

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.5  
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律 ..... 张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)  
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征 ..... 王红丽,景盛翱,乔利平(2010)  
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征 ..... 沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)  
郑州-新乡冬季PM<sub>2.5</sub>中元素浓度特征及其源分析 ..... 闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)  
我国PM<sub>2.5</sub>浓度分阶段改善目标情景分析 ..... 贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)  
安阳市典型工业源PM<sub>2.5</sub>排放特征及减排潜力估算 ..... 杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)  
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单 ..... 赵庆炎,韩士杰,张轶舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)  
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性 ..... 乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)  
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势 ..... 刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)  
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征 ..... 李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)  
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布 ..... 黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)  
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价 ..... 刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)  
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价 ..... 范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)  
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征 ..... 陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)  
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义 ..... 袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)  
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素 ..... 黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)  
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素 ..... 周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)  
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析 ..... 秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)  
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力 ..... 黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)  
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素 ..... 李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)  
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险 ..... 李如忠,鲍琴,戴源(2178)  
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析 ..... 徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)  
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应 ..... 蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗冲,刘新亮,吴金水(2194)  
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估 ..... 张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)  
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征 ..... 马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)  
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析 ..... 刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)  
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征 ..... 樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)  
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响 ..... 黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娴(2234)  
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析 ..... 吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)  
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系 ..... 王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)  
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析 ..... 刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)  
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应 ..... 毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)  
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能 ..... 伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)  
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制 ..... 吕娟,许志伟,王言(2278)  
铝代水铁矿协同吸附砷的机制 ..... 黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)  
新型材料磁性氧化铁的除氯效能 ..... 方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)  
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制 ..... 祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)  
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化 ..... 吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)  
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征 ..... 马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)  
15℃ SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能 ..... 孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)  
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响 ..... 王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)  
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响 ..... 杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)  
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液 ..... 刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)  
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响 ..... 黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)  
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异 ..... 秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)  
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响 ..... 王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)  
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制 ..... 刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)  
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响 ..... 刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)  
地膜覆盖和施氮对菜地CH<sub>4</sub>排放的影响 ..... 倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)  
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响 ..... 王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)  
不同施肥模式对热区晚稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)  
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响 ..... 曾蔓蔓,慈思,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)  
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价 ..... 宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)  
超富集植物藿香蓟(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力 ..... 张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)  
种植油菜评价多环芳烃污染土壤的农用风险 ..... 焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)  
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应 ..... 舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)  
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价 ..... 吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)

《环境科学》征订启事(2018) 《环境科学》征稿简则(2042) 信息(2114, 2348, 2393)

## 上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析

吴杰<sup>1</sup>, 熊丽君<sup>2\*</sup>, 吴健<sup>2</sup>, 沙晨燕<sup>2</sup>, 唐浩<sup>2</sup>, 林匡飞<sup>1\*</sup>, 李大雁<sup>2</sup>, 沈城<sup>2</sup>

(1. 华东理工大学资源与环境工程学院, 国家环境保护化工过程环境风险评价与控制重点实验室, 上海 200237; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

