

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.9

第40卷 第9期

目次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)
郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析	郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)
济南市背景区域大气 PM _{2.5} 污染特征及其对能见度的影响	别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中多环芳烃来源解析及健康风险评估	刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875)
2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势	刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)
长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征	赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)
燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征	杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)
高速公路沿线 PM _{2.5} 中重金属污染特征	李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)
北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险	胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)
风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用	秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (3935)
京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)
成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱	周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)
工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估	孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)
典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析	王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)
不同方法制备 Co ₃ O ₄ 催化剂 CO-SCR 性能及机制	仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)
全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征	崔杰文, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)
江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笪文怡, 季鹏飞 (4000)
城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素: 以宁波市小浃江为例	高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)
水华对沉积物中氮的转化和去除的影响	肖琳, 杨佳怡 (4018)
沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性	刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)
汾河下游雨季硝酸盐污染源解析	汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)
新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)
基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性	张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)
FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较: 以贵州三座水库为例	陈倩, 李秋华, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)
天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制	邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)
镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb ²⁺ 的去除	何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)
2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb ²⁺	晋圣兆, 向阳, 张隽琦, 张凯, 吉庆华 (4091)
钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验	白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)
大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除	贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建峰 (4105)
A ² /O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化	荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)
上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能	杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)
微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析	张若晨, 陈川, 邵博, 王威, 徐熙俊, 任南琪 (4128)
基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验	张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)
聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比	易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)
厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学	唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)
Ca ²⁺ 对污泥硝化活性和絮凝沉降性能的影响	张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)
从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷	畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)
信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响	徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏清旋 (4177)
海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响	胡越航, 宣丽霞, 裴琼芬 (4185)
耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析	赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)
稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响	保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)
地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响	陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)
氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N ₂ O 排放的影响	吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)
三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N ₂ O) 分布和释放	程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)
沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响	朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)
新建铅蓄电池集聚区对周边土壤环境的影响: 基于重金属空间特征	丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)
不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响	杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)
基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法	张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)
缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征	罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明 (4270)
西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响	田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)
调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析	彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)
海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源	陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)
《环境科学》征订启事 (3923) 《环境科学》征稿简则 (3941) 信息 (4041, 4051, 4229)	

高速公路沿线 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征

李晓宝, 廖祖文, 赵红*, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍

(江西省交通科学研究所, 南昌 330200)

摘要: 为研究高速公路沿线 $PM_{2.5}$ 中重金属的污染特征, 于2018年3~8月分3次集中采集南昌市周边3条高速公路(昌樟、昌铜和温厚)的服务区、收费站、隧道和公路沿线的 $PM_{2.5}$ 样品, 运用电感耦合等离子体质谱联用仪(ICP-MS)监测了 $PM_{2.5}$ 中6种重金属(Cu、Zn、Pb、Cd、Cr和Ni)浓度, 分析其污染状况和分布情况, 并利用地累积指数法、潜在生态风险指数法评价其污染特征、潜在生态危害程度。结果表明, 3条高速公路服务区 and 收费站的 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{2.5}$ 中重金属均未表现出显著差异。高速公路沿线中 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{2.5}$ 中的重金属显示为特长隧道 > 长隧道 > 公路沿线、服务区和收费站, 重金属浓度从高到低依次为 Zn ($3.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、Pb ($10.2 \times 10^{-2} \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、Cr ($6.8 \times 10^{-2} \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、Cu ($3.5 \times 10^{-2} \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、Ni ($1.5 \times 10^{-2} \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和 Cd ($0.1 \times 10^{-2} \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。不同月份 $PM_{2.5}$ 及 $PM_{2.5}$ 中重金属浓度的显著差异可归结为温度和降水的影响。其中 $PM_{2.5}$ 的浓度与温度呈反相关, 而 $PM_{2.5}$ 中 Zn 浓度与温度呈极显著正相关, 主要是由于温度升高加重轮胎磨损和金属腐蚀。高速公路 $PM_{2.5}$ 中重金属污染程度和潜在生态危害程度表现为 Zn 和 Cd > Pb > Cu > Ni 和 Cr, 其中 Zn 和 Cd 污染及危害程度是评价标准中最严重的等级, 大气污染防治计划应着重考虑交通源的 Zn 和 Cd 污染。

关键词: 高速公路; $PM_{2.5}$; 重金属; 隧道; 收费站; 服务区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-3916-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811101

Pollution Characteristics of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ Near Highway

LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong*, PENG Cheng-hui, TAN Teng-fei, HUANG Ping

(Jiangxi Transportation Institute, Nanchang 330200, China)

