

百方知库
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, 张春荣 (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 Co₃O₄ 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 崔文杰, 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, 笄文怡, 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:以宁波市小浞江为例 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, 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 Pb²⁺ 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 Pb²⁺ 晋圣珧, 向阳, 张隽瑀, 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, 叶建锋 (4105)

A²/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, 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)

Ca²⁺ 对污泥硝化活性和絮体沉降性能的影响 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, 魏漪旋 (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, 袁琼芬 (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 N₂O 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 (N₂O) 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)

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

(北京市环境保护监测中心, 大气颗粒物监测技术北京市重点实验室, 北京 100048)

摘要:以北京市代表性道路扬尘2004年的 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 和2013年的 $PM_{2.5}$ 中21种无机元素含量为基础,分析和探讨北京市道路扬尘重金属污染特征及其潜在生态风险。结果表明,北京市道路扬尘中6种主要元素为Si、Ca、Al、Fe、Mg和K,其含量之和占有被测元素含量的比例分别为:2004年 PM_{10} 为96.51%、2004年 $PM_{2.5}$ 为96.42%和2013年 $PM_{2.5}$ 为96.53%。2004年北京市道路扬尘中元素富集水平、重金属污染程度和潜在生态风险总体表现为: $PM_{2.5} > PM_{10}$;燃煤烟尘特征元素Se在2004年的 $PM_{2.5}$ 中、Cd在2004年的 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 中均为极强富集,富集因子分别为1024.03、68.15和871.55;Co、Zn、Ca和Cu属显著富集,其富集因子在2004年 PM_{10} 中分别为12.93、12.33、8.30和8.07,在 $PM_{2.5}$ 中分别为17.41、21.80、12.83和19.73;但Na和Si在道路扬尘中均无富集。重金属的污染负荷指数(PLI)在2004年 PM_{10} 中为3.95, $PM_{2.5}$ 为7.71。2013年北京市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中重金属污染水平和潜在生态风险较2004年均显著降低,在2013年 $PM_{2.5}$ 中,Cd和Se的富集因子分别下降为98.47和0.95;Cu、Ca和Zn富集因子分别下降为11.90、8.84和8.20;PLI下降为2.56。研究表明,北京市道路扬尘多种重金属总的潜在生态风险极强,重金属Cd为极显著污染因子和主要的潜在生态风险来源,其潜在生态风险指数(RI)对重金属总的RI贡献超过85%。2004年北京市道路扬尘主干道重金属污染程度明显高于其它道路类型, PM_{10} 表现为:主干道>高速进京口>次干道>环路, $PM_{2.5}$ 表现为:主干道>环路>高速进京口>次干道;而2013年 $PM_{2.5}$ 表现为:高速进京口>主干道>环路>次干道,且次干道重金属污染水平显著低于其它道路类型。2013年北京市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中,重金属Ti、Zn、V、Cr、Cu、Pb和Ni相关性显著,主要来源于与交通有关的排放。

关键词:道路扬尘; PM_{10} 与 $PM_{2.5}$; 重金属; 富集因子; 潜在生态风险; 年际变化

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2019)09-3924-11 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.201903094

Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing

HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, WANG Zheng, YAN Xu, YANG Dong-yan, LIU Zhao-ying

(Beijing Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology, Beijing Municipal Environmental Protection Monitoring Center, Beijing 100048, China)

Abstract: Based on the concentrations of 21 inorganic elements in particulate matter with diameters less than $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}) in 2004, and $PM_{2.5}$ in 2004 and 2013 of representative road dust in Beijing, the pollution characteristics and potential ecological risks of heavy metals in this dust were analyzed and discussed. The results showed that the six main elements in road dust in Beijing were Si, Ca, Al, Fe, Mg, and K, and the proportions of the total content of the six elements in PM_{10} in 2004, $PM_{2.5}$ in 2004, and $PM_{2.5}$ in 2013 accounted for 96.51%, 96.42%, and 96.53% of the total content of all elements tested, respectively. The elemental enrichment level and the pollution degree and the potential ecological risk of heavy metal in road dust in Beijing in 2004 were $PM_{2.5} > PM_{10}$. Se, a characteristic element of coal dust, was highly enriched in $PM_{2.5}$ in 2004, and Cd was high in PM_{10} and $PM_{2.5}$ in 2004 with enrichment factors of 1024.03, 68.15, and 871.55, respectively. Co, Zn, Ca, and Cu were significantly enriched in PM_{10} and $PM_{2.5}$ in 2004 with enrichment factors of 12.93, 12.33, 8.30, and 8.07 in PM_{10} and 17.41, 21.80, 12.83, and 19.73 in $PM_{2.5}$, respectively; Na and Si were not enriched in the road dust. The pollution load index (PLI) of heavy metals was 3.95 in PM_{10} and 7.71 in $PM_{2.5}$ in 2004. Owing to the implementation of dust, motor vehicles, and combustion source control measures in Beijing and the relocation of the Shougang corporation, the elemental enrichment level, pollution degree, and potential ecological risk of heavy metals in road dust $PM_{2.5}$ in 2013 were significantly lower than those in 2004. The enrichment factors of Cd and Se in $PM_{2.5}$ in 2013 decreased to 98.47 and 0.95, respectively; those of Cu, Ca, and Zn decreased to 11.90, 8.84, and 8.20, respectively; and PLI decreased to 2.56. The results showed that the total potential ecological risk of heavy metals in road dust in Beijing was extremely strong. Heavy metal Cd was the most significant pollution factor and the main potential ecological risk source; its potential ecological risk index (RI) contribution to the total RI of heavy metals was more than 85%. In 2004, the pollution degree of heavy metals in road dust of main roads was significantly higher than that for other road types. The pollution degree of heavy metals in PM_{10} was main road > expressway entrance to Beijing > secondary main road > ring road; that for $PM_{2.5}$ was main road > ring road > expressway entrance to Beijing > secondary main road. For $PM_{2.5}$ in 2013, however, the order was expressway entrance to Beijing > main road > ring road > secondary main road. The pollution degree of heavy metals in road dust of secondary main roads was significantly lower than that for other road types. In 2013, for

收稿日期: 2019-03-11; 修订日期: 2019-04-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0208502); 北京市科技专项(H030630540190); 北京市科技计划项目(Z121100000312035); 北京市科技重大专项(D171100001517003)

作者简介: 胡月琪(1971~), 男, 高级工程师, 主要研究方向为环境与污染源监测, E-mail: huyueqi@bjmeme.com.cn

road dust $PM_{2.5}$ in Beijing, the correlation of heavy metals Ti, Zn, V, Cr, Cu, Pb, and Ni was significant owing mainly to traffic-related emissions.

Key words: road dust; PM_{10} and $PM_{2.5}$; heavy metal; enrichment factor; potential ecological risk; interannual variation

近年来京津冀区域性复合型污染日趋严重,颗粒物尤其是细颗粒物 $PM_{2.5}$ 已成为城市环境空气质量的首要污染物^[1~3]. 有研究表明,细颗粒物对人类身体健康、大气能见度和局部气候环境造成显著影响^[4~8].

国务院 2018 年 7 月发布的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》中,突出的 4 个重点行业和领域中明确提出了扬尘治理. 相关研究也表明,无组织排放源是大气颗粒物的重要来源之一,其中道路扬尘容易被机动车、行人及风力的作用下反复扬起,反复沉降,其贡献不容忽视^[9~12]. 北京市 2018 年 5 月基于本项目发布的新一轮 $PM_{2.5}$ 来源解析结果表明:本地扬尘排放源贡献占 16%,而其中道路扬尘贡献高达 43%.

