高于粗颗粒^[27]. 因本研究另行对过滤后的悬浮态颗粒物进行分析, 故在分析降雪样品中的元素浓度时, 采用过滤消解融雪水 (R II) 后测定的元素浓度.

元素富集因子又称富集因子法 (EF), 是用以表示大气颗粒物中元素的富集程度, 判断和评价颗粒物中元素来源 (自然来源和人为来源) 的方法^[28]. EF 小于 10 则可以认为相对于地壳 (或表土) 来源没有富集, 主要来自于土壤或岩石风化的尘埃, 如果 EF 增大到 $10 \sim 10^4$, 则可认为该元素被富集了, 它不仅是地壳物质的贡献, 更可能与人类的各种活动的不同贡献有关^[29]. Al 是相对稳定的地壳元素,

表 1 降雪样品不同前处理过程 (R I、R II、R III) 金属浓度变化/ $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$

Table 1 Metal concentrations of the pretreatment of snowfall samples (R I、R II、R III)/ $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$

金属	R I	R II	R III
Cr	0.75	42.40	51.37
Mn	9.52	63.59	77.67
Fe	28.26	6 582.85	3 150.55
Cu	4.49	11.76	32.33
Zn	196.09	152.62	283.12
Cd	3.44	1.63	1.12
Pb	1.66	13.06	29.71
Al	67.08	27 784.47	39 353.05
Co	0.93	24.01	16.66
Mg	837.50	4 278.57	6 572.18
Ca	13 849.54	10 0822.90	13 0571.88
V	2.78	19.14	27.83
As	6.10	239.64	344.43
Be	0.02	1.47	2.12
K	743.87	5 571.15	6 710.18
Ni	5.22	26.54	38.93
Se	0.79	4.81	4.76
Sr	63.22	178.48	287.80
Ba	126.12	493.10	2 104.58
Tl	0.03	0.22	0.30
Bi	0.29	0.10	0.27
Ti	69.35	2 434.29	4 307.07

选择 Al 作为参比元素, 乌鲁木齐土壤重金属背景值选取参考文献 [30] 中新疆 A 层土壤的平均值.

$$EF_X = \frac{(c_X/c_R)_{\text{降水或大气颗粒物}}}{(c_X/c_R)_{\text{土壤}}}$$

式中, $(c_X/c_R)_{\text{降水或大气颗粒物}}$: 降水或颗粒物中元素 X 与参考元素 R 质量浓度比值, $(c_X/c_R)_{\text{土壤}}$: 参考物质中元素 X 与参考元素 R 质量浓度比值.

对降雪 R1、R2 阶段、降雪全过程 R 及总悬浮颗粒 TSP 中水溶性元素进行富集因子分析 (表 2). 结果表明, 降雪中地壳元素的 EF 值与总悬浮颗粒物 EF 值接近, 这是由于地壳元素主要富集在粗颗粒中, 降雪 (云下清除) 对粗颗粒的清除效率是细颗粒的 3 倍以上, 此次降雪粗颗粒被有效的清除, 降雪中地壳元素组成代表了局地土壤组成^[31].

TSP 中 Pb、Zn 的 EF 值略大于 10, 说明乌鲁木齐东南郊这两种元素的富集来自地壳物质 (如土壤扬尘), 亦与人类活动有关. 我国自 2000 年 7 月 1 日起已全国停止销售和使用含铅汽油, 汽车尾气不再是 Pb 的主要来源, 因此现燃煤产生的工业废气已成为大气 Pb 含量的重要来源; Zn 主要来源于交通和工业源, 有色金属冶炼^[32], 橡胶轮胎的磨损^[33] 以及煤、垃圾的燃烧^[34]. 复杂的排放源对确定乌鲁木齐

东南郊 Pb、Zn 的人为源存在一定的难度,对于 Pb、Zn 的来源还需做进一步的研究。

Se、Cd、As 在大气颗粒物及降雪样品中均发生富集,EF 值分别为 40.73、83.62、300.66,124.65、36.70、57.69,主要是由人为污染源排放造成。本研究对大气总悬浮颗粒物及降雪中重金属研究的结果与 Li 等^[15]的较一致,其中富集因子 EF 值最大的元素为 As。燃煤是环境中 As、Se 的主要来源之一^[35,36],而我国的煤消耗占总能源的 70%^[37],As、Se、Cd 等是煤中潜在的有毒微量元素^[38,39],目前火电厂燃煤是这些微量元素的主要人为来源^[40],大量的 As、Se、Cd 等挥发性元素通过燃煤过程富集于亚微米飞灰颗粒上并排放入大气中^[41]。As、Se、Cd 元素的富集表明采样期间主要为煤烟型污染。

