

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.2

第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响	李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)
珠三角地区利用 PM _{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)
广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性	范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)
扬州市 PM _{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估	董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)
博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源	宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)
某集约化肉鸡饲养场 PM _{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征	刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)
水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响	胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)
滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献	任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)
基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)
湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响	余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)
异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险	李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 王荣, 沈吉 (614)
珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素	杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)
北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价	陈磊, 李蕾芳, 邱晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)
氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律	郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)
磁性铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响	王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)
钙预处理对磁性铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响	赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)
NH ₄ ⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响	郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)
3 种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较	吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)
硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制	代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 邵超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)
ZnTiO ₂ -TiO ₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)
高指数晶面 TiO ₂ 对铬的吸附及光催化去除	钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)
Fe ⁰ /海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B	张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)
不同滤料滤池启动期对铁锰离子的去除机制	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)
SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能	张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)
一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制	薛文静, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺处理高盐废水及膜污染分析	王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)
多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除	刘淑惠, 周伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)
微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程	刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)
从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水	窦文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)
夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法	宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)
硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性	于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)
乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性	毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)
DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性	杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建国, 张帆, 吕廷廷 (791)
间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷	赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)
ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行	韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)
进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响	都叶奇, 于德爽, 甄建国, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)
ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性	李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)
不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响	李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)
调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)
C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响	张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)
基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性	王杨, 朱斌, 童俊, 白晓慧 (853)
黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征	姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)
基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化	祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)
硝化作用对盐碱湿地 N ₂ O 排放的影响及其环境因子分析	杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)
长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N ₂ O 和 NO 排放的影响	聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)
地膜覆盖和施氮对菜地 N ₂ O 排放的影响	倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)
双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系	肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)
多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响	李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)
桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征	丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)
工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析	李峰, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)
膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响	林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)
缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征	陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)
复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献	张彦军, 郭胜利 (961)
不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征	王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓扬悟, 葛体达, 吴金水 (970)
宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价	张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)
生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响	周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)
污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响	袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)
热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜禽粪混合物料及其甲烷高值化条件	卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

扬州市 PM_{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估

董世豪¹, 谢扬², 皇甫延琦¹, 史旭荣¹, 易睿², 史国良^{1*}, 冯银厂¹

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300071; 2. 扬州市环境监测中心站, 扬州 225009)

摘要: 本研究利用正定矩阵因子分解模型(PMF)-健康风险评估模型(HMHR)探究了扬州市细颗粒物(PM_{2.5})中重金属污染源及不同污染源对重金属潜在健康风险值的贡献。结果表明, 各重金属全年浓度均值为 Pb(64.4 ng·m⁻³) > Cr(25.24 ng·m⁻³) > As(6.36 ng·m⁻³) > Ni(5.36 ng·m⁻³) > Cd(3.34 ng·m⁻³) > Co(1.21 ng·m⁻³); 各污染源对 PM_{2.5} 贡献分别为二次源(37.7%) > 燃煤源(19.4%) > 扬尘(17.5%) > 机动车(16.9%) > 建筑尘(5.2%) > 工业源(3.4%)。As 主要源于燃煤、机动车和扬尘; Co 主要源于工业源; 燃煤源对 Pb 的浓度贡献较高; 工业源对 Ni、Cd 含量的贡献最高。不同污染源的健康风险依次为扬尘源、燃煤源、机动车、工业源、建筑尘。扬尘源和燃煤源的潜在健康风险较其他污染源为高, 与其源谱中重金属元素占比较大且对 PM_{2.5} 贡献浓度较高有关。

关键词: 重金属元素; 健康风险; 致癌风险; 正定矩阵因子分解模型(PMF); PM_{2.5}

中图分类号: X513; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0540-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201805083

Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM_{2.5} in Yangzhou, China

DONG Shi-hao¹, XIE Yang², HUANGFU Yan-qi¹, SHI Xu-rong¹, YI Rui², SHI Guo-liang^{1*}, FENG Yin-chang¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Yangzhou Environmental Monitoring Center, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Recently, a new method combining positive matrix factorization (PMF) and heavy metal health risk (HMHR) assessment was proposed to apportion sources of heavy metals in ambient particulate matter and the associated heavy metal cancer health risk (HMCR), which has been applied to data collected in Yangzhou, China. The annual average concentrations of six measured heavy metals were Pb (64.4 ng·m⁻³), followed by Cr (25.24 ng·m⁻³), As (6.36 ng·m⁻³), Ni (5.36 ng·m⁻³), Cd (3.34 ng·m⁻³), and Co (1.21 ng·m⁻³). The results showed that the major sources of PM_{2.5} were secondary sources (37.7%), followed by coal combustion (19.4%), resuspended dust (17.5%), vehicle emissions (16.9%), construction dust (5.2%), and industrial emissions (3.4%). As was primarily emitted from coal combustion, vehicle emissions, and resuspended dust. Co originated from industry emissions. Pb was mainly emitted from coal combustion. Ni and Cd were from industrial emissions. The major sources that contributed to HMCR were resuspended dust, coal combustion, vehicle emissions, industry emissions, and construction dust. The high contributions of resuspended dust and coal to HMCR were likely due to the high heavy metals concentrations in coal and the resuspended dust profile as well as high emissions of these sources.