Abstract: In this study, we evaluate the pollution characteristics of heavy metals in particulate matter with diameters less than $2.5 \mu\text{m}$ ($PM_{2.5}$) near highways. Three rounds of cluster sampling of $PM_{2.5}$ were conducted on three highways, Changzhang, Changtong, and Wenhou, in peri-urban areas near Nanchang from March to August 2018. The sampling sites included service areas, toll stations, tunnels, and areas near the highway. The concentrations of six heavy metals including Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, and Ni in $PM_{2.5}$ were analyzed using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The pollution and distribution of heavy metals in $PM_{2.5}$ near the highway were analyzed, and that pollution characteristics and the level of possible ecological jeopardy were assessed by using the Geoaccumulation Index and Potential Risk Index methods. No significant difference was observed in $PM_{2.5}$ or in heavy metals in $PM_{2.5}$ along highways with different traffic flow, but they differed significantly in among highway settings in the following order: super-long tunnels > long tunnels and area near the highway > service areas and toll stations. The heavy metal concentration in highways decreased in the following order: Zn ($3.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > Pb ($10.2 \times 10^{-2} \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > Cr ($6.8 \times 10^{-2} \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > Cu ($3.5 \times 10^{-2} \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > Ni ($1.5 \times 10^{-2} \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > Cd ($0.1 \times 10^{-2} \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). In accordance with the influence of temperature and precipitation, $PM_{2.5}$ and heavy metals in $PM_{2.5}$ showed significant variations among the monitoring months. The $PM_{2.5}$ concentration had a significant negative correlation with atmospheric temperature. We observed that $PM_{2.5}$ concentration was significantly lower from May to August than from March to April. The Zn concentration in $PM_{2.5}$ was more significant from May to August than from March to April. Pearson analysis showed a significant positive correlation between Zn in $PM_{2.5}$ with atmospheric temperature because elevated temperatures could aggravate wear and tear and metallic corrosion, which then prompts the emission of Zn. According to the Geoaccumulation Index and Potential Ecological Jeopardy Index, the level of pollution associated with heavy metals of $PM_{2.5}$ manifested in the following order: Zn and Cd > Pb > Cu > Ni and Cr. The pollution and degree of jeopardy associated with Zn and Cd were the most severe in the assessment criteria; therefore, the pollution by these elements and the sources of traffic should be noted in air pollution control plans. Super long tunnels, long tunnels, and areas near highways showed greater levels of pollution and higher potential ecological jeopardy than service areas and toll stations. The degree of pollution in densely populated service areas and toll stations was consistent across partially urban areas.

Key words: highway; $PM_{2.5}$; heavy metal; tunnel; toll station; service area

自2013年全国大范围连续高强度的大气污染事件后, 细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的污染已被高度关注, $PM_{2.5}$ 的研究也成为大气环境的研究热点之一。 $PM_{2.5}$ 指悬浮在空气中, 动力学当量直径不大于 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 由于其可直接通过呼吸道进入肺部, 故也称为可吸入颗粒物。有研究表明颗粒物的粒径越小其重金属元素的含量越高^[1], $PM_{2.5}$ 吸附的有

毒重金属(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn)很可能对人体健康造成潜在危害^[2, 3], 如Cu会引起记忆力减退,

收稿日期: 2018-11-15; 修订日期: 2019-03-08

基金项目: 江西省交通厅科技项目(2017R0025)

作者简介: 李晓宝(1983~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为交通环境监测与污染治理, E-mail: 24367210@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhaohuahua1985@126.com

可能导致肝功能异常; Zn 浓度过高引发动脉硬化; Cd 可引起肾损伤; Cr 和 Ni 易诱发人体细胞组织的癌变; Pb 能够伤害人体, 严重影响儿童的智力发育^[4].

近几年国内对于 $\text{PM}_{2.5}$ 重金属污染的研究多集中在城市或者郊区等大范围范围^[3,5~12], 主要的研究方向包括健康风险评价^[5,9~11], 污染特征研究^[7,8]及源解析方面^[6,12], 城市 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属主要污染源包括燃煤、工业、交通等. 而以交通为主要来源 $\text{PM}_{2.5}$ 研究报道较少, 其中 Hou 等^[13]和王成辉等^[14]对高速公路隧道的大气颗粒物进行研究, 分析了隧道内大气颗粒物的污染特征, 近期 Li 等^[15]探讨了高速公路收费站工作人员的重金属健康风险评价, 赵兴敏等^[16]分析了长春市高架桥公路的 $\text{PM}_{2.5}$ 重金属元素污染特征, 但其包括了除交通源外其他人为源的干扰. 截止 2017 年 4 月, 江西省机动车保有量已达 651 万辆, 其中汽车保有量突破 425 万辆, 以 615.3% 的增长速度成为全国私家车数量增长最快的省份. 近年来江西省高速公路建设迅猛发展, 2016 年底高速通车里程数已达到 6 000 km. 随着江西省及周边省份城市的快速发展, 以及高速公路客运量和货运量的攀升, 诸多人群长期往返于高速公路, 而目前国内对高速公路收费站、服务区 $\text{PM}_{2.5}$ 及其重金属相关研究鲜见报道. 因此, 基于前人的研究, 本文通过监测昌樟、昌铜和温厚这 3 条高速不同沿线的 $\text{PM}_{2.5}$ 及其中重金属 (Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 和 Ni) 浓度, 分析高速公路沿线 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属的污染水平及污染特征, 以期防治高速公路及大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属污染提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样地点

本研究选择南北走向的昌樟高速, 以及东西走向的昌铜和温厚高速, 这 3 条高速公路在建设时期、车流量和地形地势等方面均有较大差异, 可代表目前江西省高速公路的整体情况, 有利于展开高速公路 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属污染特征的研究.

3 条高速公路中服务区、收费站和隧道作为主要采样点, 昌樟高速选择胡家坊收费站和樟树服务区, 温厚高速选择丰厚收费站和南昌南服务区, 昌铜高速选择奉新收费站和奉新服务区, 昌铜高速昌奉段中拥有梅岭和萧峰两条隧道, 其中梅岭隧道长 3 430 m (属于特长隧道), 萧峰隧道长 1 197 m (属于长隧道), 因此本研究在两条隧道中心处采集 $\text{PM}_{2.5}$ 样品, 同时在两条隧道的公路沿线亦设置了采样点, 保证了 3 个采样点不受车流量的影响. 另

外, 选择距昌铜高速 1 km 以外的无工厂的张坊村竹林作为 $\text{PM}_{2.5}$ 的背景值. 具体的采样点如图 1 所示.

