

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估 ..... 罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)

南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析 ..... 秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)

南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征 ..... 师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)

苏州市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子的季节变化及来源分析 ..... 王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沫,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)

成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 中元素特征及重金属潜在生态风险评价 ..... 杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)

泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析 ..... 张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)

青奥会期间基于δ<sup>13</sup>C观测的大气 CO<sub>2</sub> 来源解析 ..... 徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)

民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析 ..... 韩博,黄佳敏,魏志强(4524)

畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究 ..... 张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)

有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物 ..... 邢奕,王骢,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)

基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性 ..... 楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)

亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征 ..... 龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)

浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析 ..... 马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)

太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应 ..... 高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)

利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性 ..... 黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)

三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估 ..... 杨兵,何丙辉,王德宝(4586)

太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价 ..... 武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)

滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义 ..... 余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)

洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性 ..... 王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)

蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化 ..... 赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)

三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究 ..... 卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)

模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险 ..... 刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)

有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验 ..... 张思,何江涛,朱晓婧(4651)

无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例 ..... 李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)

清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应 ..... 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)

南方典型农田区浅层地下水污染特征 ..... 郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)

水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用 ..... 马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)

粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果 ..... 沈庆然,侯娟,李田(4700)

超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝 ..... 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)

QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO<sub>2</sub> 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制 ..... 姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)

群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能 ..... 赵畅,王文昭,徐期勇(4720)

水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性 ..... 王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)

外加微量 N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 下 SBR 中硝化微生物特性 ..... 肖芄颖,张代钧,卢培利(4734)

部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析 ..... 鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)

典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响 ..... 姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)

生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析 ..... 张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)

开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析 ..... 吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)

全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性 ..... 李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)

水肥用量对玉米季土壤 CO<sub>2</sub> 排放的综合影响 ..... 杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)

福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性 ..... 姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)

基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估 ..... 杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)

北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系 ..... 柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)

准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征 ..... 刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)

河北平原潮土中微生物对氮降解特征 ..... 张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)

砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响 ..... 廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)

碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力 ..... 蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)

不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响 ..... 孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲锋,展惠英(4857)

南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征 ..... 田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)

Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能 ..... 汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)

铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂 ..... 付军,范芳,李海宁,张高生(4882)

不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性 ..... 王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)

《环境科学》第37卷(2016年)总目录 ..... (4899)

《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)

# 成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 中元素特征及重金属潜在生态风险评价

杨怀金<sup>1,2,3</sup>, 杨德容<sup>1,2</sup>, 叶芝祥<sup>1,2</sup>, 张恒德<sup>3</sup>, 马学款<sup>3</sup>, 汤志亚<sup>4</sup>, 毛冬艳<sup>5</sup>

(1. 成都信息工程大学资源环境学院, 成都 610225; 2. 大气环境模拟与污染控制四川省高校重点实验室, 成都 610225; 3. 中国气象局环境气象中心, 北京 100081; 4. 成都信息工程大学科技处, 成都 610225; 5. 国家气象中心, 北京 100081)

**摘要:** 于 2012 年和 2014 年春季在成都西南郊区采集 PM<sub>2.5</sub> 样品, 采用重量法测定 PM<sub>2.5</sub> 的浓度, 利用 X 射线荧光光谱法测定 PM<sub>2.5</sub> 中 24 种元素的质量浓度, 运用地累积指数法和富集因子法分别讨论了 PM<sub>2.5</sub> 中元素的污染特征、富集程度及来源, 并用潜在生态风险指数法对 PM<sub>2.5</sub> 中重金属的潜在生态风险进行评价. 结果表明, 成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 的质量浓度处于相对较高的水平; PM<sub>2.5</sub> 中元素组成特征表现为 K 和 S 的质量分数最高, Ga、Cs、Co、Cd、V 的质量分数最低. 国内外典型城市比较发现, 不同城市 PM<sub>2.5</sub> 中元素质量浓度水平存在较大差异. 地累积指数结果表明, PM<sub>2.5</sub> 中 As、Br、S、Cd、Se、Pb、Cl 和 Zn 污染程度较严重. 富集因子分析表明, PM<sub>2.5</sub> 中 Se、Cd 为超富集, As、Br、Cl、Pb、Zn、S 为高度富集, Cu、Cs、Ni、Ga、Co 为中度富集, 这些元素主要受人为污染影响, 受自然源的影响很小; Cr、Mn、Ca、V 为轻度富集, 受自然源和人为源的共同作用; Na、Ti、Al、Si 和 Mg 为基本无富集或微量富集, 主要来自于土壤尘或扬尘. 潜在生态危害指数法评价显示, PM<sub>2.5</sub> 中重金属单因子潜在生态危害程度大小为 Cd > As > Pb > Cu > Zn > Ni > Co > Cr > Mn > V > Ti, 重金属联合的潜在生态风险为极强, Cd 是多种重金属联合的潜在生态风险指数中的主要贡献因子.

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 元素; 富集因子; 重金属; 潜在生态风险指数

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4490-14 DOI: 10.13227/j.hjks.201604212

## Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM<sub>2.5</sub> at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring

YANG Huai-jin<sup>1,2,3</sup>, YANG De-rong<sup>1,2</sup>, YE Zhi-xiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Heng-de<sup>3</sup>, MA Xue-kuan<sup>3</sup>, TANG Zhi-ya<sup>4</sup>, MAO Dong-yan<sup>5</sup>

(1. College of Resource and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Air Environmental Modeling and Pollution Controlling Key Laboratory of Sichuan Higher Education Institutes, Chengdu 610225, China; 3. National Environmental Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 4. Department of Science and Technology, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 5. National Meteorological Centre, Beijing 100081, China)

**Abstract:** PM<sub>2.5</sub> samples were collected at the southwest suburb of Chengdu in spring (in May 2012 and 2014). The mass concentrations of PM<sub>2.5</sub> were determined by the weight method, and 24 chemical elements in PM<sub>2.5</sub> were analyzed by XRF. To study the pollution characteristics and sources of chemical elements, and the potential ecological risk of heavy metals in PM<sub>2.5</sub>, the Geo-accumulation Index, Enrichment Factor, and Potential Ecological Risk Index methods were applied, respectively. The results indicated that the mass concentrations of PM<sub>2.5</sub> in spring at the southwest suburb of Chengdu were very high, compared with American EPA's Standard and National Standard level-II. The detection of chemical element composition in PM<sub>2.5</sub> showed that K and S were the main elements, whereas the contents of Ga, Cs, Co, Cd, and V were the lowest. The differences of elemental concentrations in PM<sub>2.5</sub> showed relatively large differences, when compared with domestic and foreign representative cities. Se, Cd, As, Br, S, Pb, Cl and Zn were present at an extremely high level of geo-accumulation degree, which revealed that the pollution coming from human activities was serious. The analysis results of enrichment factor showed that Se, Cd, As, Br, Cl, Pb, Zn and S elements were highly enriched or hyper accumulated, Cu, Cs, Ni, Ga and Co elements were moderately enriched, and they were mainly from human activities rather than soil dust. Cr, Mn, Ca and V elements were mildly enriched, and they were from both natural sources and human activities. Na, Ti, Al, Si and Mg elements were scarcely enriched, and they were mainly from natural sources. The ecological risk assessment of heavy metals showed that the order of potential ecological risk index of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> was Cd > As > Pb > Cu > Zn > Ni > Co > Cr > Mn > V > Ti, while the ecological harm degree of Cd was extremely strong, and the whole potential ecological risk degree was very

收稿日期: 2016-04-26; 修订日期: 2016-07-23

基金项目: 四川省环境保护重大科技专项 (2013HBZX02); 四川省教育厅项目 (14ZB0170); 大气环境模拟与污染控制四川省高校重点实验室开放项目 (ZZKT2014002)

作者简介: 杨怀金 (1979 ~), 男, 讲师, 主要研究方向为大气环境监测与评价、环境气象与健康, E-mail: jakcrazy@cuit.edu.cn

strong.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>; element; enrichment factor; heavy metals; potential ecological risk index

随着我国工业化和城市化进程的加快,大气污染的区域性特征日益明显.近年来,京津冀、长三角、珠三角、长株潭城市群、辽宁中部城市群、山东半岛城市群、武汉城市群、成渝城市群、海峡西岸城市群等地秋冬季节大气霾污染事件频发,大气细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)多次出现爆表,而大气颗粒物则是霾形成的重要原因之一,引起了社会的高度关注<sup>[1,2]</sup>.因此,大气霾污染问题不仅是大气环境领域研究的热点和公众热议的焦点,同时也是政府部门和公众迫切需要解决的重大环境污染问题<sup>[3]</sup>.PM<sub>2.5</sub>已成为我国许多城市大气环境中组成复杂、潜在危害大的首要污染物.PM<sub>2.5</sub>不仅对能见度和气候变化有重要影响,对人体健康也有较大危害.PM<sub>2.5</sub>除本身有毒外,因其比表面积大,较粗颗粒物更容易富集和携带大量重金属、PAHs、诱变剂以及病菌等有毒有害物质,对人体健康构成潜在威胁.近年来国外有关PM<sub>2.5</sub>方面的研究报道较多<sup>[4~10]</sup>.国内大城市PM<sub>2.5</sub>污染问题也引起学者们的关注<sup>[11~13]</sup>,如北京<sup>[14~18]</sup>、上海<sup>[19]</sup>、广州<sup>[20~22]</sup>、成都<sup>[23~28]</sup>、天津<sup>[16,29]</sup>、太原<sup>[30]</sup>、兰州<sup>[31,32]</sup>、乌鲁木齐<sup>[33]</sup>等针对PM<sub>2.5</sub>元素组成、来源及重金属污染特征等方面开展了不少研究,尤其在PM<sub>2.5</sub>中重金属污染特征方面取得了较大进展<sup>[34,35]</sup>,为深入开展PM<sub>2.5</sub>相关方面的研究积累了大量数据.

成都地处四川盆地西部,是中国西南地区最大平原腹地,人口密度排全国前列(常住人口超过1 400万).气象特征上,常年风速小、静风和逆温频率高、降雨少、云雾多、日照少、湿度大,极不利于污染物稀释和扩散,且容易形成污染物在近地层累积和盆地内传输的恶性循环.成都大气污染形势严峻,且特殊与典型,大气环境容量先天不足、大气污染物来源复杂、大气复合型污染突显,已成为全国霾严重的城市之一.目前针对成都PM<sub>2.5</sub>污染特征方面的研究主要集中在中心城区<sup>[36~40]</sup>,而对郊区的研究相对报道较少<sup>[41]</sup>.因此,加强郊区PM<sub>2.5</sub>中元素组成、来源解析及重金属潜在生态风险评价等方面的研究具有重要的现实意义.本研究分别于2012年和2014年春季在成都信息工程大学航空港校区设置采样点采集PM<sub>2.5</sub>样品,通过对PM<sub>2.5</sub>的质量浓度及其中24种元素的质量浓度进行分析,探讨成都西南郊区春季PM<sub>2.5</sub>中元素特征、污染水平、来源及重

金属潜在生态风险,以期为区域大气霾联防联控、大气环境管理和保护人体健康等方面提供基础数据和参考依据.