道路扬尘通常被认为是一种复合源类,其化学组成特征能够反映城市环境受到人为源影响的程度^[13,14]. 人类活动会造成道路扬尘重金属的聚集,重金属因其难降解性和食物链传递与累积性而具有重要的环境指示意义和较严重的环境危害^[15,16]. 国内外学者对大气降尘^[16~18]、地表土^[19,20]和地表灰尘^[21~23]中重金属的含量水平、污染特征、人体健康风险和潜在生态风险等进行了大量研究,但这些研究主要针对不同功能区、全粒径样品开展的工作,而对于道路扬尘 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 中重金属的关注相对较少.

本文以北京市高速公路进京口、环路、城市主干道和城市次干道等具有代表性路段为研究对象,分别于 2004 年 9 月和 2013 年 5 月采集道路扬尘,并通过再悬浮设备制备了 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 颗粒物样品,测试了 21 种无机元素的含量. 在此基础上本研究系统地分析了北京市不同粒径道路扬尘中无机元素的富集程度及其差异,探讨了道路扬尘中主要重金属的污染特征与潜在生态风险,考察了相关评价指标的年际变化,以期为北京市道路扬尘污染防治提供科学依据,同时对于了解北京市道路扬尘重金属污染状况及潜在生态风险具有一定的科学指导意义.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

北京市位于东经 $115.7^{\circ} \sim 117.4^{\circ}$, 北纬 $39.4^{\circ} \sim 41.6^{\circ}$, 地处华北平原北部,地势西北高、东南

低,西、北和东北群山环绕,三面环山,东南为平原,为向东南展开的“簸箕状”地形. 北京与天津相邻,并与天津一起被河北省环绕,是中华人民共和国首都. 北京市总面积 $16\,410.54\text{ km}^2$, 2018 年底常住人口为 2 154.2 万,机动车保有量控制为 610 万. 北京市属北温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温在 $8 \sim 12^{\circ}\text{C}$, 年降水量 $318 \sim 759\text{ mm}$, 年平均日照时数 $2\,000 \sim 2\,800\text{ h}$, 北京的风向有着明显的季节变化特征,常年主导风向冬季以西北风为主,夏秋季以东南风为主.

1.2 采样点位的布设

根据北京市核心区道路特点,按道路类型选择具有代表性路段进行布点采样. 通过现场踏勘,挑选了北京市不同区域不同类别的道路,包括高速公路五环进京口、环路、主要干道、次要干道及支路或小路的十字路口,共布设采样点 18 个. 采样点周围避免烟尘、工业粉尘、建筑工地及其他人为污染源的干扰. 图 1 为北京市道路扬尘采样点位分布示意.

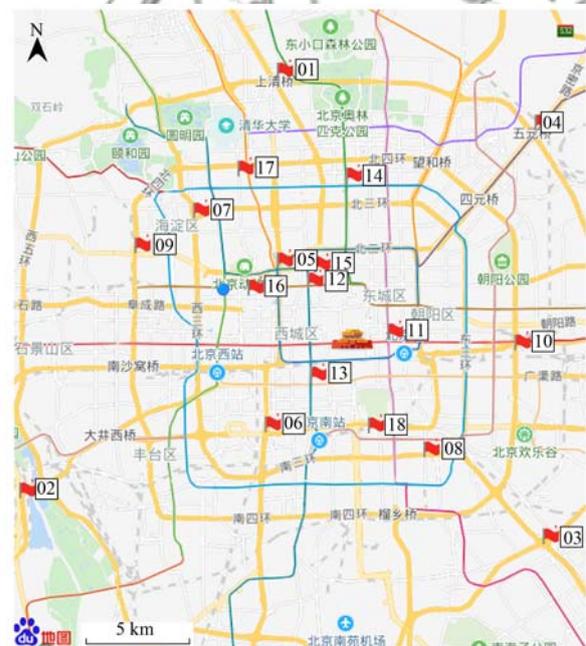


图 1 北京市道路扬尘采样点位分布示意

Fig. 1 Map showing the distribution of road dust sampling points in Beijing

1.3 样品的采集与处理

在每个采样点上采集马路边、隔离带、交通岗亭、交通指挥台、广告栏等处长期积累的道路扬尘,以及立交桥下的停车场地面或长期停放的车辆表面积聚的大量道路尘,用毛刷刷入牛皮纸袋中.

采样时应避开雨季进行. 每个采样点采集 3~5 处混合, 样品质量约 1 kg. 样品运回实验室后自然风干, 并保持样品的自然状态.

经自然风干的样品先用 20 目 (850 μm) 尼龙筛筛分, 将道路扬尘样品中的杂质除去, 再对筛下物过 100 目 (150 μm) 的尼龙筛. 将筛分后所得的粒径 $\leq 150 \mu\text{m}$ 的道路扬尘样品, 经由南开大学研制的 NK-ZXF 型再悬浮 8 通道分级采样系统制备道路扬尘 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 样品. 本研究每个采样点位 2004 年获得道路扬尘 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 样品各 4 个, 其中 Teflon 滤膜样品和石英滤膜样品各 2 个; 2013 年获得 8 个 $\text{PM}_{2.5}$ 样品, Teflon 滤膜样品和石英滤膜样品各 4 个.

所用滤膜均为 47 mm 的进口 Whatman 滤膜. 采样前, 空白 Teflon 滤膜在烘箱中 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘 2 h, 以去除滤膜中杂质和挥发分对称重和分析结果的影响. 采样前后滤膜置于温度为 (25 \pm 1) $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 (50 \pm 5)% 的恒温恒湿环境中平衡 24 h, 使用瑞士梅特勒公司的 XP205 型十万分之一分析天平称量至恒重.

1.4 样品组分分析

Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Sc、Ti、V、Cr、Mn、

Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Ba 和 Pb 等 19 种无机元素采用电感耦合等离子体发射光谱法 (ICP-OES), 使用美国热电公司的 Intrepid II -XDL 等离子体发射光谱仪进行分析. 非金属元素砷、硒采用氢化物发生-原子荧光光度法, 使用北京吉天公司的 AFS-9130 原子荧光光度计进行分析.

1.5 富集因子评价方法

富集因子常用于探讨颗粒物中元素的富集程度, 从而判断和识别道路扬尘中元素的自然来源和人为污染来源^[1,10,14,17,24]. 富集因子的计算公式如下:

$$EF_i = \frac{(C_i/C_r)_{\text{道路扬尘}}}{(C'_i/C'_r)_{\text{参比}}} \quad (1)$$

式中, EF_i 为道路扬尘中测量元素 i 的富集因子; C_i 、 C_r 分别为道路扬尘中测量元素 i 和参比元素 r 的质量分数(%); C'_i 、 C'_r 分别为参比系统中测量元素 i 和参比元素 r 的质量分数(%).

一般认为 $EF_i < 1$ 时, 表明测量元素 i 相对于参比系统未富集, 主要来源为自然源, 由土壤岩石风化造成; 若 $EF_i > 10$ 时, 则认为该元素主要来源为人为源. 本研究采用表 1 所示富集因子分级表^[10,24].

表 1 富集因子分级

Table 1 Classes of enrichment factors

项目	$EF < 1$	$1 \leq EF < 2$	$2 \leq EF < 5$	$5 \leq EF < 20$	$20 \leq EF < 40$	$40 \leq EF$
污染级别	0	1	2	3	4	5
富集程度	无	无~轻微	中度	显著	强烈	极强

1.6 重金属污染评价方法

被广泛应用于评价土壤、沉积物、扬尘等环境介质中重金属污染水平的方法包括地积累指数法和污染载荷指数法^[21~23], 其中单个重金属的污染水平采用地积累指数法评价, 重金属的综合污染水平采用污染载荷指数法进行评价.

