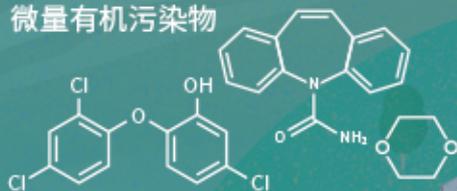


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路  
王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



## 深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

污水达标排放

下游城市水源地

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期  
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

城市环境生物安全研究的进展与挑战 ..... 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)  
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 ..... 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)  
污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 ..... 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

北京大气 PM<sub>2.5</sub> 载体金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 ..... 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)  
京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度特征及相关性分析 ..... 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)  
天津市 PM<sub>2.5</sub> 中二次硝酸盐形成及防控 ..... 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)  
南京市大气细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 ..... 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)  
汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 ..... 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)  
西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析 .....  
..... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沫, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)  
气溶胶中溶解性有机质 (DOM) 液相氧化 ..... 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)  
基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析 .....  
..... 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)  
石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 ..... 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)  
基于光化学指数的邯郸市臭氧生成敏感性 ..... 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)  
基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 ..... 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)  
基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 ..... 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)  
中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 ..... 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)  
北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 ..... 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)  
工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 ..... 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)  
基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 ..... 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)  
基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 ..... 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)  
基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 ..... 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)  
大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 ..... 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)  
不同流域水陆过渡带磷有效态的特征对比及环境意义 ..... 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)  
基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析 .....  
..... 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)  
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 ..... 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)  
渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 ..... 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)  
太湖流域上游南苕溪水夏季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素 .....  
..... 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡廷江 (2826)  
低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量: 以白洋淀为例 ..... 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)  
覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 ..... 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)  
圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 ..... 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)  
两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 ..... 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)  
铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 ..... 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)  
CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs ..... 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)  
pg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 ..... 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)  
海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI) 的还原去除 ..... 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 牟诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)  
超顺磁性纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> 功能化材料对镉的吸附机制 ..... 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)  
典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 ..... 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)  
印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 ..... 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)  
短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 ..... 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)  
厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 ..... 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)  
市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 ..... 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)  
不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 ..... 黄福义, 周曙仝, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)  
宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 ..... 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)  
温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响 .....  
..... 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)  
小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 ..... 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)  
农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 ..... 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)  
汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 ..... 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)  
调理剂对磷镉富集土壤中两种元素交互作用的影响 ..... 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)  
S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 ..... 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)  
连续 4 个生长季大气 CO<sub>2</sub> 升高与土壤铅 (Pb) 污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征 .....  
..... 贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)  
嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 ..... 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)  
冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 ..... 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤祿, 蒋敏, 宋琪 (3063)  
罗红霉素对大型溛生殖生长及抗氧化系统的影响 ..... 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)  
中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染响应关系 ..... 冯兆忠, 彭金龙 (3084)  
《环境科学》征订启事(2698) 《环境科学》征稿简则(2712) 信息(3027, 3055, 3073)

# 北京大气 PM<sub>2.5</sub> 载带金属浓度、来源及健康风险的城郊差异

周安琪<sup>1</sup>, 刘建伟<sup>1,2</sup>, 周旭<sup>1</sup>, 毕思琪<sup>1</sup>, 张博晗<sup>1</sup>, 高越<sup>1</sup>, 曹红斌<sup>1\*</sup>

(1. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450046)

**摘要:** 为探究北京地区大气 PM<sub>2.5</sub> 载带金属在城区和郊区污染特征、来源及其健康风险的差异, 于 2017 年 6 ~ 11 月采集海淀和大兴两地的 PM<sub>2.5</sub> 日样本, 分析 PM<sub>2.5</sub> 及其载带的 13 种金属浓度. 利用 PMF 源解析方法对 13 种金属元素来源进行分析, 并采用健康风险评估方法对其中 9 种金属的健康危害进行评估. 结果表明, 城区 PM<sub>2.5</sub> 及 Cr、Co、Mn 和 Ni 等 10 种金属浓度与郊区均有显著差异 ( $P < 0.05$ ). 源解析结果发现, 城区和郊区均可解释为 4 个源, 但来源略有不同, 占比亦有差异. 城区的为机动车源 (51.2%)、燃煤来源 (19.1%)、扬尘来源 (19.3%) 和燃油来源 (10.4%); 郊区的为机动车源 (47.9%)、燃煤来源 (22.6%)、扬尘来源 (20.2%) 和电镀来源 (9.3%). 健康风险评估结果表明, 城郊各金属 HQ 值均小于 1, 均不存在非致癌风险. 城区中 Ni 和 Pb, 郊区中 Cd、Co、Ni 和 Pb 可忽略致癌风险, 而城区的 As ( $2.77 \times 10^{-5}$ )、Cd ( $2 \times 10^{-6}$ )、Co ( $1.76 \times 10^{-6}$ ) 和 Cr(VI) ( $7.88 \times 10^{-6}$ ), 郊区的 As ( $8.34 \times 10^{-6}$ ) 和 Cr(VI) ( $4.94 \times 10^{-6}$ ) 的 R 值介于  $10^{-6}$  与  $10^{-4}$  之间, 具有一定的致癌风险.

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 金属元素; 源解析; 健康风险评估; 城郊差异

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2595-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010201

## Concentrations, Sources, and Health Risks of PM<sub>2.5</sub> Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs

ZHOU An-qi<sup>1</sup>, LIU Jian-wei<sup>1,2</sup>, ZHOU Xu<sup>1</sup>, BI Si-qi<sup>1</sup>, ZHANG Bo-han<sup>1</sup>, GAO Yue<sup>1</sup>, CAO Hong-bin<sup>1\*</sup>

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** To explore the differences in pollution characteristics, sources, and health risks of PM<sub>2.5</sub> carrier metals in urban and suburban areas in Beijing, daily PM<sub>2.5</sub> samples were collected from Haidian and Daxing from June to November 2017 and the concentration of PM<sub>2.5</sub> and 13 constituent metals were analyzed. The sources of these 13 metal elements were analyzed by positive matrix factorization (PMF), and the health hazards of a subset of 9 metals were evaluated using health risk assessment. The results showed that the concentrations of PM<sub>2.5</sub> and 10 metal concentrations in the urban area including Cr, Co, Mn, and Ni were significantly different from those in suburban areas ( $P < 0.05$ ). The source analysis results show four key sources, although their relative contributions vary slightly between urban and rural areas. In urban areas, the main sources are motor vehicles (51.2%), coal burning (19.1%), dust (19.3%), and fuel oil (10.4%); in the suburbs, sources are motor vehicles (47.9%), coal burning (22.6%), dust (20.2%), and electroplating (9.3%). The results of the health risk assessment showed that all metal HQ values in the suburbs were less than 1, and there was no non-carcinogenic risk. Ni and Pb in urban areas, and Cd, Co, Ni, and Pb in suburban areas, do not present a cancer risk, while the R values of As ( $2.77 \times 10^{-5}$ ), Cd ( $2 \times 10^{-6}$ ), Co ( $1.76 \times 10^{-6}$ ), and Cr(VI) ( $7.88 \times 10^{-6}$ ) in urban areas and As ( $8.34 \times 10^{-6}$ ) and Cr(VI) ( $4.94 \times 10^{-6}$ ) in suburban areas present some risk of cancer.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>; metal elements; source apportionment; health risk assessment; difference between urban and suburban

大气污染已成为近年关注的热点话题, PM<sub>2.5</sub> 作为大气污染的主要污染物之一, 不仅会降低道路能见度, 造成交通隐患, 还会直接影响人体健康<sup>[1]</sup>. 金属元素在大气环境中主要存在于 PM<sub>2.5</sub> 中, 很大一部分金属或类金属元素 (如 Pb、Cd、Cr 和 As 等) 具有致癌或潜在致癌作用, 对人体健康有极大潜在危害<sup>[2,3]</sup>. PM<sub>2.5</sub> 载带金属来源广泛, 但每个来源的贡献率具有很大的差异, 了解不同来源对大气环境管控方向起着指导性的作用. 目前国内外对于大气颗粒物载带金属的研究主要集中在单一地区的污染物的污染特征<sup>[3,4]</sup>、源解析<sup>[5,6]</sup>、在植物中的富集情况<sup>[7,8]</sup>、生态和健康风险评估<sup>[3,9,10]</sup> 或者是不同城市

大气载带金属之间进行比较<sup>[10]</sup>. 对于同一城市 PM<sub>2.5</sub> 载带金属城郊差异的研究很少. 鉴于此, 本文拟对北京市大气 PM<sub>2.5</sub> 载带金属从金属浓度、来源及健康风险的角度来对城市和郊区的差异进行研究.