## 1 材料与方法

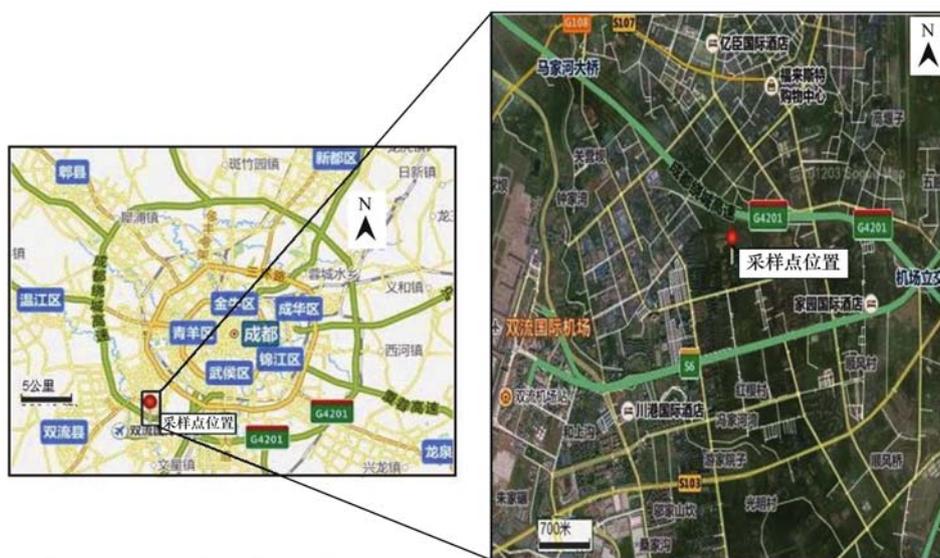
### 1.1 研究区域概况及采样点

西南航空港位于成都西南郊区,北靠成都武侯区、东至成都高新区、南至成都五环线、西临双流国际机场,是西部唯一集航空、铁路、公路、航运为一体的省级重点经济开发区,是省级重点培育的特色产业园区、市级新能源产业功能区、国家新能源装备高新技术产业化基地.经过20多年的建设和发展,该区域已形成了“光伏光电、机电一体化、生物医药、新型材料、绿色食品”五大产业集群,是我国农村城镇化的典型代表.伴随着农村城镇化的快速推进,郊区大气颗粒物污染问题不容忽视.本文选择成都西南郊区为研究区域.采样点设在成都信息工程大学航空港校区信息楼楼顶(如图1),距离地面约20 m.采样点位于成都武侯区和双流区的交汇处,地处成都西南航空港,行政区划属双流区,具有典型的城乡结合部特征.采样点位置距成都绕城高速约700 m、机场高速约1 km,距双流国际机场约3 km,周围500 m范围内无高大建筑物和大型工业企业,无单一特定污染源的影响,具有区域代表性.

### 1.2 样品采集与分析

样品采集时间为2012年和2014年春季,分别于2012年5月16~27日和2014年5月7~15日用智能中流量大气采样器(TH-150C,武汉天虹)采集PM<sub>2.5</sub>样品,采样流量为100 L·min<sup>-1</sup>,每次采样从当日09:00~次日09:00,连续采样24 h.采样滤膜为φ90 mm聚丙烯膜,使用前均严格按照环境空气颗粒物采样技术要求准备好采样滤膜.采样前后将滤膜放置于恒温恒湿箱平衡24 h后使用十万分之一精度的电子天平(TB-215D型,美国丹佛)进行称量,称量操作均在大气环境模拟与污染控制四川省高校重点实验室的洁净天平室中完成.样品空白为除不参与采集PM<sub>2.5</sub>外,其余过程完全相同的空白滤膜.2012年春季和2014年春季分别采集了有效样品12个和9个.

采用重量法对PM<sub>2.5</sub>的质量浓度进行测定,采用X射线荧光光谱仪(XRF-1800,日本岛津)分析

图 1  $PM_{2.5}$  采样点示意Fig. 1 Location of the  $PM_{2.5}$  sampling sites

$PM_{2.5}$  样品中 24 种元素 (Pb、Cs、Cd、Br、Se、As、Ga、Cu、Ni、Co、Fe、Mn、Cr、V、Ti、Ca、K、Cl、S、Si、Al、Mg、Na、Zn) 的质量浓度。

### 1.3 地累积指数法

地累积指数 (geo-accumulation index,  $I_{geo}$ ) 是 1969 年由德国海德堡大学沉积物研究所的科学家 Muller 提出的广泛用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标。 $I_{geo}$  综合考虑了自然地质过程造成的背景值的影响和人为活动对环境的影响, 是反映各组分分布的自然变化特征和判别人为活动对环境影响的重要参数。地累积指数法可用于研究大气颗粒物中

元素的污染特征<sup>[42]</sup>。本文采用地累积指数法对  $PM_{2.5}$  中 24 种元素的污染特征进行研究, 计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{c_n}{1.5B_n} \right)$$

式中,  $I_{geo}$  为地累积指数;  $c_n$  为  $PM_{2.5}$  中元素  $n$  的含量,  $mg \cdot kg^{-1}$ ;  $B_n$  是元素  $n$  的土壤背景值, 本文 Si、S、Cl 元素背景值取地壳丰度值, 其余元素取四川省 A 层土壤平均值<sup>[43]</sup>; 1.5 为考虑到各地造岩运动等效应可能引起的背景值差异而取的修正系数。本研究中  $PM_{2.5}$  中元素的  $I_{geo}$  与污染程度的关系分级见表 1。

表 1  $I_{geo}$  与污染程度分级

Table 1 Contamination degree corresponding to geoaccumulation index

地累积指数 ( $I_{geo}$ )	$\leq 0$	$0 < I_{geo} \leq 1$	$1 < I_{geo} \leq 2$	$2 < I_{geo} \leq 3$	$3 < I_{geo} \leq 4$	$4 < I_{geo} \leq 5$	$I_{geo} > 5$
等级	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无污染	轻微污染	轻度污染	中度污染	偏重污染	重度污染	严重污染

### 1.4 富集因子法

富集因子法是用来研究大气颗粒物中元素的富集程度以及判断、评价元素的自然来源和人为来源的普遍方法<sup>[21,22,26,27,30,33,36,44]</sup>。富集因子 (enrichment factor, EF) 的计算公式为:

$$EF = (c_i/c_n)_{sample} / (c_i/c_n)_{background}$$

式中,  $c_i$  为研究元素  $i$  的质量浓度 ( $ng \cdot m^{-3}$ ) 或含量 ( $mg \cdot kg^{-1}$ );  $c_n$  为参比元素的质量浓度 ( $ng \cdot m^{-3}$ ) 或含量 ( $mg \cdot kg^{-1}$ );  $(c_i/c_n)_{sample}$  和  $(c_i/c_n)_{background}$  分别为  $PM_{2.5}$  样品和土壤背景中研究元素与参比元素质量浓度 (或含量) 的比值。参比元

素的选择要求不易受所在环境与分析测试过程的影响, 性质比较稳定。由于 Fe 在土壤中比较稳定, 人为污染较小且在  $PM_{2.5}$  中也普遍存在, 故本研究选择 Fe 为参比元素。各元素的背景值 Si、S、Cl 取地壳丰度值, 其余元素取四川省 A 层土壤平均值<sup>[43]</sup>。

一般而言, 若  $PM_{2.5}$  中某元素的  $EF \geq 10$ , 认为该元素主要来源于人为污染; 若  $1 < EF < 10$ , 认为该元素是自然源和人为污染源共同作用的结果;  $EF \leq 1$ , 认为主要来源于地壳或土壤源。因此, EF 值的大小不仅可以反映出  $PM_{2.5}$  中元素的富集程度, 还可定

性判断和评价 PM<sub>2.5</sub> 中元素的初步来源及其对污染的贡献. 根据 PM<sub>2.5</sub> 中元素的 EF 值的大小, 本研究

将 PM<sub>2.5</sub> 中元素的富集程度分为 5 个级别, 具体分级情况见表 2.

表 2 EF 与 PM<sub>2.5</sub> 中元素的富集程度的关系

Table 2 Relationships of EF and enrichment degree of the chemical elements in PM<sub>2.5</sub>

富集因子(EF)	EF ≤ 1	1 < EF ≤ 10	10 < EF ≤ 100	100 < EF ≤ 1000	EF > 1000
富集程度	基本无富集或微量富集	轻度富集	中度富集	高度富集	超富集
等级	1	2	3	4	5
来源	地壳或土壤源	自然源和人为源共同作用	人为污染源	人为污染源	人为污染源

1.5 潜在生态风险指数法

1980 年瑞典地球化学家 Hakanson 基于元素丰度响应和污染物的协同效应提出了潜在生态风险指数法<sup>[45]</sup>, 是目前大气颗粒物中重金属污染程度及潜在生态风险评价最为常用方法之一<sup>[30,32]</sup>. 该方法不仅反映了特定沉积物中单一重金属的潜在生态危害, 同时还考虑了多种重金属的综合生态效应, 并定量划分出重金属的潜在生态风险等级, 体现了生物有效性和相对贡献及地理空间差异等特点, 是表征重金属对生态环境影响程度的综合指标. 计算公式如下:

$$C_r^i = \frac{C_i}{C_n^i}, \quad E_r^i = T_r^i \times C_r^i, \quad RI = \sum_i^m E_r^i$$

式中,  $C_r^i$  为第  $i$  种重金属的污染系数;  $C_i$  为样品中第  $i$  种重金属的含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $C_n^i$  为第  $i$  种重金属的土壤背景值,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $E_r^i$  为第  $i$  种重金属的潜在生态风险系数;  $T_r^i$  为第  $i$  种重金属的毒性系数; RI 为多种重金属的潜在生态风险指数.  $E_r^i$  和 RI 与潜在生态危害程度关系分级标准见表 3<sup>[29,30,32]</sup>.

