

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.12
第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛,高愈霄,刘冰,王晓彦,朱莉莉,许荣,汪巍,丁俊男,李健军,段小丽(5191)

2016~2017年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴,王杰,高健,徐仲均,车飞,马彤,杨艳,刘素,闫璐璐(5202)

霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬,刘安康,卢文,杨晓旻,王红磊,陈魁,夏丽(5213)

上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃,戴海夏,张蕴晖,乔利平,马英歌,周敏,夏斌,朱清扬,赵迎亚,黄成(5224)

固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤,邓建国,王刚,张莹,李妍菁,段雷,郝吉明(5234)

家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮,曾春玲,刘锐源,姚懿娟,柯云婷,范丽雅,叶代启(5240)

抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛,吕怡蓉,边文璟,牛文凤,袁前程,段二红,于洋,林军(5250)

新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路,吴锦涛,张颖,孙玉静,乔泓钦,张子伟,裴梦园,张孟琼,任明浩(5258)

成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红,朱和祥,叶芝祥,印红玲,孙静(5265)

祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟,李宗省,王昱,李永格,吕越敏,袁瑞丰,桂娟(5272)

长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟,张芹,宋宁慧,卜元卿,杨正标,刘艳华,郭瑞昕,陈建秋,张圣虎(5286)

夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰,黄廷林,程亚,张莎莎,阮昭意,卢磊(5294)

浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍,于建全,李青松,马晓雁,杨玉龙,贾佳(5302)

三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇,李思悦(5309)

川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨,孙辉,刘琛,王小沁(5318)

三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞,刘京,邓开开,先宇,王伟,方芳,欧阳文娟,郭劲松(5330)

九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲,唐莉,黄金良,肖才荣(5340)

不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜,刘玲玲,游清徽,田娜,吴燕平,阳文静(5348)

太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪,文帅龙,孙培荣,徐楚天,李大鹏,黄勇(5358)

太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪,祁闯,张新厚,韩睿明,黄和笑,王卓森,王国祥(5367)

降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹,雷秋良,周脚根,张亦涛,李影,胡万里,武淑霞,翟丽梅,王洪媛,刘宏斌(5375)

外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹,孙萍,陈广琳,陈友媛,彭昌盛(5384)

泽泻(*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团,李贝贝,王赛,华佩,陈军,应光国(5394)

复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰,郑煜铭,李清飞,赵承美,魏巍,张凯(5401)

铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷,赵钰颖,林建伟,詹艳慧,秦琴(5411)

生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响 陈梅,王芳,张德俐,易维明(5421)

溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹,刘灵婕,王芬,季民(5430)

间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬,刘志成,徐贵达,李帅,张杰(5438)

共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹,刘梦瑜,刘冰茵,赵治国,袁林江(5446)

阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬,魏子清,劳会妹,李帅,张杰(5456)

酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡,向金豪,刘英,龚天翼,张彬辉,吕文洲(5465)

基于 GEE 的 1998~2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿,付波霖,林星辰,闭璐,马瑞雪,唐廷元(5473)

基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰,濮励杰,朱明,吴涛,许艳(5484)

淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬,黄佳芳,罗敏,刘育秀,谭季,朱爱菊,王声钰,仝川(5493)

养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇,肖薇,张秀芳,张弥,张文庆,刘强,陈争,董保华,李旭辉(5503)

施肥对高粱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞,张媛,焦晓燕(5515)

高硒高镉区土地安全区划方法 王锐,侯宛苓,李雨潼,余涛,陈娟(5524)

不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰,许晨阳,耿增超,王强,祝乐,龚园,拓卫卫(5531)

水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅,刘刚,王慧峰,胡文友,黄标(5540)

狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健,朱旭炎,陆金,孙雨,赵兴青(5550)

林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊,吴宪,李刚,修伟明,王丽丽,张贵龙(5561)

粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑

粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英,董敏刚,邓一荣,肖荣波,刘丽丽(5570)

粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁,张盛,杨海超,张建通(5581)

城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响:以粤港澳大湾区为例 马仕君,周传斌,杨光,赵志岚,刘懿颀(5593)

粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽,龚星,詹泽波,刘锋,黄子航,杨立宏,林晓琛(5604)

粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣,陆海建,董敏刚,程洲,庄长伟,肖荣波,钟音,彭平安(5615)

针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧,李想,周阳媚,唐杰鹏,林亲铁,姚琨(5623)

广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜,刘广波,崔金立,肖唐付(5629)

Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺,罗飞,朱艳,杨坤,郝秀平(5640)

《环境科学》第 40 卷(2019 年)总目录 (5649)

《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响

李琦路¹, 吴锦涛¹, 张颖¹, 孙玉静¹, 乔泓钦¹, 张子祎¹, 裴梦园¹, 张孟琼¹, 任明浩²

(1. 河南师范大学环境学院, 黄淮水环境与污染防治教育部重点实验室, 河南省环境污染控制重点实验室, 新乡 453007; 2. 华北水利水电大学地球科学与工程学院, 郑州 450046)