Key words: heavy metals; health risk; cancer risk; positive matrix factorization (PMF); PM_{2.5}

大气细颗粒物^[1] (PM_{2.5}, 空气动力学当量直径 ≤ 2.5 μm) 对人体健康^[2] 和环境空气质量^[3] 均会产生影响。其中重金属对人体健康的影响尤为显著, 其可通过手-口摄入、呼吸和皮肤接触等途径进入人体, 进一步导致人体机能功能性障碍和一些不可逆性损伤^[4]。

有研究表明, 重金属元素会对人体健康造成危害。Cr 和 Ni 元素均是人体致癌物质, 过量的吸入会导致呼吸道癌变^[5], 一定浓度的 As 会造成神经系统的伤害和皮肤损伤, 导致癌变。唐荣莉等^[6] 对北京市道路灰尘重金属健康影响的研究表明, 元素 Cr、Pb 是城市中具有最高潜在健康风险的元素; Pb

能引起神经系统和血液系统的疾病, 尤其对婴幼儿伤害更甚^[7]。因此, 颗粒物中重金属元素的来源、健康评估的研究具有非常重要的意义。

长三角地区是我国大气污染防治的重要区域, 很多学者针对该地区开展了大量研究。胡子梅等^[8] 对上海市重金属元素污染水平进行了研究, 对于上海市来说, Cd 和 Cr 的风险指数要高于 Cu、Pb、Zn 的风险指数, 对人体健康的潜在危害较大。秦鑫

收稿日期: 2018-05-09; 修订日期: 2018-08-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0208505); 国家自然科学基金项目(41775149)

作者简介: 董世豪(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染防治, E-mail: dongshihao1221@163.com

* 通信作者, E-mail: nksjgl@nankai.edu.cn

等^[9]以南京市北郊为研究点位,对重金属元素的来源进行了分析,认为含 Pb、Cd 和 Cr 重金属气溶胶粒子最主要来源于工业排放,含 As 和 Ni 的气溶胶粒子则主要来源于化石燃料燃烧. Li 等^[10]同样对南京市的重金属元素水平进行了全面的评估,认为 Zn、As、Cd、Cu 等元素主要来自于人为源, Mn、Cr、Fe 等主要来自于自然源;同时对于重金属的健康风险指数进行了计算,认为 Cr、As、Mn 的风险指数较高,对人体健康的潜在危害较大. 截至目前,国内外已有很多关于重金属元素对于人体健康影响、重金属来源分析等多方面的相关研究,但是关于不同不同重金属排放源对人体健康产生影响的研究却鲜见报道.

本文选取长三角地区的重要城市扬州市为研究区域,在扬州市采集 PM_{2.5} 受体样品,利用正定矩阵因子分解模型(positive matrix factorization, PMF)分析不同污染源对 PM_{2.5} 及不同重金属的贡献,并结合健康风险评价模型(heavy metal health risk, HMHR)计算不同污染源对人体健康的影响^[11],以期揭示不同污染源对人体健康的潜在危害提供科学的信息.

1 材料与方法

1.1 样品采集及分析

本研究充分考虑扬州市主导风向、地形、人群聚集区、功能区、城市发展及城区周边污染源类等因素,共选取了包括市区、市郊在内的共 4 个采样点位. 采样时间共分为 4 个时间段:2016 年冬季(2016-01-23 ~ 2016-02-23)、2016 年春季(2016-02-26 ~ 2016-06-20)、2016 年夏季(2016-07-27 ~ 2016-09-12)、2016 年秋季(2016-09-20 ~ 2016-12-15). 各个点位进行连续四季度采样,共采集约 60 d,每天连续 22 h 采集. 各点位平行采集聚丙烯滤膜和石英滤膜,采样结束共获得聚丙烯滤膜和石英滤膜各 245 个(90 mm),最后获得有效数据的滤膜各 227 个. 滤膜采样前后分别使用十万分之一天平在恒温恒湿条件下进行手工称重.

石英滤膜用于测定碳组分和水溶性离子(OC、EC、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺、Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺等)含量. 离子测定依据《环境空气颗粒物中水溶性阳离子的测定 离子色谱法》(HJ 800-2016). 通过加入一定量的二次去离子水超声萃取,将水溶性阳离子从颗粒物转移至水中,过滤后进入离子色谱仪分析. 离子色谱法是利用离子交换原理分离阳离子,然后利用电导检测器进行测定. 根据混合标准溶液中各阳离子出峰的保留时间和峰面积可定性和

定量样品中的 Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、NH₄⁺ 含量. 每批样品至少测定 2 个全程空白,空白样品使用和样品完全一致的消解程序,测定结果低于方法测定下限.

聚丙烯滤膜用于元素(Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Ti、V、Co、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Cd、Zn、Hg、Pb等)含量测定. 元素测定参照《空气和废气颗粒物中铅等金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》(HJ 657-2013),采用硝酸-盐酸体系、微波消解 200℃ 保持 15min,对滤膜样品进行前处理,ICP-MS(美国赛默飞世尔科技, XSeries II 型)测定消解液中的近 20 种金属元素. 每个工作日测定曲线中间点溶液,来检验标准曲线;每批 20 个样品测定一个平行样品和加标样品.