表 3 潜在生态风险评价指标的分级

Table 3 Classification criteria of the potential ecological risk index

$E_r^i$	单因子生态危害程度	RI	总的潜在生态风险程度
< 40	轻微	< 150	轻微
40 ~ 80	中等	150 ~ 300	中等
80 ~ 160	强	300 ~ 600	强
160 ~ 320	很强	600 ~ 1 200	很强
> 320	极强	> 1 200	极强

2 结果与讨论

2.1 PM<sub>2.5</sub> 的污染水平

本研究监测结果表明, 成都西南郊区 2012 年和 2014 年春季采样期间 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度均值分别为  $(180.5 \pm 82.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $(104.5 \pm 56.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . 我国环境空气质量标准 (GB 3095-2012) 中规定 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的二级标准 24 h 平均值为  $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 美国 EPA 中 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的日均值为  $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ <sup>[46]</sup>. 采样期间成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度均值与国家标准、美国 EPA 标准及国内外其它大城市比较如图 2.

由图 2 可看出: 成都西南郊区 2012 年春季

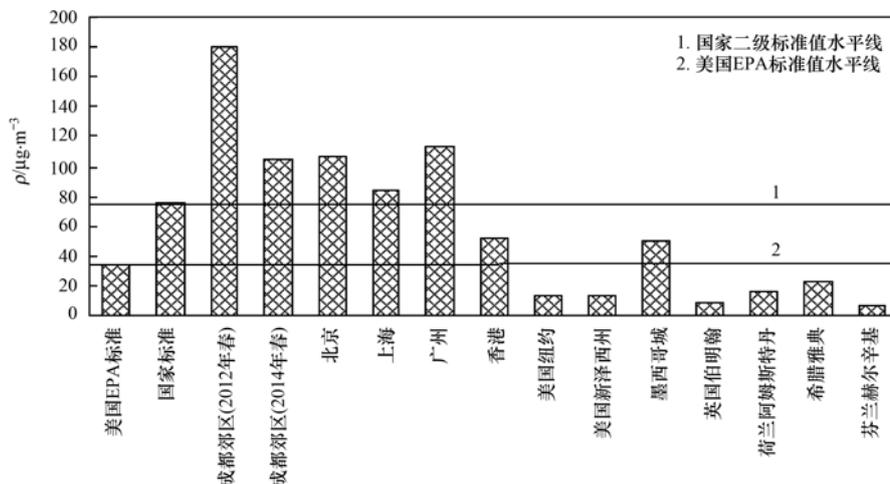


图 2 采样期间成都郊区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的平均值与国家标准、美国 EPA 标准及国内外其它大城市比较

Fig. 2 Comparison of average concentrations of PM<sub>2.5</sub> during sampling period in the southwest suburb of Chengdu with National Standard, American EPA's Standard and those in other cities

PM<sub>2.5</sub>的质量浓度较2014年春季有所下降,但均超过美国EPA标准值和国家标准值,2012年春季采样期间PM<sub>2.5</sub>质量浓度均值超过美国EPA标准值和国家标准值的倍数分别为1.41和4.16,2014年春季采样期间PM<sub>2.5</sub>质量浓度均值超过美国EPA标准值和国家标准值的倍数分别为0.39和1.99.与国内外大城市比较,成都西南郊区2012年春季PM<sub>2.5</sub>的质量浓度水平(180.5 μg·m<sup>-3</sup>)高于广州<sup>[22]</sup>(113.3 μg·m<sup>-3</sup>)、北京<sup>[47]</sup>(106.7 μg·m<sup>-3</sup>)、上海<sup>[48]</sup>(84.1 μg·m<sup>-3</sup>)、香港<sup>[49]</sup>(52.8 μg·m<sup>-3</sup>)和墨西哥城<sup>[50]</sup>(50.5 μg·m<sup>-3</sup>),远远高于希腊瑞典<sup>[51]</sup>(22.6 μg·m<sup>-3</sup>)、荷兰阿姆斯特丹<sup>[51]</sup>(16.5

μg·m<sup>-3</sup>)、美国新泽西州<sup>[52]</sup>(13.11 μg·m<sup>-3</sup>)、美国纽约<sup>[52]</sup>(13.56 μg·m<sup>-3</sup>)、英国伯明翰<sup>[51]</sup>(8.7 μg·m<sup>-3</sup>)和芬兰赫尔辛基<sup>[51]</sup>(7.5 μg·m<sup>-3</sup>);而成都西南郊区2014年春季PM<sub>2.5</sub>的浓度水平则与北京、广州、上海三大城市相当,高于香港和墨西哥城,远高于希腊瑞典、荷兰阿姆斯特丹、美国新泽西州和纽约、英国伯明翰和芬兰赫尔辛基,由此说明成都西南郊区PM<sub>2.5</sub>的质量浓度处于相对较高的污染水平.

## 2.2 PM<sub>2.5</sub>中元素的质量浓度特征

成都西南郊区春季PM<sub>2.5</sub>中24种元素的质量浓度均值和组成百分比(质量分数)见表4.

表4 成都西南郊区PM<sub>2.5</sub>中元素的质量浓度和组成百分比

Table 4 Concentrations and fractions of the elements in PM<sub>2.5</sub> at the southwest suburb of Chengdu

元素	2012年		2014年		质量浓度比 (2014年/2012年)	2012年和2014年 浓度的均值 /ng·m <sup>-3</sup>
	平均浓度 /ng·m <sup>-3</sup>	百分比 /%	平均浓度 /ng·m <sup>-3</sup>	百分比 /%		
Pb	179.9 ± 51.3	1.25	106.5 ± 30.3	1.24	0.59	143.2
Cs	6.8 ± 2.5	0.05	5.7 ± 5.1	0.07	0.83	6.2
Cd	3.2 ± 0.8	0.02	2.4 ± 1.2	0.03	0.76	2.8
Br	44.5 ± 14.9	0.31	22.9 ± 15.1	0.27	0.51	33.7
Se	16.7 ± 6.4	0.12	11.9 ± 6.4	0.14	0.71	14.3
As	91.4 ± 26.0	0.63	76.1 ± 41.0	0.89	0.83	83.8
Ga	7.4 ± 2.8	0.05	4.4 ± 3.3	0.05	0.59	5.9
Cu	48.7 ± 19.1	0.34	27.6 ± 9.4	0.32	0.57	38.2
Ni	24.4 ± 4.6	0.17	11.5 ± 9.8	0.13	0.47	17.9
Co	3.9 ± 2.3	0.03	2.7 ± 1.4	0.03	0.70	3.3
Fe	524.0 ± 158.3	3.63	366.2 ± 110.9	4.28	0.70	445.1
Mn	55.9 ± 21.4	0.39	22.6 ± 8.0	0.26	0.40	39.2
Cr	22.9 ± 3.6	0.16	5.7 ± 3.2	0.07	0.25	14.3
V	3.0 ± 1.1	0.02	1.1 ± 1.3	0.01	0.37	2.0
Ti	56.0 ± 21.3	0.39	36.8 ± 13.5	0.43	0.66	46.4
Ca	620.5 ± 263.6	4.29	535.8 ± 187.8	6.26	0.86	578.1
K	5 243.9 ± 3 544.6	36.29	3 002.2 ± 2 485.6	35.08	0.57	4 123.0
Cl	994.2 ± 497.1	6.88	613.0 ± 607.8	7.16	0.62	803.6
S	4 350.3 ± 2 465.7	30.11	2 103.5 ± 1 409.4	24.58	0.48	3 226.9
Si	959.5 ± 258.5	6.64	905.2 ± 362.2	10.58	0.94	932.4
Al	325.8 ± 91.5	2.26	300.0 ± 129.9	3.50	0.92	312.9
Mg	76.6 ± 19.1	0.53	74.4 ± 26.3	0.87	0.97	75.5
Na	122.0 ± 46.4	0.84	70.4 ± 34.8	0.82	0.58	96.2
Zn	666.6 ± 300.3	4.61	250.9 ± 69.1	2.93	0.38	458.8

由表4可知,2012年春季PM<sub>2.5</sub>中元素质量浓度大小排序依次为K > S > Cl > Si > Zn > Ca > Fe > Al > Pb > Na > As > Mg > Ti > Mn > Cu > Br > Ni > Cr > Se > Ga > Cs > Co > Cd > V,其中:K和S的质量分数分别为36.29%和30.11%,Cl、Si、Zn、Ca、Fe、Al、Pb、Na、As、Mg的质量分数在0.53% ~ 6.88%之间,Ti、Mn、Cu、Br、Ni、Cr、Se的质量分数在0.12% ~ 0.39%之间,Ga、Cs、Co、Cd、V的质量分数在0.02% ~ 0.05%之间;2014年春季PM<sub>2.5</sub>

中元素质量浓度大小排序依次为K > S > Si > Cl > Ca > Fe > Al > Zn > Pb > As > Mg > Na > Ti > Cu > Br > Mn > Se > Ni > Cr > Cs > Ga > Co > Cd > V,其中:K和S的质量分数分别为35.08%和24.58%,Si、Cl、Ca、Fe、Al、Zn、Pb、As、Mg、Na质量分数在0.82% ~ 10.58%之间,Ti、Cu、Br、Mn、Se、Ni、Cr的质量分数在0.07% ~ 0.43%之间,Cs、Ga、Co、Cd、V的质量分数在0.01% ~ 0.07%之间.由此可见,从质量浓度上看,2012年和2014年春季PM<sub>2.5</sub>

中各元素质量浓度大小排序略有不同;但从元素组成上看,无论是 2012 年春季还是 2014 年春季,PM<sub>2.5</sub> 中元素组成百分比都具有有一致性:K 和 S 最高,两元素质量分数之和占总质量分数的 66.40% (2012 年)和 59.66% (2014 年);Cl、Si、Zn、Ca、Fe、Al、Pb、Na、As、Mg 较高,这 10 种元素质量分数之和占总质量分数的 31.57% (2012 年)和 38.54% (2014 年);Ti、Mn、Cu、Br、Ni、Cr、Se 较低,这 7 种元素质量分数之和占总质量分数的 1.86% (2012 年)和 1.62% (2014 年);Ga、Cs、Co、Cd、V 最低,这 5 种元素质量分数之和占总质量分数的 0.17% (2012 年)和 0.19% (2014 年).此外,2014 年与 2012 年春季 PM<sub>2.5</sub> 中各元素质量浓度比的范围在 0.25 ~ 0.97 之间,均小于 1,说明 2014 年春季 PM<sub>2.5</sub> 中各元素质量浓度较 2012 年春季均有所下降.其中:Cr 的质量浓度下降最多,降低了 75%;其次是 Ni、Mn、V、S 和 Zn,下降比例在 51.6% ~ 63.1% 之间;再次是 Pb、Br、Se、Co、

Fe、Ti、K、Cl、Na、Ga 和 Cu,下降比例在 28.8% ~ 42.7% 之间;Cd、Cs、As、Ca 下降比例在 13.6% ~ 24.3% 之间;Al、Si 和 Mg 分别下降 7.9%、5.7% 和 3.0%.