**摘要:** 随着城市化发展, 我国城市地表径流污染问题日益突出, 交通道路地表径流多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)污染受到广泛关注. 以上海中心城区(漕宝路)和郊区(嘉金高速)交通道路为研究对象, 采集2017~2018年7场降雨地表动态径流水样, 分析道路地表径流多环芳烃的质量浓度特征及组成比例, 并采用特征比值法和正定矩阵因子法(positive matrix factorization, PMF)进行PAHs源解析, 从而明确交通道路地表径流PAHs的污染特征及来源差异. 结果表明, 郊区嘉金高速 $\sum 16\text{PAHs}$ 的几何均值( $5\,539.2\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )高于市区漕宝路( $548.1\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )10倍以上, 与嘉金高速货车比例大且清扫频率相对较低有关. 两个点位的苯并[a]芘[benzo(a)pyrene, BaP]均超过国家排放标准, 尤其嘉金高速超标21倍. 漕宝路和嘉金高速径流PAHs组分比例差异不大, 均以4~6环为主, 占比约80%. 通过特征比值法定性源解析发现, 漕宝路PAHs主要来自燃煤源和交通源; 嘉金高速PAHs主要来自石油、煤等燃烧源和交通源. PMF定量源解析表明, 漕宝路径流PAHs来源以燃气、燃煤源为主, 占48.6%, 其次为交通排放源和石油源, 分别占29.8%和21.7%; 嘉金高速道路径流PAHs来源贡献比从大到小依次为交通排放源、燃煤源、石油源以及炼焦源, 其贡献率分别为38.5%、34.6%、14.6%和12.6%. 市、郊道路的PAHs来源及贡献率存在显著差异, 燃气、燃煤源是市区漕宝路地表径流PAHs主要来源, 与其所在徐汇区人口密度大、燃气使用量相对较多有关; 交通排放源是郊区嘉金高速地表径流PAHs主要来源, 与其客、货车流量相对较大、其排放PAHs远高于轿车有关; 另外嘉金高速PAHs来源还存在炼焦源, 与青浦区工业煤炭使用量较大有关.

**关键词:** 交通道路; 地表径流; 多环芳烃(PAHs); 源解析; PMF模型

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2240-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201810055

## Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai

WU Jie<sup>1</sup>, XIONG Li-jun<sup>2\*</sup>, WU Jian<sup>2</sup>, SHA Chen-yan<sup>2</sup>, TANG Hao<sup>2</sup>, LIN Kuang-fei<sup>1\*</sup>, LI Da-yan<sup>2</sup>, SHNE Cheng<sup>2</sup>

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Risk Assessment and Control on Chemical Process, School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** Rapid urbanization has driven surface runoff pollution in urban areas to a serious state. In particular, polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs)from road surface runoff has attracted wide attention. Two traffic roads in Shanghai (Caobao Road in an urban central area, and Jiajin Expressway in the suburbs) were identified as research objects. Runoff samples from these two traffic roads were collected for 7 rainfall events between 2007 and 2018. Then, the concentration characteristics and composition ratio of PAHs were analyzed. The differences in pollution sources of runoff PAHs from two types of traffic roads were identified based on characteristic ratio method and positive matrix factorization(PMF). The results showed that the geometric mean value ( $5\,539.2\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ) of 16 PAHs of runoff from Jiajin Expressway in the suburbs was 10 times greater than that from Caobao Road ( $548.1\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ), which was related to a higher truck traffic and a lower cleaning frequency on Jiajin Expressway. The benzo(a)pyrene(BaP) concentration on both roads exceeded the national emission standard, and the amount in the Jiajin Expressway was up to 21 times higher than the standard. There was no significant difference in the composition of PAHs of runoff between Caobao Road and Jiajin Expressway, and 4-6 ring were dominant and responsible for 80% of total PAHs loads in both sites. Based on the analysis of the characteristic ratio method, the PAHs of runoff from Caobao Road mostly came from coal-fired sources and traffic sources, while that from Jiajin Expressway were mostly from fossil fuels, coal, and other traffic sources. Quantitative source analysis through PMF method showed that the primary sources of PAHs were gas and coal, accounting for 48.6%, followed by traffic emission sources (29.8%), and oil sources (21.7%). The contribution ratios of PAHs sources of runoff from Jiajin Expressway, sorted in descending order, are: traffic emission sources (38.5%), coal-fired sources (34.6%), oil sources (14.6%), and coking sources (12.6%). PAHs sources and contribution rates between urban and suburban roads are completely different. Gas and coal were the main sources of PAHs of runoff from Caobao Road, which was related to the high population density and relatively large gas consumption in the Xuhui District. Traffic emission was the main source of PAHs from surface runoff on Jiajin Expressway, which was related to the massive flow of coaches and trucks, and their