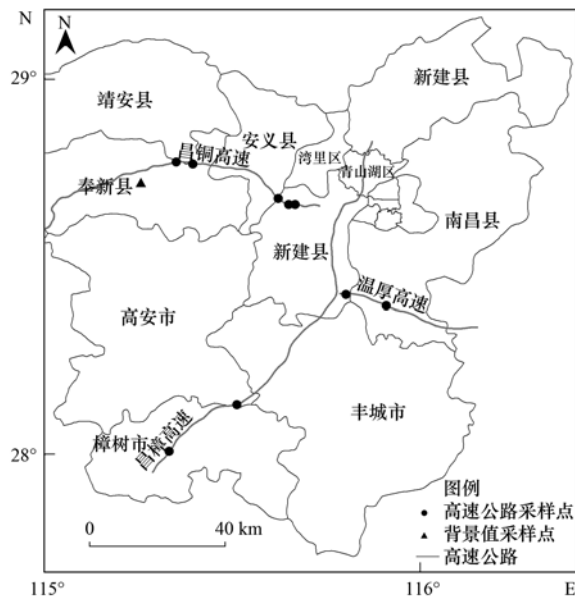


图1 高速公路 $\text{PM}_{2.5}$ 采样点

Fig. 1 $\text{PM}_{2.5}$ sampling sites on highway

1.2 采样方法

采用智能中流量空气总悬浮微粒采样器 (青岛崂山, TH-150C) 对高速公路沿线 $\text{PM}_{2.5}$ 样品进行采集, 使用的滤膜为聚丙烯滤膜, 采样高度距地面 1.5 m. 采样前后将聚丙烯膜放置恒温恒湿箱中恒重, 用精度为 0.01 mg 的天平称重, 并用铝箔纸封装保存于 -20°C 冰箱待分析. 采样时间从 2018 年 3 ~ 8 月, 每 2 个月集中采样 1 次, 服务区、收费站 (有电源) 连续 24 h 采样, 公路沿线、隧道内 (无电源) 连续 6 h 采样, 梅岭隧道、萧峰隧道及 2 条隧道公路沿线中 $\text{PM}_{2.5}$ 样品的采集保证同时进行. 采样期间, 用自动气象监测仪 (QT1010, 美国) 测定气温、湿度、风向、风速等气象参数. 采样期间的气象参数如表 1 所示.

1.3 样品的分析测定

$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度测定按《环境空气 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的测定 重量法》(HJ 618-2011) 进行. $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属浓度的样品处理按照《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 (ICP-MS)》(HJ 657-2013) 中的方法, 采用 ICP-MS (NexIon-350x, 美国) 分析 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 和 Ni 的质量浓度, 相应金属元素检出限分别为: 0.000 7、0.003、0.000 6、0.000 03、0.001 和 0.000 5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

1.4 数据分析

本研究主要采用地累积指数法、富集因子法及

表 1 采样期间的气象参数

Table 1 Partial metrological parameters during the sampling periods

采样地点	采样日期(月-日)	温度/℃	气压/kPa	相对湿度/%	风向	风速/m·s ⁻¹
昌铜	04-08~04-26	27.4~31.5	100.6	33.2~37.7	东南	0.7~1.0
	06-24~06-29	33.4~35.0	99.8	62.4~67.2	东北	1.2~2.0
	07-26~08-10	38.1~42.9	99.8	49.0~57.0	南	0.3~0.5
昌樟	03-26~03-28	21.6~30.0	101.5	63.4~70.6	西南	0.8~1.3
	06-26~06-28	35.4~36.7	100.1	54.1~55.9	西南	1.5~2.0
	08-26~08-28	34.0~34.0	100.1	40.0	南	0.5
温厚	03-22~03-24	24.3~28.8	101.5	41.0~46.2	东南	0.3~0.5
	06-24~06-26	34.5~36.1	100.4	51.8~63.2	东南	0.8~1.2
	08-22~08-24	32.0~32.0	100.3	5.01~54.0	东南	1.2~1.3

统计分析法分析高速公路沿线 PM_{2.5} 中重金属污染特征.

1.4.1 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, 目前地累积指数法常用于表征大气颗粒物中重金属的污染程度^[8, 9, 12], 计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{c_i}{k \times B_i}$$

式中, I_{geo} 为地累积指数, c_i 为 PM_{2.5} 中元素 i 的含量 (mg·kg⁻¹), B_i 是元素 i 的土壤背景值, 本研究采用的土壤背景值如表 2^[17], k 为考虑造岩运动可能引起背景值变动而加入的常数, 一般取值为 1.5.

PM_{2.5} 中元素的 I_{geo} 与污染程度的关系分级见表 3.

表 2 江西省重金属元素背景值/mg·kg⁻¹

Table 2 Background value of heavy metal elements/mg·kg⁻¹

项目	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni
参数值	20.8	69.0	32.1	0.1	48.0	19.0

表 3 地累积指数 I_{geo} 与污染程度分级

Table 3 Contamination degree corresponding to geoaccumulation index

等级	I_{geo}	污染程度
1	$I_{geo} \leq 0$	无污染
2	$0 < I_{geo} \leq 1$	轻微污染
3	$1 < I_{geo} \leq 2$	轻度污染
4	$2 < I_{geo} \leq 3$	中度污染
5	$3 < I_{geo} \leq 4$	偏重污染
6	$4 < I_{geo} \leq 5$	重度污染
7	$I_{geo} > 5$	严重污染

1.4.2 潜在生态风险指数法

目前该方法是大 气颗粒物中重金属潜在生态风险评价最为常用方法之一, 该方法定量划分出重金属的潜在生态风险等级, 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:

$$C_f^i = \frac{C^i}{C_n^i}$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i$$

$$RI = \sum_i^m E_r^i$$

式中, C^i 为重金属 i 的实测浓度; C_n^i 为重金属 i 的土壤背景值; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数, 被用来反映重金属的毒性水平以及生物对重金属敏感程度, Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 和 Ni 的毒性响应系数分别为 5、1、5、30、2 和 5^[18], E_r^i 为潜在生态危害指数, RI 为多种重金属元素的潜在生态风险指数. 重金属污染潜在生态危害指数及风险指数分级标准列于表 4.