为进一步说明成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中元素的质量浓度水平,选取了近年公开发表的国内外典型城市 PM<sub>2.5</sub> 中元素的质量浓度水平数据与本研究的结论进行比较分析.所选对比城市包括京津冀城市群中的北京<sup>[53]</sup>和天津<sup>[38]</sup>、长江三角洲城市群中的上海<sup>[19]</sup>和南京<sup>[54]</sup>、珠江三角洲城市群中的广州<sup>[22,30]</sup>、长株潭城市群中的长沙<sup>[55]</sup>、辽宁中部城市群中的沈阳和抚顺<sup>[38]</sup>、山东半岛城市群中的济南<sup>[56]</sup>、武汉城市群中的武汉<sup>[57]</sup>、成渝城市群中的重庆<sup>[42]</sup>和成都城区<sup>[27,37~40]</sup>、海峡西岸城市群中的厦门<sup>[58]</sup>、太原<sup>[30]</sup>、香港<sup>[59]</sup>以及美国纽约和新泽西<sup>[52]</sup>.不同城市的数据来源、采样信息、样品代表季节、采样点类型和分析方法等信息见表 5.不同城市 PM<sub>2.5</sub> 中各元素质量浓度比较结果如图 3 所示.

表 5 不同城市数据来源、样品信息和分析方法

Table 5 Data sources, sampling information and analysis method indifferent cities

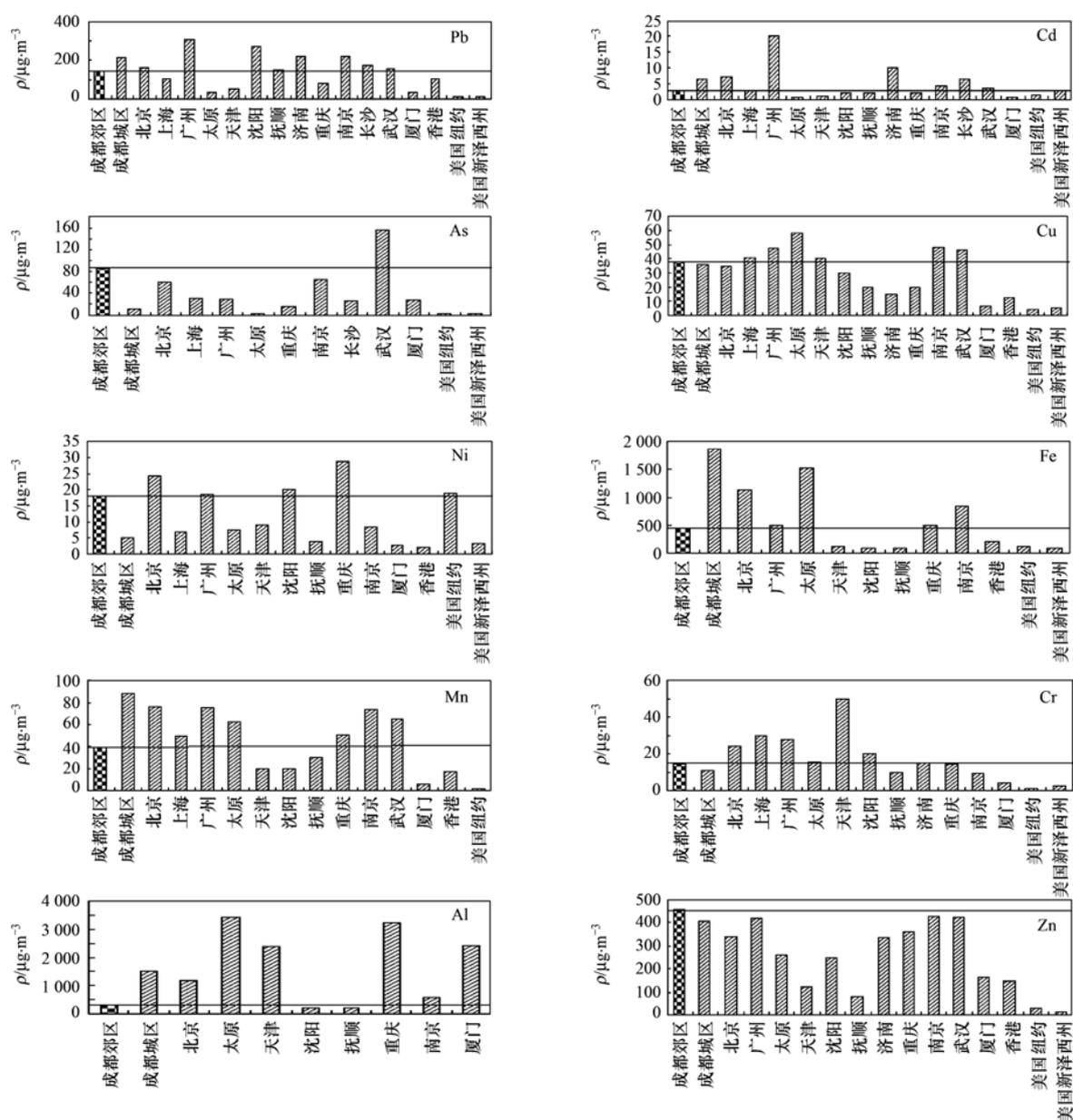
城市	采样时间	代表季节	站点类型	分析方法
成都(本研究)	2012-05、2014-05	春	郊区	XRF
成都 <sup>[27,37~40]</sup>	2009-04 ~ 2010-01	春、夏、秋、冬	城区	XRF
重庆 <sup>[42]</sup>	2012	春、夏、秋、冬	城区、郊区	ICP-MS/ICP-OES
北京 <sup>[53]</sup>	2007-04 ~ 2007-12	春、夏、秋、冬	城区和郊区	ICP-AES
天津 <sup>[38]</sup>	2008-01 ~ 2008-10	春、夏、秋、冬	城区	XRF
上海 <sup>[19]</sup>	2012-05 ~ 2008-10	春、夏、秋	中心城区、郊区	AAS
南京 <sup>[54]</sup>	2007-06 ~ 2008-05	春、夏、秋、冬	城区	TEP
广州 <sup>[22,30]</sup>	2007-04	春	城区	ICP-MS
长沙 <sup>[55]</sup>	2012-10 ~ 2012-12	秋、冬	城区、郊区	AFS/AAS
沈阳和抚顺 <sup>[38]</sup>	2004 ~ 2005	春、夏、秋、冬	城区、郊区	XRF
济南 <sup>[56]</sup>	2004-11 ~ 2007-02	春、夏、秋、冬	城区、郊区	XRF
武汉 <sup>[57]</sup>	2011-07 ~ 2012-02	夏、秋、冬	中心城区	ICP-MS
厦门 <sup>[58]</sup>	2014-04 ~ 2015-03	春、夏、秋、冬	城区	ICP-MS
太原 <sup>[30]</sup>	2012-02	冬	城区、郊区	ICP-OES/ICP-AES
香港 <sup>[59]</sup>	1999-10 ~ 2000-03	春、夏、秋、冬	城区	PIXE
纽约 <sup>[52]</sup>	2000-03 ~ 2001-01	春、夏、冬	城区	XRF
新泽西 <sup>[52]</sup>	2000-05 ~ 2001-06	春、夏、冬	城区、郊区	XRF

由图 3 可知,不同城市群、同一城市群不同城市、同一城市不同功能区及国内外不同城市 PM<sub>2.5</sub> 中各元素质量浓度水平均表现出较大的差异.由表 5 可看出,各城市 PM<sub>2.5</sub> 的采样时间、季节性、采样点类型和分析方法等不尽相同.因此,国内外城市除排放源差异较大外,采集 PM<sub>2.5</sub> 样品的时空差异和分析方法差异也是造成国内外城市 PM<sub>2.5</sub> 中各元素质量浓度差异的原因之一.与成都城区相比,成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中 As、Se、Ni、Co、Br、Cr、K、Zn、Si、

Cu 元素质量浓度水平较城区高,依次是城区的 7.62、5.28、3.52、1.73、1.72、1.32、1.28、1.13、1.06、1.05 倍;而 S、Cl、Pb、Ca、Mn、Cd、Ti、Mg、Fe、Al、Na 元素质量浓度水平则比城区低,依次是城区的 0.75、0.68、0.67、0.67、0.44、0.42、0.38、0.27、0.24、0.21、0.17 倍.与国内“三区六群”中典型城市相比,成都郊区 PM<sub>2.5</sub> 中处于较高质量浓度水平的元素分别表现为: Pb 是广州、上海、重庆、天津和厦门的 1.15 ~ 4.07 倍, Cs 是南京的

4.2 倍, Cd 是重庆、沈阳、抚顺、天津和厦门的 1.32 ~ 6.17 倍, Br 是北京 的 1.49 倍, Se 是武汉、广州、南京和北京的 1.20 ~ 2.55 倍, As 是南京、北京、上海、广州、厦门和重庆的 1.28 ~ 4.96 倍, Cu 是北京、沈阳、抚顺、重庆、济南和厦门的 1.11 ~ 5.96 倍, Ni 是天津、南京、上海、抚顺和厦门的 1.99 ~ 6.4 倍, Co 是南京和重庆的 1.35 和 6.58 倍, Fe 是天津、抚顺和沈阳的 3.71 ~ 6.36 倍, Mn 是抚顺、天津、沈阳和厦门的 1.31 ~ 6.82 倍, Cr 是重庆、抚顺、南京和厦门的 1.01 ~ 3.34 倍, V 是北京的 2.92 倍, Ca 是天津、南京、抚顺和沈阳的