地积累指数的计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{C_i}{1.5 \times C'_i} \right) \quad (2)$$

式中, I_{geo} 为地积累指数; 常数 1.5 是为了减少或消除背景值变动可能对评价结果产生影响的转换系数. 本研究采用表 2 所示 I_{geo} 的污染分级表^[19,22,23].

表 2 I_{geo} 污染程度分级

Table 2 Contamination degree corresponding to geoaccumulation index

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

污染载荷指数的计算公式为:

$$PLI = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \frac{C_i}{C'_i}} \quad (3)$$

式中, PLI 为污染载荷指数. 本研究采用表 3 所示污染分级标准^[19,22].

1.7 重金属潜在生态风险评价方法

潜在生态风险分析是以金属元素丰度响应为基

表 3 PLI 污染程度分级

Table 3 Contamination degree corresponding to pollution load index

项目	$PLI \leq 1$	$1 < PLI \leq 2$	$2 < PLI \leq 3$	$3 < PLI$
污染级别	0	1	2	3
污染程度	无污染	轻度污染	中度污染	强度污染

本条件, 即道路扬尘中金属潜在生态危害指数与金属污染程度正相关, 且多种金属污染的生态危害具有加

和性^[1,14,25]。潜在生态风险指数的计算公式如下：

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i^r = \sum_{i=1}^n T_i^r \times \frac{C_i}{C_i^r} \quad (4)$$

式中，RI 为道路扬尘中多种重金属元素总的潜在

生态风险指数； E_i^r 为道路扬尘中重金属元素 i 的潜在生态风险指数； T_i^r 为重金属元素 i 的毒性系数，反映其毒性水平和生物对其污染的敏感性。表 4 列示了 12 种重金属元素的毒性系数^[25,26]。

表 4 重金属的毒性系数

Table 4 Toxicity coefficient of heavy metals

元素	Ti	Mn	Zn	V	Cr	Cu	Pb	Ni	Co	As	Cd	Hg
T_i^r	1	1	1	2	2	5	5	5	5	10	30	40

表 5 为潜在生态风险评价指标分级^[1,14,19,25,26]。

表 5 潜在生态风险评价指标分级

Table 5 Classification criteria of the potential ecological risk index

E_i^r	单因子生态危害程度	RI	总的潜在生态危害程度
<40	轻微	<150	轻微
40~80	中等	150~300	中等
80~160	较强	300~600	强
160~320	强	600~1200	很强
≥320	极强	≥1200	极强

2 结果与讨论

2.1 道路扬尘 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 无机元素浓度特征

图 2 所示为北京市道路扬尘 2004 年 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 和 2013 年 PM_{2.5} 中无机元素的质量分数^[27]。从中可看出，北京市道路扬尘中，质量分数大于 1% 的 6 种主要元素为 Si、Ca、Al、Fe、Mg 和 K，其含量之和占有所有 21 种被测元素含量的比例分别为：2004 年 PM₁₀ 为 96.51%、2004 年 PM_{2.5} 为 96.42% 和 2013 年 PM_{2.5} 为 96.53%。其中 Si 和 Ca 的含量显著高于其他元素，Si 在 2004 年 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 和

2013 年 PM_{2.5} 中的质量分数分别为 10.8534%、13.5464% 和 9.2749%；Ca 分别为 10.0037%、14.1751% 和 7.7818%；Al 分别为 5.5441%、5.0818% 和 4.0493%；Fe 分别为 4.0653%、6.2191% 和 2.7631%；Mg 分别为 2.0960%、1.7302% 和 1.6085%；K 分别为 1.6813%、2.0120% 和 1.3419%。其余 15 种元素中，Na 在 2004 年 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 和 2013 年 PM_{2.5} 中的质量分数分别为 0.6440%、0.4528% 和 0.4860%；Ti 分别为 0.2207%、0.5695% 和 0.2267%，其他元素质量分数均 < 0.2%。

从图 2 中还可看出，在北京市道路扬尘 PM_{2.5} 中除 Na 元素 2013 年含量略高于 2004 年外，其他 20 种元素含量均呈下降趋势。本研究表明，Si 含量 2013 年较 2004 年下降了 31.5%；Ca 下降了 45.1%；Al 下降了 20.3%；Fe 下降了 55.6%；Mg 下降了 7.0%；K 下降了 33.3%。2004 年北京市道路扬尘中，除 Na、Mg、Al、Ba、Pb、Sc 在 PM₁₀ 中的含量比在 PM_{2.5} 的含量略高或基本持平外，其他各组分含量均表现为：PM_{2.5} > PM₁₀。

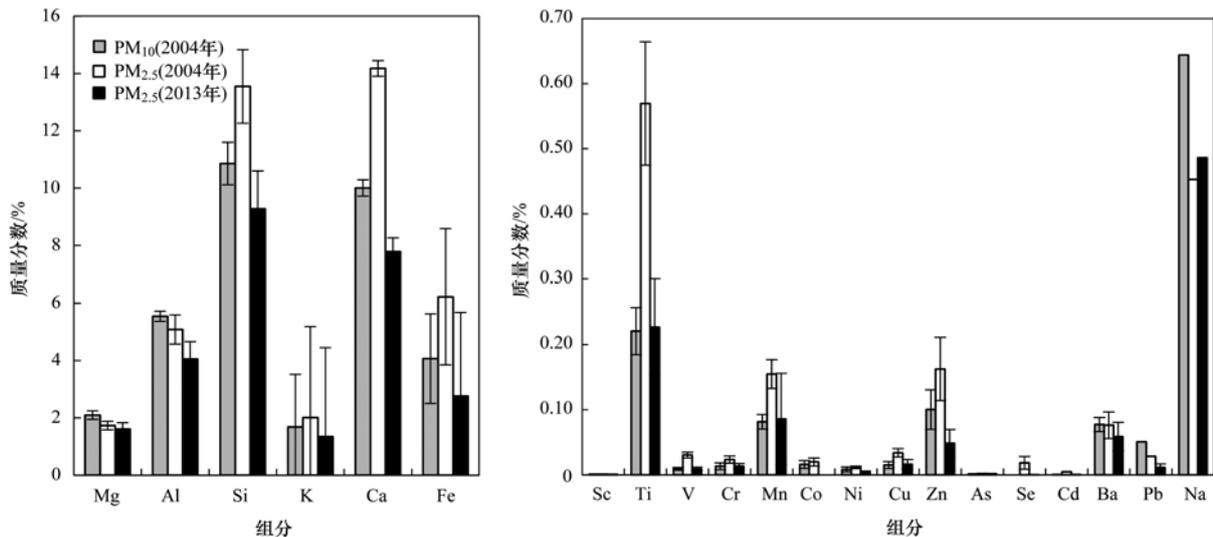


图 2 北京市道路扬尘中无机元素含量

Fig. 2 Content of inorganic elements in road dust in Beijing

2.2 道路扬尘无机元素富集分析

本研究借鉴其他研究，选择 Al 元素作为参比

元素^[1,10,14]；同时选取北京市 A 层土壤背景元素含量平均值作为参比系统元素的背景值^[28]，按照公

式(1)计算北京市道路扬尘富集因子。

图3所示为北京市道路扬尘中无机元素的富集因子。从中可见,2004年北京市道路扬尘总体上 $PM_{2.5}$ 元素富集程度较 PM_{10} 高。在 PM_{10} 中,元素Co、Zn、Ca和Cu属显著富集水平,富集因子分别为12.93、12.33、8.30和8.07;Ni、Cr和Mg为中度富集,富集因子分别为3.70、2.44和2.08;元素Ba、Fe、As、V、Mn、Pb和K为轻微富集,富集因子分别为:1.83、1.73、1.69、1.46、1.46、1.21和1.10;而Se、Ti、Na和Si无富集。北京道路扬尘 PM_{10} 中富集因子大于10的元素是Co和Zn,其来源受到人为活动的影响,Co主要来源于化石燃料燃烧或垃圾焚烧^[29];Zn可能与钢铁冶炼、燃煤、汽车尾气排放和轮胎磨损、垃圾焚烧等有关^[10,27,30-32];其他元素均为自然来源,没有受到人为活动的影响。