HYSPLIT 轨迹模式已被广泛应用在降水化学源解析中,为了探讨乌鲁木齐东南郊污染输送路径及可能存在的来源,运用后向轨迹聚类分析技术对 9~21 日距地面 300 m 高度(边界层低层)的 72 h 后向轨迹进行了分析(图 1),具体计算和方法参见

文献[42]。后向轨迹聚类分析结果表明,此次降雪前期采样点气团主要来自西南方(簇 4、簇 5),与地面高压移动路径一致,气团除携带中亚发达城市区域大量工业燃烧烟灰颗粒外,大多数西南方气团(簇 2、簇 5)途径乌鲁木齐燃煤污染区域。由于目前还缺乏对中亚长距离输送的研究,还不能确定其对乌鲁木齐大气污染的贡献率,因此考虑乌鲁木齐特殊地形及冬季逆温层的影响,采样区域降雪前期主要受其西南方向燃煤火电排放烟尘及乌鲁木齐周边工业排放的影响,且前期受逆温层影响,使得局地污染物不断堆积,降雪前大气总悬浮颗粒物中的元素含量反映天气系统进入乌鲁木齐东南郊时局地的大气污染状况。

煤燃烧产生的污染物中尤以亚微颗粒形式存在的微量重金属元素排放物威胁性最大,目前,火电厂虽有各种除尘设备,但仍有大量微米、亚微米的飞灰排放入大气中,成为乌鲁木齐大气颗粒物的主要来源。因此,希望通过本研究,再次强调了燃煤对人体健康的危害,加强对工业、火电煤烟的防治。

表 2 降雪及大气总悬浮颗粒物元素富集因子¹⁾

Table 2 Enrichment factors of snowfall and total suspended particles

元素	R1/ $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	R2/ $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	R/ $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	T/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	EF _{R1}	EF _{R2}	EF _R	EF _T	EF _T [*]
Al	16 332.41	14 452.06	30 784.47	127 562.20	1	1	1	1	1
Ca	50 769.91	50 052.99	100 822.90	114 942.95	4.96	5.53	5.23	1.44	0.36
Ti	1 010.66	1 423.63	2 434.29	2 901.02	0.80	1.28	1.03	0.29	0.11
Mg	3 258.14	1 020.43	4 278.57	41 222.30	0.59	0.21	0.41	0.96	0.09
Fe	5 627.25	955.60	6 582.85	8 492.85	0.49	0.09	0.31	0.10	0.85
K	8 744.24	1 926.91	10 671.15	6 414.84	2.61	0.65	1.69	0.25	
Mn	47.64	15.95	63.59	539.01	0.35	0.13	0.25	0.51	1.68
Co	19.95	4.06	24.01	61.87	6.38	1.47	4.07	2.53	3.27
V	13.38	5.76	19.14	173.07	0.91	0.44	0.69	1.50	2.10
As	88.69	150.94	239.64	5 175.40	40.24	77.40	57.69	300.66	382
Be	1.02	0.44	1.47	24.25	3.15	1.54	2.39	9.56	
Cr	29.41	12.99	42.40	88.79	3.03	1.51	2.32	1.17	2.55
Cu	5.57	6.19	11.76	231.62	1.06	1.33	1.19	5.64	23.92
Zn	68.98	83.63	152.62	1 423.18	5.10	6.98	5.98	13.46	94
Cd	0.96	0.67	1.63	15.42	40.80	32.07	36.70	83.62	270
Pb	8.16	4.90	13.06	340.21	2.14	1.45	1.82	11.41	333
Ni	12.15	14.38	26.54	68.89	2.32	3.11	2.69	1.69	2.38
Se	3.16	1.64	4.81	6.51	154.61	90.79	124.65	40.73	
Sr	137.47	41.01	178.48	1 840.67	2.10	0.71	1.45	3.60	0.50
Ba	316.17	176.93	493.10	2 783.86	3.44	2.18	2.85	3.88	
Tl	0.18	0.04	0.22	3.59	1.73	0.46	1.14	4.46	
Bi	0.07	0.03	0.10	3.24	1.32	0.72	1.04	7.80	