表 4 潜在生态危害的分级评价标准

Table 4 Classification criteria of the potential ecological jeopardy assessment

E_r^i	RI	生态危害程度
$E_r^i < 40$	$RI < 150$	轻微生态危害
$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中等生态危害
$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	较高生态危害
$160 \leq E_r^i < 320$	$600 \leq RI < 1200$	高生态危害
$E_r^i \geq 320$	$RI \geq 1200$	极高生态危害

1.4.3 统计分析

不同采集时间不同采集地点 PM_{2.5} 中重金属浓度的方差分析采用 Duncan 法, PM_{2.5} 中重金属浓度与温度、湿度等相关分析采用 Pearson 相关分析法, 应用的软件为 SPSS 16.0, 采用 SigmaPlot 10.0 软件制作相关图表.

2 结果与讨论

2.1 高速公路沿线 PM_{2.5} 中重金属浓度变化

本研究监测了不同高速公路中 PM_{2.5} 浓度及其重金属浓度 (表 5), 结果表明昌樟、昌铜和温厚这 3 条高速公路沿线的 PM_{2.5} 浓度及其重金属浓度均高于乡村背景. 尽管 3 条高速公路的收费站和服务

区有较大的车流量差异(昌樟、昌铜和温厚日车流量均值分别为15 000、13 000和4 700辆),但3条高速中收费站和服务区的PM_{2.5}浓度及其重金属浓度均未呈现显著差异,主要由于收费站和服务区大气流通良好,大气PM_{2.5}未受车流量影响.而通过监测昌铜高速沿线不同设施中PM_{2.5}及其重金属浓度,发现监测结果显示显著性差异,其中PM_{2.5}浓度梯度分别为特长隧道(100 μg·m⁻³)>长隧道(74 μg·m⁻³)>公路沿线、服务区和收费站(45~53 μg·m⁻³).重金属的浓度梯度显示为特长隧道>长隧道和公路沿线>服务区和收费站.隧道是一个半封闭且大气污染物不易扩散的微环境,并且隧道长度越长,大气污染物扩散越困难,因此特长隧道的大气污染物浓度高于短隧道.本文公路沿线PM_{2.5}中重金属浓度高于服务区和收费站,这可能与采样地点处于两个隧道之间,通风条件较差有关.

高速公路沿线的大气PM_{2.5}中重金属浓度从高到低依次为Zn(3.8 μg·m⁻³)、Pb(10.2×10⁻² μg·m⁻³)、Cr(6.8×10⁻² μg·m⁻³)、Cu(3.5×10⁻² μg·m⁻³)、Ni(1.5×10⁻² μg·m⁻³)和Cd(0.1×10⁻² μg·m⁻³),见表5.邵莉等^[19]测得南昌公路沿线大气PM₁₀中重金属浓度从高到低依次是Zn、Pb、Cu和Cd;Li等^[20]测得香港街道灰尘中重金属浓度从高到低依次为Zn、Pb、Cu和Cd;Adamiec等^[21]和Lanzerstorfer^[22]分别对波兰和奥地利街道灰尘进行粒径分级,测得最小粒径(<20 μm)灰尘中的重金属浓度从高到低均为Zn、Pb、Cu和Cd.另外,以本文的研究结果与南方周边城市重庆^[7]、成都^[8,9]、南昌^[10]、上海、南京、杭州和广州^[11,12]等地区相比,高速公路沿线PM_{2.5}中Zn的平均浓度较城市大气的平均浓度高3倍以上.研究结果说明含Pb汽油停止使用之后,Zn已成为高速公路大气PM_{2.5}中重金属的首要污染物.

表5 高速公路沿线PM_{2.5}中重金属浓度¹⁾/μg·m⁻³
Table 5 Heavy metal concentrations of PM_{2.5} near highway/μg·m⁻³