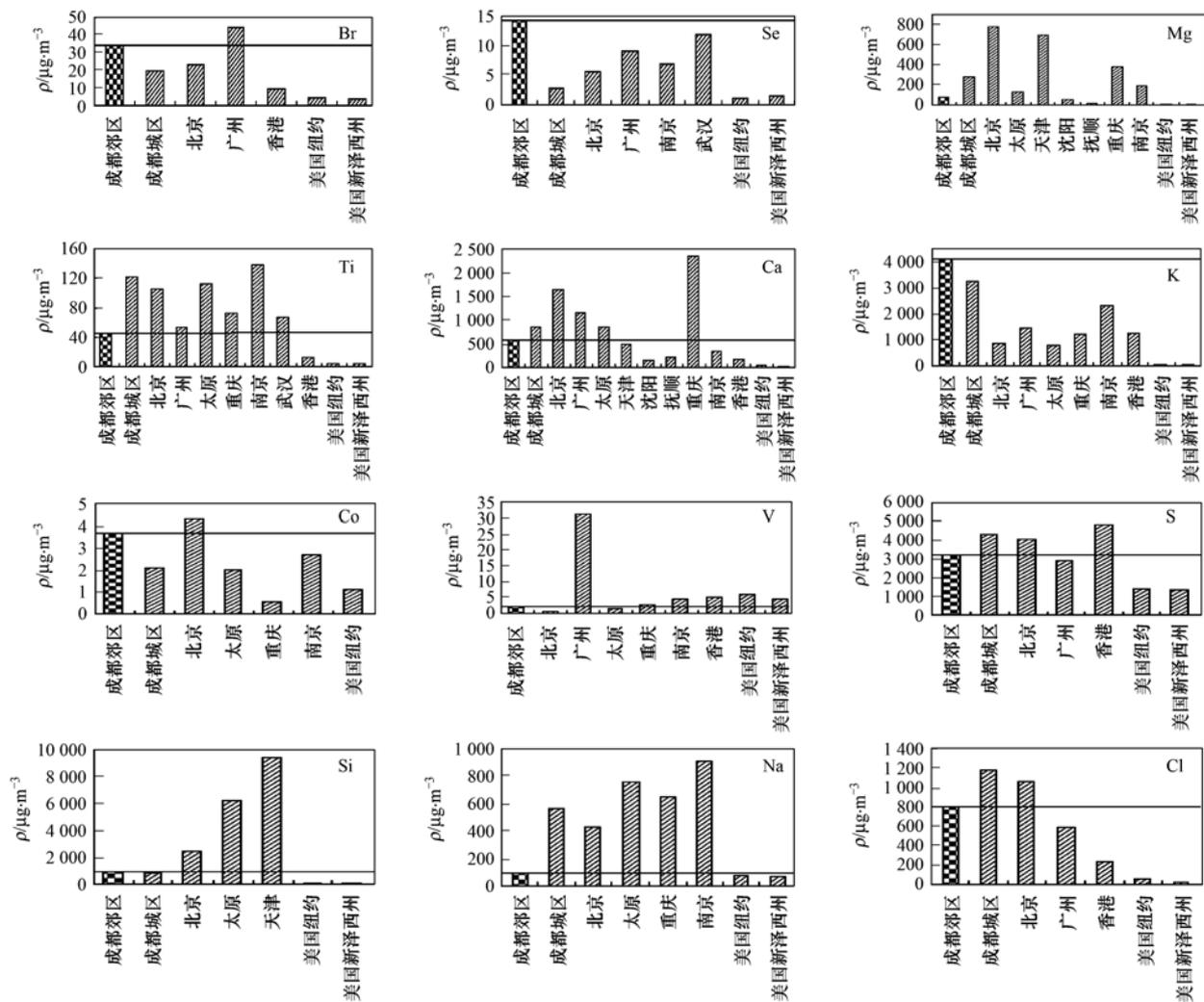
1.16 ~ 4.13 倍, K 是南京、广州、重庆和北京的 1.8 ~ 4.87 倍, Cl 和 S 是广州的 1.36 和 1.11 倍, Al 是沈阳和抚顺的 1.74 和 1.84 倍, Mg 是沈阳和抚顺的 1.51 和 3.77 倍, Zn 是南京、武汉、广州、重庆、北京、济南、沈阳、厦门、天津和抚顺的 1.07 ~ 5.73 倍. 与太原比, 成都郊区  $PM_{2.5}$  中 As、Cd、K、Pb、Ni、Co、Zn 的质量浓度是太原的 1.41 ~ 42.52 倍, 处于较高水平, 其中 As 的质量浓度水平差异最大(成都郊区是太原的 42.52 倍); 而 Cr、Ca、Cu、Mn、Mg、Ti、Fe、Si、Na、Al 的质量浓度则处于较低水平. 与香港比, 成都郊区  $PM_{2.5}$  中 Ni、Br、



图中的横线表示成都西南郊区  $PM_{2.5}$  中各元素的质量浓度水平线

图 3 不同城市  $PM_{2.5}$  中元素质量浓度比较

Fig. 3 Comparison of mass concentrations of elements in  $PM_{2.5}$  in different cities



续图 3

Ti、Cl、Ca、K、Zn、Cu、Mn、Fe、Pb 的质量浓度处于较高水平,是香港的 1.38 ~ 8.54 倍;而 S 和 V 则较小,分别是香港的 0.67 和 0.42 倍.与美国纽约和新泽西比,除 V 外,成都郊区 PM<sub>2.5</sub> 中元素质量浓度水平普遍较高.

### 2.3 PM<sub>2.5</sub> 中元素的污染特征

成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 中元素的地累积指数 ( $I_{\text{geo}}$ ) 计算结果见表 6.

由表 6 可知, Cr 元素的  $I_{\text{geo}}$  值由 0.10 (2012 年) 降为 -1.13 (2014 年), 污染程度由轻微污染降为无污染, 说明 2014 年春季成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中 Cr 元素的污染较 2012 年春有明显的减轻. 除 Cr 元素外, 2012 年和 2014 年春季成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中各元素的地累积指数对应的等级和污染程度均具有一致性: As、Br、S、Cd、Se 的  $I_{\text{geo}}$  值在 5.02 ~ 9.64 之间, 属严重污染; Pb、Cl、Zn 的  $I_{\text{geo}}$  值在 4.21 ~ 4.91 之间, 属重度污染; 2012 年和 2014 年 Cu 的  $I_{\text{geo}}$  值分

别为 2.53 和 2.50, 属中度污染; Ni 和 Cs 的  $I_{\text{geo}}$  值在 1.16 ~ 1.93 之间, 属轻度污染; 2012 年和 2014 年 Ga 的  $I_{\text{geo}}$  值分别为 0.18 和 0.21, 属轻微污染; Co、Fe、Mn、V、Ti、Ca、K、Si、Al、Mg、Na 的  $I_{\text{geo}}$  值均小于 0, 属无污染. 由此表明, 成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 中 Pb、Cs、Cd、Br、Se、As、Ga、Cu、Ni、Cr、Cl、S、Zn 元素均受到不同程度的人为污染, 尤其是 As、Br、S、Cd、Se、Pb、Cl 和 Zn 污染比较严重.

### 2.4 PM<sub>2.5</sub> 中元素的富集特征和来源分析

#### 2.4.1 PM<sub>2.5</sub> 中元素的富集特征

成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 中各元素的富集因子 (EF) 计算结果见表 7.

由表 7 可知, Cr 元素的 EF 值由 2012 年的 18.26 降为 2014 年的 6.48, 富集程度由中度富集降为轻度富集; S 元素的 EF 值由 2012 年的 1053.64 降为 2014 年的 729.14, 富集程度由超富集降为高度富集. 由此说明 2014 年春季成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub>

表 6 成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中各元素的地累积指数 ( $I_{geo}$ ) 计算结果<sup>1)</sup>Table 6 Geoaccumulation index of elements in PM<sub>2.5</sub> at the southwest suburb of Chengdu

元素	四川土壤背景值 /mg·kg <sup>-1</sup>	2012 年春			2014 年春		
		$I_{geo}$	等级	污染程度	$I_{geo}$	等级	污染程度
Pb	30.9	4.43	5	重度污染	4.46	5	重度污染
Cs	9.48	1.40	2	轻度污染	1.93	2	轻度污染
Cd	0.079	7.21	6	严重污染	7.59	6	严重污染
Br	3.110	5.73	6	严重污染	5.55	6	严重污染
Se	0.095	9.34	6	严重污染	9.64	6	严重污染
As	10.4	5.02	6	严重污染	5.55	6	严重污染
Ga	24.2	0.18	1	轻微污染	0.21	1	轻微污染
Cu	31.1	2.53	3	中度污染	2.50	3	中度污染
Ni	32.6	1.47	2	轻度污染	1.16	2	轻度污染
Co	17.6	-0.30	0	无污染	-0.02	0	无污染
Fe	33 000	-4.09	0	无污染	-3.82	0	无污染
Mn	657	-1.67	0	无污染	-2.19	0	无污染
Cr	79	0.10	1	轻微污染	-1.13	0	无污染
V	96	-3.12	0	无污染	-3.77	0	无污染
Ti	4 000	-4.27	0	无污染	-4.09	0	无污染
Ca	11 300	-2.30	0	无污染	-1.73	0	无污染
K	20 200	-0.06	0	无污染	-0.08	0	无污染
Cl	130 *	4.82	5	重度污染	4.91	5	重度污染
S	260 *	5.95	6	严重污染	5.69	6	严重污染
Si	281 500 *	-6.31	0	无污染	-5.61	0	无污染
Al	62 600	-5.70	0	无污染	-5.03	0	无污染
Mg	85 000	-8.23	0	无污染	-7.49	0	无污染
Na	8 500	-4.24	0	无污染	-4.24	0	无污染
Zn	86.5	4.83	5	重度污染	4.21	5	重度污染

1) \* 表示土壤背景值取地壳丰度值

表 7 成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中各元素的富集因子 (EF) 计算结果Table 7 Enrichment factors (EF) of elements in PM<sub>2.5</sub> at the southwest suburb of Chengdu

元素	2012 年春			2014 年春		
	EF	等级	富集程度	EF	等级	富集程度
Pb	366.67	4	高度富集	310.73	4	高度富集
Cs	45.09	3	中度富集	53.72	3	中度富集
Cd	2 521.56	5	超富集	2 730.30	5	超富集
Br	901.93	4	高度富集	664.05	4	高度富集
Se	11 050.84	5	超富集	11 257.49	5	超富集
As	553.47	4	高度富集	659.72	4	高度富集
Ga	19.30	3	中度富集	16.37	3	中度富集
Cu	98.61	3	中度富集	80.06	3	中度富集
Ni	47.15	3	中度富集	31.66	3	中度富集
Co	13.83	3	中度富集	13.90	3	中度富集
Mn	5.35	2	轻度富集	3.10	2	轻度富集
Cr	18.26	3	中度富集	6.48	2	轻度富集
V	1.96	2	轻度富集	1.04	2	轻度富集
Ti	0.88	1	基本无富集	0.83	1	基本无富集
Ca	3.46	2	轻度富集	4.27	2	轻度富集
K	16.35	3	中度富集	13.39	3	中度富集
Cl	481.60	4	高度富集	424.94	4	高度富集
S	1 053.64	5	超富集	729.14	4	高度富集
Si	0.21	1	基本无富集	0.29	1	基本无富集
Al	0.33	1	基本无富集	0.43	1	基本无富集
Mg	0.06	1	基本无富集	0.08	1	基本无富集
Na	0.90	1	基本无富集	0.75	1	基本无富集
Zn	485.30	4	高度富集	261.45	4	高度富集