本文于 2017 年夏秋季分别采集北京中心城区及郊区 PM<sub>2.5</sub> 样品, 通过分析其中载带金属元素及其

收稿日期: 2020-10-27; 修订日期: 2020-11-30

基金项目: 北京市自然科学基金项目 (8192026); 宁夏重点研发计划项目 (2019BFG02020)

作者简介: 周安琪 (1996 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气与健康风险评估, E-mail: 201821051216@mail.bnu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: caohongbin@bnu.edu.cn

他富集金属元素 As、Ba、Ca、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Pb、V、Zn、Mn 和 Ni 含量(其中 As 作为类金属元素,下文统一作金属元素看待),利用源解析模型——正定矩阵因子分解模型 PMF,对城区与郊区金属进行源解析.结合我国人群暴露参数,采用呼吸暴露途径的健康风险评估模型,揭示北京城区和郊区人群暴露于 PM<sub>2.5</sub> 载带金属的健康风险差异.

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品采集与化学分析

郊区点位于北京南 5 环与 6 环之间,北京建筑大学大兴校区校园内的实验楼顶,距离地面 15 m,周边以仓储物流、居民住宅及临街商铺为主,为典型的郊区环境.城区点位于北 2 环与 3 环之间,北京师范大学校园内实验楼顶,采样点距地面高约 4 m,周边以办公实验楼、住宅和临街商铺为主.2 采样点距离约 24 km(图 1).2 样点均利用大流量颗粒物采样器(型号:TH-1000C II,武汉市天虹仪表有限责任公司)采集 2017 年 6~11 月相同日期的逐日 PM<sub>2.5</sub> 样品,除去大风、下雨及仪器故障天数,共获得样品 78 个.郊区点采样时间为每日 07:00~次日 07:00,城区点为 09:00~次日 09:00.仪器采样流量为 1 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>,滤膜均为石英纤维滤膜(QFF).

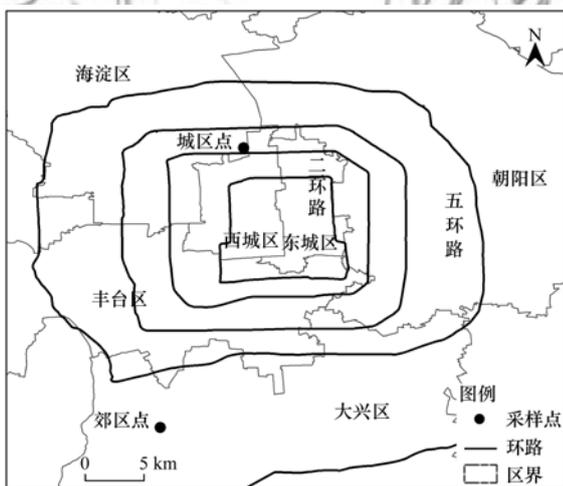


图 1 采样点示意

Fig. 1 Location of the sampling sites

采样前将石英纤维滤膜置于马弗炉中 450℃ 烘干 6 h 去除杂质.滤膜采样前后均需放置于避光处理的干燥器内平衡 48 h,采样前后重量用电子分析天平(精度 0.01 mg)称量,样品质量即为 2 次重量差.石英滤膜用锡纸包裹并密封于自封袋内,保存于 -18℃ 冰箱内待化学分析.

采样完成并平衡称重后,用不锈钢环形刀从每个石英滤膜(面积:18 cm × 23 cm)样品上切割圆形滤膜(直径:47 mm),用陶瓷剪刀剪碎滤膜置入 TFM

反应罐中,加入 3 mL 氢氟酸(MOS 级)和 5 mL 硝酸(BV-Ⅲ级)置于美国 CEM 公司 MARS 型微波消解仪中,按照消解程序(依次 120℃ 2 min, 160℃ 8 min, 190℃ 35 min)进行消解.消解完成后取出反应罐,加入 1 mL 高氯酸(优级纯)于赶酸电热板上加热至 170℃ 赶酸 3 h,取出反应罐冷却后将反应液转移至 10 mL 比色管中用高纯水定容待测.利用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES, SPECTRO Analytical Instruments GmbH)测定了 As、Ba、Ca、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Pb、V、Zn、Mn 和 Ni 共 13 种金属元素.以上样品化学分析均于北京师范大学分析测试中心进行.

### 1.2 QA/QC

样品中金属元素含量为仪器检测值减去滤膜空白的几何平均值,共进行 7 个空白滤膜处理,空白滤膜平均值及各元素仪器检出限见表 1.使用土壤国家标准物质(GBW07401)进行质量控制实验,各元素测定值均位于标准范围内(见表 1),表明 ICP-AES 测定本研究中的重金属准确性较高.

### 1.3 统计分析

采用独立样本 *t* 检验对城区及郊区金属浓度差异性进行分析.以上方法均在 SPSS 20.0 软件内实现.

### 1.4 PMF 源解析方法

正定矩阵因子法(positive matrix factorization, PMF)最早是由 Paatero 等<sup>[11]</sup>提出的基于最小二乘法的定量受体源解析模型.PMF 模型将样品数据分解为源成分谱矩阵  $F(k \times j)$  和源贡献矩阵  $G(i \times k)$ ,以及一个残差矩阵  $E(i \times j)$ .

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p G_{ik} F_{kj} + E_{ij}$$

式中, $X_{ij}$ 是第 *i* 个样品的第 *j* 个化学成分的浓度, $F_{kj}$ 是源 *k* 中第 *j* 个化学成分浓度, $G_{ik}$ 是源 *k* 对第 *i* 个样品的贡献率, $p$  为源的数量.

PMF 模型残差矩阵与输入的不确定度矩阵比值  $Q$  的最小化为模型最优解.

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left( \frac{e_{ij}}{u_{ij}} \right)^2$$

式中, $e_{ij}$ 和  $u_{ij}$ 分别为残差矩阵与不确定度矩阵.

当金属元素浓度( $c$ )小于等于相应方法检出限(MDL)时, $u_{ij}$ 为:

$$u_{ij} = (5/6)MDL$$

当大于 MDL 时, $u_{ij}$ 为:

$$u_{ij} = \sqrt{(\sigma \times c)^2 + (0.5MDL)^2}$$

式中, $\sigma$ 为样品误差,取经验值 10%; $c$ 为金属元素浓度.