本研究北京道路扬尘 PM_{10} 中Zn、Cu、Ni、Pb和Cr元素的富集程度明显低于石家庄市^[32]和运城市^[14];Ca的富集因子大于运城市,小于石家庄市;Co的富集因子大于石家庄市和运城市。

从图3还看出,2004年北京市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中,Zn、Cu、Co和Ca属显著富集水平,且富集因子均大于10,分别为21.80、19.73、17.41和12.83,这些元素的来源与人为活动有关,其他元素为自然来源,Cu与机动车尾气排放、轮胎及零部件磨损有关^[21,22,27],Ca是建筑水泥尘的标识元素。另外,Ni和V也属显著富集,富集因子分别为5.41和5.28;Cr、Mn、Fe和As为中度富集,富集因子分别为4.74、3.02、2.88和2.55;Ba、Mg、Ti、K和Sc为轻微富集,而Pb、Si和Na无富集。与 PM_{10} 相比,除Pb、Na和Mg元素的富集因子持平略有下降外,其他元素富集因子均表现为 $PM_{2.5} > PM_{10}$ 。

与2004年相比,2013年北京市道路扬尘 $PM_{2.5}$

中除Co元素未分析外,Na、Mg、As和Sc元素的富集因子持平略有升高,其他元素的富集因子均有不同程度下降。显著富集的元素Cu、Ca和Zn富集因子下降明显,分别下降为11.90、8.84和8.20,V和Ni由显著富集下降为轻微富集和中度富集,富集因子分别为2.00和2.50;此外,Cr、As、Mg和Mn为中度富集,富集因子分别为3.38、3.05、2.19和2.11;Ba、Fe、Sc和K为轻微富集;Na和Si无富集。Pb与机动车尾气排放、冶金工业和燃煤排放有关^[30],北京2000年已淘汰含铅汽油,首钢2010年关停,并逐步控制燃煤排放与实施煤改气^[27],使Pb的污染水平和富集程度均下降明显。同时,北京市强化施工工地管理等扬尘污染控制措施也显著降低了Ca的污染水平与富集程度^[27]。

本研究中,2004年与2013年北京道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中Zn、Cu、Pb和Cr元素的富集程度均明显低于盘锦市、鞍山市^[10]和石家庄市^[32];Ca的富集因子大于盘锦市、鞍山市,小于石家庄市。

从图3还看出,北京市道路扬尘富集因子变化最大元素是Se和Cd,主要来源于人类活动。在2004年北京市道路扬尘 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 中,Se元素的富集因子分别为0.00和1024.03, $PM_{2.5}$ 中富集因子显著大于 PM_{10} ,且在 $PM_{2.5}$ 中表现为极强富集,是极强富集因子限值的25.6倍,但2013年道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中Se元素的富集因子下降明显,为0.95,属无富集。有研究认为Se元素也是燃煤烟尘的特征元素^[33,34],由Se元素在 $PM_{2.5}$ 中富集因子的变化进一步表明北京市控制燃煤排放和实施煤改气等措施的显著效果。

本研究还发现,在2004年北京市道路扬尘 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 和2013年 $PM_{2.5}$ 中,元素Cd均为极强富集,富集因子分别为68.15、871.55和98.47,但富集程度在2013年 $PM_{2.5}$ 中显著下降。有学者认为

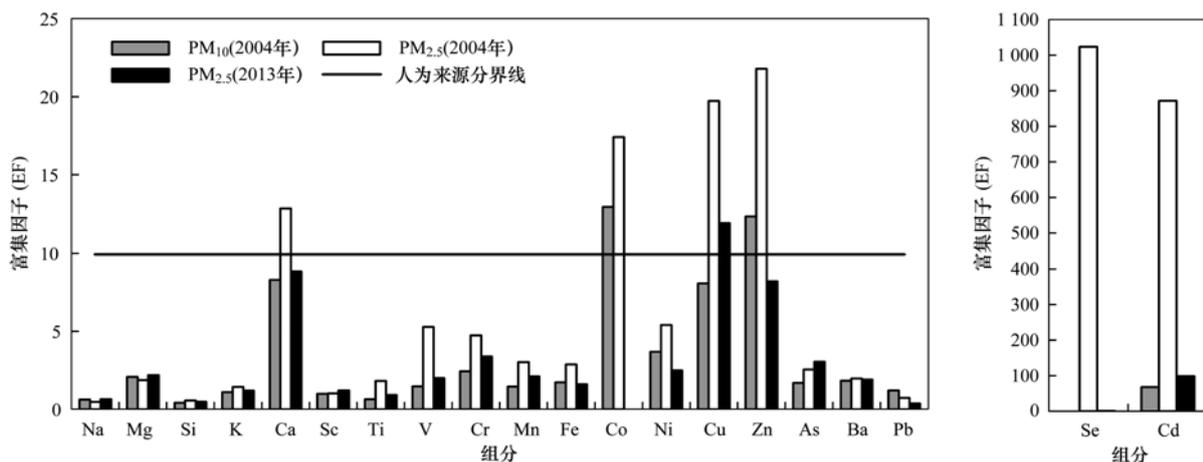


图3 北京市道路扬尘中元素的富集因子

Fig. 3 Enrichment factors of elements in road dust in Beijing

Cd 来源于与机动车有关的排放(包括机动车尾气与机动车损耗磨损排放)^[11,22], 以及与金属熔化冶炼有关^[30]. 有研究表明北京市近年来采取的提高油品质量、淘汰老旧车型、限行限购等措施控制与机动车有关的排放, 改进道路清扫方式与频次、提高道路清扫质量及完成首钢搬迁等^[27], 显著降低了道路扬尘中相关元素的富集.

2.3 道路扬尘重金属污染水平与特征

按照公式(2)计算北京市道路扬尘重金属的地积累指数, 按照公式(3)计算重金属的污染载荷指数.

图4为北京市道路扬尘中 Ti、Mn、Zn、V、Cr、Cu、Pb、Ni、Co、As 和 Cd 等 11 种重金属地积累指数. 由图看出, 在 11 种重金属中, 2004 年北京市道路扬尘除 Pb 外, 重金属的污染程度均表现为: $PM_{2.5} > PM_{10}$, 且 2013 年道路扬尘 $PM_{2.5}$ 的重金属污染程度比 2004 年均显著降低, 与道路扬尘中重金属富集因子的结果一致. 在北京市道路扬尘中, Cd 的污染最严重, 2004 年和 2013 年均均为严重污染, 其地积累指数 2004 年 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 和 2013 年 $PM_{2.5}$ 中分别为 8.72、5.17 和 5.25; 其次是 Zn、Cu、Pb 和 Co, 在 2004 年 PM_{10} 中, Pb 为偏重污染, Zn、Cu 和 Co 为中度污染, 而在 $PM_{2.5}$ 中, 2004 年 Zn、Cu 和 Co 为偏重污染, Pb 为中度污染, 2013 年 Cu 为中度污染, Zn 和 Pb 为轻度污染. 2004 年和 2013 年 Ti 为无污染; Mn 和 V 在 2004 年 PM_{10} 与 2013 年 $PM_{2.5}$ 为无污染, 2004 年 $PM_{2.5}$ 分别为轻微污染和轻度污染. Cr 和 Ni 在 2004 年 $PM_{2.5}$ 中均为轻度污染, 在 2004 年 PM_{10} 中为轻微污染, 在 2013 年 $PM_{2.5}$ 中分别为轻微污染和无污染. As 在 $PM_{2.5}$ 中均为轻度污染, 而在 PM_{10} 中无污染.