摘要: 以新乡市主要道路的地表灰尘为样本, 采用电感耦合等离子体质谱仪和气相色谱质谱联用仪分别测定所含 5 种重金属 (Cd、Pb、Cr、Cu 和 Zn) 和 15 种多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 的含量, 并探究了机动车排放对其污染特征的影响。结果显示, 重金属和 PAHs 的含量范围分别为 2.58 ~ 1560 mg·kg⁻¹ 和 ND ~ 1.30 mg·kg⁻¹, 其含量总体上随灰尘粒径减小而增高。组成上, 重金属以 Zn 为主, PAHs 主要以高环为优势组分。空间分布上, 重金属和 PAHs 含量存在差异: 人民路、小店工业园区和水泥厂附近道路灰尘中的重金属总含量最高, 而 PAHs 含量的高值出现在人民路、高速上口和 107 国道的灰尘中。Pearson 相关分析表明, 5 种重金属与 15 种 PAHs 间基本不存在正相关关系。通过聚类分析和因子分析发现, 新乡市道路灰尘中的重金属基本不受机动车排放影响, 而 PAHs 受机动车排放影响较大。

关键词: 道路灰尘; 重金属; 多环芳烃 (PAHs); 污染特征; 机动车排放

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5258-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901050

Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang

LI Qi-lu¹, WU Jin-tao¹, ZHANG Ying¹, SUN Yu-jing¹, QIAO Hong-qin¹, ZHANG Zi-yi¹, PEI Meng-yuan¹, ZHANG Meng-qiong¹, REN Ming-hao²

(1. Key Laboratory for Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 2. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In this study, samples were taken of the surface dust of main roads in Xinxiang City, and the concentrations of five heavy metals (Cd, Pb, Cr, Cu and Zn) and fifteen polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), respectively. Meanwhile, the effects of vehicle emissions on the pollution characteristics were investigated. The results showed that the concentrations of heavy metals and PAHs ranged from 2.58 to 1560 mg·kg⁻¹ and ND to 1.30 mg·kg⁻¹, respectively. Overall, the concentrations of heavy metals and PAHs increased with a decrease in dust particle size. In terms of composition, the heavy metals were dominated by Zn while the high-molecular-weight PAHs were mainly homologous. In spatial distribution, the concentrations of heavy metals and PAHs were different. The total concentrations of heavy metals in road dust near Renmin Road, Xiaodian Industrial Park, and Cement Plant were the highest, while the high concentrations of PAHs appeared in the dust of Renmin Road, Upper Expressway, and 107 National Highway. Pearson correlation analysis showed that there was no positive correlation between the five heavy metals and fifteen PAHs. Then cluster analysis and factor analysis indicated that the PAHs were greatly affected by vehicle emissions, while the heavy metals were basically unaffected.

Key words: road dust; heavy metals; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); pollution characteristics; vehicle emissions

道路表面灰尘是城市环境污染物之一^[1], 其来源不仅受大气降尘、雨水径流、风力等自然因素的影响^[2], 同时也受交通排放(汽车尾气、轮胎磨损、制动器磨损和汽车外壳等)、农业生产、火电厂、钢铁厂和金属制造厂等多种人为因素的影响^[3]。随着城市化和工业化进程的不断加快, 城市交通网的完善及人均汽车保有量的增加, 使得交通污染成为城市道路灰尘的主要贡献之一。

机动车可造成重金属和 PAHs 污染^[1, 4]。这两类污染物具有持久性、难降解等特点, 可长期积累

于灰尘中。同时, 因具有较强的“三致效应”与生物蓄积性, 当进入人体后, 会造成直接或潜在的健康危害^[5, 6]。机动车对重金属和 PAHs 影响的研究开展较多, 如有研究报道, 不同工况下汽油车和柴油车尾气中 PAHs 的含量有所不同^[1], 而邵莉^[7]指出重金属含量与交通流量成正比。但是, 城市道路行驶的

收稿日期: 2019-01-05; 修订日期: 2019-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41703126); 河南省科技攻关计划(重点)项目(152102310316); 河南省高等学校重点科研项目(19A170009)

作者简介: 李琦路(1983~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为毒害污染物环境行为, E-mail: lqlblue@hotmail.com

机动车类型和数量对道路灰尘中重金属和 PAHs 的影响仍不明。

本研究采集河南省新乡市主要街区道路的地表灰尘,检测样品中镉(Cd)、铅(Pb)、铬(Cr)、铜(Cu)和锌(Zn)这 5 种重金属元素和 15 种 PAHs 的含量,并结合采样点交通统计数据,用 Pearson 相关性分析、聚类分析和因子分析探究 重金属与 PAHs 的相互关系及机动车类型与数量对其的影响。

1 材料与方法

1.1 采样情况

选取新乡市市区及周边具有代表性的道路,布

设 10 个采样点(图 1),经纬度用 GPS 仪获得。采样时间为 2016 年 11 月 30 日~12 月 2 日,晴朗无风,在距街道边缘 1.5~2 m 的路面选取 3~5 处(每处 5~10 m²),用细毛刷和塑料铲子进行采集,多点混合后,放入自封袋中保存,每份样品质量为 200~300 g。采样道路的车流信息经现场统计:各点位每 10 min 记录 1 次机动车的类型与数量,共 3 次,汇总得出交通数据(表 1)。

采集的样品经冷冻干燥后,去除动植物残体、砂砾等杂物,然后依次用筛孔直径分别为 600、238 和 120 μm 的筛子筛分,得到各粒径范围下的道路灰尘样品备用待测。

表 1 采样信息与道路交通统计数据/辆·(30 min)⁻¹

Table 1 Information of sampling and the date of traffic vehicle data/n·(30 min)⁻¹