项目	PM _{2.5}	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni
昌铜(奉新收费站)	47±10	1.8×10 ⁻² ± 0.4×10 ⁻²	3.0±1.6	6.1×10 ⁻² ± 3.1×10 ⁻²	0.09×10 ⁻² ± 0.01×10 ⁻²	3.3×10 ⁻² ± 0.80×10 ⁻²	0.84×10 ⁻² ± 0.17×10 ⁻²
昌铜(奉新服务区)	45±40	1.5×10 ⁻² ± 0.4×10 ⁻²	2.6±1.5	4.8×10 ⁻² ± 2.8×10 ⁻²	0.07×10 ⁻² ± 0.01×10 ⁻²	2.9×10 ⁻² ± 0.32×10 ⁻²	0.74×10 ⁻² ± 0.01×10 ⁻²
昌铜(特长隧道)	100±53	7.4×10 ⁻² ± 1.4×10 ⁻²	6.8±2.7	19×10 ⁻² ± 12×10 ⁻²	0.16×10 ⁻² ± 0.05×10 ⁻²	15×10 ⁻² ± 2.9×10 ⁻²	3.2×10 ⁻² ± 0.72×10 ⁻²
昌铜(公路沿线)	53±17	6.0×10 ⁻² ± 1.6×10 ⁻²	4.0±2.7	18×10 ⁻² ± 12×10 ⁻²	0.10×10 ⁻² ± 0.06×10 ⁻²	15×10 ⁻² ± 4.4×10 ⁻²	2.7×10 ⁻² ± 2.3×10 ⁻²
昌铜(长隧道)	74±13	6.0×10 ⁻² ± 0.5×10 ⁻²	6.3±3.8	18×10 ⁻² ± 14×10 ⁻²	0.16×10 ⁻² ± 0.06×10 ⁻²	12×10 ⁻² ± 2.1×10 ⁻²	2.9×10 ⁻² ± 0.45×10 ⁻²
昌樟(胡家坊收费站)	59±16	2.6×10 ⁻² ± 1.3×10 ⁻²	3.2±1.7	6.6×10 ⁻² ± 3.8×10 ⁻²	0.09×10 ⁻² ± 0.06×10 ⁻²	3.9×10 ⁻² ± 1.7×10 ⁻²	1.0×10 ⁻² ± 0.46×10 ⁻²
昌樟(樟树服务区)	47±24	2.6×10 ⁻² ± 1.4×10 ⁻²	2.8±1.7	6.2×10 ⁻² ± 3.4×10 ⁻²	0.10×10 ⁻² ± 0.6×10 ⁻³	3.9×10 ⁻² ± 1.8×10 ⁻²	1.0×10 ⁻² ± 0.50×10 ⁻²
温厚(丰厚收费站)	70±35	1.9×10 ⁻² ± 0.3×10 ⁻²	3.0±1.2	2.8×10 ⁻² ± 5.8×10 ⁻²	0.09×10 ⁻² ± 0.05×10 ⁻²	2.8×10 ⁻² ± 0.42×10 ⁻²	0.73×10 ⁻² ± 0.06×10 ⁻²
温厚(南昌南服务区)	50±25	1.8×10 ⁻² ± 0.3×10 ⁻²	2.5±31	6.6×10 ⁻² ± 3.5×10 ⁻²	0.08×10 ⁻² ± 0.04×10 ⁻²	2.9×10 ⁻² ± 0.55×10 ⁻²	0.53×10 ⁻² ± 0.04×10 ⁻²
平均值	64±37	3.5×10 ⁻² ± 2.3×10 ⁻²	3.8±2.2	10.2×10 ⁻² ± 9.1×10 ⁻²	0.10×10 ⁻² ± 0.05×10 ⁻²	6.8×10 ⁻² ± 5.4×10 ⁻²	1.5×10 ⁻² ± 1.3×10 ⁻²
乡村背景	18	0.9×10 ⁻²	0.3	1.3×10 ⁻²	1.9×10 ⁻⁴	1.2×10 ⁻²	0.3×10 ⁻²
南方城市 ^[6~11]	41~165	2.0×10 ⁻² ~ 34×10 ⁻²	0.2~2.1	0.1~0.45	0.2×10 ⁻² ~ 1.3×10 ⁻²	1.4×10 ⁻² ~ 5.4×10 ⁻²	0.3×10 ⁻² ~ 2.3×10 ⁻²

1)表内数值为平均值±标准差

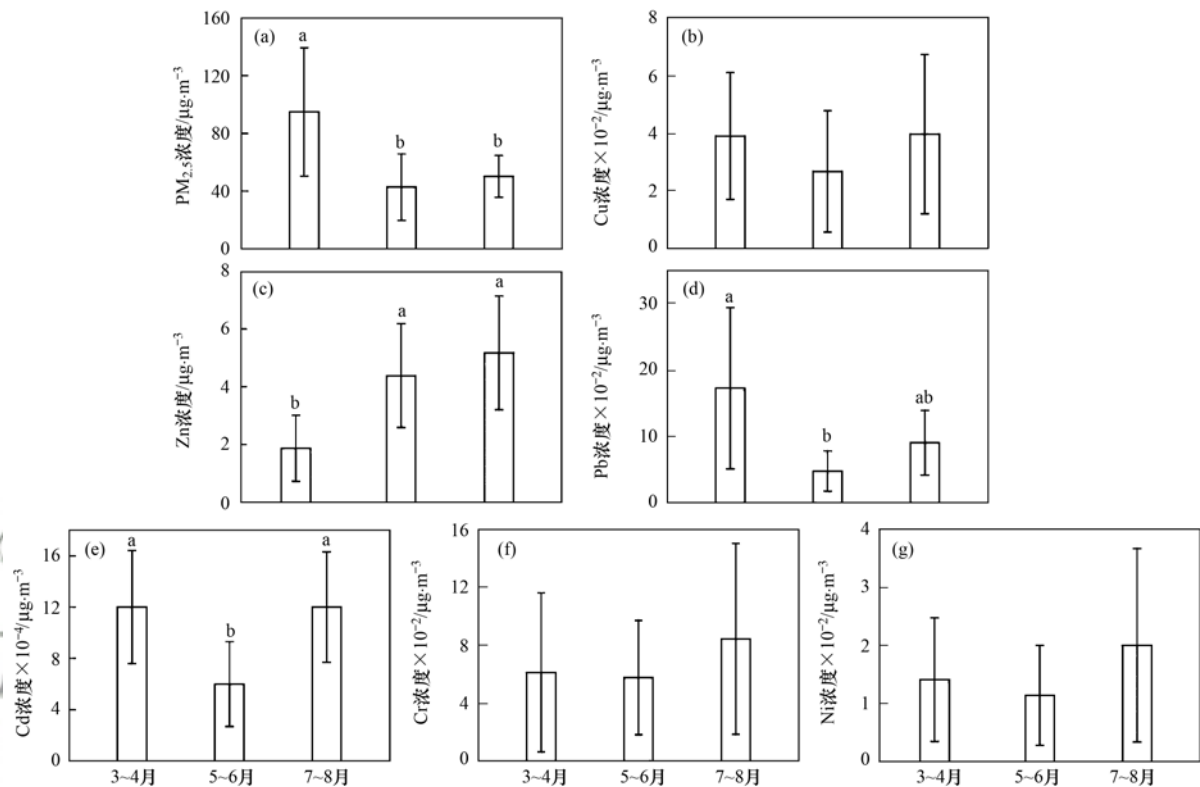
本文研究结果表明,不同月份的PM_{2.5}浓度及其重金属浓度呈现显著差异(图2),而不同月份的监测结果可用气象因子与PM_{2.5}浓度及其重金属浓度的相关性来解释.如3~4月气温偏低时,虽然其车流量较5~8月低7%~25%,但公路沿线的PM_{2.5}浓度仍较5~8月高1倍左右(图2).这是由于气温升高带来的气象变化及高植被丰富度有利于