1) EF_T^{*} 乌鲁木齐 2004~2007 年采集 TSP 计算 EF 平均值^[15],表中黑体字表示本研究和文献[15]中大于 10 的 EF 值

2.3 悬浮态颗粒物形态

扫描电镜观测结果显示,降雪中悬浮态单颗粒主要有 3 种形态特征,即矿物颗粒、燃煤飞灰和碳

质颗粒,而生物物质颗粒稀少。EDX 检测未通过 0.45 μm 滤膜的悬浮态单颗粒物中,不规则、规则矿物颗粒主要由地壳元素和少量的重金属元素组成,这是

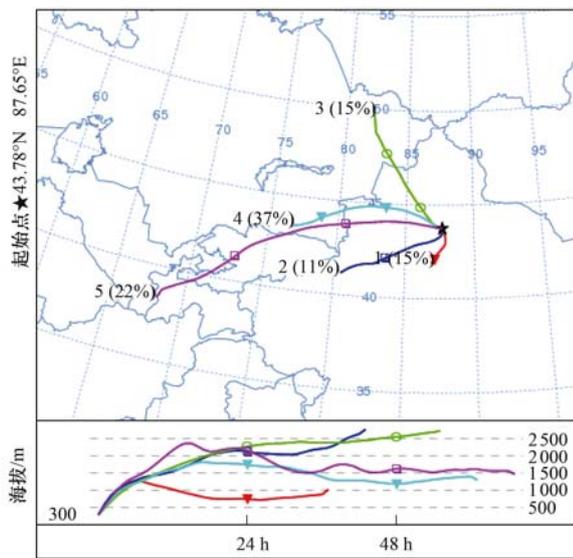


图1 距地300 m后向轨迹聚类72 h反演
Fig. 1 Cluster mean 72 h backward trajectories
starting at 300 m above the ground

由于融雪水中大部分碱性元素能够完全溶解,Zn、Cd、Se、As也部分溶解,而Al、Fe等地壳元素大部分不能溶解^[43].

2.3.1 矿物颗粒

矿物颗粒占总观测颗粒的36.83%,一般呈不规则形态,不规则颗粒通常来自自然源,细长(条状)的颗粒可能是颗粒物的二次反应物^[44].能谱测试结果显示主要含有Si、Al、Ca、Fe、K、Mg元素,部分颗粒中有微量的Ti元素,其中Si质颗粒占64.86%,大多数Si质颗粒也含有Al元素,根据形态和元素(Si含量、Al/Si值^[45])的含量,不溶性矿物颗粒主要为硅铝酸盐、石英等矿物,来源于自然

地表风化层和土壤. Ca质颗粒占19.67%,还含有微量的Si、Al、Mg、S等元素,其主要为方解石,矿物形态呈不规则状或晶簇状[图2(d)].

2.3.2 燃煤飞灰

燃煤飞灰颗粒物一般呈圆球形,占总观测颗粒的39.75%,直径为100 nm~28 μm不等,圆球形颗粒大多数表面光滑亮泽[图2(a)],少数表面包裹黏附物[图2(b)]或有小突起[图2(c)].根据成分燃煤飞灰可分为Si-Al质、Ca质、Fe质和有机质这4种类型^[46],本研究观察到的燃煤飞灰化学成分与地壳来源相似,除C、O元素外,主要成分元素为Si和Al,还含有Ca、Na、K、Fe、Mg、Ti微量元素,其主要为硅铝质燃煤飞灰,其中还发现少量的Fe质和Ti质燃煤飞灰,Si-Al质球形颗粒来自燃煤供热站或火电厂高温燃煤过程,Fe质和Ti质球形颗粒则来自钢铁厂、铸造厂等温度稍低的燃煤过程^[47].

2.3.3 碳质颗粒

观察到的碳质颗粒占总颗粒物的22.06%,主要为烟尘集合体(soot aggregate),不规则碳颗粒较少[图2(e)],X射线能谱分析表明,其主要成分是C和O元素,含有微量的Si、Al、Ca、Na、K、Fe、S元素.烟尘集合体由生物质或化石燃料不完全燃烧产生^[48],呈典型链条型、蓬松状及密实状,本研究扫描电镜观察结果中烟尘集合体多呈密实状,可能由于烟尘在大气或降雪中发生了“吸湿”、“碰并”作用,导致形貌发生改变^[49],这些老化的烟尘集合体除了C、O元素之外,还检测到S元素,这是由于烟尘集合体在大气中吸附了SO₂发生反应[图2(f)]^[50].