收稿日期: 2018-10-11; 修订日期: 2018-11-09

基金项目: 上海市科委项目(17DZ1202304); 上海市环境保护局重大项目(沪环科[2016]第5号); 国家自然科学基金项目(51679141)

作者简介: 吴杰(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地表有机污染物(多环芳烃)多界面环境过程, E-mail:wujie2012163@163.com

\* 通信作者, E-mail: xionglij@saes.sh.cn; kflin@ecust.edu.cn

higher PAHs emission compared to small cars. In addition, there are still coking sources of PAHs of runoff from Jiajin Expressway, which can be related to the massive industrial coal consumption in the Qingpu District.

**Key words:** traffic roads; surface runoff; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); source analysis; positive matrix factorization (PMF) model

地表径流污染是影响地表水环境质量的主要因素之一<sup>[1]</sup>. 由于汽车尾气排放、轮胎磨损、油品泄漏、路面老化、大气沉降等原因,道路积累了重金属、营养盐、PAHs 等污染物质<sup>[2]</sup>,这些污染物随着降雨径流进入受纳水体对水环境质量造成威胁<sup>[3]</sup>. PAHs 在环境中广泛存在并且对人类具有致癌、致畸、致突变的“三致效应”<sup>[4]</sup>,受到国内外研究者的关注. 随着城市化发展,我国城市地表径流污染问题日益突出,是 PAHs 等有机污染物进入地表水体的重要途径<sup>[5]</sup>.

有研究者发现不同下垫面的径流多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 污染存在差异,如谢继锋等<sup>[6]</sup>发现交通道路径流 PAHs 污染负荷明显高于广场和草地;武子澜等<sup>[7]</sup>发现道路地表径流中 PAHs 的质量浓度最大,高于校园、小区路面和小区屋面;吴巧花等<sup>[8]</sup>发现不同下垫面径流中 PAHs 的污染负荷大小排序为沥青 > 水泥 > 草地. 在交通道路地表径流 PAHs 来源方面,研究者发现大部分以燃煤源和交通源为主,如 Zhang 等<sup>[9]</sup>发现北京市机动车道路径流 PAHs 来源于机动车排放和煤炭燃烧;武子澜等<sup>[7]</sup>用因子分析法对交通路面径流 PAHs 来源进行解析,发现燃煤/燃油源占来源贡献率 53%.

现有报道主要以城市道路为研究对象,分析其地表径流 PAHs 污染特征及污染情况,对市区和郊

区道路地表径流 PAHs 的差异及来源对比分析较少. 另外郊区道路沿线大多分布农田,上海市土地利用数据分析表明,农田占全市用地的 29.4%,郊区道路地表径流 PAHs 对沿线农田造成的生态风险应当引起足够重视<sup>[10]</sup>. 因此,本文以上海市区和郊区道路为研究对象,利用特征比值法和正定矩阵因子分解法对降雨径流 PAHs 的来源进行解析,对比市区和郊区道路径流 PAHs 污染特征及来源差异,以期对降雨径流多环芳烃污染控制和农田生态健康风险评估提供借鉴.

## 1 材料与方法

### 1.1 监测点概况

上海属于高密度城区,不透水面积比例高,城市道路为除屋顶外的主要不透水下垫面,地表径流污染问题突出<sup>[7]</sup>. 以上海市徐汇区漕宝路和青浦区嘉金高速为研究对象,分别代表市区和郊区道路(表 1). 漕宝路位于上海市徐汇区漕宝路和钦州路交叉口,经纬度(31.174 574°N, 121.437 148°E),附近遍布居民区和商业区. 嘉金高速位于上海市青浦区华新镇华益路桥旁,经纬度(31.259 281°N, 121.249 207°E),监测点附近 0.5 km 内无居住区,监测点 20 m 外为农田(图 1). 两条道路所属的徐汇区和青浦区人口密度和燃料使用组成见表 2.