编号	样点	采样时间	公交和 大巴	商务和 面包车	轿车	货车	农用燃油 三轮车	燃油两轮 摩托车	总计
S1	新长大道	14:00~14:40	13	64	225	27	6	9	344
S2	新辉公路	09:10~09:50	51	100	358	33	24	32	598
S3	人民路	15:00~15:40	12	157	359	209	44	19	800
S4	环宇立交桥	10:20~11:00	45	153	478	266	37	58	1 008
S5	小店工业园区	16:00~16:40	13	52	225	10	6	9	315
S6	高速上口	09:20~10:00	0	13	90	17	0	0	120
S7	高速下口	10:10~10:50	2	5	84	15	0	0	106
S8	107 国道	10:30~11:10	16	139	130	319	445	21	1 070
S9	水泥厂附近道路	15:10~15:50	0	0	52	12	0	0	64
S10	河师大道路	09:00~09:40	0	2	34	2	1	4	43

1) S1、S5、S8 和 S10 采样时间为 11 月 30 日;S6、S7 和 S9 采样时间为 12 月 1 日;S2、S3 和 S4 采样时间为 12 月 2 日



图 1 采样点位及空间分布示意

Fig. 1 Sampling sites and spatial distribution diagram

1.2 分析方法

1.2.1 重金属

使用 MDS-6G 型多型通量微波消解仪(上海新仪微波化学科技有限公司)消解样品,具体步骤如

下:准确称取 0.20 g 样品置于消解罐中,依次加入 6 mL 浓 HNO₃、2 mL H₂O₂ 和 1 mL HF 的酸体系,采用三步升温法(单罐功率 400 W,130、150、180 和 210℃ 条件下分别保持 10、5、5 和 15 min)进行消

解. 用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定 Cd、Pb、Cr、Cu 和 Zn 这 5 种重金属含量.

1.2.2 多环芳烃

准确称量 2.00 g 样品,样品处理前加入 5 种氘代 PAHs(萘-D8、二氢萘-D10、菲-D10、蒽-D12 和芘-D12)作为回收率指示物. 用二氯甲烷索氏提取 24 h,之后用正己烷进行溶剂置换并用旋转蒸发器浓缩至 0.5 mL,然后经过层析柱净化,层析柱填充物从上到下依次为:无水硫酸钠(1 cm)、中性硅胶(3 cm,3%)和中性氧化铝(3 cm,3%),用 20 mL 的正己烷/二氯甲烷的混合溶液(体积比为 1:1)洗脱,洗脱液氮吹浓缩至约 0.5 mL 待测.

采用安捷伦 7890GC-5975MS、DB5-MS 柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm)和 EI 离子源测定 15 种 PAHs: 萘(Naphthalene, Nap)、二氢萘(Acenaphthene, Ace)、芴(Fluorene, Flu)、菲(Phenanthrene, Phe)、蒽(Anthracene, Ant)、荧蒽(Fluoranthene, Fla)、芘(Pyrene, Pyr)、蒽(Chrysene, Chry)、苯并[a]蒽[Benzo(a)anthracene, BaA]、苯并[b]荧蒽[Benzo(b)fluoranthene, BbF]、苯并[k]荧蒽[Benzo(k)fluoranthene, BkF]、苯并[a]芘[Benzo(a)pyrene, BaP]、二苯并[a,h]蒽[Dibenzo(a,h)anthracene, DahA]、苯并[ghi]芘[Benzo(g,h,i)perylene, BghiP]和茚并[1,2,3-cd]芘[Indeno(1,2,3-cd)pyrene, InP].

1.2.3 质量控制与保证

重金属分析过程中加入国家土壤标准参比物质 GSS1,制备 3 个平行样进行实验流程质量控制, GSS1 的回收率为 94.7%~98.6%,平行样的标准偏差均小于 10%,测定结果达到控制要求. 为确保分析结果准确可靠,所有使用工具均不含金属成分. 分析 PAHs 所用玻璃器皿及层析柱填充物均经马弗炉 450℃ 高温煅烧 12 h. 测定样品时,程序空白与样品同流程操作以排除分析过程中可能存在的干扰,

除 Nap、Flu 和 Phe 外,在空白中未检测到其他目标物. 5 种氘代 PAHs(萘-D8、二氢萘-D10、菲-D10、蒽-D12 和芘-D12)在样品中的平均回收率分别为(74.5 ± 5.9)%、(80.8 ± 4.8)%、(89.1 ± 5.1)%、(89.9 ± 4.0)%和(81.5 ± 7.3)%,本研究报道的结果进行了空白校正,但未经回收率校正.

1.2.4 数据统计分析

本研究使用 IBM SPSS Statistics 22 进行统计分析,分析前利用单样本 K-S 检验法对数据进行正态分布检验(数据均已扣除背景值),结果显示偏度值均大于零,遂按如下方法将非正态分布的数据转换为正态分布:若偏度值为其标准误的 2~3 倍,利用平方根转换;若偏度值为其标准误差值的 3 倍以上,利用对数转换(取自然对数). 待数据均呈正态分布后再进行 Pearson 相关性分析、聚类分析及因子分析. 此外,使用 Excel 2016 进行单因素方差分析,比较重金属和 PAHs 含量间的差异性:若 $P < 0.05$,说明存在显著差异,反之则无显著差异.