PM_{2.5}及部分PM_{2.5}中重金属浓度的吸收扩散.诸多研究证实PM_{2.5}呈现“冬高夏低,春秋居中”的态势^[23,24],这与气温对PM_{2.5}的影响趋势一致.另外江西省5~6月降水丰富,雨水的冲刷致使PM_{2.5}中重金属浓度降低^[19].

交通源PM_{2.5}有3个主要来源:①燃油燃烧所释放的尾气;②交通扬尘(包括轮胎磨损、汽车零件

摩擦、道路尘土沉降)；③道路施工建设形成的扬尘源，而交通扬尘对PM_{2.5}浓度增高的贡献比尾气排放更大^[25]。交通扬尘如轮胎磨损、汽车零件摩擦与Zn、Cd和Cu有关。防腐镀Zn汽车板的广泛使用产生大量含Zn粉尘。机动车尾气排放、燃油燃烧与Pb、Cr、Ni和Cu有关^[20, 26]。表6为PM_{2.5}中重金属浓度与气象因子的相关性分析结果，其中Zn、Pb、Cr、Cu、Ni和Cd之间均有显著的相关性，

说明本研究监测的重金属均与交通扬尘关系密切。由表6可知，PM_{2.5}中Zn浓度与温度呈极显著正相关，这是由于轮胎添加剂、润滑油添加剂均有大量的含Zn化合物。据Li等^[20]的报道，气温较高时，轮胎磨损加重，释放更多的Zn粉进入大气，同时润滑油在高温下与空气氧化产生的酸腐蚀金属也会产生大量的Zn粉^[26]，所以公路沿线PM_{2.5}中的Zn浓度在5~8月较3~4月高。



不同小写字母表示不同月份PM_{2.5}及PM_{2.5}中重金属浓度存在显著性差异

图2 高速公路沿线不同月份PM_{2.5}中重金属浓度

Fig. 2 Heavy metal concentrations of PM_{2.5} in different months near highway

表6 PM_{2.5}中重金属浓度与气象因子的相关性¹⁾

Table 6 Correlation between the heavy metal concentrations of PM_{2.5} and meteorological parameters

	PM _{2.5}	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	温度	湿度	气压
PM _{2.5}	1.00									
Cu	0.31	1.00								
Zn	-0.34	0.61**	1.00							
Pb	0.63**	0.72**	0.14	1.00						
Cd	0.48*	0.82**	0.55**	0.79**	1.00					
Cr	-0.29	0.92**	0.72**	0.66**	0.77**	1.00				
Ni	-0.11	0.89**	0.76**	0.61**	0.76**	0.91**	1.00			
温度	-0.60**	-0.59*	0.54**	-0.80**	-0.48*	0.33	0.19	1.00		
湿度	-0.35	-0.04	-0.07	-0.54**	-0.40	-0.14	-0.22	0.18	1.00	
气压	0.64**	0.62**	-0.53*	0.70**	0.41	-0.42	-0.24	-0.86**	-0.04	1.00

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

2.2 公路沿线PM_{2.5}中重金属污染特征评估

高速公路沿线PM_{2.5}中重金属元素的I_{geo}结果见表7，从I_{geo}的结果来看，PM_{2.5}中重金属污染程度为

Zn、Cd > Pb > Cu > Cr > Ni。Zn和Cd在高速公路沿线的I_{geo}处于6.39~9.63之间，全部表现为严重污染，可见Zn和Cd是高速公路中污染程度最高的重

金属，这与赵兴敏等^[16]在长春典型高架公路 PM_{2.5} 中重金属污染特征的研究结果基本一致。Pb、Cu、Cr 和 Ni 的 I_{geo} 分别处于 4.16 ~ 6.08、3.33 ~ 4.98、2.83 ~ 4.46 和 2.24 ~ 3.77，Ni 在 6 种重金属中的 I_{geo} 污染程度最低，表现为中度至偏重污染。从高速

公路沿线来看，PM_{2.5} 中重金属污染程度表现为超长隧道、公路沿线、长隧道 > 收费站、服务区，可能由于收费站和服务区空间相对大，大气流通良好。另外，收费站和服务区乔、灌木的绿化植被配置更为丰富，对 PM_{2.5} 也有一定的滞尘作用。

表 7 高速公路沿线 PM_{2.5} 中各重金属元素的地累积指数 (I_{geo})

Table 7 Geoaccumulation index of heavy metal elements in PM_{2.5} near highway

重金属	收费站		服务区		超长隧道		公路沿线		长隧道	
	I_{geo}	污染程度	I_{geo}	污染程度	I_{geo}	污染程度	I_{geo}	污染程度	I_{geo}	污染程度
Cu	3.33	偏重污染	3.76	偏重污染	4.62	重度污染	4.98	重度污染	4.73	重度污染
Zn	8.74	严重污染	9.12	严重污染	9.46	严重污染	9.37	严重污染	9.63	严重污染
Pb	4.16	重度污染	4.66	重度污染	5.16	严重污染	6.08	严重污染	5.39	严重污染
Cd	6.39	严重污染	6.86	严重污染	6.75	严重污染	6.91	严重污染	7.13	严重污染
Cr	2.83	中度污染	3.38	偏重污染	4.40	重度污染	4.42	重度污染	4.46	重度污染
Ni	2.24	中度污染	2.41	中度污染	3.55	偏重污染	3.77	偏重污染	2.77	中度污染