表 1 13 种金属元素仪器检出限、滤膜空白测定值及标准物质测定值<sup>1)</sup>

Table 1 Instrument detection limits, blank values of QFF, and determination values of the standard material of 13 metals

金属元素	滤膜空白值 (均值 ± 标准偏差) /μg	仪器检出限 /μg·mL <sup>-1</sup>	标准物质测定值 /μg·g <sup>-1</sup>	标准物质标准值 (均值 ± 不确定度) /μg·g <sup>-1</sup>
As	0.03 ± 0.020	0.003	35.89	33.5 ± 5.2
Ba	0.87 ± 0.032	0.000 2	571	590 ± 50
Ca	264.71 ± 3.57	0.000 2	12 100.9	12 286 ± 571
Cd	nd	0.000 2	4.26	4.3 ± 0.6
Co	0.017 ± 0.004 5	0.001	12.8	14.2 ± 1.5
Cr	0.47 ± 0.081	0.001	59.1	62 ± 6
Cu	0.07 ± 0.011	0.001	20.7	21 ± 2
Fe	7.47 ± 0.50	0.001	35 709.8	36 330 ± 910
Mn	0.31 ± 0.010	0.000 2	1 654	1 760 ± 98
Ni	0.32 ± 0.008 8	0.001	19.6	20.4 ± 2.7
Pb	0.089 ± 0.008 3	0.003	102	98 ± 8
V	0.011 ± 0.0035	0.002	83	86 ± 6
Zn	0.56 ± 0.29	0.001	667	680 ± 39

1) 滤膜空白值共测量了 7 个空白滤膜; nd 表示未检出

本文利用美国环境保护署 (USEPA) 推荐的 PMF5.0 软件对 PM<sub>2.5</sub> 中金属进行源解析. 将 39 d 的 13 种金属浓度数据和相应不确定性矩阵导入 PMF 模型. 其中, 根据经验将  $\sigma$  值设置为 10%<sup>[12,13]</sup>. 由于郊区点的 Ni 元素有 20 个样品值低于检出限, 故设置为“bad”. 郊区样点的 V, 城区 Co, Cr 由于其信噪比 (S/N) 小于 0.5 或模型模拟与样品数据相关系数 ( $r^2$ ) 小于 0.3, 设置为“weak”. 将 13 种金属元素浓度之和设置为总变量 (total variable). 按 3~7 个因子数分别进行 200 次的基础运行, 对各因子数下运行的结果进行质量平衡约束. 以上运行均通过了误差及 DISP 检验. 最后, 根据每个因子的成分图谱, 对照已有研究中排放源指纹谱或标志物, 结合采样点周边实际排放源信息确定了 4 个因子为最优解.

### 1.5 健康风险评价方法

由于本文主要探究的是大气 PM<sub>2.5</sub> 载带金属以呼吸途径进入人体, 对人体健康产生影响, 故本文只考虑呼吸暴露途径金属暴露风险, 暴露人群为北京城区与郊区一般人群. 考虑到毒性参数的可获取性, 针对 As、Ba、Cd、Co、Cr(VI)、Mn、Ni 和 V 进行非致癌健康效应的健康风险评价, As、Cd、Co、Cr(VI)、Pb 和 Ni 进行致癌效应的健康风险评价.

参考剂量 (RfD) 与致癌斜率 (SF) 是毒物对人体产生健康危害重要毒性参数, 该值可由流行病学研究、动物实验等研究给出, 并按照一定的不确定系数转化为适合人类的参数, 进而用于健康风险评估中. 就呼吸暴露途径下, 以往研究通常用经口摄入途径的参考剂量及致癌斜率代替<sup>[11,12]</sup>, 但由于毒物进入人体途径不同, 对人体产生毒效应的机制相差很大, 所得的风险值会相差几个数量级. 目前采用

IRIS 推荐的参考浓度 (RfC) 和单位风险 (IUR) 分别应用在非致癌及致癌健康风险评价中, 这两个参数通常是由流行病学研究中, 特定职业工人暴露数据推导得出, 相比于动物实验数据等, 被认为是目前最可靠准确的值.

本文应用 US EPA 推荐的危害商值 (hazard quotient, HQ) 和致癌风险 (cancer risk, CR) 评价健康风险:

非致癌健康风险:

$$ADC = C \times EF \times ED / AT \quad (1)$$

$$HQ_i = ADC / RfC \quad (2)$$

$$HI = \sum HQ_i \quad (3)$$

式中, ADC 为日均暴露浓度,  $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ; C 为金属暴露浓度,  $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ , 本文取平均浓度的 95% 置信区间上限值 (95% UCL), 作为最大合理暴露量相对保守地估计人群健康风险; ED 为暴露持续时间, 取值 30; 该参数值取自我国人群暴露参数手册<sup>[14~16]</sup>. AT 为暴露时间,  $ED \times 365$ ; EF 为暴露频率, 取值为 350; RfC 为金属元素参考浓度,  $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ; HQ 为单一金属的非致癌健康风险, 当  $HQ \leq 1$  时, 表示无非致癌健康风险;  $HQ > 1$  时, 表示存在非致癌风险. HI 为 8 种金属 ( $i = 8$ ) 的非致癌风险总和.

致癌健康风险:

$$LADC = C \times EF \times ED / LT \quad (4)$$

$$R_j = LADC \times IUR \quad (5)$$

$$CR = \sum R_j \quad (6)$$

式中, LADC 为终生日均暴露浓度,  $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ; ED 取值 70; LT 为终生暴露时间,  $ED \times 365$ ; IUR 为金属元素的呼吸单位风险,  $(\text{ng} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ ; R 表示一种金属所导致人群终生发生致癌的概率, 若 R 小于

$10^{-6}$ , 则致癌风险可忽略, 若  $R$  大于  $10^{-4}$ , 则认为致癌风险较大,  $R$  处于两者之间, 表示无明显的致癌风险. CR(总体致癌健康风险)为所有致癌金属( $j = 4$ )的  $R$  总和.

Cr 有三价和六价两种价态存在, 但是 Cr(VI) 元素毒性比 Cr(III) 高, 并且 USEPA 及我国环境大气标准均以大气 Cr(VI) 作为标准限值依据, 故风险评价中以  $PM_{2.5}$  中 Cr(VI) 量代入计算, 而非 Cr 总量. 本文以 Cr(VI) 浓度占 Cr 总浓度比例 1/6 作为 Cr(VI)

比例转化系数进行研究<sup>[17~20]</sup>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 $PM_{2.5}$ 及其载带金属的浓度特征

从表 2 可见,  $PM_{2.5}$  平均浓度郊区为  $(25.5 \pm 7.21) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 城区为  $(63.5 \pm 26.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 9 种金属(Cd、Co、Cr、Pb、Mn、Ni、Fe、Cu 和 Zn)总浓度的平均值郊区为  $(30.4 \pm 10.0) \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 城区为  $(59.5 \pm 66.4) \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ .

表 2  $PM_{2.5}$  及其载带金属浓度统计/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Descriptive statistics of  $PM_{2.5}$  and metals/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$

金属元素	郊区 ( $n = 39$ )			城区 ( $n = 39$ )			浓度限值
	均值 $\pm$ 标准差	95% UCL	范围	均值 $\pm$ 标准差	95% UCL	范围	
As	1.62 $\pm$ 1.25	2.02	0.10 ~ 5.62	5.57 $\pm$ 3.52	6.71	0.39 ~ 12.9	6
Ba	8.98 $\pm$ 3.50	10.1	4.67 ~ 20.8	8.38 $\pm$ 3.31	9.45	3.99 ~ 16.3	—
Ca	708 $\pm$ 268	795	247 ~ 1 247	350 $\pm$ 202	415	83.1 ~ 1 026	—
Cd	0.37 $\pm$ 0.31	0.47	0.11 ~ 1.70	0.96 $\pm$ 0.62	1.16	0.21 ~ 3.27	5
Co	0.09 $\pm$ 0.06	0.11	nd ~ 0.24	0.18 $\pm$ 0.08	0.20	nd ~ 0.46	—
Cr	2.70 $\pm$ 0.94	3.01	1.20 ~ 5.14	3.27 $\pm$ 4.70	4.80	nd ~ 29.6	0.025
Cu	5.30 $\pm$ 2.26	6.03	1.83 ~ 12.1	10.9 $\pm$ 4.29	12.3	3.97 ~ 21.3	—
Fe	286 $\pm$ 85.4	314	140 ~ 471	315 $\pm$ 110	350	182 ~ 641	—
Mn	10.5 $\pm$ 2.92	11.4	6.23 ~ 18.2	21.7 $\pm$ 6.77	23.9	12.6 ~ 38.5	—
Ni	0.53 $\pm$ 0.60	0.73	nd ~ 1.95	1.12 $\pm$ 0.75	1.36	0.27 ~ 3.67	—
Pb	10.1 $\pm$ 4.59	11.6	2.76 ~ 21.4	27.8 $\pm$ 12.4	31.8	6.15 ~ 57.6	500
V	0.78 $\pm$ 0.36	0.89	0.35 ~ 2.14	1.33 $\pm$ 1.50	1.82	0.23 ~ 7.36	—
Zn	44.3 $\pm$ 17.7	50.0	9.98 ~ 94.7	97.1 $\pm$ 39.8	110	24.8 ~ 186	—
THMs	30.4 $\pm$ 10.0	33.7	14.0 ~ 52.9	59.5 $\pm$ 66.4	66.4	20.1 ~ 117	—
$PM_{2.5}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	25.5 $\pm$ 7.21	27.9	13.9 ~ 43.9	63.5 $\pm$ 26.3	72.0	18.0 ~ 123	35