2 结果与讨论

2.1 污染特征

2.1.1 重金属

新乡市道路灰尘中重金属的含量范围为 2.58~1560 mg·kg⁻¹,显著高于新乡市土壤和近年来国内城市灰尘的重金属含量(表 2, $P < 0.05$). 明显高的 Cd 和 Pb 含量($P < 0.05$)可能与新乡市发达的电池产业有关,铅酸蓄电池和镍镉电池的生产过程中会排放大量 Pb 和 Cd^[8,9]. Pb 也可能来自燃煤排放^[10],这与新乡市能源结构吻合. 重金属以 Zn 为优势单体,与其他城市一致,可能受各地土壤背景值的高含量 Zn 影响^[11~14]. 从粒径分布上看[图 2(a)],重金属主要集中在粒径为 238 μm 和 120 μm 的道路灰尘中,且含量随粒径的减小而增大. 造成这一规律的原因可能是道路灰尘粒径越小,对重金属的贡献率越高^[15].

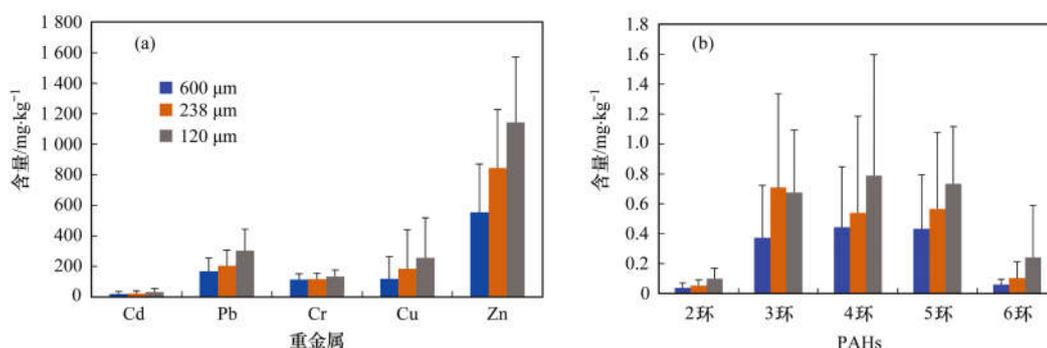


图2 重金属和 PAHs 含量的粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution of heavy metals and PAHs concentrations

2.1.2 多环芳烃

道路灰尘中 PAHs 的含量范围为 ND ~ 1.30 mg·kg⁻¹, PAHs 单体含量与其他城市相差不大(表 3, $P > 0.05$). 新乡市道路灰尘中以高环组分为主, 可能是由于高环 PAHs 分子量较大, 易黏附在颗粒物上沉降于地面^[20]; 而低环 PAHs 由于分子量较

小, 较易挥发和降解^[21]. 总体上, 灰尘粒径越小, PAHs 含量越高[图 2(b)]. 而 3 环 PAHs 略有不符, 238 μm 中的 3 环 PAHs 含量略高于 120 μm. 这主要是受到个别样点(S6、S7 和 S9)灰尘中少数几种单体(Ace、Phe 和 Ant)的高含量值影响, 拉高了其平均值.

表 2 重金属含量的平均值与相对质量分数¹⁾

Table 2 Mean concentrations and relative mass fractions of heavy metals

城市	样品	Cd	Pb	Cr	Cu	Zn	文献
新乡	道路灰尘	27.1(1.98)	241(17.6)	116(8.46)	115(8.39)	872(63.6)	本研究
新乡	土壤	16.6(2.33)	62.3(8.74)	32.6(4.58)	48.0(6.74)	553(77.6)	[13]
洛阳	道路灰尘	1.79(0.16)	83.6(7.28)	198(17.2)	117(10.2)	748(65.1)	[16]
开封	地表灰尘	1.02(0.21)	145(30.0)	53.3(11.0)	44.3(9.16)	240(49.6)	[17]
许昌	街道灰尘	—	41.9(13.1)	96.8(30.3)	35.4(11.1)	145(45.4)	[18]
西安	城市灰尘	—	145(22.3)	213(32.7)	59.4(9.12)	234(35.9)	[14]
天津	道路灰尘	0.99(0.35)	61.5(21.7)	121(42.7)	100(35.3)	—	[11]
北京	道路灰尘	0.71(0.15)	69.6(14.4)	85.0(17.6)	78.3(16.2)	249(51.6)	[19]

1) 括号外数值表示含量, mg·kg⁻¹; 括号内数值表示所占质量分数, %; “—”表示无相关数据

2.1.3 空间分布

空间分布特征可在一定程度上反映道路灰尘中重金属和 PAHs 与周边环境及车辆信息的关系. 本研究中, 道路灰尘中重金属和 PAHs 含量的空间分布存在差异: S3、S5 和 S9 灰尘中的重金属总含量最高, 而 PAHs 含量的高值出现在 S3、S6 和 S8 的灰尘中(图 1). S3 车流量大, 周围为居民区且无工业企业, 由此推测机动车排放是造成高含量的主要原因, 而已有研究也指出汽油和柴油的使用会排放 Pb 和 Zn 等重金属^[22]与 PAHs^[21]. S5 和 S9 车辆较少, 其高含量的重金属可能主要来自工业排放. 同时发现, S3 和 S8 道路灰尘中柴油车标识单体 Chry^[1]的含量最高, 这也与 2 个样点车流信息中柴油货车的数量较多相吻合. 总体上, 车流量较大的样点灰尘中 PAHs 总含量普遍高于车流量较少的, 但 S6 的车流量较少而 PAHs 总含量较高, 可能与该点机动车

怠速状态下更易排放 PAHs^[23]有关.