高速公路沿线 PM_{2.5} 中重金属元素含量潜在生态危害评价结果如表 8 所示，从重金属元素的污染程度来看，PM_{2.5} 中重金属元素的潜在生态危害评价程度依次为 Cd、Zn、Pb、Cu、Ni 和 Cr。潜在生态危害程度最高的是 Cd 和 Zn，其次为 Pb、Cu、Cr 和 Ni。不同高速公路沿线 6 种重金属综合的潜在生态风险指数值 (RI) 均超过 1 200，说明交通源 PM_{2.5} 对高速公路沿线存在极强的潜在生态危害，其中重金属 Cd 的毒性水平最高^[18]，并且 Cd 对 RI 的贡献值最大。现有报道指出城市 PM_{2.5} 中重金属 Cd 的潜在

生态危害指数也远超过其他元素^[8]。未来在治理大气环境过程中，要注意加强对交通源污染物 Cd 和 Zn 的治理，以减少对生态环境和人体的损害。

从高速公路沿线来看，PM_{2.5} 中重金属潜在生态危害评价依次为超长隧道、公路沿线、长隧道 > 收费站、服务区，潜在生态危害评价的结果趋势与 I_{geo} 一致。本研究中收费站和服务区与成都^[8]、太原^[27] 和兰州^[28] 等城市 PM_{2.5} 中的 Pb、Cu、Ni 和 Cr 元素的危害程度较为一致，证明高速公路收费站和服务区中大气重金属污染与城市较为接近。

表 8 高速公路沿线 PM_{2.5} 中各重金属元素的潜在生态危害指数 (E_n^i)

Table 8 Potential ecological jeopardy index (E_n^i) of heavy metal in PM_{2.5} near highway

重金属	收费站		服务区		超长隧道		公路沿线		长隧道	
	E_n^i	危害程度	E_n^i	危害程度	E_n^i	危害程度	E_n^i	危害程度	E_n^i	危害程度
Cu	82	较高	112	高	199	高	268	高	200	高
Zn	834	极高	1 289	极高	1 229	极高	1 104	极高	1 319	极高
Pb	150	较高	198	高	274	高	389	极高	357	极高
Cd	4 391	极高	6 031	极高	5249	极高	5 551	极高	6 564	极高
Cr	25	轻微	37	轻微	67	中等	86	较高	68	中等
Ni	41	中等	54	中等	96	较高	119	较高	105	较高

3 结论

(1) 不同高速公路沿线的 PM_{2.5} 及其重金属浓度梯度为特长隧道 > 长隧道 > 公路沿线 > 服务区 和收费站，而车流量差异较大的 3 条高速公路中服务区和收费站的 PM_{2.5} 及其重金属浓度未发现显著性差异。

(2) 由于温度和降水的双重影响，不同月 PM_{2.5} 及 PM_{2.5} 中重金属浓度表现出显著差异，其中 PM_{2.5} 的浓度与温度呈反相关，而 PM_{2.5} 中 Zn 浓度与温度呈极显著正相关，主要是由于温度升高加重轮胎磨损和金属腐蚀。

(3) 高速公路 PM_{2.5} 中重金属污染程度和潜在

生态危害均表现为 Zn、Cd > Pb > Cu > Ni > Cr。重金属 Cd 的潜在生态危害指数远超过其他元素，其次为 Zn。未来在治理大气环境过程中，应注意加强对交通源污染物 Cd 和 Zn 的治理。

(4) 高速公路沿线的重金属污染及危害程度依次为超长隧道、公路沿线、长隧道 > 收费站、服务区，收费站与服务区 PM_{2.5} 的重金属污染程度与城市较为接近，而隧道和公路沿线的潜在生态危害程度较高。

参考文献：

[1] Talbi A, Kerchich Y, Kerbach R, et al. Assessment of annual air pollution levels with PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ and associated heavy metals in Algiers, Algeria[J]. Environmental Pollution, 2018, 232: 252-263.