1) 浓度限值为我国环境空气质量标准(GB 3095-2012)中年平均二级标准(未标注的表示在标准里未提及); 95% UCL 指金属浓度平均值的 95% 置信区间上限值; THMs 为 9 种金属(Cd、Co、Cr、Pb、Mn、Ni、Fe、Cu 和 Zn)平均浓度; nd 表示未检出

运用 SPSS 20.0 软件对城区及郊区  $PM_{2.5}$  及金属浓度差异性采用独立样本  $t$  检验进行分析, 结果发现除 Ba、Cr 和 Fe 外其他元素浓度、 $PM_{2.5}$  浓度及 9 种金属(Cd、Co、Cr、Pb、Mn、Ni、Fe、Cu 和 Zn)平均浓度在城郊之间均有显著差异( $P < 0.05$ ). 城区采样点周边主要是学校、医院、商场和小型店铺, 交通繁忙, 机动车数量多. 绝大部分是第三产业用地. 郊区附近有洗车行、物流园和纺织制品厂等企业, 机动车数量较城区较少. 整体土地利用类型组合数较多, 以耕地、园地、林地、居民点和独立工矿用地为主, 土地利用整体功能较强<sup>[21]</sup>. 产业结构和工业布局等方面的不同可能是导致城郊大气  $PM_{2.5}$  载带金属产生显著差异的原因.

与我国环境空气质量标准(GB 3095-2012)中  $PM_{2.5}$  年平均二级标准  $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  相比, 郊区点均值未超过标准限值, 仅有 6 d 超标天数; 而城区  $PM_{2.5}$  平均浓度为郊区的约 2.5 倍, 超过了标准限值, 超标天数为 35 d. 原因可能是由于城区点距离最近道路仅 150 m, 距离一处加油站仅 100 m, 且周围道路网密集, 机动车流量大, 相应尾气排放、机动车刹车制动及轮胎磨损等会释放更多的  $PM_{2.5}$ . 另一方面, 相

比于郊区点采样高度 15 m, 城区点仅 4 m, 易受地表活动影响, 如机动车及道路扬尘等.

在测定的元素中, 只有 Ca 的平均浓度郊区大于城区, 其他金属或类金属元素浓度城区均大于郊区. 在电力、建材和钢铁等多个行业甚至地面起尘等都会产生大量 Ca 的排放<sup>[22]</sup>, 因此检测出来浓度水平最高. 城区及郊区 Cr 的平均浓度均显著超过我国环境空气质量二级标准(GB 3095-2012)的  $0.025 \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ , 且城区污染更重. Cr 常来源于电镀、制革、油漆、颜料和印染等工业<sup>[10]</sup>, 北京市海淀区和大兴区相关产业可能是 Cr 排放超标的主要原因. Fe、Zn、Pb 和 Mn 这 4 种重金属浓度相较其他也较高. 魏青等<sup>[9]</sup>对枣庄市大气  $PM_{2.5}$  重金属元素的研究和田春晖等<sup>[23]</sup>对南京市大气重金属的研究中均显示, Fe、Zn、Pb 和 Mn 这 4 种重金属浓度与其他重金属相比均偏高.

### 2.2 $PM_{2.5}$ 载带金属的源解析

从图 2 可见, 郊区与城区点均解释为 4 个源. 需要指出, 每个元素都可以具有多个来源, 判断因子来源归属时必须将因子贡献谱与源排放谱对应, 而不是仅考虑个别元素, 且需要对采样点周边污染源进行调查, 以实际污染排放信息佐证因子归属的判断.

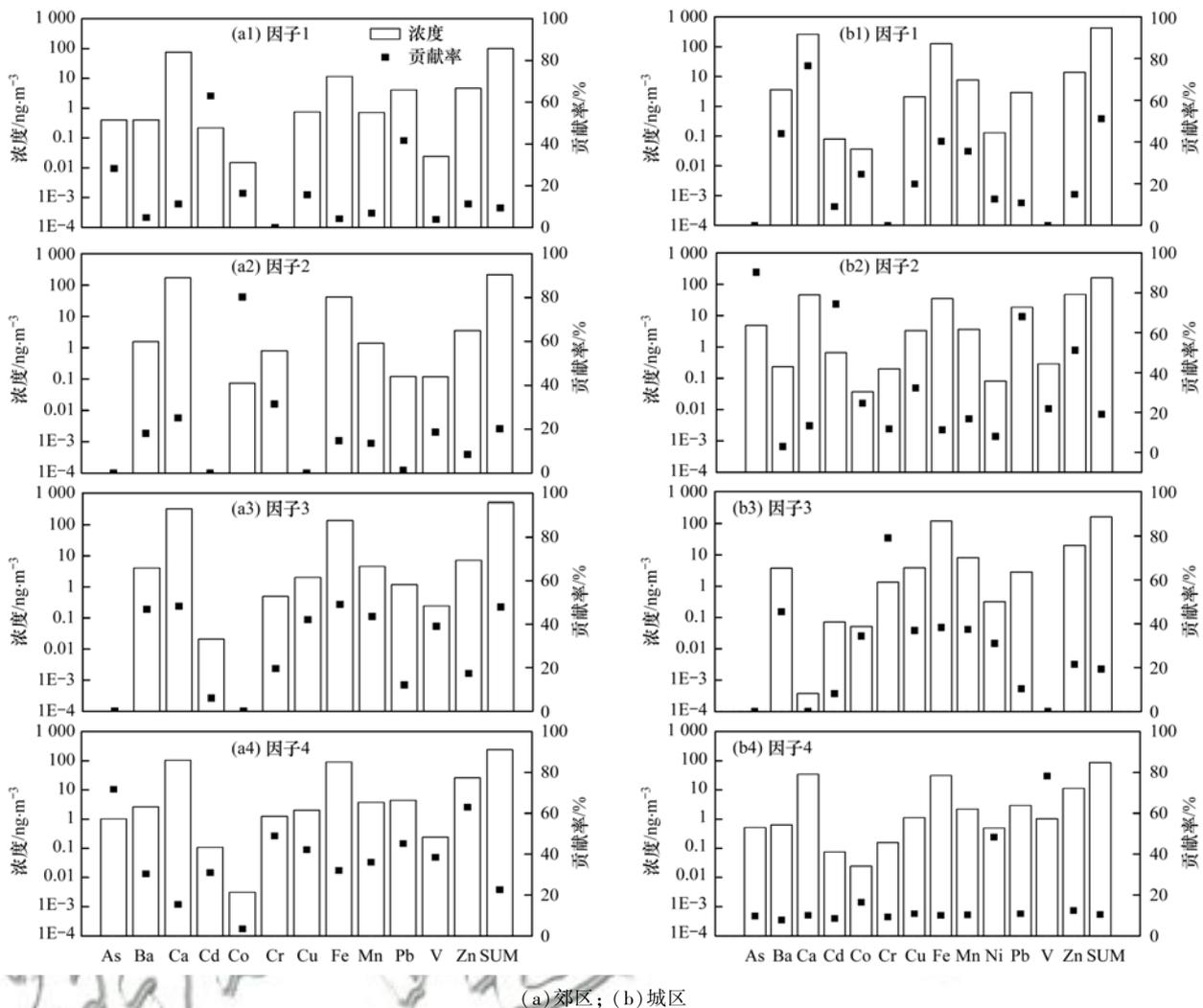


图 2 基于 PMF 的郊区 and 城区因子贡献谱

Fig. 2 Profiles of factor contributions for suburban and urban areas resolved by a PMF model

郊区点因子 1 解释了总变量的 9.3%, 以 Cd 和 Pb 为主. Cd 和 Pb 是电镀行业中表面镀层常用金属, 用以保护钢材免受表面腐蚀<sup>[24]</sup>. 采样点周边分布有许多小型金属建材厂及电镀厂, 故认为该因子为电镀来源.