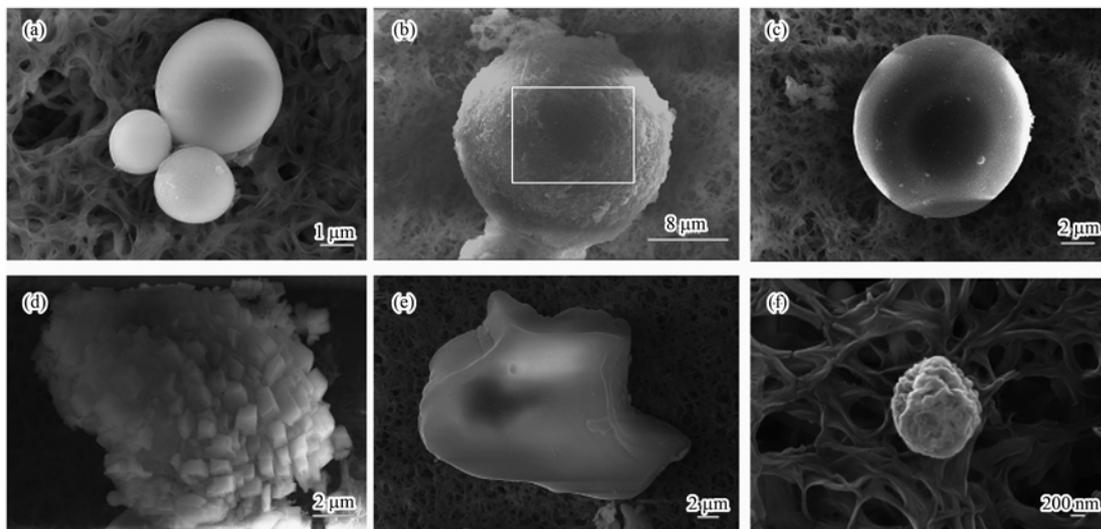


图2 不同类型悬浮态颗粒形貌特征
Fig. 2 Secondary electron images of insoluble aerosol particles

在悬浮态单颗粒中仅观察到 2 个生物质颗粒,能谱测试主要为 C、O 元素,含有微量 Si、Ca、Al 元素,一粒呈卷曲长条状,可能为植物的碎片,另一个形状规则对称,可能为植物花粉。

利用单颗粒物分析手段进行颗粒物源解析一般是通过大量统计得出定量或半定量的源解析结果,由于实验经费限制,对每个样品只随机统计 50 个能谱点,统计结果存在一定的偶然性。但从现有的实验结果来看,燃煤飞灰所占比例较高,且主要为 Si-Al 质燃煤飞灰,进一步验证了后向轨迹聚类簇分析的结果,说明乌鲁木齐局地燃煤火电厂对采样区域的影响比较严重。

3 结论

(1)降雪和大气总悬浮颗粒物样品的元素分析结果表明,降雪时段乌鲁木齐东南郊呈现出 As、Cd、Se、Zn、Pb 为主的多金属复合污染的特点,其富集程度受人为影响严重。元素特征及轨迹模拟也显示工业与火电厂燃煤是乌鲁木齐最主要的污染源。

(2)扫描电镜能谱分析表明,降雪中悬浮态颗粒物以不规则体和球体颗粒居多,烟尘集体次之,烟尘集体多为老化或吸湿后形成的密实颗粒,大量球形燃煤飞灰及矿物颗粒表明乌鲁木齐冬季大气环境中悬浮颗粒物主要来自煤炭燃烧和裸地起尘。

参考文献:

- [1] Galloway J N, Thornton J D, Norton S A, *et al.* Trace metals in atmospheric deposition: a review and assessment [J]. *Atmospheric Environment*, 1982, **16**(7): 1677-1700.
- [2] Nriagu J O. Global metal pollution: poisoning the biosphere? [J]. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 1990, **32**(7): 7-33.
- [3] 康汉青,朱彬,樊曙先. 南京北郊冬季大气气溶胶及其湿清除特征研究[J]. *气候与环境研究*, 2009, **24**(5): 523-530.
- [4] Koulousaris M, Aloupi M, Angelidis M O. Total metal concentrations in atmospheric precipitation from the Northern Aegean Sea [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2009, **201**(1): 389-403.
- [5] Schaumann F, Borm P J A, Herbrich A, *et al.* Metal-rich ambient particles (Particulate Matter_{2.5}) cause airway inflammation in healthy subjects [J]. *American Journal Respiratory and Critical Care Medicine*, 2004, **170**(8): 898-903.
- [6] Adamson I Y R, Prieditis H, Hedgecock C, *et al.* Zinc is the toxic factor in the lung response to an atmospheric particulate sample [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2000, **166**(2): 111-119.
- [7] Normana M, Das S N, Pillai A G, *et al.* Influence of air mass trajectories on the chemical composition of precipitation in India [J]. 2001, **35**(25): 4223-4235.
- [8] Zhang M Y, Wang S J, Wu F C, *et al.* Chemical compositions of wet precipitation and anthropogenic influences at a developing urban site in southeastern China [J]. *Atmospheric Research*, 2007, **84**(4): 311-322.
- [9] Chate D M, Rao P S P, Naik M S, *et al.* Scavenging of aerosols and their chemical species by rain [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(18): 2477-2484.
- [10] 孙龙仁,郑春霞,王文全,等. 乌鲁木齐市大气 PM₁₀ 中重金属元素的浓度和富集特征 [J]. *新疆农业科学*, 2009, **46**(3): 582-588.
- [11] 钱翌,巴雅尔塔. 乌鲁木齐市大气污染物时空分布特征研究 [J]. *新疆农业大学学报*, 2004, **27**(4): 51-55.
- [12] 刘玉燕,刘敏. 乌鲁木齐城市土壤性质及污染研究 [J]. *干旱区研究*, 2007, **24**(1): 66-68.
- [13] 亚力昆江·吐尔逊,迪丽努尔·塔力甫,阿不力克木·阿布力孜,等. 乌鲁木齐市采暖期大气 PM_{2.5}、PM_{10-2.5} 中重金属污染水平评价 [J]. *新疆大学学报*, 2010, **27**(3): 338-342.
- [14] 冯银厂,彭林,吴建会,等. 乌鲁木齐市环境空气中 TSP 和 PM₁₀ 来源解析 [J]. *中国环境科学*, 2005, **25**(Z1): 30-33.
- [15] Li J, Zhuang G S, Huang K, *et al.* Characteristics and sources of air-borne particulate in Urumqi, China, the upstream area of Asia dust [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(4): 776-787.
- [16] Wei B G, Jiang F Q, Li X M. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in urban road dusts from Urumqi, NW China [J]. *Microchemical Journal*, 2009, **93**(2): 147-152.
- [17] GB 13580. 2-92, 大气降水样品的采集与保存 [S].
- [18] GB/T 15432-1995, 环境空气总悬浮颗粒物的测定重量法 [S].
- [19] 卢玉棋. 微孔滤膜过滤水样对水中一些微量金属含量测定的影响 [J]. *中国卫生检验杂志*, 1999, **9**(6): 415-417.
- [20] Wang C F, Yang J Y, Ke C H. Multi-element analysis of airborne particulate matter by various spectrometric methods after microwave digestion [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1996, **320**(2-3): 207-216.
- [21] CEN, EN 14902: 2005. Ambient air quality-Standard method for the measurement of Pb, Cd, As and Ni in the PM₁₀ fraction of suspended particulate matter [S].
- [22] Rasmussen P E, Wheeler A J, Hassan N M, *et al.* Monitoring personal, indoor, and outdoor exposures to metals in airborne particulate matter: Risk of contamination during sampling, handling and analysis [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(28): 5897-5907.
- [23] GB 3095-2012, 环境空气质量标准 [S].
- [24] Van Dingenen R, Raes F, Putaud J P, *et al.* A European aerosol phenomenology—1: Physical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(16): 2561-2577.