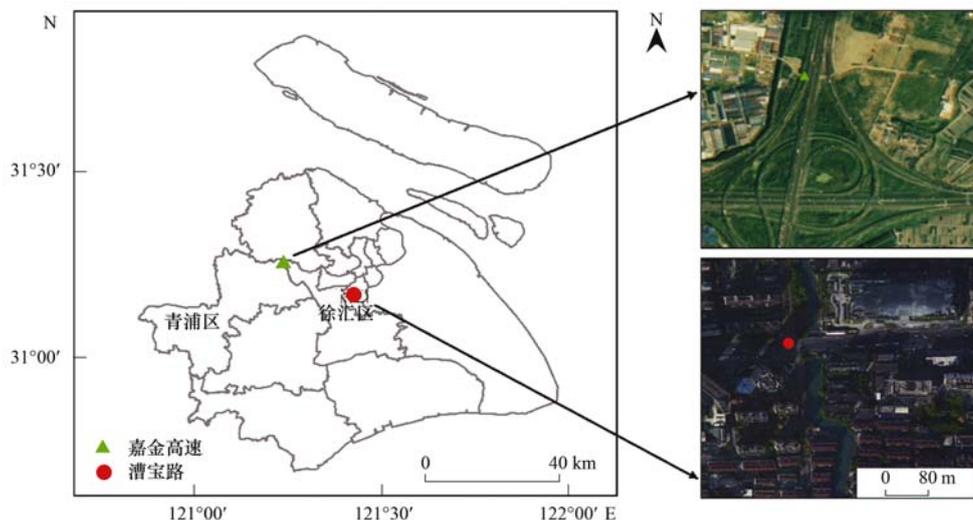


图 1 上海市区漕宝路与郊区嘉金高速采样点位置示意

Fig. 1 Sampling location of Caobao Road and Jiajin Expressway

### 1.2 样品采集

2017 ~ 2018 年雨季共监测 7 场道路降雨径流,

采用便携式采样器采集径流样品,共 38 个,其中漕宝路 2017 年 8 ~ 10 月采集 3 场降雨径流,场次降

雨量在 6.1 ~ 15.9 mm; 嘉金高速 2017 年 10 月 ~ ~49.4 mm. 7 场降雨的特征及降雨期间机动车平均流量见表 3.

表 1 地表径流采样点概况

Table 1 Sampling points of surface runoff

采样点	区域位置	道路特征	清扫频率 /次·周 <sup>-1</sup>	下垫面 材料	汇流面积 /m <sup>2</sup>
漕宝路	市区	双向混合车道, 车流量大, 轿车比例大	7 ~ 14	沥青	250
嘉金高速	郊区	单向机动车车道, 车流量大, 客、货车比例大	3 ~ 6	沥青	300

表 2 徐汇区、青浦区人口密度和燃料使用组成情况<sup>[11]</sup>

Table 2 Population density and fuel types in Xuhui and Qingpu District

区域	人口密度 /人·km <sup>-2</sup>	燃料组成		
		石油/kg	煤炭/kg	天然气/m <sup>3</sup>
徐汇区	19 825	4.29 × 10 <sup>9</sup>	1.92 × 10 <sup>9</sup>	3.3 × 10 <sup>5</sup>
青浦区	1 813	5.12 × 10 <sup>9</sup>	6.58 × 10 <sup>9</sup>	1.4 × 10 <sup>5</sup>

表 3 7 场降雨的特征参数

Table 3 Characteristic parameters of 7 rainfall events

样点	日期	平均雨强 /mm·min <sup>-1</sup>	总降雨量 /mm	降雨历时 /min	采样时车流量/辆·h <sup>-1</sup>		雨前干燥期 /h
					轿车	客、货车	
漕宝路	2017-08-09	0.12	15.9	132	868	212	10
	2017-09-07	0.02	6.1	291	814	169	12
	2017-10-11	0.14	9.6	70	917	235	134
嘉金高速	2017-10-11	0.40	44.3	110	345	772	132
	2018-02-27	0.02	6.5	372	452	865	98
	2018-04-12	0.04	36.8	879	315	734	148
	2018-04-23	0.07	49.4	664	481	806	216