因子 2 占总变量的 20.2%, 以 Co 和 Cr 为主. 研究认为 Co 和 Cr 可来源于土壤尘<sup>[25,26]</sup>, 也可来源于地表扬尘<sup>[27]</sup>. 由于采样点周边有多处农田及拆迁后裸地, 且西部 3 km 即是永定河干涸河床, 故认为该因子为扬尘来源.

因子 3 占总变量的 47.9%, 具有较高的 Ca、Ba、Fe、Mn、Cu 和 V 等元素. 有研究指出, 这些元素是机动车尾气排放或车辆磨损过程释放的主要元素<sup>[28~34]</sup>, 且这 6 种的元素也被认为是交通源指示物<sup>[35,36]</sup>. 其中, Ca 即钙基润滑油, 是机动车常用润滑剂<sup>[32]</sup>. 柴油车发动机可释放大量的 Ca、Cu 和 Fe<sup>[28,37,38]</sup>. Ca、Ba、Cu 和 Fe 在机动车刹车制动和车辆轮胎磨损过程中也可以释放出来<sup>[32,39~41]</sup>. Mn, 即甲

基环戊二烯三碳基锰, 是机动车汽油中的添加剂, 用以提高汽油辛烷值改善抗爆性. PM<sub>2.5</sub> 的 Ba/Cu 及 Fe/Cu 比值可作为机动车磨损碎屑源的判断依据<sup>[42]</sup>. 一系列对公路隧道环境 PM<sub>2.5</sub> 的 Fe/Cu 比值分析显示, 我国珠江隧道该比值为 28<sup>[43]</sup>, 中国香港城门隧道为 17<sup>[44]</sup>; 世界其他地区研究取值范围为 15 ~ 45<sup>[45~48]</sup>. 已有研究中显示 PM<sub>2.5</sub> 的 Ba/Cu 比在 0.58 ~ 2.48 之间<sup>[43,44,47,48]</sup>. 本文 Fe/Cu 比均值为 60, Ba/Cu 为 1.8. 其中 Fe/Cu 比高于其他研究, 相比于已有研究中隧道环境内单一的机动车源而言, 本文郊区采样点易受周围钢铁建材工厂排放 Fe 等影响, 导致该比值升高. 最后, 该因子解释为机动车来源.

因子 4 占总变量的 22.6%, 主要包括 As、Zn、Pb、Cr、Cu 和 Mn 等元素. Okuda 等<sup>[49]</sup>通过对北京市 2001 ~ 2006 年的多年观测研究, 指出北京市大气中 As、Pb、Cu 和 Zn 主要来自燃煤. 许多学者也认为这些金属元素是燃煤排放的重要标志物<sup>[50~53]</sup>. Zhang 等<sup>[54]</sup>的研究显示, 北京市 PM<sub>2.5</sub> 中 Pb 主要来

自于燃煤.北京市和全国分别于1997年与2000年禁止了汽油中Pb的添加,且目前在汽油中规定了Pb的限量,即 $0.005\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (GB 17930-2011),因此,大气颗粒物中Pb被认为主要来自于燃煤而不是机动车尾气排放与道路扬尘<sup>[51]</sup>.本研究中样品为夏秋季节,受东南方向季风影响,认为可能是北京东南方向的天津和河北等地钢铁工厂燃煤来源.最后,该因子解释为燃煤来源.

城区点中共得到4个因子,即机动车源、燃煤来源、扬尘来源与燃油来源.其中前3个因子与郊区相同,需要指出,即使认定为同一源,其排放谱也会因源排放空间差异而不同,如因子3主要为Cr、Ba、Cu、Fe、Mn和Co等元素,解释为扬尘来源,且以道路扬尘为主,受到机动车排放的Ba、Cu、Fe和Mn等元素沉积于道路尘内影响,而郊区点的扬尘来源Co和Cr是主要元素,主要受到土壤扬尘影响.另外,因子4具有较高的V(71.8%)和Ni(37.1%),解释为燃料油燃烧源.Ni和V是石油中十分丰富的

金属元素,在石油炼制过程,汽油,柴油及煤油提炼后,会保留在重油或燃料油产品(船舶重油、工业锅炉重油、沥青和石油焦等)中.作为动力燃料,重油和石油焦主要用于石化企业、小型发电厂、船舶和建筑(玻璃、水泥、陶瓷等)等行业<sup>[55]</sup>,并在燃烧过程中,释放重金属Ni和V到大气中<sup>[56]</sup>.且大量研究学者均认为,大气中Ni和V主要来自燃料油产品的燃烧过程<sup>[40,42,49,57,58]</sup>.城区点西侧靠近京能热电厂和高井山热电厂,受夏季东南季风影响,上风向途经华能北京热电厂,认为热电厂企业的相关排放是该因子的主要来源.

从图3可以看出,郊区大气金属可以解析成4个源,其中贡献最大的是机动车源,占47.9%,燃煤源和扬尘源相差不多,分别占22.6%和20.2%,占比最少的为电镀来源9.3%.城区大气重金属也可以解析为4个源,其中机动车源、燃煤源和扬尘源与城区的占比结构相似,分别为51.2%、19.1%和19.3%,第4个因子被解析成了燃油来源,占比10.4%.

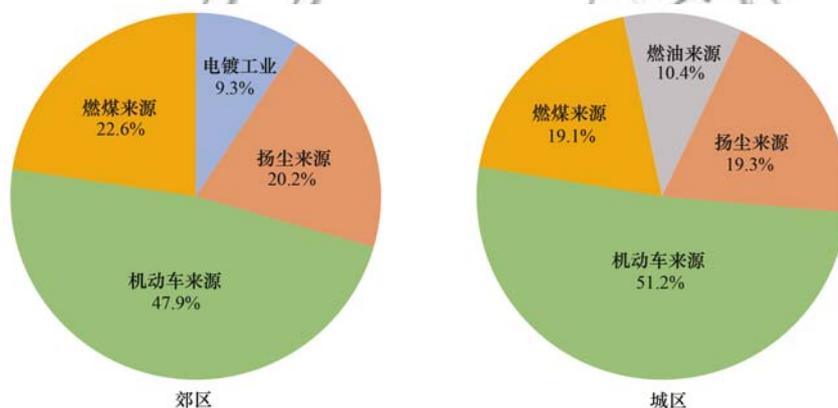


图3 郊区点和城区点金属源的质量贡献

Fig. 3 Mass contributions of sources of metals in suburban and urban sites

造成这种差异的原因可能是,郊区有大面积拆迁,建筑尘地表扬尘及土壤尘.城市交通密集,车流量大,故交通排放的51.2%大于郊区交通排放47.9%.扬尘是一类复杂的开放源,包含多种由机动车,工业和其他来源产生的污染物.城市交通所引起的道路尘,郊区大量裸露的地面以及工业施工造成的建筑尘和不利自然条件造成的自然尘等皆是扬尘来源在两个地区都占不小比例的原因.北京坚持能源清洁化战略,燃煤来源比例相较从前已经大大减少,但是北京夏季盛行东南风,污染物可能由河北和天津等地而来.河北和天津是我国重要的工业基地,许多大型石化工厂和以燃煤为动力的工业受季风影响,燃煤来源在城郊两地仍具有一定比例.郊区分布着大量的物流、建材、汽修和食品公司,形成了公司围村的特点.而在城区建筑基本上以商场、学校

和医院等为主.因此产品的制作和加工主要集中在郊区,这也是郊区电镀来源更高的原因.城区的燃油来源占10.4%,这可能是由于城市中的小型发电厂使用动力燃料时释放进入大气.城区西方石景山区有京能热电厂和高井山热电厂,加之受夏季东南季风影响,上风向途经华能北京热电厂,也为燃油来源做出了贡献.而京能热电厂和高井山热电厂距郊区点较城区点远,且华能北京热电厂位于郊区点的东北方,因此对郊区点影响不大.