2.2 污染物间的相关性分析

用 Pearson 相关分析新乡市道路灰尘中 5 种重金属和 15 种 PAHs 间的相关性(见表 4), Cd 和 Pb、Cr 和 Cu 之间分别呈显著正相关($r = 0.658, P < 0.05$; $r = 0.709, P < 0.05$), 表明 Cd 和 Pb、Cr 和 Cu 可能分别来自相似的污染源, Cd 和 Pb 可能与新乡电池产业有关^[8, 9]; 而 Cr 和 Cu 的含量较低且变异系数较小($CV = 28.8\%$, $CV = 14.1\%$), 且仅在 S9(车辆较少)检测到较高含量, 因此二者不大可能受人为因素影响. Flu 和 Phe、Ant 和 Pyr、Fla 和 BaA、BbF 和 Chry 之间分别呈显著正相关($r = 0.713, P < 0.05$; $r = 0.853, P < 0.01$; $r = 0.760, P < 0.05$; $r = 0.912, P < 0.01$), 而 Phe、Pyr、Fla、BbF 和 Chry 来自于机动车排放^[1], 推断这 5 种 PAHs 单体与机动车排放存在一定关系. 从表 4 也可看出, Pb 和 Pyr

表 3 PAHs 含量的平均值与相对质量分数

Table 3 Mean concentrations and relative mass fractions of PAHs

项目	3 环				4 环				文献
	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	Chry	BaA	
新乡 ¹⁾	0.83(13.4)	0.24(3.86)	0.64(10.3)	0.40(6.44)	0.65(10.5)	0.21(3.38)	0.14(2.25)	0.77(12.4)	本研究
北京 ¹⁾	0.01(0.29)	0.06(1.72)	0.46(13.2)	0.04(1.15)	0.69(19.8)	0.43(12.4)	0.46(13.2)	0.17(4.89)	[24]
石家庄 ¹⁾	0.51(6.79)	0.13(1.73)	0.80(10.7)	0.06(0.80)	1.14(15.2)	0.46(6.13)	0.77(10.3)	0.33(4.39)	[25]
西安 ¹⁾	0.12(0.88)	0.30(2.20)	1.56(11.4)	0.58(4.25)	1.92(14.1)	1.38(10.1)	1.45(10.6)	0.71(5.20)	[21]
开封 ²⁾	0.01(0.12)	0.03(0.35)	1.33(15.7)	0.65(7.67)	0.97(11.4)	0.72(8.49)	0.43(5.07)	0.84(9.91)	[26]
项目	2 环		5 环			6 环		文献	
	Nap	BbF	BkF	BaP	DahA	BghiP	InP		
新乡 ¹⁾	0.19(3.06)	0.72(11.6)	0.04(0.64)	0.08(1.29)	0.90(14.5)	0.23(3.70)	0.17(2.74)	本研究	
北京 ¹⁾	0.09(2.59)	0.35(10.1)	0.21(6.03)	0.13(3.74)	0.04(1.15)	0.16(4.60)	0.18(5.17)	[24]	
石家庄 ¹⁾	0.58(7.72)	0.81(10.8)	0.16(2.13)	0.57(7.59)	0.54(7.19)	0.41(5.46)	0.24(3.20)	[25]	
西安 ¹⁾	0.24(1.76)	1.01(7.39)	0.88(6.44)	0.81(5.93)	0.62(4.54)	1.18(8.64)	0.90(6.59)	[21]	
开封 ²⁾	0.11(1.30)	0.66(7.78)	0.32(3.77)	1.14(13.4)	0.54(6.37)	0.19(2.24)	0.54(6.37)	[26]	

1) 代表样品类型为道路灰尘; 2) 代表样品类型为公园地表灰尘; 括号外数值表示含量, mg·kg⁻¹; 括号内数值表示所占质量分数, %

表 4 重金属和 PAHs 间的相关性 (Pearson 相关)¹⁾

Table 4 Correlation between heavy metals and PAHs (Pearson correlation)

	Cd	Pb	Cr	Cu	Zn	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	BaA	Chry	BbF
Cd	1												
Pb	0.658*	1											
Cr	-0.303	-0.211	1										
Cu	-0.337	-0.148	0.709*	1									
Zn	0.354	0.457	0.179	0.172	1								
Flu	0.257	0.426	-0.260	-0.131	0.207	1							
Phe	0.598	0.593	-0.336	-0.343	0.232	0.713*	1						
Ant	0.490	0.618	-0.105	-0.280	-0.012	0.443	0.803**	1					
Fla	0.116	0.341	0.507	0.581	0.414	0.178	0.155	-0.038	1				
Pyr	0.246	0.694*	-0.156	-0.113	0.365	0.398	0.723*	0.853**	0.297	1			
BaA	-0.166	-0.078	0.232	0.358	0.329	0.154	0.149	-0.174	0.760*	0.238	1		
Chry	-0.104	-0.419	-0.067	0.043	0.137	0.158	0.140	-0.380	0.218	-0.246	0.676*	1	
BbF	-0.168	-0.433	-0.100	-0.220	0.108	-0.014	0.033	-0.342	-0.089	-0.260	0.510	0.912**	1

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

间的相关系数为 0.694 ($P < 0.05$), 呈显著正相关, 推测二者可同时存在于道路灰尘中而不发生竞争吸附. 除此之外, 其他重金属与 PAHs 之间无显著相关性, 一定程度上表明重金属和 PAHs 的主要来源贡献可能不同.