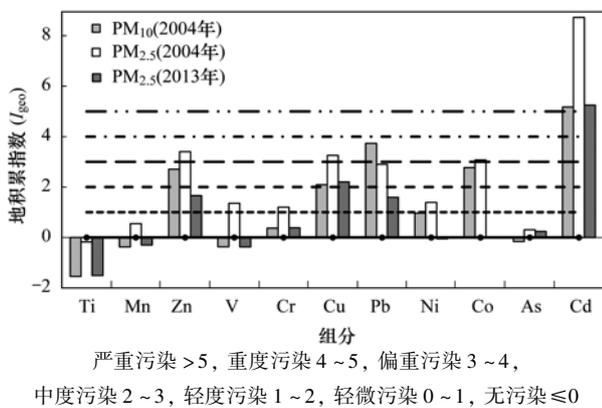
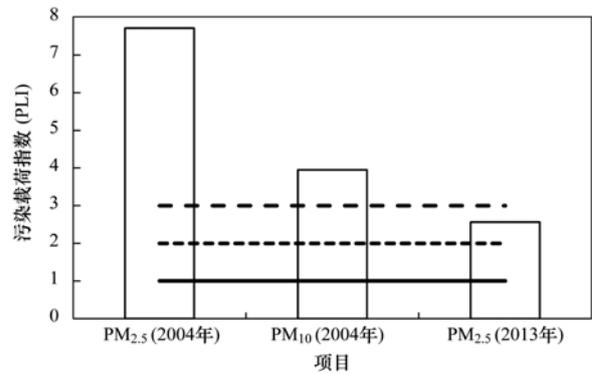


图4 北京市道路扬尘重金属地积累指数

Fig. 4 Geoaccumulation index of heavy metals in road dust in Beijing

图5为北京市道路扬尘重金属污染载荷指数评价结果. 从中可知, 2004年北京市道路扬尘 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中重金属均表现为强度污染, PLI 分别为 3.95

和 7.71, $PM_{2.5}$ 是 PM_{10} 的近 1 倍; 2013 年 $PM_{2.5}$ 中重金属表现为中度污染, 其 PLI 显著降低为 2.56, 约为 2004 年 $PM_{2.5}$ 的三分之一. 北京市道路扬尘重金属污染水平的下降, 与近年来北京市采取的各项大气污染防治措施取得的效果直接相关^[27].



强度污染 >3, 中度污染 2~3, 轻度污染 1~2, 无污染 ≤1

图5 北京市道路扬尘重金属污染载荷指数评价结果

Fig. 5 Pollution load index of heavy metals in road dust in Beijing

2.4 道路扬尘重金属的潜在生态风险分析

道路扬尘中含有的具有毒性和持久毒性的重金属对人体危害较大. 按照公式(4)计算北京市道路扬尘中重金属的潜在生态风险指数和多种重金属总的潜在生态风险指数.

表6所示为北京市道路扬尘中 11 种重金属的潜在生态风险指数评价结果. 从中可知, 北京市道路扬尘中多种重金属总的 RI 和单因子 Cd 的 RI 均远超 1200, 生态健康风险极强, 且单因子 Cd 的 RI 对多种重金属总的 RI 贡献在 85% 以上, 是主要的生态健康风险来源, 这与北京市地表土的研究结论一致^[19], 但风险程度更高; 2004 年道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中多种重金属总的 RI 为 19 272.27, 其中 Cd 的 RI 为 19 009.01, 而 2013 年 $PM_{2.5}$ 中单个重金属的 RI 较 2004 均有不同程度下降, 其中多种重金属总的 RI 和单因子 Cd 的 RI 下降幅度明显, 降幅在 90% 以上, 分别降为 1 805.97 和 1 711.28, 这进一步印证了近年来北京市实施扬尘、机动车和燃烧源控制以及首钢公司搬迁等措施的综合效果^[27].

本研究还表明, 2004 年北京市道路扬尘中 Ti、Mn、Zn、V、Cr、Ni 和 As 的 RI 均不超过 40, 相关重金属生态危害程度轻微; $PM_{2.5}$ 中 Cu、Pb 和 Co 的 RI 介于 40~80 之间, 生态健康风险中等; 而 PM_{10} 中, Cu 的生态危害程度轻微, Co 的生态健康风险中等, 但 Pb 的 RI 介于 80~160 之间, 生态健康风险强. 而在 2013 年 $PM_{2.5}$ 中, 除 Cd 外其他重金属元素的 RI 均不超过 40, 生态危害程度轻微.

2.5 道路扬尘重金属污染元素相关分析

表7~9分别为北京市道路扬尘 2004 年 PM_{10}

与 PM_{2.5} 和 2013 年 PM_{2.5} 中重金属元素之间的相关分析结果。从表 7 可知,北京市道路扬尘 2004 年 PM₁₀ 中, Ti-Mn (0.572)、Mn-V (0.515)、Mn-Cr

(0.476)、Cr-Cu(0.524) 和 Cu-Ni(0.533) 之间在 $P < 0.05$ 水平上显著正相关,而其它元素之间不存在相关关系。

表 6 北京市道路扬尘重金属潜在生态风险评价结果¹⁾

Table 6 Potential ecological risk index of heavy metals in road dust in Beijing

项目	E_i^p											RI
	Ti	Mn	Zn	V	Cr	Cu	Pb	Ni	Co	As	Cd	
PM _{2.5} (2004 年)	1.32	2.20	15.85	7.68	6.89	71.70	56.10	19.66	63.30	18.56	19009.01	19272.27
PM ₁₀ (2004 年)	0.51	1.16	9.78	2.32	3.88	31.99	100.00	14.66	51.28	13.40	1621.62	1850.60
PM _{2.5} (2013 年)	0.53	1.22	4.75	2.32	3.92	34.46	22.59	7.23	—	17.67	1711.28	1805.97

1) —表示未检出或未分析

表 7 2004 年北京市道路扬尘 PM₁₀ 中重金属的相关分析¹⁾

Table 7 Correlations analysis of the heavy metals in PM₁₀ in 2004 for road dust in Beijing

	Ti	Mn	Zn	V	Cr	Cu	Pb	Ni	Co	As	Cd
Ti	1										
Mn	0.572*	1									
Zn	-0.010	-0.224	1								
V	0.403	0.515*	-0.502	1							
Cr	0.255	0.476*	0.141	0.142	1						
Cu	-0.144	-0.082	0.227	-0.236	0.524*	1					
Pb	0.258	0.101	0.022	0.212	0.276	0.317	1				
Ni	0.209	0.364	-0.121	0.457	0.365	0.533*	0.071	1			
Co	0.397	0.236	-0.379	0.413	0.378	0.092	-0.104	0.412	1		
As	-0.024	0.033	-0.055	0.236	-0.318	-0.459	0.102	-0.296	-0.012	1	
Cd	0.103	0.251	0.103	-0.116	0.058	0.099	-0.148	0.419	-0.073	-0.043	1

1) * *表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关, *表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关

从表 8 可知,北京市道路扬尘 2004 年 PM_{2.5} 中, Ti-Mn(0.727)、Ti-V(0.767)、Ti-Ni(0.679)、Mn-V(0.792)、Mn-Co(0.674)、Cr-Ni(0.627)、Cu-Ni(0.599)之间在 $P < 0.01$ 水平上显著正相关; Ti-