1.2 PMF 模型

正定矩阵因子分解模型(PMF)由 Paatero 等^[12]提出,此后,Amato 等^[13]不断对 PMF 模型进行改进,现已广泛应用于国内外源解析工作^[14]. 其不需要知道源数量和源成分谱信息,适用于分析长时间序列样品. 基本原理如下:

$$E = X_{nm} - \sum_{j=1}^p G_{np} F_{pm} \quad (1)$$

式中, E 为残差矩阵; X_{nm} 为第 n 个样品中的 m 个化学成分浓度; p 为因子个数; G 为源贡献矩阵; F 为源成分谱矩阵.

为得到最优的解析结果, PMF 定义了一个“目标函数” Q , 最终解析得到使这个目标函数 Q 的值最小的 G 矩阵和 F 矩阵:

$$Q(E) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (E_{ij}/\sigma_{ij})^2 \quad (2)$$

式中, σ_{ij} 是第 j 个样品中第 i 个化学成分的标准偏差,或者不确定性.

本研究使用 PMF 5.0 进行解析.

1.3 健康风险评价模型(HMHR)

国内健康风险评价主要是在美国环保署^[15]提出的土壤健康风险评价模型的基础上,对其中部分参数进行修正后使用^[16]. 重金属主要从呼吸、摄食和皮肤接触这 3 种暴露途径对人体健康产生危害,包括慢性非致癌风险和致癌风险,本文结合既有数据,对致癌风险进行主要研究. 致癌风险(R_i)计算公式如下:

$$D_{\text{ing}} = C \times \frac{EF \times ED}{AT \times BW} \times \text{IngR} \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$D_{\text{inh}} = C \times \frac{EF \times ED}{AT \times BW} \times \text{InhR} \quad (4)$$

$$D_{\text{der}} = C \times \frac{EF \times ED}{AT \times BW} \times \text{SL} \times \text{SA} \times \text{ABS} \times 10^{-6} \quad (5)$$

$$R_i = D \times \text{SFI} \tag{6}$$

式中各指标如表 1 所示, 其中 D_{ing} 、 D_{inh} 、 D_{der} 分别为经手-口摄入、呼吸和皮肤接触的日均暴露量. 公式 (6) 中 SFI 为重金属元素致癌斜率因子, 表示人体暴露于一定剂量某种污染物下产生致癌效应的最大概率 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; 不同的金属元素有着对应不同的斜率系数.

表 1 重金属日平均暴露量计算参数含义及其取值^[17]

Table 1 Parameter values for daily average dose calculation model of heavy metals			
参数	含义	单位	数值
C	重金属含量	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	具体浓度
EF	暴露频率	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	350
ED	暴露年限	a	30
AT	平均暴露时间	d	25 270
BW	平均体重	kg	70
IngR	摄食降生速率	$\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	100
InhR	呼吸速率	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	20
SL	皮肤黏着度	$\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.07
SA	暴露皮肤面积	$\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$	5 700
ABS	皮肤吸收因子	无量纲	0.001 (As 为 0.03)

若 R_i 在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间 (即每 1 万 ~ 100 万人增加 1 个癌症患者), 认为该物质不具备致癌风险. 呼吸是人体重金属暴露的重要途径, 因此本研究只评估了呼吸相关的重金属致癌风险.

1.4 PMF-HMHR 模型

该复合模型将源解析模型和健康风险评价模型结合, 能够解析不同污染源类对重金属的贡献大小及对人体健康的影响^[11]. 计算步骤如下.

第一步: PMF 模型运算

此步解析获得各污染源对 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属元素的贡献值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

$$C_{ij}^{k*} = g_i^k \times f_j^k \tag{7}$$

$$C_{ij}^k = C_{ij}^{k*} / S_i \tag{8}$$

式中, C_{ij}^k 指 i 样品中 k 源类含有的重金属元素 j 的质量分数, 单位 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_{ij}^{k*} 是计算得到的 i 样品中 k 源类含有的重金属元素 j 的质量浓度, 单位 $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$; S_i 是 i 样品的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度, 单位 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

第二步: 各污染源的健康风险与致癌风险 (R_{ij}^k) 计算^[11]

$$D_{ij,\text{ing}}^k = C_{ij}^k \times \frac{\text{EF} \times \text{ED}}{\text{AT} \times \text{BW}} \times \text{IngR} \times 10^{-6} \tag{9}$$

$$D_{ij,\text{inh}}^k = C_{ij}^{k*} \times \frac{\text{EF} \times \text{ED}}{\text{AT} \times \text{BW}} \times \text{InhR} \tag{10}$$

$$D_{ij,\text{der}}^k = C_{ij}^k \times \frac{\text{EF} \times \text{ED}}{\text{AT} \times \text{BW}} \times \text{SL} \times \text{SA} \times \text{ABS} \times 10^{-6} \tag{11}$$

$$R_{ij}^k = D_{ij}^k \times \text{SFI}_j \tag{12}$$

式中, 下标 i 代表不同样品, 上标 k 代表不同源类, 下标 j 代表不同重金属元素类别; 其余符号的含义与前面相同.

2 结果与讨论

2.1 扬州市常规组分概况及季节变化特征

本研究中扬州市常规组分 (NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、OC、EC) 全年的平均质量浓度情况与周边长江三角洲地区中其他城市的研究结果对比如表 2 所示. 扬州市全年的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度为 $74.08 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 与长三角地区其他城市较为一致. 在常规组分中, NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 的浓度均低于其他城市, 可能说明扬州市的二次颗粒物生成较长三角地区其他城市较少.