- [25] Wu Z Y, Han M, Lin Z C, *et al.* Chesapeake bay atmospheric deposition study, Year 1: Sources and dry deposition of selected elements in aerosol particles [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(8): 1471-1486.
- [26] Lighty J S, Veranth J M, Sarofim A F. Combustion aerosols: factors governing their size and composition and implications to human health [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2000, **50**(9): 1565-1618.
- [27] Cyrys J, Stölzel M, Heinrich J, *et al.* Elemental composition and sources of fine and ultrafine ambient particles in Erfurt, Germany [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **305**(1-3): 143-156.
- [28] Mason B. Principles of geochemistry [M]. New York: John Wiley & Sons, 1966. 41-49.
- [29] Duce R A, Hoffman G L, Zoller W H. Atmospheric trace metals at remote northern and southern hemisphere sites: pollution or natural? [J]. *Science*, 1975, **187**(4171): 59-61.
- [30] 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. 329-492.
- [31] Türküm A, Pekey H, Pekey B, *et al.* Investigating relationships between aerosol and rainwater compositions at different locations in Turkey [J]. *Atmospheric Research*, 2008, **89**(4): 315-323.
- [32] Nriagu J O, Pacyna J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals [J]. *Nature*, 1988, **333**(6169): 134-139.
- [33] Cunnell T B, Duckenfield K U, Landa E R, *et al.* Tire-wear particles as a source of zinc to the environment [J]. *Environment Science Technology*, 2004, **38**(15): 4206-4214.
- [34] Adriano D C. Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability and risks of metals [M]. (2nd ed). New York: Springer-Verlag, 2001. 8.
- [35] Luo K L, Zhang X M, Chen C H, *et al.* Estimate of arsenic emission amount from the coal power stations in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**(20): 2138-2189.
- [36] Fang G C, Wu Y S, Huang S H, *et al.* Review of atmospheric metallic elements in Asia during 2000-2004 [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(17): 3003-3013.
- [37] You C F, Xu X C. Coal combustion and its pollution control in China [J]. *Energy*, 2010, **35**(11): 4467-4472.
- [38] Finkelman R B. Trace elements in coal [J]. *Biological Trace Element Research*, 1999, **67**(3): 197-204.
- [39] Liu G J, Zheng L G, Duzgoren-Aydin N S, *et al.* Health effects of arsenic, fluorine, and selenium from indoor burning of Chinese coal [J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, **189**: 89-106.
- [40] Tang Q, Liu G J, Yan Z C, *et al.* Distribution and fate of environmentally sensitive elements (arsenic, mercury, stibium and selenium) in coal-fired power plants at Huainan, Anhui, China [J]. *Fuel*, 2012, **95**: 334-339.
- [41] Itskos G, Koukouzasa N, Vasilatos C, *et al.* Comparative uptake study of toxic elements from aqueous media by the different particle-size-fractions of fly ash [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **183**(1-3): 787-792.
- [42] Draxler R R, Rolph G D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model Access via NOAA ARL READY [EB/OL]. <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>, 2003.
- [43] Al-Momani I F. Trace elements in atmospheric precipitation at Northern Jordan measured by ICP-MS: acidity and possible sources [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(32): 4507-4515.
- [44] Shi Z B, Shao L Y, Jones T P, *et al.* Characterization of airborne individual particles collected in an urban area, a satellite city and a clean air area in Beijing, 2001 [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(29): 4097-4108.
- [45] 吕森林, 邵龙义. 北京市可吸入颗粒物(PM₁₀)中单颗粒的矿物组成特征 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2003, **22**(4): 421-424.
- [46] 孙俊民, 韩德馨, 姚强, 等. 燃煤飞灰的显微颗粒类型与显微结构特征 [J]. *电子显微学报*, 2001, **20**(2): 140-147.
- [47] Choël M, Deboudt K, Flament P, *et al.* Single-particle analysis of atmospheric aerosols at Cape Gris-Nez, English Channel: Influence of steel works on iron apportionment [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(13): 2820-2830.
- [48] Cong Z Y, Kang S C, Qin D H. Seasonal features of aerosol particles recorded in snow from Mt. Qomolangma (Everest) and their environmental implications [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(7): 914-919.
- [49] Ebert M, Inerle-Hof M, Weinbruch S. Environmental scanning electron microscopy as a new technique to determine the hygroscopic behaviour of individual aerosol particles [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(39): 5909-5916.
- [50] 刘彦飞, 邵龙义, 程晓霞. 大气可吸入颗粒物 PM₁₀ 单颗粒硫化特征 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(11): 2555-2563.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride(TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LU Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

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@ rcees. 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@ rcees. 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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行