Cr(0.580)、Ti-Co(0.519)、Mn-Ni(0.556)、V-Cr(0.549)、Cr-Cu(0.479)、Ni-Co(0.504)之间在 $P < 0.05$ 水平上显著正相关;其它元素之间不存在相关关系。

表 8 2004 年北京市道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属的相关分析¹⁾

Table 8 Correlations analysis of the heavy metals in PM_{2.5} in 2004 for road dust in Beijing

	Ti	Mn	Zn	V	Cr	Cu	Pb	Ni	Co	As	Cd
Ti	1										
Mn	0.727**	1									
Zn	-0.064	-0.413	1								
V	0.767**	0.792**	-0.282	1							
Cr	0.580*	0.446	0.312	0.549*	1						
Cu	0.214	0.007	0.264	-0.140	0.479*	1					
Pb	-0.566	-0.411	0.290	-0.401	-0.268	-0.105	1				
Ni	0.679**	0.556*	-0.029	0.381	0.627**	0.599**	-0.529	1			
Co	0.519*	0.674**	-0.292	0.459	0.398	0.105	-0.329	0.504*	1		
As	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	
Cd	0.310	0.375	-0.006	0.086	0.152	0.258	0.018	0.253	0.306	—	1

1) * *表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关, *表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关, —表示未检出或未分析,下同

从表 9 可知,北京市道路扬尘 2013 年 PM_{2.5} 中, Ti-Zn(0.742)、Ti-V(0.924)、Ti-Cr(0.719)、Ti-Cu(0.692)、Ti-Pb(0.798)、Ti-Ni(0.903)、Zn-Cr(0.811)、Zn-Cu(0.816)、Zn-Ni(0.868)、V-Cr(0.750)、V-Pb(0.778)、V-Co(0.777)、Cr-Cu

(0.857)、Cr-Ni(0.702)、Cu-Ni(0.742)、Pb-Ni(0.797)之间在 $P < 0.01$ 水平上显著正相关; Zn-V(0.597)、Zn-Pb(0.683)、V-Cu(0.621)、Cr-Pb(0.672)、Cu-Pb(0.620)之间在 $P < 0.05$ 水平上显著正相关;其它元素之间不存在相关关系。

表 9 2013 年北京市道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属的相关分析

Table 9 Correlations analysis of the heavy metals in PM_{2.5} in 2013 for road dust in Beijing

	Ti	Mn	Zn	V	Cr	Cu	Pb	Ni	Co	As	Cd
Ti	1										
Mn	0.358	1									
Zn	0.742 **	0.246	1								
V	0.924 **	0.398	0.597 *	1							
Cr	0.719 **	0.201	0.811 **	0.750 **	1						
Cu	0.692 **	0.055	0.816 **	0.621 *	0.857 **	1					
Pb	0.798 **	0.213	0.683 *	0.778 **	0.672 *	0.620 *	1				
Ni	0.903 **	0.220	0.868 **	0.777 **	0.702 **	0.742 **	0.797 **	1			
Co	—	—	—	—	—	—	—	—	1		
As	-0.064	-0.206	0.273	-0.278	-0.068	-0.076	0.224	0.167	—	1	
Cd	-0.120	-0.394	-0.330	0.053	-0.271	-0.262	-0.048	-0.142	—	-0.190	1

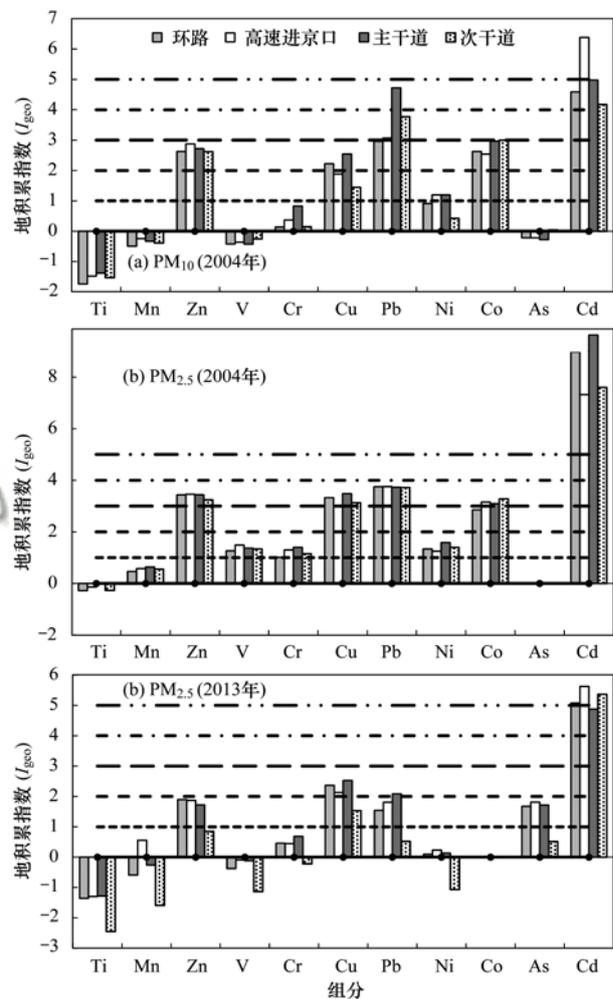
本研究发现, 2004 年北京市道路扬尘 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 中重金属元素之间的相关系数均较低, 可能由于 2004 年北京市道路扬尘来源复杂, 受到土壤风沙尘、建筑水泥尘、钢铁冶炼尘、煤烟尘和机动车尾气尘等影响显著^[27], 多重来源综合作用导致各重金属元素之间的相关系数降低. 但 PM_{2.5} 中重金属元素之间的相关系数总体高于 PM₁₀, 原因可能与 PM_{2.5} 粒径越小, 比表面积越大, 其吸附相关化学组分的能力越强有关.

2013 年北京市道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属元素之间的相关系数显著高于 2004 年 PM_{2.5} 中的相关系数. 有研究表明 2013 年北京市道路扬尘 PM_{2.5} 受到土壤风沙尘、建筑水泥尘和煤烟尘的影响显著降低, 钢铁冶炼尘影响基本消除^[27], 来源单一对重金属之间的相关性分析可能更有利. 同时 2013 年北京市道路扬尘 PM_{2.5} 中, 重金属 Ti、Zn、V、Cr、Cu、Pb、Ni 之间相关性显著, 可能具有同源性. 相关研究认为 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 等可能来源于机动车尾气尘、轮胎磨损、润滑油损耗、刹车磨损及汽车零部件碰撞损耗等交通排放^[21,22,31], 表明北京市 2013 年道路扬尘 PM_{2.5} 重金属可能主要来源于交通排放.

2.6 不同道路类型道路扬尘重金属污染差异分析

图 6 为北京市不同道路类型 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 中重金属的地积累指数评价结果. 从中可知, 在 11 种重金属中, 除 Pb 元素外, 2004 年不同道路类型道路扬尘的重金属污染程度基本上均表现为: PM_{2.5} > PM₁₀; 且 2013 年不同道路类型道路扬尘 PM_{2.5} 的重金属污染程度比 2004 年均不同程度地显著降低; 同时所有道路类型中, 重金属 Cd 的污染程度最突出.