表 2 扬州市 $\text{PM}_{2.5}$ 中常规组分与其他城市比对/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

Table 2 Comparison of the concentrations of the routinely measured chemical species in $\text{PM}_{2.5}$ among different cities/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$							
城市	年份	$\text{PM}_{2.5}$	NH_4^+	NO_3^-	SO_4^{2-}	OC	EC
扬州 (本研究)	2016	74.08	5.50	8.35	9.79	11.10	3.79
南京 ^[18]	2014 ~ 2015	94.40	6.80	11.78	14.87	—	—
苏州 ^[19]	2015	69.00	9.10	14.52	13.51	9.06	5.75
上海 ^[20]	2013 ~ 2014	—	6.36	11.04	13.48	9.41	3.92
杭州 ^[21]	2014 ~ 2015	72.33	8.10	12.80	11.50	12.55	5.73

1) “—” 为不存在相应数据

扬州市全年和不同季度主要组分占比和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度见表 3. $\text{PM}_{2.5}$ 年均质量浓度呈冬季浓度最高, 夏季浓度最低的特点. 全年组分占比大小依次为 $\text{OC} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{EC} > \text{Si} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Al}$, 碳组分和离子组分为 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要组分. NO_3^- 为半挥发性物质, 其含量受温湿度影响较大. NO_3^- 占比

在冬季最高, 夏季最低, 可能因为冬季温度较低, 低温环境中硝酸盐的离解常数较低, 因此利于硝酸盐形成、沉积、分配到气溶胶相中^[22]; 夏季平均温度较高, 导致气溶胶中的硝酸盐分解较易挥发到气相中. SO_4^{2-} 占比在夏季最高, 此期间光化学反应较强, 利于 SO_4^{2-} 生成.

表 3 扬州市不同季度环境空气中主要化学组分占比和 PM_{2.5} 质量浓度Table 3 PM_{2.5} concentration and mass fraction of major components during four seasons in Yangzhou

项目	全年	冬季	春季	夏季	秋季
OC/%	14.98	19.82	9.67	12.90	15.09
EC/%	5.11	5.91	3.70	4.95	5.31
NH ₄ ⁺ /%	7.42	5.48	8.32	7.73	8.77
NO ₃ ⁻ /%	11.27	13.67	12.62	6.59	12.08
SO ₄ ²⁻ /%	13.22	7.80	14.87	17.21	14.34
Al/%	1.67	2.33	1.49	0.97	1.12
Si/%	3.23	4.18	3.07	2.54	2.82
K/%	1.77	2.11	1.11	1.23	1.58
Ca/%	3.13	3.96	2.58	2.29	3.37
PM _{2.5} /μg·m ⁻³	74.08	80.76	79.01	57.75	77.66

2.2 扬州市重金属元素概况及其季节变化特征

扬州市 6 种重金属元素全年平均浓度为 Pb (64.41 ng·m⁻³) > Cr (25.24 ng·m⁻³) > As (6.36 ng·m⁻³) > Ni (5.36 ng·m⁻³) > Cd (3.34 ng·m⁻³) > Co (1.21 ng·m⁻³)。为进一步说明扬州市 PM_{2.5}

中重金属污染水平,选取了其他文献中周边城市上海、南京等长三角城市的研究成果进行对比,如表 4 所示。通过对比可知,扬州市的重金属元素污染水平整体重于上海^[23],轻于南京等长三角地区城市^[40]。

表 4 扬州市 PM_{2.5} 中重金属元素与其他城市对比/ng·m⁻³Table 4 Comparison of concentrations of heavy metals among different cities/ng·m⁻³

城市	年份	Pb	Cr	As	Ni	Cd	Co
扬州	2016	64.41	25.24	6.36	5.36	3.34	1.21
上海 ^[23]	2009~2010	59.06	9.01	—	9.05	1.07	—
南京 ^[40]	2013	205.20	26.14	10.61	14.65	4.36	—