中 Cr 和 S 元素的富集程度虽较 2012 年春有明显减轻,但两种元素仍然存在不同程度的富集,尤其是 S 仍然处于高度富集水平. 除 Cr 和 S 外, 2012 年和 2014 年春季成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中各元素的 EF 对应的等级和富集程度均表现出一致性: PM<sub>2.5</sub> 中 Se、Cd、As、Br、Cl、Pb、Zn 元素的 EF 值均大于 100, 尤其是 Se 和 Cd 的 EF 值甚至超过了 1 000, 为高度富集或超富集, 说明这些元素在成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中的污染已经非常严重, 主要来源于人为污染, 受土壤扬尘源的影响很小; Cu、Cs、Ni、Ga、Co 和 K 的 EF 值均在 10 ~ 100 之间, 为中度富集, 说明它们主要来自于人为污染; Mn、Ca 和 V 的 EF 值均在 1 ~ 10 之间, 为轻度富集, 说明它们部分来源于地壳或

土壤, 部分来源于人为污染; Na、Ti、Al、Si 和 Mg 元素的 EF 值均小于 1, 为基本无富集或微量富集, 说明它们主要来自于地壳或土壤源. 由此表明, Se、Cd、As、Br、Cl、Pb、Zn、S、Cu、Cs、Ni、Ga、Co、K、Cr、Mn、Ca、V 在成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 中均有不同程度的富集, 尤其是 Se、Cd、As、Br、Cl、Pb、Zn 和 S 的富集程度非常显著, 受到比较严重的人为污染, 这与地累积指数法的分析结果完全一致.

#### 2.4.2 PM<sub>2.5</sub> 中元素的来源分析

PM<sub>2.5</sub> 中元素组成与其来源相关, 通过对比各类污染源排放的特征元素与 PM<sub>2.5</sub> 中元素成分, 可进一步判断和分析 PM<sub>2.5</sub> 的来源. 各类污染源排放的特征元素见表 8.

表 8 各类污染源排放的特征元素

Table 8 Characteristic elements of emission from various pollution sources

污染源	土壤尘	建筑尘	燃煤尘	冶金尘	机动车源	燃油	垃圾焚烧	生物质燃烧源
最强特征元素	Si、Al	Ca	As、Se	Zn、Fe、Mn	Pb	V、Ni、Co	Zn	K
较强特征元素	Ti、K、Mn	Mg、Na	Sb、Hg、S	Ni、Cu	Br、Ba、Cl	Cu、S	Sb、Cd、Cu	

通过对比分析表 8 中污染源排放特征元素和富集因子结果可得出以下结果.

成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 中 Se、Cd、As、Br、Cl、Pb、Zn、S、Cu、Cs、Ni、Ga、Co、K 主要受人源的影响. 其中: As 和 Se 主要来源于燃煤尘; S 主要来源于燃煤尘和燃油; Pb、Br、Cl 主要来自机动车尾气; Zn 主要来自冶金尘和垃圾焚烧, 机动车轮胎磨损也会释放出 Zn; Cu 主要来自冶金尘、燃油和垃圾焚烧, 还可来自机动车刹车片磨损; Cd 主要来自垃圾焚烧; Ni 主要来自冶金尘和燃油; Co 主要来自燃油; K 主要来自以燃料秸秆、薪柴和露天秸秆燃烧为主的生物质燃烧源; Cs 是制造真空器件、光电管的主要材料, Ga 是制作光学玻璃、真空管、半导体的原料, 而该区域目前已形成了光伏光电、机电一体化、生物医药、新型材料等产业集群, 因此认为 Cs 和 Ga 主要来自工业生产过程的无组织排放. 从富集因子分析看, Se、Cd、As、Br、Cl、Pb、Zn、S 在成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中存在显著富集, Cu、Cs、Ni、Ga、Co、K 存在明显富集. 由此可以说明, 与机动车排放相关的交通源、与燃烧有关的燃煤尘源、与冶金有关的工业尘源、与新材料和新能源有关的无组织排放源以及与燃料秸秆、薪柴等有关的生物质燃烧源对成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 的污染造成比较严重的影响.

Cr、Mn、Ca 和 V 在成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 中存在一定程度的富集, 是自然源和人为源共同作用.

其中: Ca 是建筑尘的特征元素; Mn 部分来源于土壤尘, 部分来源于冶金尘; Cr 与金属冶炼、燃煤以及地壳或土壤源有关; V 与燃油有关. 成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 中 Na、Ti、Al、Si 和 Mg 主要受自然源影响. 其中: Ti、Al、Si 主要来自地壳或土壤尘, Na 和 Mg 主要来自建筑尘. 本研究区域是典型的城乡结合部, 农村城镇化进程迅速, 建筑工地和道路施工等活动水平较高, 区域内与建筑有关的砂石厂、石材加工厂、电缆厂、玻璃厂、塑料厂以及五金建材等小型工厂企业比较多. 由此推断, 扬尘源(包括: 土壤尘、道路扬尘和建筑扬尘)也是成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 的主要来源之一.

#### 2.5 PM<sub>2.5</sub> 中重金属的潜在生态风险评价

PM<sub>2.5</sub> 中含有大量有害元素, 尤其是具有毒性和持久毒性的重金属对人体危害较大. 由于 As 具有与重金属相似的健康效应<sup>[17]</sup>, 在环境研究中通常也被纳入重金属之列进行讨论. 本研究采用潜在生态风险指数法对成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中 Pb、Cd、As、Cu、Ni、Co、Mn、Cr、V、Ti 和 Zn 这 11 种有毒重金属元素潜在生态风险进行评价. 选取四川省 A 层土壤的平均值作为背景值<sup>[43]</sup>, 11 种有毒重金属元素背景值见表 6. Pb、Cd、As、Cu、Ni、Co、Mn、Cr、V、Ti 和 Zn 的毒性系数<sup>[60]</sup>分别为 5、30、10、5、5、5、1、2、2、1、1. 成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中重金属潜在生态危害系数 ( $E_i^p$ ) 及生态风险指数 (RI) 计算结果见表 9.

表 9 成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中重金属潜在生态危害系数 ( $E_r^i$ ) 及生态风险指数 (RI)Table 9 Potential ecological risk index of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> at the southwest suburb of Chengdu

城市	采样年份	$E_r^i$										RI	
		Pb	Cd	As	Cu	Ni	Co	Mn	Cr	V	Ti		Zn
成都(本研究)	2012	161.29	6 655.20	486.93	43.38	20.74	6.08	0.47	3.21	0.35	0.08	42.70	7 420.43
	2014	164.97	8 697.03	700.49	42.50	16.81	7.38	0.33	1.38	0.22	0.09	27.76	9 658.94
天津 <sup>[29]</sup>	2011	141.8	933.3	20.0	84.3		19.6	1.2	5.7		0.4	86.8	1 293.10
兰州 <sup>[32]</sup>	2011	36.33	1 163.79		260.36	198.08			12.62			64.46	1 735.64
太原 <sup>[30]</sup>	2012	68.01	1 203.09	13.31	103.64	21.27	20.37	0.81	5.91			54.60	1 491.01

由表 9 可知,2012 年和 2014 年成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中 11 种重金属潜在生态危害程度大小排序具有一致性: Cd > As > Pb > Cu > Zn > Ni > Co > Cr > Mn > V > Ti. 从单因子潜在生态危害系数 ( $E_r^i$ ) 看: Cd 的潜在生态危害系数最大,远远大于 320,其次是 As, 潜在生态危害系数大于 320, Cd 和 As 的生态危害程度均为极强; Pb 的潜在生态危害系数在 160 ~ 320 之间,生态危害程度为很强; Cu 的潜在生态危害系数在 40 ~ 80 之间,生态危害程度为中等; Zn 的潜在生态危害系数则由 2012 年的 42.70 降为 2014 年的 27.76,生态危害程度由中等降为轻微; Ni、Co、Cr、Mn、V、Ti 的潜在生态危害系数均小于 40,生态危害程度均为轻微. 从 11 种重金属联合的潜在生态风险指数 (RI) 看,无论是 2012 年还是 2014 年,成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中 11 种重金属联合的潜在生态风险指数均远远大于 1 200,潜在生态风险均为极强.

2012 年和 2014 年比较分析可得出: 2014 年成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中 Pb、Cd、As 和 Co 的单因子潜在生态危害系数均较 2012 年大,而 Cu、Ni、Mn、Cr、V、Ti 和 Zn 则刚好相反; 2014 年成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中 11 种重金属总的潜在生态风险指数是 2012 年的 1.3 倍,说明 2014 年 PM<sub>2.5</sub> 中重金属潜在生态风险较 2012 年有明显的增强.

与国内城市比较发现,PM<sub>2.5</sub> 中重金属单因子潜在生态危害系数大小排序为: Cd 是成都 > 太原 > 兰州 > 天津, As 是成都 > 天津 > 太原, Pb 是成都 > 天津 > 太原 > 兰州, Cu 和 Cr 是兰州 > 太原 > 天津 > 成都, Zn 是天津 > 兰州 > 太原 > 成都, Ni 是兰州 > 太原 > 成都, Co 是太原 > 天津 > 成都, Mn 是天津 > 太原 > 成都, Ti 是天津 > 成都,由此说明: 成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中 Cd 和 Pb 的潜在生态危害程度较天津、太原和兰州均高, As 的生态危害程度较天津和太原高,而 Zn、Cu 和 Cr 的潜在生态危害程度则较天津、太原和兰州均低, Co 和 Mn 的潜在生态危害程度较天津和太原都低, Ni 的潜在生态危害

程度较兰州和太原低, Ti 的潜在生态危害程度较天津低. 多种重金属联合的潜在生态风险指数 (RI) 显示: 成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中 Cd、As、Pb、Cu、Zn、Co、Cr、Mn 和 Ti 这 9 种重金属的 RI 值较天津高, Cd、Pb、Cu、Zn、Ni 和 Cr 这 6 种重金属的 RI 值较兰州高, Cd、As、Pb、Cu、Zn、Ni、Co、Cr 和 Mn 这 9 种重金属的 RI 值较太原高; 成都、天津、太原和兰州 PM<sub>2.5</sub> 中潜在生态风险程度均为极强,而且 Cd 是多种重金属联合的潜在生态风险指数中的主要贡献因子.