图 7 为北京市不同道路类型 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 中重金属的污染负荷指数评价结果. 从中可知, 2004 年北京市不同道路类型道路扬尘 PM₁₀ 重金属的 PLI 均大于 3, 为强度污染, 表现为: 主干道 > 高速进京



严重污染 >5, 重度污染 4~5, 偏重污染 3~4, 中度污染 2~3, 轻度污染 1~2, 轻微污染 0~1, 无污染 ≤0

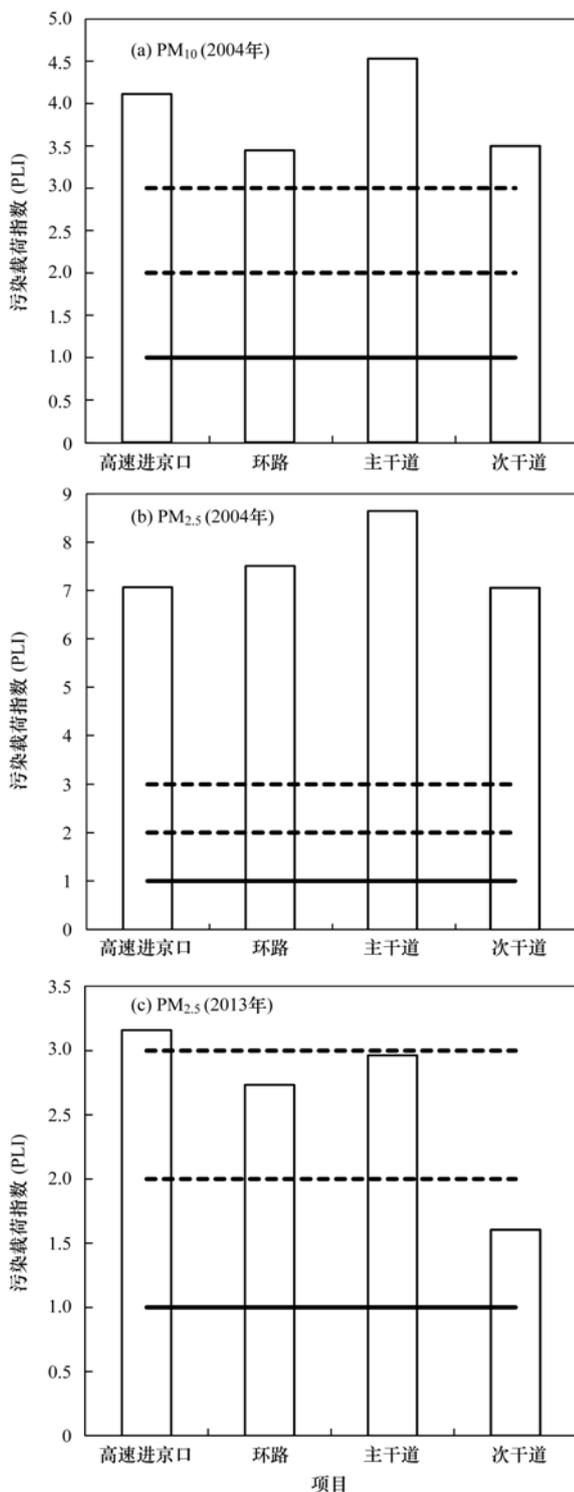
图 6 北京市不同道路类型扬尘重金属地积累指数

Fig. 6 Geoaccumulation index of heavy metals in road dust of different road types in Beijing

口 > 次干道 > 环路, 且环路和次干道的重金属污染水平相当; 而 2004 年不同道路类型 PM_{2.5} 重金属的 PLI 均为强度污染, 是 PM₁₀ 的近 1 倍, 表现为: 主干道 > 环路 > 高速进京口 > 次干道, 主干道重金属污染水平明显高于其他道路类型, 且其它道路类型的

污染程度相当. 结合图 6 发现, 环路 $PM_{2.5}$ 中 Cd 的 I_{geo} 明显大于高速进京口, 是导致环路的 PLI 高于高速进京口的主要原因.

2013 年不同道路类型 $PM_{2.5}$ 重金属污染载荷指数, 比 2004 年均显著下降至不足 2004 年的 1/2, 可能由于 2010 年石景山首钢公司的彻底关停, 与



强度污染 >3, 中度污染 2~3, 轻度污染 1~2, 无污染 ≤1

图 7 北京市不同道路类型扬尘重金属污染载荷指数

Fig. 7 Pollution load index of heavy metals in road dust of different road types in Beijing

钢铁冶炼相关的重金属对道路扬尘的影响显著消除的缘故. 2013 年 $PM_{2.5}$ 高速进京口重金属的 PLI 为 3.16, 强度污染; 环路和主干道介于 2.5~3 之间, 分别为 2.73 和 2.96, 中度污染; 次干道为 1.60, 轻度污染; 表现为: 高速进京口 > 主干道 > 环路 > 次干道. 另外, 2013 年 $PM_{2.5}$ 中次干道重金属污染水平显著低于其它道路类型, 次干道与其它道路类型仅交通流量、机动车况和刹车频次等与交通有关的排放存在差异, 其它影响因素大致相同, 钢铁冶炼影响基本消除, 燃煤排放受到有效遏制, 表明 2013 年北京市道路扬尘中重金属可能主要来源于与交通有关的排放.

3 结论

(1) 北京市道路扬尘中, 质量分数大于 1% 的 6 种主要元素为 Si、Ca、Al、Fe、Mg 和 K, 其含量之和占有 21 种被测元素总质量的比例在 2004 年的 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 和 2013 年的 $PM_{2.5}$ 中分别为 96.51%、96.42% 和 96.53%. 其他元素含量除 Na、Ti、Mn 和 Zn 的质量分数介于 0.1%~0.6% 外, 均低于 0.1%.

(2) 北京市道路扬尘中 Na 和 Si 在道路扬尘中均无富集. 富集因子变化最大元素是 Se 和 Cd, Se 元素在 2004 年的 $PM_{2.5}$ 中表现为极强富集, 富集因子为 1024.03, 而在 2013 年的 $PM_{2.5}$ 中富集因子下降为 0.95, 为无富集. 在 2004 年的 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 和 2013 年的 $PM_{2.5}$ 中, 元素 Cd 均为极强富集, 富集因子分别为 68.15、871.55 和 98.47.

(3) 北京市 2004 年道路扬尘中 Co、Zn、Ca 和 Cu 均显著富集水平, 其富集因子 PM_{10} 中分别为 12.93、12.33、8.30 和 8.07; $PM_{2.5}$ 中分别为 17.41、21.80、12.83 和 19.73; $PM_{2.5}$ 中 Ni 和 V 也显著富集, 富集因子分别为 5.41 和 5.28. 而 2013 年的 $PM_{2.5}$ 中元素的富集因子均有不同程度下降; 显著富集元素 Cu、Ca 和 Zn 富集因子分别下降为 11.90、8.84 和 8.20.

(4) 北京市 2004 年道路扬尘元素富集因子、重金属污染水平和潜在生态风险基本表现为: $PM_{2.5} > PM_{10}$, 且 2013 年道路扬尘 $PM_{2.5}$ 的重金属污染程度比 2004 年显著降低. 重金属的 PLI 在 2004 年的 PM_{10} 中为 3.95, $PM_{2.5}$ 为 7.71, 而 2013 年的 $PM_{2.5}$ 中显著降低至 2.56.

(5) 北京市道路扬尘中多种重金属总的 RI 和单因子 Cd 的 RI 均超过 1200, 生态健康风险极强, 且元素 Cd 的 RI 对多种重金属总的 RI 贡献超过 85%, 是主要的潜在生态健康风险来源.