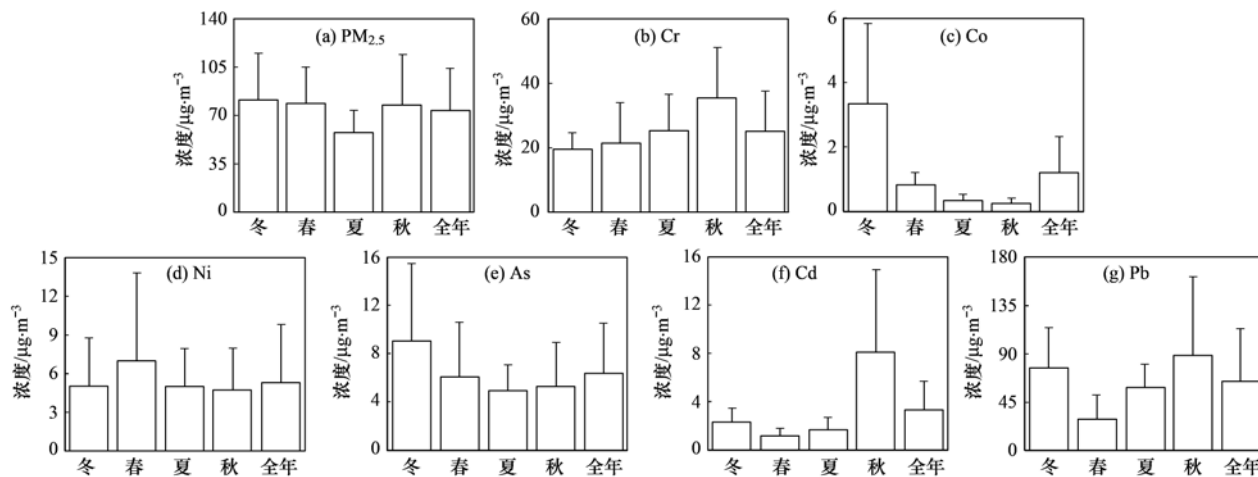
1) “—”为不存在相应数据

扬州市各重金属元素呈现不同的季节变化特征(图 1)。As 在冬季浓度最高(9 ng·m⁻³),夏季浓度最低(4.9 ng·m⁻³),与 PM_{2.5} 浓度季节变化一致;Cr 浓度在秋季最高(35.4 ng·m⁻³),冬季最低(19.4 ng·m⁻³);Co 浓度冬季最高(3.3 ng·m⁻³),秋季最低(0.2 ng·m⁻³);Ni 浓度春季最高(7.0 ng·m⁻³),秋季最低(4.7 ng·m⁻³);Cd 和 Pb 呈现一致的季节变化,均为秋季浓度最高(分别为 8.1 ng·m⁻³, 88.7 ng·m⁻³),春季最低(分别为 1.2 ng·m⁻³, 29.4 ng·m⁻³);6 种重金属元素加和也为

秋季最高(142.6 ng·m⁻³),春季最低(65.7 ng·m⁻³)。重金属元素呈现不同的季节变化,可能因为不同金属元素来源不同,而各污染源贡献存在不同的季节变化特征。

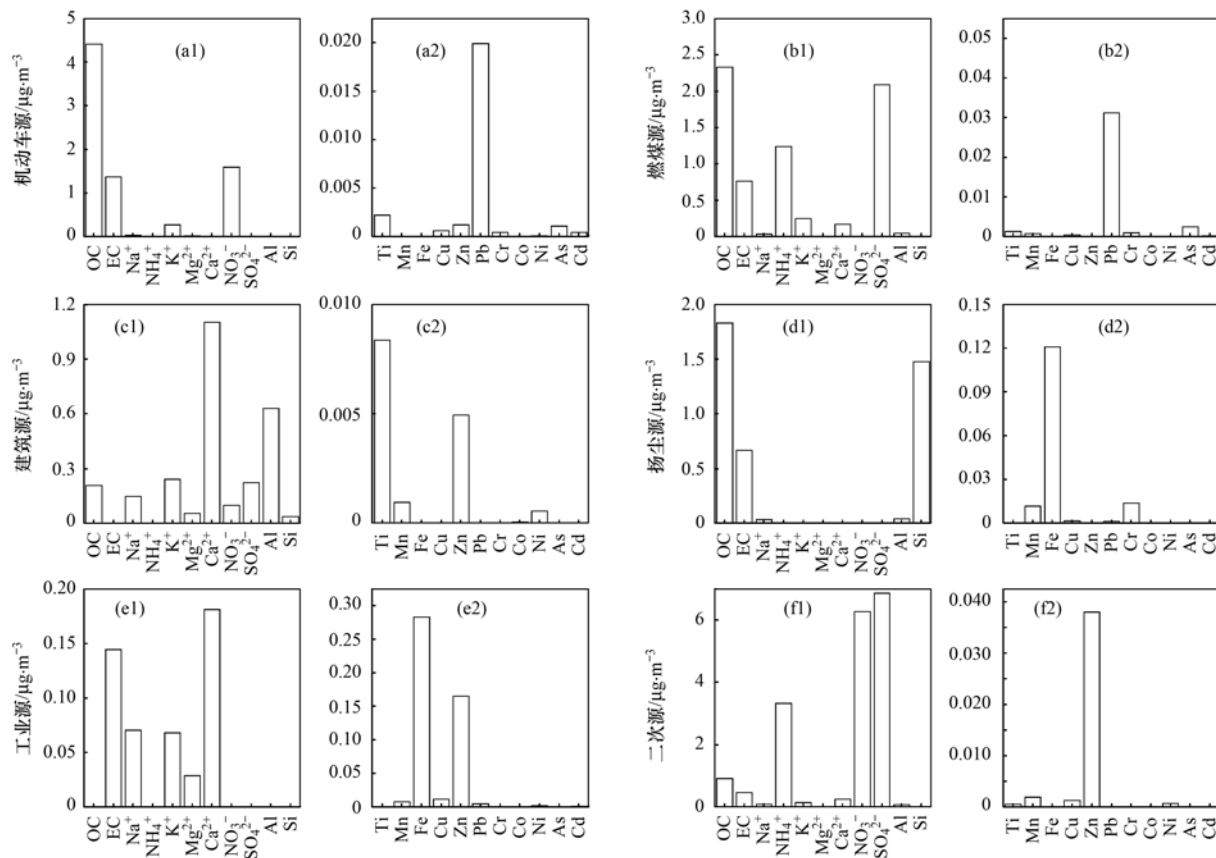
2.3 重金属元素源贡献

污染源的元素组分排放特征不同;且各元素组分可能源于不同的污染源。为探讨不同污染源对重金属元素的贡献,本研究利用正定矩阵因子分解模型(PMF)计算了扬州市全年的源贡献值,然后结合解析出的因子谱,定量计算了不同污染源对受体