### 2.3 $\text{PM}_{2.5}$ 载带金属的健康风险评价

根据US EPA推荐的风险评价模型,分别计算北京市城郊两地大气 $\text{PM}_{2.5}$ 载带As、Ba、Cd、Co、Cr、Pb、V、Mn和Ni这9种金属元素的致癌和非致癌健康风险.RfC和IUR的取值来源于毒理数据库,见表3.

结果表明,对于非致癌风险,城区和郊区各金属 HQ 值均小于 1,均不存在非致癌风险(图 4)。城区风险排序为: Mn > As > Cd > Ni > Co > Ba > V > Cr(IV); 郊区风险排序为: Mn > As > Ni > Cd > Ba >

表 3 参考浓度(RfC)与呼吸单位风险(IUR)取值

重金属	非致癌		致癌	
	RfC/(ng·m <sup>-3</sup> )	文献	IUR/(ng·m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup>	文献
As	1.50 × 10 <sup>1</sup>	[59]	4.30 × 10 <sup>-6</sup>	[63]
Ba	5.00 × 10 <sup>2</sup>	[60]	—	—
Cd	1.00 × 10 <sup>1</sup>	[61]	1.80 × 10 <sup>-6</sup>	[63]
Co	6.00 × 10 <sup>0</sup>	[62]	9.00 × 10 <sup>-6</sup>	[62]
Cr(VI)	1.00 × 10 <sup>2</sup>	[63]	1.20 × 10 <sup>-5</sup>	[63]
Mn	5.00 × 10 <sup>1</sup>	[63]	—	—
Ni	1.40 × 10 <sup>1</sup>	[64]	2.40 × 10 <sup>-7</sup>	[63]
Pb	—	—	1.20 × 10 <sup>-8</sup>	[66]
V	1.00 × 10 <sup>2</sup>	[65]	—	—

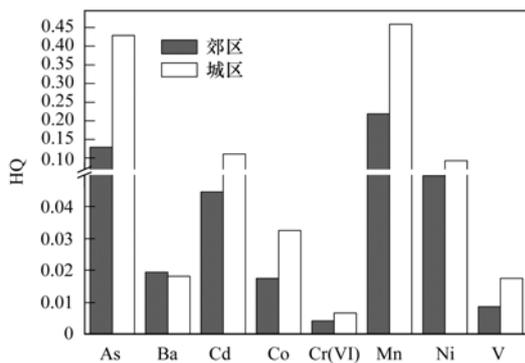


图 4 郊区与城区点金属非致癌与致癌风险

Fig. 4 Non-cancer risk and cancer risk of metals in suburban and urban sites

### 3 结论

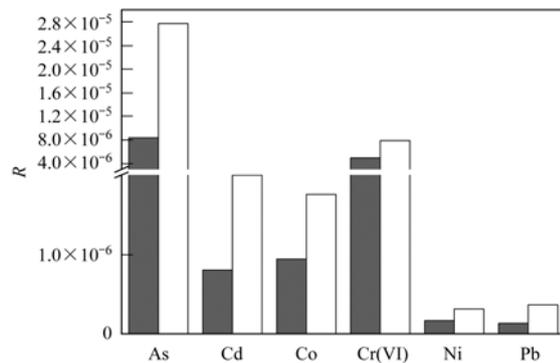
(1) 郊区 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度为 (25.5 ± 7.21) μg·m<sup>-3</sup>, 9 种金属(Cd、Co、Cr、Pb、Mn、Ni、Fe、Cu 和 Zn) 总浓度的平均值为 (30.4 ± 10.0) ng·m<sup>-3</sup>; 城区 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度为 (63.5 ± 26.3) μg·m<sup>-3</sup>, 9 种金属(Cd、Co、Cr、Pb、Mn、Ni、Fe、Cu 和 Zn) 总浓度的平均值为 (59.5 ± 66.4) ng·m<sup>-3</sup>. 除 Ba、Cr 和 Fe 外其他元素浓度、PM<sub>2.5</sub> 浓度及 9 种金属(Cd、Co、Cr、Pb、Mn、Ni、Fe、Cu 和 Zn) 总浓度的平均值在城郊之间均有显著差异(P < 0.05)。

(2) 利用 PMF 源解析方法可将城区大气金属解析为 4 个因子, 分别是机动车源(51.2%)、燃煤来源(19.1%)、扬尘来源(19.3%)和燃油来源(10.4%)。郊区也可解析为 4 个因子, 分别是机动车源(47.9%)、燃煤来源(22.6%)、扬尘来源(20.2%)和电镀来源(9.3%)。

(3) 对于非致癌风险, 城区和郊区各金属元素 HQ 值均小于 1, 均不存在非致癌风险。从金属元素的

Co > V > Cr(IV)。从金属元素的综合效应来看, 对于这 8 种金属元素, 郊区的 HI 值小于 1, 不存在非致癌风险。但是城区的 HI 值大于 1, 表明这 8 种金属元素的综合效应具有一定非致癌风险。

对于致癌风险, 城区中 Ni 和 Pb 小于人群可接受的危险度水平(10<sup>-6</sup>), 郊区中 Cd、Co、Ni 和 Pb 小于 10<sup>-6</sup>, 可被视为致癌风险可忽略。其他几种金属元素 R 值虽然大于 10<sup>-6</sup> 但小于 10<sup>-4</sup>, 可认为具有一定致癌风险, 但致癌风险不算太大。郊区 6 种金属的 CR 值为 1.53 × 10<sup>-5</sup>, 城区的为 4.00 × 10<sup>-5</sup>, 两者皆没超过 10<sup>-4</sup>, 表明 6 种金属的综合效应在城区和郊区皆有一定的致癌风险, 但风险不算太大。城区风险排序为: As > Cr(IV) > Cd > Co > Pb > Ni; 郊区风险排序为: As > Cr(IV) > Co > Cd > Ni > Pb。不论城区还是郊区, 致癌风险最大的均为 As 和 Cr(IV)。



综合效应来看, 郊区的 HI 值小于 1, 不存在非致癌风险。但是城区的 HI 值大于 1, 表明这 8 种金属元素的综合效应具有一定非致癌风险。对于致癌风险, 城区中 Ni 和 Pb, 郊区中 Cd、Co、Ni 和 Pb 小于 10<sup>-6</sup>, 可忽略致癌风险, 但其他金属元素致癌风险不可忽略。不论城区还是郊区, 致癌风险最大的均为 As 和 Cr(IV)。