- [2] Zhang J, Wu L, Fang X Z, *et al.* Elemental composition and health risk assessment of PM₁₀ and PM_{2.5} in the roadside microenvironment in Tianjin, China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, **18**(7): 1817-1827.
- [3] Zeng X, Xu X J, Zheng X B, *et al.* Heavy metals in PM_{2.5} and in blood, and children's respiratory symptoms and asthma from an e-waste recycling area[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **210**: 346-353.
- [4] Bekteshi L, Lazo P, Qarri F, *et al.* Application of the normalization process in the survey of atmospheric deposition of heavy metals in Albania through moss biomonitoring [J]. *Ecological Indicators*, 2015, **56**: 50-59.
- [5] Zhang Y Y, Ji X T, Ku T T, *et al.* Heavy metals bound to fine particulate matter from northern China induce season-dependent health risks: A study based on myocardial toxicity [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **216**: 380-390.
- [6] Yang J, Song D, Fang D L, *et al.* Drivers of consumption-based PM_{2.5} emission of Beijing: a structural decomposition analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **219**: 734-742.
- [7] 焦姣, 姬亚芹, 白志鹏, 等. 重庆市颗粒物 PM₁₀/PM_{2.5} 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 PM₁₀, PM_{2.5} in Chongqing [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2013, **46**(6): 8-13, 19.
- [8] 杨怀金, 杨德容, 叶芝祥, 等. 成都西南郊区春季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4490-4503.
Yang H J, Yang D R, Ye Z X, *et al.* Characteristics of elements and potential ecological risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} at the southwest suburb of Chengdu in spring[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4490-4503.
- [9] 李友平, 刘慧芳, 周洪, 等. 成都市 PM_{2.5} 中有毒重金属污染特征及健康风险评价[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_{2.5} in Chengdu[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(7): 2225-2232.
- [10] 郑权, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 南昌市冬季大气 PM_{2.5} 中重金属元素来源分析及健康风险评价[J]. *地球与环境*, 2018, **46**(3): 306-312.
Zheng Q, Hu G R, Yu R L, *et al.* Source analysis and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} in winter in Nanchang city[J]. *Earth and Environment*, 2018, **46**(3): 306-312.
- [11] Luo X S, Zhao Z, Xie J W, *et al.* Pulmonary bioaccessibility of trace metals in PM_{2.5} from different megacities simulated by lung fluid extraction and DGT method[J]. *Chemosphere*, 2019, **218**: 915-921.
- [12] Ming L L, Jin L, Li J, *et al.* PM_{2.5} in the Yangtze River Delta, China: chemical compositions, seasonal variations, and regional pollution events[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 200-212.
- [13] Hou C, Shao L Y, Hu W, *et al.* Characteristics and aging of traffic-derived particles in a highway tunnel at a coastal city in southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 1385-1393.
- [14] 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 等. 高原城市昆明公路隧道大气中 PM_{2.5} 理化特征分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 4968-4975.
- Wang C H, Yan K, Han X Y, *et al.* Physico-chemical characteristic analysis of PM_{2.5} in the highway tunnel in the plateau city of Kunming[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 4968-4975.
- [15] Li P H, Yu J, Bi C L, *et al.* Health risk assessment for highway toll station workers exposed to PM_{2.5}-bound heavy metals[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10**(4): 1024-1030.
- [16] 赵兴敏, 杨扬, 郭欣欣, 等. 长春市典型高架公路大气环境颗粒物中重金属污染特征[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(9): 3280-3288.
Zhao X M, Yang Y, Guo X X, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals in atmospheric particulates from typical elevated highway in Changchun City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(9): 3280-3288.
- [17] 何纪力, 徐光炎, 朱惠民, 等. 江西省土壤环境背景值研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [18] 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.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [19] 邵莉, 肖化云. 公路两侧大气颗粒物中的重金属污染特征及其影响因素[J]. *环境化学*, 2012, **31**(3): 315-323.
Shao L, Xiao H Y. Pollution characterization and controlling factors of heavy metals in airborne particulate matter near expressway[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, **31**(3): 315-323.
- [20] Li X D, Poon C S, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(11-12): 1361-1368.
- [21] Adamiec E, Jarosz-Krzemińska E, Wieszała R. Heavy metals from non-exhaust vehicle emissions in urban and motorway road dusts[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, **188**(6): 369.
- [22] Lanzerstorfer C. Heavy metals in the finest size fractions of road-deposited sediments[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **239**: 522-531.
- [23] 姜磊, 周海峰, 赖志柱, 等. 中国城市 PM_{2.5} 时空动态变化特征分析: 2015—2017 年[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(10): 3816-3825.
Jiang L, Zhou H F, Lai Z Z, *et al.* Analysis of spatio-temporal characteristic of PM_{2.5} concentrations of Chinese cities: 2015—2017 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **38**(10): 3816-3825.
- [24] Liu Y K, Yu Y P, Liu M, *et al.* Characterization and source identification of PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in different seasons from Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **644**: 725-735.
- [25] 张玉梅, 张卫东, 王军玲. 大气 PM_{2.5} 源解析“源清单化学质量平衡法(I-CMB)”模型的建立与应用[J]. *大气科学学报*, 2015, **38**(2): 279-284.
Zhang Y M, Zhang W D, Wang J L. Establishment and application of pollutant Inventory-Chemical Mass Balance (I-CMB) model for source apportionment of PM_{2.5} [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2015, **38**(2): 279-284.
- [26] Men C, Liu R M, Xu F, *et al.* Pollution characteristics, risk assessment, and source apportionment of heavy metals in road dust in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 138-147.

[27] 李丽娟, 温彦平, 彭林, 等. 太原市采暖季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价[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_{2.5} and health risk assessment of heavy metals during heating season in Taiyuan[J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4431-4438.

[28] 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.

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,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:hjkk@rcees.ac.cn;网址:www.hjkk.ac.cn

CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)
Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017	GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)
Characteristics of Atmospheric PM _{2.5} Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan	BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, GAO Ying, <i>et al.</i> (3868)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)
Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017	LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)
Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta	ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)
Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers	YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} Near Highway	LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)
Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant	QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei	LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)
Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)
Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources	MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)
Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China	WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)
CO-SCR Performance and Mechanism over Co ₃ O ₄ Catalysts	ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China	 CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)
Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province	 SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000)
Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City	 GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)
Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal	 XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)
Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs	LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)
Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)
Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)
Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons	 ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)
Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau	CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)
Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals	SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)
Removal of Pb ²⁺ from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent	HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)
Intensified Electrosorption of Pb ²⁺ by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode	JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)
Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe ₃ O ₄	BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jin-feng, <i>et al.</i> (4098)
Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants	JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)
Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A ² /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater	RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)
Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment	YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)
Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions	ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)
Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal	ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)
Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal	YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)
Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge	TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)
Effect of Ca ²⁺ on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge	ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)
Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge	CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur	XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)
Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage	HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)
Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process	 ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)
Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils	BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)
Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland	CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)
N ₂ O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover	LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)
Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River	CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)
Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters	ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)
Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment; A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals	 DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)
Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)
Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety	ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)
Content of Soil Phytolith-Occluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns at Jinyun Mountain	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)
Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China	 TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)
Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice	PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)
Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo	CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)