图 1 PM_{2.5} 和元素组分浓度季节变化Fig. 1 Seasonal variations in the mass concentrations of PM_{2.5} and heavy metals

PM_{2.5}元素组分含量的贡献^[24]. 图2为PMF解析的因子谱特征,根据各源类特征标识组分,将因子分别识别为机动车源、燃煤源、建筑源、扬尘源、工业源、二次源^[25]. 其中,机动车源因子谱中含有明显的Pb元素,Pb元素被广泛认为是汽油燃烧排放的主要重金属元素之一^[26];燃煤源因子谱中含有明显的Pb、As元素;扬尘源因子谱中含有明显的

Cr元素,Cr主要源于土壤尘,表明该扬尘源中混有土壤尘^[27]. 各源类贡献占比分别为二次源贡献(37.7%)>燃煤源(19.4%)>扬尘(17.5%)>机动车(16.9%)>建筑尘(5.2%)>工业源(3.4%),主要源类的影响与长三角地区其他城市的源类排序较为一致^[28],其中,机动车源类的贡献占比总体低于其他城市(如南京20.4%^[29]).



(a) 机动车源, (b) 燃煤源, (c) 建筑源, (d) 扬尘源, (e) 工业源, (f) 二次源

图2 PMF解析结果因子谱特征

Fig. 2 Factor profiles of PM_{2.5}, yielded from PMF analysis

图3为各污染源对受体PM_{2.5}中6种重金属元素含量的贡献占比。Cr元素主要来源于扬尘源,扬尘源对Cr的贡献占比达到73.0%;较高的贡献占比与扬尘因子谱中Cr浓度较高且扬尘源对PM_{2.5}贡献较大(17.5%)有关。工业源对Co贡献占比最高,为52.2%,其次为机动车源(28.6%);Co也被广泛认为来源于工业废气排放。As的排放受自然源和人为源共同影响^[30],但主要来自于工业金属冶炼、汽车尾气排放和矿物燃烧等人为源^[31,32],土壤中的As可进入大气加重污染^[33];PMF模型解析结果中,As元素的主要来源分别为燃煤(55.7%)、机动车(22.7%)和扬尘(17.5%)。Ni被认为主要来源于工业冶炼和燃油^[34],在此次解析结果中(图3),工业源对Ni元素贡献最高,贡献占比达到68.0%。同时,工业源也对Cd有着较高的源贡献,

贡献占比为65.2%;Cd主要来源于工业过程产生的废气,如冶炼、燃煤、垃圾焚烧等^[33]。燃煤源、机动车源对Pb的浓度贡献分别为53.8%、31.9%;Pb是机动车排放和金属冶炼的特征元素,但近年来无铅汽油的使用减少了机动车源Pb的排放^[35]。此外,二次源因子谱中含有Co和Ni等组分(Co、Ni在计算的二次源谱中含量很低),这是由于模型的不确定性引起的,并不具备真实的物理意义,因此在重金属来源贡献以及潜在致癌风险分析中,二次源均不进行讨论。

2.4 重金属元素致癌风险源贡献

关于重金属元素健康风险的研究较多,但关于污染源的致癌风险的研究很少。本文中的健康风险只对致癌风险部分进行讨论。本研究表明,呼吸是人体暴露于环境中的一个最重要的途径,因此本文

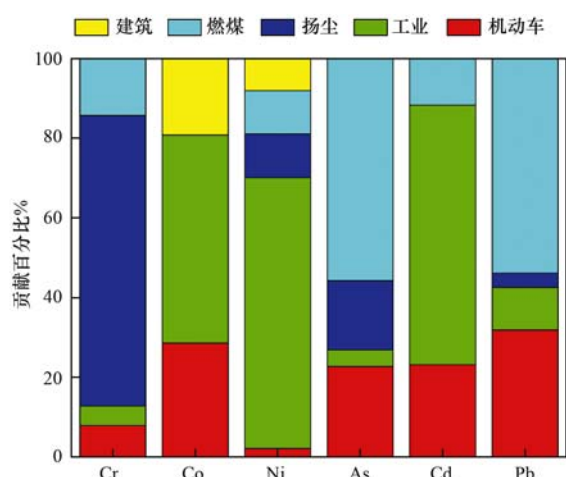


图3 各污染源对重金属元素贡献百分比

Fig. 3 Contributions of sources to heavy metals in PM_{2.5}

致癌毒性重点只考虑呼吸过程的影响。由于缺乏 Pb 的 SFI 值(斜率系数), 本研究只计算了 Cr、Co、Ni、As、Cd 这 5 种元素的致癌毒性。

图 4 为不同污染源(不包括二次源)的致癌风险值(R_i)。整体上, As、Cr 的致癌风险值高于 Cd、Co、Ni。对于 As 来说, 燃煤源对其致癌风险值贡献较其他源为高, 为 8.7×10^{-6} , 可能与燃煤谱中 As 浓度较高有关(图 2); 其次机动车和扬尘的致癌风险贡献较高, 分别为 3.6×10^{-6} 、 2.7×10^{-6} 。工业源对 Cd 的致癌风险值贡献最高(1.7×10^{-6}), 其次为机动车(5.9×10^{-7})、燃煤(3.0×10^{-7}), 虽然工业源因子谱中 Cd 浓度并不高, 但工业源对 Cd 浓度贡献占比较高(图 3), 因此导致工业对 Cd 致癌风险值较高。Co 的致癌风险值整体较低, 受工业源影响最大, 工业源致癌风险值贡献为 4.3×10^{-7} 。Cr 的致癌风险值则整体较高, 显著受到扬尘源的影响, 扬尘对其 R_i 值的贡献达到 2.0×10^{-4} ; 其次是燃煤源, 其贡献值为 9.2×10^{-6} 。Ni 的致癌风险值