2.3 机动车影响

道路灰尘中重金属和 PAHs 来源复杂, 土壤扬尘、工业源与机动车源均有影响. 一般认为, 汽油和柴油的使用会排放 Pb、Zn 以及其他重金属^[22], 同时对 PAHs 的贡献也较大^[21, 27-29]. 此外, 工业源与燃烧源对重金属和 PAHs 亦有贡献^[3, 21]. 前文已对新乡市道路灰尘中重金属和 PAHs 的污染特征进行了描述, 并通过相关性分析判断其来源, 发现重金属和 PAHs 主要来源存在一定差异. 考虑到有研究指出, 道路灰尘中重金属与 PAHs 含量通常与机动车排放存在较好的线性关系^[7, 21]. 因此, 需要进一步分析机动车对重金属和 PAHs 的影响. 根据每条道路车流量的不同, 通过聚类分析将道路样点分为两类(图 3): 第一类为 S1、S5、S6、S7、S9 和 S10, 第二类为 S2、S3、S4 以及 S8. 再按分类将重金属和 PAHs 含量分别与车辆类型及流量做因子分析.

本研究中, 5 种重金属与机动车流量间无显著相关性 ($P > 0.05$). 而因子分析显示, 除第二类中的 Cr 与轿车团聚在一起外, 其余重金属与车辆较离散[图 4(a)]和[图 4(b)], 反映了新乡市机动车对道路灰尘中重金属的污染特征影响不大. 这可能与前文中提到的 PAHs 在与重金属的竞争性吸附中占据优势, 从而使重金属在道路灰尘中的吸附量较少有关^[30]. 另一方面也可能由于工业源及自然源对道路灰尘重金属的贡献, 导致机动车排放并不是主要影响因素.

因子分析显示, 第一类中的公交和大巴、商务和面包车、轿车、农用燃油三轮车和燃油两轮摩托

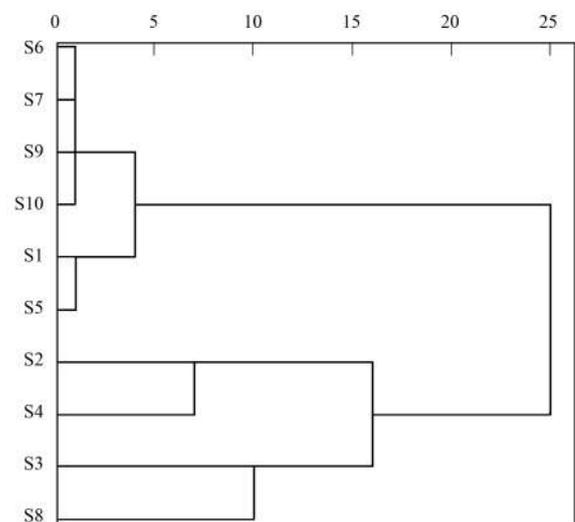


图 3 道路样点聚类分析结果

Fig. 3 Cluster analysis result for the road samples

车与 Chry 和 BbF 团聚在一起[图 4(c)], 说明这两种 PAHs 与大部分车辆类型间都存在显著关系, 受因子 1 影响较大. 第二类中的货车与 Pyr、商务和面包车与 Phe 和 Flu 团聚在一起[图 4(d)], 且在商务和面包车较多的道路上其对应的 Phe 和 Flu 的含量也较高, 说明三者间关系显著, 主要受因子 1 影响; 农用燃油三轮车与 BbF、BaA 和 Chry 团聚在一起, S3 和 S8 上农用燃油三轮车较多, 其对应的 BbF、BaA 和 Chry 的含量高于其他道路, 由此推断三者间存在显著关系, 主要受因子 2 影响. 此外, 轿车与 Ant、公交和大巴及燃油两轮摩托车与 Ace 分别团聚在一起. S4 的轿车最多, Ant 含量也最高; 而 S2 的公交和大巴与燃油两轮摩托车最多, Ace 含量最高, 表明轿车与 Ant、公交和大巴及燃油两轮摩托车与 Ace 分别存在显著关系. 通过聚类后再进行因子分析, 表明 PAHs 含量受机动车影响相对较大, 进一步说明机动车排放可能是道路灰尘中 PAHs 的主要来源.