(6)2004 年主干道道路扬尘重金属污染明显高于其它道路类型,而 2013 年 PM_{2.5} 中次干道重金属污染水平显著低于其它道路类型。2013 年道路扬尘 PM_{2.5} 中,重金属 Ti、Zn、V、Cr、Cu、Pb 和 Ni 相关性显著,主要来源于与交通有关的排放。

参考文献:

- [1] 王燕,彭林,李丽娟,等. 晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 82-87.
Wang Y, Peng L, Li L J, *et al.* Chemical compositions and sources apportionment of re-suspended dust in Jincheng [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 82-87.
- [2] Cao J J, Shen Z X, Chow J C, *et al.* Winter and summer PM_{2.5} chemical compositions in fourteen Chinese cities[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2012, **62**(10): 1214-1226.
- [3] 胡月琪, 郭晓东, 王琛, 等. 北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1653-1661.
Hu Y Q, Wu X D, Wang C, *et al.* Testing of concentration and characteristics of particulate matters emitted from stationary combustion sources in Beijing [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1653-1661.
- [4] Lelieveld J, Evans J S, Fnais M, *et al.* The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale[J]. Nature, 2015, **525**(7569): 367-371.
- [5] Li M H, Fan L C, Mao B, *et al.* Short-term exposure to ambient fine particulate matter increases hospitalizations and mortality in COPD: a systematic review and meta-analysis[J]. Chest, 2016, **149**(2): 447-458.
- [6] 胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 等. 北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 1966-1974.
Hu Y Q, Ma Z H, Feng Y J, *et al.* Emission characteristics of water-soluble ions in fumes of coal fired boilers in Beijing [J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 1966-1974.
- [7] Shen G F, Xue M, Yuan S Y, *et al.* Chemical compositions and reconstructed light extinction coefficients of particulate matter in a mega-city in the western Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, **83**: 14-20.
- [8] 赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 等. 基于样方法的天津市春季道路扬尘 PM_{2.5} 中水溶性离子特征及来源解析[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 1994-1999.
Zhao J Q, Ji Y Q, Zhang L, *et al.* Characteristics and source apportionment of water-soluble inorganic ions in road dust PM_{2.5} during spring in Tianjin using the quadrat sampling method [J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 1994-1999.
- [9] Chen P L, Wang T J, Hu X, *et al.* Chemical mass balance source apportionment of size-fractionated particulate matter in Nanjing, China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2015, **15**(5): 1855-1867.
- [10] 张伟, 姬亚芹, 张军, 等. 辽宁省典型城市道路尘 PM_{2.5} 成分谱研究[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(2): 412-417.
Zhang W, Ji Y Q, Zhang J, *et al.* Study on the road dust source profile of PM_{2.5} in Liaoning Province typical cities [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(2): 412-417.
- [11] 李风华, 吴琳, 张静, 等. 典型道路路边空气颗粒物及无机元素特征分析[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(7): 2460-2469.
Li F H, Wu L, Zhang J, *et al.* Characteristic analysis of inorganic elements in PM_{2.5} and PM₁₀ at urban roadside environment [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(7): 2460-2469.
- [12] Zhao P S, Dong F, He D, *et al.* Characteristics of concentrations and chemical compositions for PM_{2.5} in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(9): 4631-4644.
- [13] Sutherland R A, Tolosa C A. Multi-element analysis of road-deposited sediment in an urban drainage basin, Honolulu, Hawaii [J]. Environmental Pollution, 2000, **110**(3): 483-495.
- [14] 武媛媛, 李如梅, 彭林, 等. 运城城市道路扬尘化学组成特征及来源分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 1799-1806.
Wu Y Y, Li R M, Peng L, *et al.* Chemical compositions and source apportionment of road dust in Yuncheng [J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 1799-1806.
- [15] Alhassan A J, Sule M S, Atiku M K, *et al.* Study of correlation between heavy metal concentration, street dust and level of traffic in major roads of Kano Metropolis, Nigeria [J]. Nigerian Journal of Basic and Applied Science, 2012, **20**(2): 161-168.
- [16] Wei X, Gao B, Wang P, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **112**: 186-192.
- [17] 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 等. 北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4051-4059.
Xiong Q L, Zhao W J, Li D J, *et al.* Enrichment levels and comprehensive pollution assessment of dust heavy metals in winter in Beijing [J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4051-4059.
- [18] Gu Y G, Gao Y P, Lin Q. Contamination, Bioaccessibility and human health risk of heavy metals in exposed-lawn soils from 28 urban parks in southern China's largest city, Guangzhou [J]. Applied Geochemistry, 2016, **67**: 52-58.
- [19] 熊秋林, 赵佳茵, 赵文吉, 等. 北京市地表土重金属污染特征及潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(6): 2211-2221.
Xiong Q L, Zhao J Y, Zhao W J, *et al.* Pollution characteristics and potential ecological risks of heavy metals in topsoil of Beijing [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(6): 2211-2221.
- [20] Castillo S, de la Rosa J D, de la Campa A M S, *et al.* Heavy metal deposition fluxes affecting an Atlantic coastal area in the southwest of Spain [J]. Atmospheric Environment, 2013, **77**: 509-517.
- [21] 石栋奇, 卢新卫. 西安城区路面细颗粒物重金属污染水平及来源分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3126-3133.
Shi D Q, Lu X W. Contamination levels and source analysis of heavy metals in the finer particles of urban road dust from Xi'an, China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3126-3133.
- [22] 段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 等. 开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2972-2980.
Duan H J, Cai X Q, Ruan X L, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and its health risk of surface dusts from parks of Kaifeng, China [J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 2972-2980.
- [23] Pan H Y, Lu X W, Lei K. A comprehensive analysis of heavy metals in urban road dust of Xi'an, China: contamination, source apportionment and spatial distribution [J]. Science of the Total Environment, 2017, **609**: 1361-1369.
- [24] 栾孟孝, 姬亚芹, 王伟, 等. 鞍山市秋季大气 PM_{2.5} 中元素污染特征和来源分析[J]. 环境化学, 2016, **35**(10): 2197-2203.
Luan M X, Ji A Q, Wang W, *et al.* Characteristic and sources of

- the polluted elements in PM_{2.5} during autumn of Anshan [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(10): 2197-2203.
- [25] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [26] 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.
- [27] 胡月琪, 李萌, 颜旭, 等. 北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1645-1655.
Hu Y Q, Li M, Yan X, *et al.* Characteristics and interannual variation of chemical components in typical road dust in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1645-1655.
- [28] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 330-493.
- [29] Pant P, Baker S J, Shukla A, *et al.* The PM₁₀ fraction of road dust in the UK and India: characterization, source profiles and oxidative potential[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **530-531**: 445-452.
- [30] 曹军骥. PM_{2.5}与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2014. 256-306.
- [31] Han S, Youn J S, Jung Y W. Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} source profiles for resuspended road dust collected using mobile sampling methodology [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(20): 3343-3351.
- [32] 康苏花, 李海峰, 赵鑫, 等. 石家庄市开放源颗粒物化学组成特征分析[J]. *科学技术与工程*, 2015, **15**(13): 221-225.
Kang S H, Li H F, Zhao X, *et al.* Analysis of characteristics and chemical composition of open source particulate matter in Shijiazhuang city [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, **15**(13): 221-225.
- [33] Tsai J, Owega S, Evans G, *et al.* Chemical composition and source apportionment of Toronto summertime urban fine aerosol (PM_{2.5}) [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2004, **259**(1): 193-197.
- [34] 王珍, 郭军, 陈卓. 贵阳市 PM_{2.5} 主要污染源成分谱分析[J]. *安全与环境学报*, 2016, **16**(2): 346-351.
Wang Z, Guo J, Chen Z. Analysis of the source componential spectrum of PM_{2.5} emission in Guiyang [J]. *Journal of safety and Environment*, 2016, **16**(2): 346-351.



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, CAO 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 Jian-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 in 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)