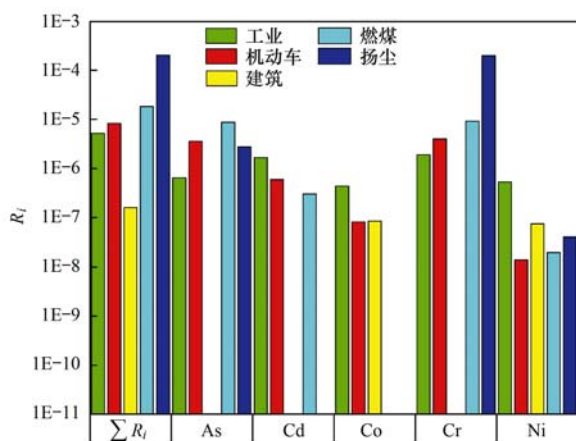


图4 不同污染源的致癌风险

Fig. 4 Cancer risks of the sources of heavy metals

主要受到工业源影响, 为 5.3×10^{-7} 。

不同污染源对 5 种重金属元素致癌风险值加和 ($\sum R_i$) 的贡献大小依次为扬尘源 (2.1×10^{-4})、燃煤源 (1.8×10^{-5})、机动车 (8.2×10^{-6})、工业源 (5.2×10^{-6})、建筑尘 (1.6×10^{-7})。在解析出的各个源类中, 扬尘源和燃煤源为 5 种金属元素致癌风险值加和的主要贡献源, 尤其是扬尘源, 虽然对扬州市 PM_{2.5} 的质量浓度贡献并不是最高, 但其致癌风险值加和最高, 这也表明在扬州市扬尘源是可能影响人体健康的重要污染源类, 值得关注。

3 结论

(1) 扬州市 2016 年全年 PM_{2.5} 的主要来源及贡献占比依次为二次源贡献 (37.7%)、燃煤源 (19.4%)、扬尘 (17.5%)、机动车 (16.9%)、建筑尘 (5.2%)、工业源 (3.4%)。

(2) 6 种重金属元素全年平均浓度为 Pb ($64.4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)、Cr ($25.24 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)、As ($6.36 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)、Ni ($5.36 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)、Cd ($3.34 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)、Co ($1.21 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)。扬尘源对 Cr 的贡献占比为 73.0%。As 的主要来源分别为燃煤 (55.7%)、机动车 (22.7%) 和扬尘 (17.5%)。工业源对 Co 浓度贡献最高, 为 52.2%, 其次为机动车源 (28.6%)。燃煤源、机动车源对 Pb 的浓度贡献分别为 53.8%、31.9%。工业源对 Ni、Cd 贡献最高, 分别为 68.0%、65.2%。

(3) 根据各污染源对 5 种金属元素致癌风险值加和 ($\sum R_i$) 的计算结果可知, 不同污染源的健康风险依次为: 扬尘源、燃煤源、机动车、工业源、建筑尘。整体上, 扬尘源和燃煤源对重金属健康风险较其他源为高, 可能因为该源类贡献占比大, 且其源谱中重金属元素浓度较高。

参考文献:

- [1] Sørensen M, Daneshvar B, Hansen M, et al. Personal PM_{2.5} exposure and markers of oxidative stress in blood [J]. Environmental Health Perspectives, 2003, 111 (2): 161-166.
- [2] 张莹, 王式功, 贾旭伟, 等. 气温与 PM_{2.5} 协同作用对疾病急诊就诊人数的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(8): 3175-3182.
Zhang Y, Wang S G, Jia X W, et al. Synergetic effect of mean temperature and PM_{2.5} on emergency room visits for different diseases [J]. China Environmental Science, 2017, 37 (8): 3175-3182.
- [3] 吴兑, 刘启汉, 梁延刚, 等. 粤港细粒子 (PM_{2.5}) 污染导致能见度下降与灰霾天气形成的研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2660-2669.
Wu D, Liu Q H, Liang Y G, et al. Hazy weather formation and visibility deterioration resulted from fine particulate (PM_{2.5})