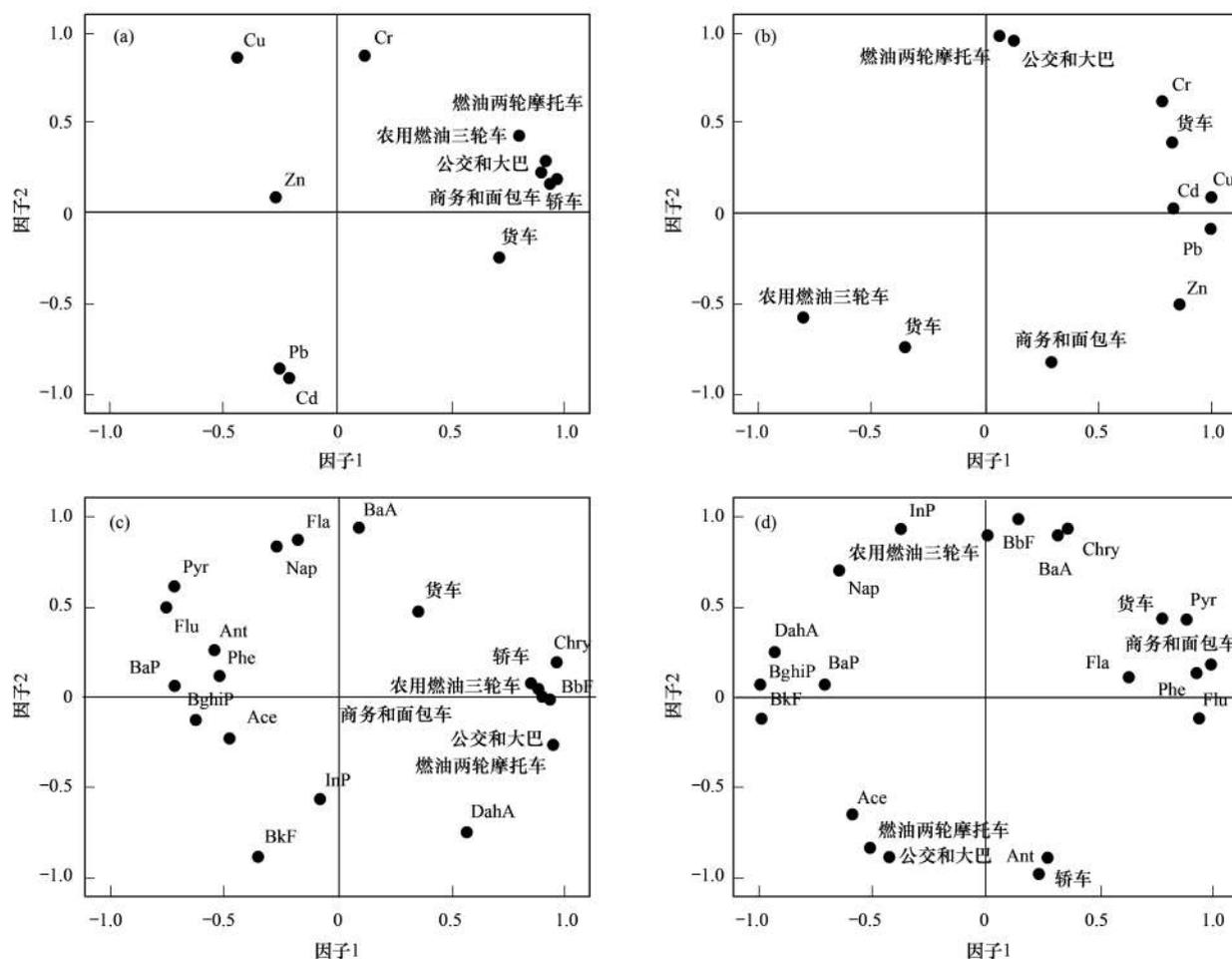


图4 因子分析载荷图

Fig. 4 Factor analysis load diagram

3 结论

(1) 新乡市道路灰尘中重金属污染严重, 显著高于当地土壤以及其他城市, PAHs 含量分布与其他城市类似。

(2) 新乡市道路灰尘重金属组成中 Zn 为优势单体, 5 种重金属主要集中在粒径为 238 μm 和 120 μm 的道路灰尘中。PAHs 主要以高环为主, 且总体上 PAHs 的含量随灰尘粒径的减小而增大。

(3) 新乡市道路灰尘中重金属和 PAHs 主要来源不同, 通过聚类分析和因子分析判断机动车排放对污染物的影响, 发现机动车排放对新乡市道路灰尘中重金属含量影响不大, 而对 PAHs 含量影响相对较大。

参考文献:

- [1] Zhang J, Li R F, Zhang X Y, *et al.* Traffic contribution to polycyclic aromatic hydrocarbons in road dust: a source apportionment analysis under different antecedent dry-weather periods[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 996-1005.
- [2] Gbeddy G, Jayarathne A, Goonetilleke A, *et al.* Variability and uncertainty of particle build-up on urban road surfaces [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **640-641**: 1432-1437.
- [3] 李小平, 高瑜, 张蒙, 等. 城市土壤重金属空间分布、污染与来源[J]. *环境科学与技术*, 2018, **41**(6): 138-146. Li X P, Gao Y, Zhang M, *et al.* Heavy metals in urban soil: spatial distribution, source and pollution assessment. *Environmental Science and Technology*, 2018, **41**(6): 138-146.
- [4] Wang S, Cai L M, Wen H H, *et al.* Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soil from a typical county-level city of Guangdong Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **655**: 92-101.
- [5] 伯鑫, 王刚, 温柔, 等. 焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评估研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2742-2747. Bo X, Wang G, Wen R, *et al.* Health risk assessment of coke oven PAHs emissions [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2742-2747.
- [6] Song Y X, Li H M, Li J Z, *et al.* Multivariate linear regression model for source apportionment and health risk assessment of heavy metals from different environmental media [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **165**: 555-563.
- [7] 邵莉. 江西省高速公路沿线环境介质中重金属污染特征及其影响因素研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012. 41-42. Shao L. A study on the pollution characteristics of heavy metals in atmospheric particles, road dusts, and soils adjacent to three highways in Jiangxi Provinces and their influencing factors[D]. Nanchang: Nanchang University, 2012. 41-42.
- [8] 任贝, 黄锦楼, 苗明升. 铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3697-