#### 参考文献:

- [1] 李铭焯, 秦玮, 杭怡春, 等. 北京昌平平地冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 元素污染特征分析[J]. 中国环境监测, 2016, 32(3): 58-63. Li M X, Qin W, Hang Y C, et al. Study on the pollution characteristics of particulate matter based on the characteristic elements in Changping of Beijing[J]. Environmental Monitoring of China, 2016, 32(3): 58-63.
- [2] 许桐楠, 曾立民, 张远航, 等. 北京市怀柔区冬季大气重金属污染状况分析[J]. 环境化学, 2016, 35(12): 2460-2468. Xu X N, Zeng L M, Zhang Y H, et al. The pollution status analysis of atmospheric heavy metal elements during winter in Huairou district of Beijing[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(12): 2460-2468.
- [3] 杜金花, 张宜升, 何凌燕, 等. 深圳某地区大气 PM<sub>2.5</sub> 中重金属的污染特征及健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(9): 838-840.
- [4] 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.
- [ 5 ] 刘凤玲, 卢霞, 吴梦龙, 等. 南京大气细粒子中重金属污染特征及来源解析[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(2): 652-658.  
Liu F L, Lu X, Wu M L, *et al.* Pollution characters and source apportionment of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> in Nanjing[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(2): 652-658.
- [ 6 ] 陈琳, 翟云波, 杨芳, 等. 长沙市夏季大气颗粒物中重金属的形态及其源解析[J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(9): 2083-2087.  
Chen L, Zhai Y B, Yang F, *et al.* Research on source and extraction characterization of heavy metals on atmospheric particles in Changsha in summer [ J ]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, **4**(9): 2083-2087.
- [ 7 ] 鲁敏, 李成. 绿化树种对大气重金属污染物吸收净化能力的研究[J]. *山东林业科技*, 2006, (3): 31-32.  
Lu M, Li C. Absorption and purification ability on the greening tree species to heavy metal pollutants of the atmosphere [ J ]. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2006, (3): 31-32.
- [ 8 ] 庄树宏, 王克明. 城市大气重金属(Pb,Cd,Cu,Zn)污染及其在植物中的富积[J]. *烟台大学学报(自然科学与工程版)*, 2000, **13**(1): 31-37.  
Zhuang S H, Wang K M. Study on the relationship between atmospheric heavy metal pollution ( Pb, Cd, Cu, Zn ) and its accumulations in leaves of urban trees [ J ]. *Journal of Yantai University ( Natural Science and Engineering Edition )*, 2000, **13** (1): 31-37.
- [ 9 ] 魏青, 陈文怡, 金麟先. 枣庄市大气PM<sub>2.5</sub>重金属元素健康风险评价及污染源解析[J]. *中国粉体技术*, 2020, **26** (6): 69-78.  
Wei Q, Chen W Y, Jin L X. Health risk assessment and source analysis of heavy metal elements in PM<sub>2.5</sub> in Zaozhuang city [ J ]. *China Powder Science and Technology*, 2020, **26**(6): 69-78.
- [ 10 ] 谢忱, 杨文, 张文杰, 等. 中国23城市PM<sub>2.5</sub>载带典型重金属的污染特征及健康风险评价研究[J]. *环境与健康杂志*, 2019, **36**(8): 693-702.  
Xie C, Yang W, Zhang W J, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> in 23 Chinese cities [ J ]. *Journal of Environment and Health*, 2019, **36**(8): 693-702.
- [ 11 ] Paatero P, Tapper U. Analysis of different modes of factor analysis as least squares fit problems [ J ]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 1993, **18**(2): 183-194.
- [ 12 ] Yang H N, Chen J, Wen J J, *et al.* Composition and sources of PM<sub>2.5</sub> around the heating periods of 2013 and 2014 in Beijing: Implications for efficient mitigation measures [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2016, **124**: 378-386.
- [ 13 ] Gao J J, Tian H Z, Cheng K, *et al.* Seasonal and spatial variation of trace elements in multi-size airborne particulate matters of Beijing, China: mass concentration, enrichment characteristics, source apportionment, chemical speciation and bioavailability [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2014, **99**: 257-265.
- [ 14 ] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册(成人卷)概要 [ M ]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [ 15 ] 王贝贝, 段小丽. 中国人群暴露参数手册(儿童卷: 0-5岁) [ M ]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [ 16 ] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册(儿童卷: 6-17岁) [ M ]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [ 17 ] Brown R J C, Van Aswegen S, Webb W R, *et al.* UK concentrations of chromium and chromium (VI), measured as water soluble chromium, in PM<sub>10</sub> [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2014, **99**: 385-391.
- [ 18 ] US EPA. User's guide/technical background document for US EPA Region 9's RSL tables [ Z ]. 2013.
- [ 19 ] Hieu N T, Lee B K. Characteristics of particulate matter and metals in the ambient air from a residential area in the largest industrial city in Korea [ J ]. *Atmospheric Research*, 2010, **98** (2-4): 526-537.
- [ 20 ] Park E J, Kim D S, Park K. Monitoring of ambient particles and heavy metals in a residential area of Seoul, Korea [ J ]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **137** (1-3): 441-449.
- [ 21 ] 方琳娜, 宋金平, 岳晓燕. 城市边缘区土地利用结构分析——以北京市大兴区为例 [ J ]. *生态经济(学术版)*, 2009, (2): 329-334.  
Fang L N, Song J P, Yue X Y. Analysis of land use structure in urban fringe area: a case study in Daxing district of Beijing [ J ]. *Ecological Economy*, 2009, (2): 329-334.
- [ 22 ] 祝晓燕, 段雷, 唐桂刚, 等. 中国工业源大气基阳离子排放量估算 [ J ]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, **44** (9): 1176-1179.  
Zhu X Y, Duan L, Tang G G, *et al.* Estimation of atmospheric emissions of base cations in China [ J ]. *Journal of Tsinghua University ( Science & Technology )*, 2004, **44** (9): 1176-1179.
- [ 23 ] 田春晖, 杨若柠, 古丽扎尔·依力哈木, 等. 南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价 [ J ]. *环境科学*, 2018, **39** (7): 3118-3125.  
Tian C H, Yang R Z, Gulizhaer Y, *et al.* Pollution levels and risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Nanjing [ J ]. *Environmental Science*, 2018, **39** (7): 3118-3125.
- [ 24 ] Taghvaei S, Sowlat M H, Mousavi A, *et al.* Source apportionment of ambient PM<sub>2.5</sub> in two locations in central Tehran using the positive matrix factorization (PMF) model [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2018, **628-629**: 672-686.
- [ 25 ] de la Campa A M S, de la Rosa J D, González-Castanedo Y, *et al.* High concentrations of heavy metals in PM from ceramic factories of Southern Spain [ J ]. *Atmospheric Research*, 2010, **96**(4): 633-644.
- [ 26 ] Nguyen Q T, Skov H, Sørensen L L, *et al.* Source apportionment of particles at Station Nord, north east Greenland during 2008-2010 using COPREM and PMF analysis [ J ]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(1): 35-49.
- [ 27 ] Basha S, Jhala J, Thorat R, *et al.* Assessment of heavy metal content in suspended particulate matter of coastal industrial town, Mithapur, Gujarat, India [ J ]. *Atmospheric Research*, 2010, **97** (1-2): 257-265.
- [ 28 ] Lee J H, Hopke P K. Apportioning sources of PM<sub>2.5</sub> in St. Louis, Mo using speciation trends network data [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40** Suppl 2: 360-377.
- [ 29 ] Wählén P, Berkowicz R, Palmgren F. Characterisation of traffic-generated particulate matter in Copenhagen [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(12): 2151-2159.
- [ 30 ] Wu B B, Shen X B, Cao X Y, *et al.* Characterization of the chemical composition of PM<sub>2.5</sub> emitted from on-road China III and China IV diesel trucks in Beijing, China [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2016, **551-552**: 579-589.
- [ 31 ] Fukuzaki N, Yanaka T, Urushiyama Y. Effects of studded tires on roadside airborne dust pollution in Niigata, Japan [ J ]. *Atmospheric Environment*, 1986, **20**(2): 377-386.
- [ 32 ] Lough G C, Schauer J J, Park J S, *et al.* Emissions of metals