- pollutions in Guangdong and Hong Kong [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(11): 2660-2669.
- [4] Abrahams P W. Soils; their implications to human health [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **291**(1-3): 1-32.
- [5] 杨孝智, 陈扬, 徐殿斗, 等. 北京地铁站灰尘中重金属污染特征及健康风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(6): 944-950.
- Yang X Z, Chen Y, Xu D D, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution and health risk assessment in subway dust in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(6): 944-950.
- [6] 唐荣莉, 马克明, 张育新, 等. 北京城市道路灰尘重金属污染的健康风险评价 [J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(8): 2006-2015.
- Tang R L, Ma K M, Zhang Y X, *et al.* Health risk assessment of heavy metals of street dust in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(8): 2006-2015.
- [7] Thomas L D K, Hodgson S, Nieuwenhuijsen M, *et al.* Early kidney damage in a population exposed to cadmium and other heavy metals [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2009, **117**(2): 181-184.
- [8] 胡子梅, 王军, 陶征楷, 等. 上海市 PM_{2.5} 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_{2.5}, Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(12): 3399-3406.
- [9] 秦鑫, 张泽锋, 李艳伟, 等. 南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4467-4474.
- Qin X, Zhang Z F, Li Y W, *et al.* Sources analysis of heavy metal aerosol particles in north suburb of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4467-4474.
- [10] Li H M, Wang J H, Wang Q G, *et al.* Chemical fractionation of arsenic and heavy metals in fine particle matter and its implications for risk assessment: A case study in Nanjing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **103**: 339-346.
- [11] Peng X, Shi G L, Liu G R, *et al.* Source apportionment and heavy metal health risk (HMR) quantification from sources in a southern city in China, using an ME2-HMR model [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **221**: 335-342.
- [12] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values [J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [13] Amato F, Hopke P K. Source apportionment of the ambient PM_{2.5} across St. Louis using constrained positive matrix factorization [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **46**: 329-337.
- [14] Amato F, Pandolfi M, Escrig A, *et al.* Quantifying road dust resuspension in urban environment by multilinear engine: a comparison with PMF2 [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(17): 2770-2780.
- [15] USEPA. Soil screening guidance: technical background document [M]. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 1996.
- [16] 李法云, 胡成, 张营, 等. 沈阳市街道灰尘中重金属的环境影响与健康风险评价 [J]. *气象与环境学报*, 2010, **26**(6): 59-64.
- Li F Y, Hu C, Zhang Y, *et al.* Environmental impact and health risk assessment of heavy metals in street dust in Shenyang, Liaoning province [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2010, **26**(6): 59-64.
- [17] Ferreira-Baptista L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(25): 4501-4512.
- [18] 张晓雨. 中国中东部地区典型城市大气细颗粒物中化学组成特征及来源解析研究 [D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [19] 王念飞. 苏州市 PM_{2.5} 浓度及其化学组分的时空分布特征 [D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [20] 徐玢花. 上海 PM_{2.5} 中水溶性有机氮的浓度特征和来源解析 [D]. 上海: 上海大学, 2015.
- [21] 陈文聪. 杭州地区大气颗粒物污染特征与来源解析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [22] Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1998.
- [23] Wang J, Hu Z M, Chen Y Y, *et al.* Contamination characteristics and possible sources of PM₁₀ and PM_{2.5} in different functional areas of Shanghai, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **68**: 221-229.
- [24] Zhang J, Hua P, Krebs P. Influences of land use and antecedent dry-weather period on pollution level and ecological risk of heavy metals in road-deposited sediment [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **228**: 158-168.
- [25] Khorshid M S H, Thiele-Bruhn S. Contamination status and assessment of urban and non-urban soils in the region of Sulaimani City, Kurdistan, Iraq [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**: 1171.
- [26] 杨丽萍, 陈发虎. 兰州市大气降尘污染物来源研究 [J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(4): 499-502.
- Yang L P, Chen F H. Study on the source apportionment of atmospheric dust pollutants in Lanzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, **22**(4): 499-502.
- [27] 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.
- [28] Hu X, Zhang Y, Ding Z H, *et al.* Bioaccessibility and health risk of arsenic and heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn) in TSP and PM_{2.5} in Nanjing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **57**: 146-152.
- [29] 王苏蓉, 喻义勇, 王勤耕, 等. 基于 PMF 模式的南京市大气细颗粒物源解析 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(12): 3535-3542.
- Wang S R, Yu Y Y, Wang Q G, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in Nanjing by PMF [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(12): 3535-3542.
- [30] De La Campa A M S, De La Rosa J D, Sánchez-Rodas D, *et al.* Arsenic speciation study of PM_{2.5} in an urban area near a copper smelter [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(26): 6487-6495.
- [31] Wang S L, Mulligan C N. Occurrence of arsenic contamination in Canada: sources, behavior and distribution [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **366**(2-3): 701-721.
- [32] Hedberg E, Gidhagen L, Johansson C. Source contributions to PM₁₀ and arsenic concentrations in Central Chile using positive matrix factorization [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(3): 549-561.
- [33] 周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 等. 2011~2012 年北京大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4054-4060.
- Zhou X M, Zheng N J, Li Y H, *et al.* Chemical characteristics

- and sources of heavy metals in fine particles in Beijing in 2011-2012[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4054-4060.
- [34] 王伟, 孔少飞, 刘海彪, 等. 南京市春节前后大气 PM_{2.5} 中重金属来源及健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(7): 2186-2195.
- Wang W, Kong S F, Liu H B, *et al.* Sources and risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} around 2014 Spring Festival in Nanjing[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(7): 2186-2195.
- [35] Bressi M, Sciare J, Gherzi V, *et al.* Sources and geographical origins of fine aerosols in Paris (France) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **14**(16): 8813-8839.

欢迎订阅 2019 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行人,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2019 年全年 12 期。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjlx@rcees.ac.cn;网址:www.hjlx.ac.cn

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> (532)
Source Apportionment and Heath Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> (540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> (558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> (567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> (573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading ...	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> (603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> (625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> (633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> (658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> (669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> (677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> (685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> (701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> (724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Juan, <i>et al.</i> (730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> (738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> (747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> (754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> (761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> (783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> (791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> (799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> (816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> (823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrosation System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> (845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> (853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> (859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> (869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> (876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> (885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> (904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> (915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> (934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> (945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> (953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> (978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> (987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> (994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1003)