### 3 结论

(1) 成都西南郊区 2012 年和 2014 年春季采样期间 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度均值分别为 (180.5 ± 82.9) μg·m<sup>-3</sup> 和 (104.5 ± 56.1) μg·m<sup>-3</sup>, 分别超过美国 EPA 标准值的 4.16 和 1.99 倍、国家标准值的 1.41 和 0.39 倍. 与国内外其它大城市相比,成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 的质量浓度处于相对较高的污染水平.

(2) 从质量浓度上看,2012 年和 2014 年春季 PM<sub>2.5</sub> 中各元素浓度大小排序略有不同; 但从元素组成上看,无论是 2012 年春季还是 2014 年春季, PM<sub>2.5</sub> 中元素质量分数都具有有一致性,均表现为: K 和 S 最高, Cl、Si、Zn、Ca、Fe、Al、Pb、Na、As、Mg 较高, Ti、Mn、Cu、Br、Ni、Cr、Se 较低, Ga、Cs、Co、Cd、V 最低. 2014 年春季 PM<sub>2.5</sub> 中各元素质量浓度较 2012 年春季均有所下降. 国内外典型城市比较发现,不同城市群、同一城市群不同城市、同一城市不同功能区及国内外不同城市 PM<sub>2.5</sub> 中各元素质量浓度水平均表现出较大的差异; 但总体来看,国内典型城市 PM<sub>2.5</sub> 中元素质量浓度水平普遍高于美国纽约和新泽西.

(3) 成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 中 Pb、Cs、Cd、Br、Se、As、Ga、Cu、Ni、Cr、Cl、S、Zn 元素均受到不同程度的人为污染,尤其是 As、Br、S、Cd、Se、Pb、Cl 和 Zn 污染比较严重.

(4) 成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中 Se、Cd 为超富集,

As、Br、Cl、Pb、Zn、S 为高度富集, Cu、Cs、Ni、Ga、Co 为中度富集, 这些元素主要来源于人为污染, 受自然源的影响很小; Cr、Mn、Ca、V 为轻度富集, 受自然源和人为源共同作用; Na、Ti、Al、Si 和 Mg 为基本无富集或微量富集, 主要来自于土壤尘或扬尘源。

(5) 成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中重金属单因子潜在生态危害程度大小排序为 Cd > As > Pb > Cu > Zn > Ni > Co > Cr > Mn > V > Ti, 11 种重金属联合的潜在生态风险为极强; 成都西南郊区 PM<sub>2.5</sub> 中多种重金属联合的潜在生态风险指数远大于兰州、太原、天津, 但 4 个城市 PM<sub>2.5</sub> 中多种重金属联合的潜在生态风险程度均为极强, Cd 是多种重金属联合的潜在生态风险指数中的主要贡献因子。

#### 参考文献:

- [1] 缪育聪, 郑亦佳, 王姝, 等. 京津冀地区霾成因机制研究进展与展望[J]. 气候与环境研究, 2015, **20**(3): 356-368.  
Miao Y C, Zheng Y J, Wang S, *et al.* Recent advances in, and future prospects of, research on haze formation over Beijing-Tianjin-Hebei, China [J]. Climatic and Environmental Research, 2015, **20**(3): 356-368.
- [2] 王跃思, 姚利, 刘子锐, 等. 京津冀大气霾污染及控制策略思考[J]. 中国科学院院刊, 2013, **28**(3): 353-363.  
Wang Y S, Yao L, Liu Z R, *et al.* Formation of haze pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region and their control strategies [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, **28**(3): 353-363.
- [3] 贺泓, 王新明, 王跃思, 等. 大气灰霾成因与控制[J]. 中国科学院院刊, 2013, **28**(3): 344-352.  
He H, Wang X M, Wang Y S, *et al.* Formation mechanism and control strategies of haze in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, **28**(3): 344-352.
- [4] Yahiaoui F, Benrachedi K, Belamri M. Air pollution by fraction particulate matters PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> in the site of Algiers centers [J]. Asian Journal of Chemistry, 2012, **24**(3): 1033-1037.
- [5] Buchholz S, Krein A, Junk J, *et al.* Modeling, measuring, and characterizing airborne particles: case studies from southwestern luxembourg[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2011, **41**(23): 2077-2096.
- [6] Okuda T, Nakao S, Katsuno M, *et al.* Source identification of nickel in TSP and PM<sub>2.5</sub> in Tokyo, Japan [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(35): 7642-7648.
- [7] Park E J, Kim D S, Park K. Monitoring of ambient particles and heavy metals in a residential area os Seoul, Korea [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, **137**(1-3): 441-449.
- [8] Liu G R, Shi G L, Tian Y Z, *et al.* Physically constrained source apportionment (PCSA) for polycyclic aromatic hydrocarbon using the Multilinear Engine 2-species ratios (ME2-SR) method[J]. Science of the Total Environment, 2015, **502**: 16-21.
- [9] Yatkin S, Bayram A. Determination of major natural and anthropogenic source profiles for particulate matter and trace elements in Izmir, Turkey [J]. Chemosphere, 2008, **71**(4): 685-696.
- [10] Pastuszka J S, Rogula-Kozłowska W, Zajusz-Zubek E. Characterization of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> and associated heavy metals at the crossroads and urban background site in Zabrze, Upper Silesia, Poland, during the smog episodes [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **168**(1-4): 613-627.
- [11] Yao L, Lu N. Spatiotemporal distribution and short-term trends of particulate matter concentration over China, 2006-2010 [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(16): 9665-9675.
- [12] Li Z, Jiang J K, Ma Z Z, *et al.* Effect of selective catalytic reduction (SCR) on fine particle emission from two coal-fired power plants in China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **120**: 227-233.
- [13] Martini F M S, Hasenkopf C A, Roberts D C. Statistical analysis of PM<sub>2.5</sub> observations from diplomatic facilities in China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **110**: 174-185.
- [14] 刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 等. 北京城区大气 PM<sub>2.5</sub> 主要化学组分构成研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2346-2352.  
Liu B X, Yang D Y, Zhang D W, *et al.* Chemical species of PM<sub>2.5</sub> in the urban area of Beijing [J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2346-2352.
- [15] Liang X, Zou T, Guo B, *et al.* Assessing Beijing's PM<sub>2.5</sub> pollution: severity, weather impact, APEC and winter heating [J]. Proceeding of the Royal Society A, 2015, **471**(2182): 20150257.
- [16] 张霖琳, 薛荔栋, 吕怡兵, 等. APEC 会期 5 个城市空气细颗粒物中重金属健康风险评估[J]. 环境化学, 2015, **34**(6): 1218-1220.  
Zhang L L, Xu L D, Lü Y B, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in air fine particulate matter of five urban during the APEC meeting [J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(6): 1218-1220.
- [17] 王晴晴, 马永亮, 谭吉华, 等. 北京市冬季 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性重金属污染特征 [J]. 中国环境科学, 2014, **34**(9): 2204-2210.  
Wang Q Q, Ma Y L, Tan J H, *et al.* Characterization of water-soluble heavy metals of PM<sub>2.5</sub> during winter in Beijing [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(9): 2204-2210.
- [18] 杨勇杰, 王跃思, 温天雪, 等. 采暖期开始前后北京大气颗粒物中化学元素特征及来源[J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 3275-3279.  
Yang Y J, Wang Y S, Wen T X, *et al.* Characteristics and sources of elements of atmospheric particles before and in heating period in Beijing [J]. Environmental Science, 2008, **29**(11): 3275-3279.
- [19] 胡子梅, 王军, 陶征楷, 等. 上海市 PM<sub>2.5</sub> 重金属污染水平与健康风险评价 [J]. 环境科学学报, 2013, **33**(12): 3399-3406.  
Hu Z M, Wang J, Tao Z K, *et al.* Pollution level and health risk assessment of heavy metals in PM<sub>2.5</sub>, Shanghai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(12): 3399-3406.
- [20] 陶俊, 柴发合, 高健, 等. 16 届亚运会期间广州城区 PM<sub>2.5</sub> 化学组分特征及其对霾天气的影响 [J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 409-415.