3703.
Ren B, Huang J L, Miao M S. Analysis of washing efficiency and change in lead speciation in lead-contaminated soil of a battery factory [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (9): 3697-3703.
- [9] Hazotte C, Leclerc N, Meux E, *et al.* Direct recovery of cadmium and nickel from Ni-Cd spent batteries by electroassisted leaching and electrodeposition in a single-cell process [J]. *Hydrometallurgy*, 2016, **162**: 94-103.
- [10] Liang F, Zhang G L, Tan M G, *et al.* Lead in children's blood is mainly caused by coal-fired ash after phasing out of leaded gasoline in Shanghai [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(12): 4760-4765.
- [11] 孙宗斌, 周俊, 胡蓓蓓, 等. 天津城市道路灰尘重金属污染特征[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(1): 157-163.
Sun Z B, Zhou J, Hu B B, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in urban street dust of Tianjin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(1): 157-163.
- [12] 陈同斌, 郑表明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. *环境科学*, 2004, **25**(1): 117-122.
Chen T B, Zheng Y M, Chen H, *et al.* Background concentrations of soil heavy metals in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(1): 117-122.
- [13] 马鑫. 新乡土壤污染重金属形态分析及 pH 与腐植酸对其影响的研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2013. 17-20.
Ma X. The speciation analysis of heavy metals and the study of their changes affected by pH and humic acid in polluted soils in Xinxing city [D]. Xinxing: Henan Normal University, 2013. 17-20.
- [14] 王丽, 王利军, 史兴民, 等. 西安城区地表灰尘中重金属分布、来源及潜在生态风险[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40** (7): 180-187.
Wang L, Wang L J, Shi X M, *et al.* Distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in surface dusts from urban areas of Xi'an city [J]. *Environmental Science and Technology*, 2017, **40**(7): 180-187.
- [15] 代勇, 李章平, 李海燕, 等. 重庆市主城区街道灰尘重金属的污染特征分析[J]. *环境化学*, 2015, **34**(1): 188-189.
- [16] 刘德鸿, 王发园, 周文利, 等. 洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 253-259.
Liu D H, Wang F Y, Zhou W L, *et al.* Heavy metal pollution in street dusts from different functional zones of Luoyang City and its potential ecological risk [J]. *Environmental Science*, 2012, **33** (1): 253-259.
- [17] 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.
- [18] 闫慧, 陈杰, 肖军. 典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例[J]. *环境科学*, 2013, **34** (10): 4017-4023.
Yan H, Chen J, Xiao J. Heavy metal content in street dust and environmental risk assessment of agricultural city: a case study of Xuchang City [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (10): 4017-4023.
- [19] 向丽, 李迎霞, 史江红, 等. 北京城区道路灰尘重金属和多环芳烃污染状况探析[J]. *环境科学*, 2010, **31** (1): 159-167.
Xiang L, Li Y X, Shi J H, *et al.* Investigation of heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in street dusts in urban Beijing [J]. *Environmental Science*, 2010, **31** (1): 159-167.
- [20] 张玉凤, 宋永刚, 田金, 等. 辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1527-1536.
Zhang Y F, Song Y G, Tian J, *et al.* Occurrence and gas-particle partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons in the air of Liaodong Bay [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (4): 1527-1536.
- [21] 王丽, 王利军, 史兴民, 等. 西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37** (4): 1279-1286.
Wang L, Wang L J, Shi X M, *et al.* Distribution characteristics and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface dust of Xi'an City, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1279-1286.
- [22] 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.
- [23] 骆路胜, 高俊华, 张仲荣. 汽油车排气颗粒物中多环芳香烃的实验研究[J]. *汽车工程*, 2009, **31**(10): 947-951.
Luo L S, Gao J H, Zhang Z R. An experimental study on PAHs in exhaust particulate matter from gasoline vehicles [J]. *Automotive Engineering*, 2009, **31**(10): 947-951.
- [24] 叶友斌, 张巍, 王学军. 北京城市道路积尘中多环芳烃的分布特征[J]. *城市环境与城市生态*, 2009, **22**(3): 28-31, 35.
Ye Y B, Zhang W, Wang X J. Road dust PAHs in urban area of Beijing [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2009, **22** (3): 28-31, 35.
- [25] 张凯, 卢新卫, 罗润. 石家庄城市地表灰尘中多环芳烃的污染特征及来源[J]. *地球与环境*, 2018, **46**(3): 313-320.
Zhang K, Lu X W, Luo R. Sources and characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface dust of Shijiazhuang City [J]. *Earth and Environment*, 2018, **46**(3): 313-320.
- [26] 段海静, 蔡晓强, 陈轶楠, 等. 开封市公园地表灰尘 PAHs 污染与健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(12): 4500-4509.
Duan H J, Cai X Q, Chen Y N, *et al.* Occurrence and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface dust from parks in Kaifeng, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(12): 4500-4509.
- [27] Zhang J, Li R F, Zhang X Y, *et al.* Vehicular contribution of PAHs in size dependent road dust: a source apportionment by PCA-MLR, PMF, and Unmix receptor models [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 1314-1322.
- [28] Khairy M A, Lohmann R. Source apportionment and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Alexandria, Egypt [J]. *Chemosphere*, 2013, **91** (7): 895-903.
- [29] Hamid N, Syed J H, Junaid M, *et al.* Elucidating the urban levels, sources and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Pakistan: implications for changing energy demand [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 165-175.
- [30] 苏都尔·克热木拉, 伊丽米热·阿布达力木, 迪丽努尔·塔力甫. 乌鲁木齐市采暖期大气 PM_{2.5-10}、PM_{2.5} 中重金属和多环芳烃的分布及其相关性[J]. *环境化学*, 2013, **32**(4): 706-707.

CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengde	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cbbL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)