- associated with motor vehicle roadways [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(3): 826-836.
- [33] Cheung K L, Ntziachristos L, Tzankiozis T, *et al.* Emissions of particulate trace elements, metals and organic species from gasoline, diesel, and biodiesel passenger vehicles and their relation to oxidative potential [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2010, **44**(7): 500-513.
- [34] Chiang H L, Lai Y M, Chang S Y. Pollutant constituents of exhaust emitted from light-duty diesel vehicles[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **47**: 399-406.
- [35] Hsu C Y, Chiang H C, Lin S L, *et al.* Elemental characterization and source apportionment of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in the western coastal area of central Taiwan [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **541**: 1139-1150.
- [36] 王琴, 张大伟, 刘保献, 等. 基于 PMF 模型的北京市 PM<sub>2.5</sub> 来源的时空分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(10): 2917-2924.
- Wang Q, Zhang D W, Liu B X, *et al.* Spatial and temporal variations of ambient PM<sub>2.5</sub> source contributions using positive matrix factorization [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(10): 2917-2924.
- [37] Wang Y F, Huang K L, Li C T, *et al.* Emissions of fuel metals content from a diesel vehicle engine [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(33): 4637-4643.
- [38] Gertler A W, Gillies J A, Pierson W R, *et al.* Real-world particulate matter and gaseous emissions from motor vehicles in a highway tunnel [J]. *Research Report (Health Effects Institute)*, 2002, (107): 5-56.
- [39] Sanders P G, Xu N, Dalka T M, *et al.* Airborne brake wear debris: size distributions, composition, and a comparison of dynamometer and vehicle tests [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(18): 4060-4069.
- [40] Dall'Osto M, Querol X, Amato F, *et al.* Hourly elemental concentrations in PM<sub>2.5</sub> aerosols sampled simultaneously at urban background and road site during SAPUSS-diurnal variations and PMF receptor modelling [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(8): 4375-4392.
- [41] Johansson C, Norman M, Burman L. Road traffic emission factors for heavy metals [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(31): 4681-4688.
- [42] Lin Y C, Tsai C J, Wu Y C, *et al.* Characteristics of trace metals in traffic-derived particles in Hsuehshan Tunnel, Taiwan: size distribution, potential source, and fingerprinting metal ratio [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(8): 4117-4130.
- [43] Ling Y H, Min H, Yuan H Z, *et al.* Fine particle emissions from on-road vehicles in the Zhujiang Tunnel, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(12): 4461-4466.
- [44] Cheng Y, Lee S C, Ho K F, *et al.* Chemically-specified on-road PM<sub>2.5</sub> motor vehicle emission factors in Hong Kong [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(7): 1621-1627.
- [45] Brito J, Rizzo L V, Herckes P, *et al.* Physical-chemical characterisation of the particulate matter inside two road tunnels in the São Paulo Metropolitan Area [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(24): 12199-12213.
- [46] Fabretti J F, Sauret N, Gal J F, *et al.* Elemental characterization and source identification of PM<sub>2.5</sub> using Positive Matrix Factorization: The Malraux road tunnel, Nice, France [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **94**(2): 320-329.
- [47] Grieshop A P, Lipsky E M, Pekney N J, *et al.* Fine particle emission factors from vehicles in a highway tunnel: effects of fleet composition and season [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40** Suppl 2: 287-298.
- [48] Gillies J A, Gertler A W, Sagebiel J C, *et al.* On-road particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>) emissions in the Sepulveda Tunnel, Los Angeles, California [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(6): 1054-1063.
- [49] Okuda T, Katsuno M, Naoi D, *et al.* Trends in hazardous trace metal concentrations in aerosols collected in Beijing, China from 2001 to 2006 [J]. *Chemosphere*, 2008, **72**(6): 917-924.
- [50] Dai Q L, Bi X H, Wu J H, *et al.* Characterization and source identification of heavy metals in ambient PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in an integrated iron and steel industry zone compared with a background site [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, **15**(3): 875-887.
- [51] Duan J C, Guo S J, Tan J H, *et al.* Characteristics of atmospheric carbonyls during haze days in Beijing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2012, **114-115**: 17-27.
- [52] Gu J X, Bai Z P, Liu A X, *et al.* Characterization of atmospheric organic carbon and element carbon of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at Tianjin, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2010, **10**(2): 167-176.
- [53] Tian H Z, Wang Y, Xue Z G, *et al.* Trend and characteristics of atmospheric emissions of Hg, As, and Se from coal combustion in China, 1980-2007 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(23): 11905-11919.
- [54] Zhang X C, Chen W P, Ma C, *et al.* Modeling particulate matter emissions during mineral loading process under weak wind simulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **449**: 168-173.
- [55] 黄金珠. 中国燃料油市场现状与展望 [J]. *中外能源*, 2013, **18**(9): 73-78.
- Huang J Z. China's fuel oil market today and outlook [J]. *Sino-Global Energy*, 2013, **18**(9): 73-78.
- [56] Bettinelli M, Tittarelli P. Evaluation and validation of instrumental procedures for the determination of nickel and vanadium in fuel oils [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 1994, **9**(7): 805-812.
- [57] Shafer M M, Toner B M, Overdier J T, *et al.* Chemical speciation of vanadium in particulate matter emitted from diesel vehicles and urban atmospheric aerosols [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(1): 189-195.
- [58] Swietlicki E, Krejci R. Source characterisation of the Central European atmospheric aerosol using multivariate statistical methods [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1996, **109-110**: 519-525.
- [59] OEHHA. Arsenic [EB/OL]. <https://oehha.ca.gov/chemicals>, 1987-02-27.
- [60] EPA-HEAST. Health Effects Assessment Summary Tables (HEAST) [EB/OL]. <https://epa-heast.ornl.gov/heast.php>, 2011-12-01.
- [61] ATSDR. Toxic substances portal [EB/OL]. <https://www.atsdr.cdc.gov/>, 2011-03-03.
- [62] PPRTV. Provisional peer-reviewed toxicity values [EB/OL]. <https://hhprtvt.ornl.gov/quickview/pprtv.php>, 2008-08-25.
- [63] IRIS. IRIS assessments [EB/OL]. [https://iris.epa.gov/AtoZ/?list\\_type=alpha](https://iris.epa.gov/AtoZ/?list_type=alpha), 2017-01-19.
- [64] Cal EPA. Nickel compounds [EB/OL]. <https://oehha.ca.gov/chemicals/nickel-compounds>, 2016-03-22.
- [65] ATSDR. Vanadium [EB/OL]. <https://www.atsdr.cdc.gov/substances/toxsubstance.asp?toxid=50>, 2011-03-03.
- [66] Cal EPA. Lead and lead compounds [EB/OL]. <https://oehha.ca.gov/chemicals/lead-and-lead-compounds>, 2013-11-22.

## CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments .....	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation .....	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant .....	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM <sub>2.5</sub> Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs .....	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM <sub>2.5</sub> Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas .....	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM <sub>2.5</sub> in Tianjin .....	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM <sub>2.5</sub> of Nanjing, China .....	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain .....	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer .....	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols .....	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data .....	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O <sub>3</sub> and NO <sub>2</sub> in Shijiazhuang .....	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan .....	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization .....	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations .....	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration .....	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing .....	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources .....	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks .....	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model .....	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality .....	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model .....	WANY Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance .....	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods .....	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands .....	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments .....	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantiaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn .....	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake .....	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping .....	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment .....	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River .....	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands .....	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs .....	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole .....	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water .....	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-jian, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> Functionalized Materials .....	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants .....	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors .....	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules .....	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge .....	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge .....	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yang, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands .....	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia .....	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure .....	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices .....	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone .....	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas .....	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium .....	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings .....	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO <sub>2</sub> on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils .....	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i> .....	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities .....	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i> .....	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China .....	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)