### 1.3 样品处理与分析

将当天采集的径流样品在 4℃ 下保存并送至实验室分析, 运用气相色谱-质谱联用仪 (Agilent 7890/5975C, GC-MS) 分析测定美国 EPA 公布的 16 种优先控制的 PAHs, 即萘 (NAP)、苊 (ACY)、苊烯 (ACE)、芴 (FLO)、菲 (PHE)、蒽 (ANT)、荧蒽 (FLA)、芘 (PYR)、苯并 [a] 蒽 (BaA)、䓛 (CHR)、苯并 [b] 荧蒽 (BbF)、苯并 [k] 荧蒽 (BkF)、苯并 [a] 芘 (BaP)、茚并 [1,2,3-c,d] 芘 (IcdP)、二苯并 [a,h] 蒽 (DahA)、苯并 [g,h,i] 芘 (BghiP)。分别分析溶解相和颗粒相 PAHs。样品采用称重并 450℃ 灼烧 4 h 的玻璃纤维 GF/F (WhatmanUSA) 过滤, 滤出液用干净、干燥的棕色玻璃瓶保存后进行固相萃取, 滤膜冷冻干燥后称重。

固相萃取柱 (SPE) 用二氯甲烷净化后依次用甲醇、超纯水各 5 mL 活化平衡。滤出液萃取后用体积比 3:7 的二氯甲烷和正己烷溶液进行洗脱, 接收的洗脱液经无水硫酸钠层析柱脱水后旋转蒸发至 1 mL, 用 10 mL 正己烷进行置换, 再次浓缩至 1 mL, 转移至 GC 样品瓶中待测。冷冻干燥后的滤膜剪碎与无水硫酸钠及少量铜粉一起进行索氏提取, 提取液经旋蒸浓缩后过硅胶-氧化铝层析柱净化。再用体积比 3:7 的二氯甲烷和正己烷溶液进行洗脱收

集, 旋蒸洗脱液至 1 mL, 用 10 mL 正己烷进行置换, 再次浓缩至 1 mL, 转移至 GC 样品瓶中待测。

利用方法空白、空白加标和样品平行样进行质量保证和质量控制。颗粒相的回收率为 76.9% ~ 116.1%, 溶解相的回收率为 76.3% ~ 115.7%, 样品平行样相对标准差在 20% 以下。空白样品中均未检出目标化合物。用内标法分析样品中 PAHs 的浓度。

### 1.4 计算评价方法

#### 1.4.1 特征比值法

特征比值法是 PAHs 源解析常用的方法, 其原理是根据互为同分异构体的 PAHs 浓度比值来判断主要来源, 多用于定性分析。特征比值法常用 Fla/(Fla + Pyr)、BaA/(BaA + Chr) 以及 IcdP/(IcdP + BghiP) 比值来解释 PAHs 的可能来源<sup>[12]</sup>, 其判断原则<sup>[13]</sup>如表 4。

#### 1.4.2 正定矩阵因子分解法

正定矩阵因子分解法 (PMF) 经过不断发展完善, 已成为美国环保署 (USEPA) 推荐的污染物源解析方法。本研究采用 EPA PMF5.0 模型对道路径流 PAHs 来源进行定量分析。PMF 基本原理<sup>[14]</sup>为: 将 X 矩阵分解为贡献比率矩阵 G, 以及成分谱的分布矩阵 F 和模型的残差矩阵 E, 其基本方程为:

$$X = GF + E \quad (1)$$

残差矩阵中的元素由公式(2)得到:

$$e_{ij} = X_{ij} - \sum_{k=1}^p G_{ik} F_{kj} \quad (2)$$

PMF 分析时将对每个数据进行不确定性的加权,目标方程是将值最小化,这可认为是 PMF 模型的一个重要判据,即:

$$Q(E) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[ \frac{e_{ij}}{s_{ij}} \right]^2 \quad (3)$$