- Tao J, Chai F H, Gao J, *et al.* Characterization of chemical compositions in PM<sub>2.5</sub> and its impact on hazy weather during 16th Asian Games in Guangzhou[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 409-415.
- [21] 王晴晴, 谭吉华, 马永亮, 等. 佛山市冬季 PM<sub>2.5</sub> 中重金属元素的污染特征[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(8): 1384-1391.  
Wang Q Q, Tan J H, Ma Y L, *et al.* Characteristics of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> during winter in Foshan city [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(8): 1384-1391.
- [22] 冯茜丹, 明彩兵, 刘晖, 等. 广州市大气细颗粒物及微量元素的分析[J]. *广东化工*, 2011, **38**(8): 239-240, 242.  
Feng X D, Ming C B, Liu H, *et al.* Analysis of fine particle and trace metals in the air of Guangzhou city [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2011, **38**(8): 239-240, 242.
- [23] Shi G L, Tian Y Z, Ye S, *et al.* Source apportionment of synchronously size segregated fine and coarse particulate matter, using an improved three-way factor analysis model[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **505**: 1182-1190.
- [24] Qiao X, Jaffe D, Tang Y, *et al.* Evaluation of quality in Chengdu, Sichuan Basin, China: are China's air quality standards sufficient yet? [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(5): 250.
- [25] Li X D, Yang Z, Fu P Q, *et al.* High abundances of dicarboxylic acids, oxocarboxylic acids, and  $\alpha$ -dicarbonyls in fine aerosols (PM<sub>2.5</sub>) in Chengdu, China during wintertime haze pollution [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(17): 12902-12918.
- [26] 袁小燕, 叶芝祥, 杨怀金, 等. 成都市道路细颗粒物污染特征[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(9): 4598-4602.  
Yuan X Y, Ye Z X, Yang H J, *et al.* Characteristics of fine particles in urban road atmospheric environment in Chengdu[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(9): 4598-4602.
- [27] 李友平, 刘慧芳, 周洪, 等. 成都市 PM<sub>2.5</sub> 中有毒重金属污染特征及健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(7): 2225-2232.  
Li Y P, Liu H F, Zhou H, *et al.* Contamination characteristics and health risk assessment of toxic heavy metals in PM<sub>2.5</sub> in Chengdu[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(7): 2225-2232.
- [28] 岳建华, 陶俊, 林泽健, 等. 成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建[J]. *环境科学*, 2012, **33**(7): 2151-2157.  
Yue J H, Tao J, Lin Z J, *et al.* Characterization and reconstruction of aerosol light scattering coefficient at Chengdu during biomass burning and dust storm period in spring [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2151-2157.
- [29] 姚青, 韩素芹, 蔡子颖. 天津采暖期大气 PM<sub>2.5</sub> 中重金属元素污染及其生态风险评估[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(9): 1596-1600.  
Yao Q, Han S Q, Cai Z Y. The pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> during heating season in Tianjin[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(9): 1596-1600.
- [30] 李丽娟, 温彦平, 彭林, 等. 太原市采暖季 PM<sub>2.5</sub> 中元素特征及重金属健康风险评估[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4431-4438.
- Li L J, Wen Y P, Peng L, *et al.* Characteristic of elements in PM<sub>2.5</sub> and health risk assessment of heavy metals during heating season in Taiyuan[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4431-4438.
- [31] 王新, 聂燕, 陈红, 等. 兰州城区大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1619-1628.  
Wang X, Nie Y, Chen H, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Lanzhou City [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1619-1628.
- [32] 林海鹏, 武晓燕, 战景明, 等. 兰州市某城区冬夏季大气颗粒物及重金属的污染特征[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(5): 810-815.  
Lin H P, Wu X Y, Zhan J M, *et al.* Analysis of atmospheric particles and heavy metals character at the area of Lanzhou City in summer and winter[J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(5): 810-815.
- [33] 伊丽米热·阿布达力木, 迪丽努尔·塔力甫, 阿布力孜·伊米提. 乌鲁木齐市大气颗粒物中重金属浓度的分布特征[J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(8): 107-111.  
Yilimire A, Dilinuer T, Abulizi Y. Distribution characteristics of heavy metals concentration in atmospheric particles of Urumqi [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(8): 107-111.
- [34] 马艳华, 宁平, 黄小凤, 等. PM<sub>2.5</sub> 重金属元素组成特征研究进展[J]. *矿物学报*, 2013, **33**(3): 375-381.  
Ma Y H, Ning P, Huang X F, *et al.* Research progress of atmospheric heavy metal elements composition characteristics in fine particles (PM<sub>2.5</sub>) [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2013, **33**(3): 375-381.
- [35] 姚琳, 廖欣峰, 张海洋, 等. 中国大气重金属污染研究进展与趋势[J]. *环境科学与管理*, 2012, **37**(9): 41-44.  
Yao L, Liao X F, Zhang H Y, *et al.* Progress and trend of atmospheric heavy metal pollution in China [J]. *Environmental Science and Management*, 2012, **37**(9): 41-44.
- [36] 袁小燕, 叶芝祥, 杨怀金, 等. 成都市无车日期间 PM<sub>2.5</sub> 污染特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(8): 22-26.  
Yuan X Y, Ye Z X, Yang H J, *et al.* Characteristics of PM<sub>2.5</sub> pollution during the world car free day in Chengdu [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(8): 22-26.
- [37] 张智胜, 陶俊, 谢绍东, 等. 成都城区 PM<sub>2.5</sub> 季节污染特征及来源解析[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(11): 2947-2952.  
Zhang Z S, Tao J, Xie S D, *et al.* Seasonal variations and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> at urban area of Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(11): 2947-2952.
- [38] 唐信英, 罗磊, 曹军骥, 等. 成都市春节期间大气 PM<sub>2.5</sub> 化学元素的特征[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(5): 151-155.  
Tang X Y, Luo L, Cao J J, *et al.* Characteristics of chemical elements in atmospheric PM<sub>2.5</sub> during the spring festival in Chengdu [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(5): 151-155.
- [39] 张智胜, 陶俊, 龙颖贤, 等. 成都城区 PM<sub>2.5</sub> 中有害微量元素污染特征[J]. *中国科学院大学学报*, 2014, **31**(3): 426-430, 438.  
Zhang Z S, Tao J, Long Y X, *et al.* Characteristics of hazardous trace elements in PM<sub>2.5</sub> in urban area of Chengdu [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2014, **31**(3): 426-430, 438.

- [40] 王启元, 曹军骥, 甘小凤, 等. 成都市灰霾与正常天气下大气 PM<sub>2.5</sub> 的化学元素特征[J]. 环境化学, 2010, **29**(4): 644-648.  
Wang Q Y, Cao J J, Gan X F, *et al.* Characteristics of elements in PM<sub>2.5</sub> during normal and haze period in Chengdu [J]. Environmental Chemistry, 2010, **29**(4): 644-648.
- [41] 林瑜, 叶芝祥, 杨怀金, 等. 成都市西南郊区春季大气 PM<sub>2.5</sub> 的污染水平及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1629-1638.  
Lin Y, Ye Z X, Yang H J, *et al.* Pollution level and source apportionment of atmospheric particles PM<sub>2.5</sub> in southwest suburb of Chengdu in Spring [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1629-1638.
- [42] 焦姣, 姬亚芹, 白志鹏, 等. 重庆市颗粒物 PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 中元素污染特征和来源[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2013, **46**(6): 8-13, 19.  
Jiao J, Ji Y Q, Bai Z P, *et al.* Element distribution characteristics and source apportionment in PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> in Chongqing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2013, **46**(6): 8-13, 19.
- [43] 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.
- [44] 战雯静, 张艳, 马蔚纯, 等. 长江口大气重金属污染特征及沉降通量[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(5): 900-905.  
Zhan W J, Zhang Y, Ma W C, *et al.* Characteristics and depositional fluxes of heavy metals in aerosol of the Yangtze Estuary [J]. China Environmental Science, 2012, **32**(5): 900-905.
- [45] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [46] United States Environmental Protection Agency. Office of air quality planning and standards fact sheet [S]. EPA's Revised Particulate Matter Standards, 1997.
- [47] Song Y, Tang X Y, Xie S D, *et al.* Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Beijing in 2004 [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **146**(1-2): 124-130.
- [48] Lu S L, Yao Z K, Chen X H, *et al.* The relationship between physicochemical characterization and the potential toxicity of fine particulates (PM<sub>2.5</sub>) in Shanghai atmosphere [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(31): 7205-7214.
- [49] Duan J C, Tan J H, Cheng D X, *et al.* Sources and characteristics of carbonaceous aerosol in two largest cities in Pearl River Delta Region, China [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(14): 2895-2903.
- [50] De Vizcaya-Ruiz A, Gutiérrez-Castillo M E, Uribe-Ramirez M, *et al.* Characterization and *in vitro* biological effects of concentrated particulate matter from Mexico City [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(S2): 583-592.
- [51] Puustinen A, Hämeri K, Pekkanen J, *et al.* Spatial variation of particle number and mass over four European cities [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(31): 6622-6636.
- [52] Qin Y J, Kim E, Hopke P K. The concentrations and sources of PM<sub>2.5</sub> in metropolitan New York City [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(S2): 312-332.
- [53] 张小玲, 赵秀娟, 蒲维维, 等. 北京城区和远郊区大气细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 元素特征对比分析[J]. 中国粉体技术, 2010, **16**(1): 28-34.  
Zhang X L, Zhao X J, Pu W W, *et al.* Comparison of elemental Characteristics of suspended particles PM<sub>2.5</sub> in urban and rural area of Beijing [J]. China powder Science and Technology, 2010, **16**(1): 28-34.
- [54] 杨卫芬, 银燕, 魏玉香, 等. 霾天气下南京 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素污染特征及来源分析[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(1): 12-17.  
Yang W F, Yin Y, Wei Y X, *et al.* Characteristics and sources of metal elements in PM<sub>2.5</sub> during hazy days in Nanjing [J]. China Environmental Science, 2010, **30**(1): 12-17.
- [55] 杨保华, 陈剑虹, 李倦生, 等. 长沙市大河西先导区大气 PM<sub>2.5</sub> 中砷等重金属的污染特征及健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2014, **31**(11): 1012-1014.
- [56] 杨凌霄. 济南市大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征、来源解析及其对能见度的影响[D]. 济南: 山东大学, 2008. 1-157.  
Yang L X. Characteristics, source apportionment and influence on visual range of in PM<sub>2.5</sub> Jinan [D]. Ji'nan: Shandong University, 2008. 1-157.
- [57] 张帆, 成海容, 王祖武, 等. 武汉大气 PM<sub>2.5</sub> 中微量元素的污染特征和来源分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, **45**(6): 757-761.  
Zhang F, Cheng H R, Wang Z W, *et al.* Pollution characteristics and sources analysis of trace elements in PM<sub>2.5</sub> in Wuhan City [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, **45**(6): 757-761.
- [58] 方宏达, 陈锦芳, 段金明, 等. 厦门市郊区 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 中重金属的形态特征及生物可利用性研究[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(11): 1872-1877.  
Fang H D, Chen J F, Duan J M, *et al.* Speciation characteristics and bioavailability of heavy metal elements in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in the suburbs of Xiamen [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, **24**(11): 1872-1877.
- [59] 黄虹, 李顺诚, 曹军骥, 等. 广州市夏、冬季室内外 PM<sub>2.5</sub> 中元素组分的特征与来源[J]. 分析科学学报, 2007, **23**(4): 383-388.  
Huang H, Li S C, Cai J J, *et al.* Characterization and source of element components in indoor and outdoor PM<sub>2.5</sub> during summer and winter in Guangzhou City [J]. Journal of Analytical Science, 2007, **23**(4): 383-388.
- [60] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.  
Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculat ion of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluat ion of potential ecological risk index [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **31**(2): 112-115.

## CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation .....	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing .....	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing .....	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou .....	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring .....	..... YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City .....	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
<sup>13</sup> C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO <sub>2</sub> During Youth Olympic Games, Nanjing .....	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff .....	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations .....	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure .....	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions .....	..... LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds .....	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province .....	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake .....	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs .....	..... HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir .....	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake .....	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi .....	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons .....	..... WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization .....	ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area .....	..... ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake .....	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media .....	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example .....	..... LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin .....	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China .....	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics .....	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs .....	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation .....	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO <sub>2</sub> Using QCM-D and AFM .....	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling .....	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank .....	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Addition .....	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition .....	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield .....	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor .....	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits .....	..... WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) .....	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO <sub>2</sub> Emission from Soils of Summer-maize Field .....	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China .....	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis .....	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City .....	..... CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin .....	..... LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvo-aquic Soil of Hebei Plain .....	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots .....	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration .....	..... CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures .....	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County .....	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake .....	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal .....	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSW Fly Ash with Various Particle Sizes .....	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行