式中,  $s_{ij}$  为第  $i$  个样品中第  $j$  种化合物的不确定度,其计算方法如下:

$$s_{ij} = \begin{cases} 2 \times L_{MDL} & (\text{当 } x_{ij} \leq L_{MDL}) \\ \sqrt{(RSD \times x_{ij})^2 + (L_{MDL})^2} & (\text{当 } x_{ij} > L_{MDL}) \end{cases} \quad (4)$$

式中, RSD 是化合物浓度值得相对标准偏差,  $L_{MDL}$  为方法检出限。

表 4 PAHs 的特征比值和来源类型

Table 4 Characteristic ratios and source types of PAHs load

PAHs	比值范围	来源类型
	< 0.4	石油源
Fla/(Fla + Pyr)	0.4 ~ 0.5	石油燃烧源
	> 0.5	煤炭/生物质染料燃烧
	< 0.2	石油源
BaA/(BaA + Chr)	0.2 ~ 0.35	燃煤源
	> 0.35	交通源/燃烧源
	< 0.2	石油源
IcdP/(IcdP + BghiP)	0.2 ~ 0.5	交通源
	> 0.5	煤炭/生物质染料燃烧

## 2 结果与讨论

### 2.1 地表径流 PAHs 的污染特征

#### 2.1.1 地表径流 PAHs 质量浓度特征

漕宝路和嘉金高速道路地表径流中 PAHs 的最大值、最小值、几何均值、 $\sum 16\text{PAHs}$  (16 种 PAHs 的总浓度)、 $\sum 6\text{PAHs}$  (6 种具有明确致癌性的 PAHs 即 BaA、BbF、BkF、BaP、IcdP、DahA 的总浓度) 见图 2。

从  $\sum 16\text{PAHs}$  质量浓度来看, 两个样点动态径流  $\sum 16\text{PAHs}$  和  $\sum 6\text{PAHs}$  的质量浓度范围有较大差异, 其中漕宝路  $\sum 16\text{PAHs}$  为  $152.4 \sim 1441.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  (几何均值  $548.1 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )、嘉金高速为  $481.2 \sim 34790.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  (几何均值  $5539.2 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )。  $\sum 6\text{PAHs}$  的浓度范围漕宝路为  $76.7 \sim 689.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  (几何均值  $331.9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )、小于嘉金高速  $238.5 \sim 16369.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  (几何均值  $5539.2 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )。武子澜等<sup>[7]</sup>的研究发现上海市沪闵路和

龙吴路降雨径流  $\sum 16\text{PAHs}$  的质量浓度范围分别为  $1245.60 \sim 4986.48 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $223.46 \sim 10364.32 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\sum 6\text{PAHs}$  的质量浓度范围分别  $247.64 \sim 2471.35 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $983.80 \sim 2671.00 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 韩景超等<sup>[15]</sup> 监测发现温州交通干道  $\sum 16\text{PAHs}$  和  $\sum 6\text{PAHs}$  的浓度范围分别为  $919.9 \sim 4026.3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $383.9 \sim 2324.6 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。漕宝路  $\sum 16\text{PAHs}$  和  $\sum 6\text{PAHs}$  低于两位研究者监测的范围, 而嘉金高速高于该范围。漕宝路和嘉金高速两个样点 PAHs 浓度存在较大差异, 主要与两条道路区域位置有关, 嘉金高速属于上海郊区高速公路, 大客车货车等柴油车辆居多, 尾气排放对路面 PAHs 的累积有着较大贡献<sup>[16]</sup>; 漕宝路为市区交通道路, 路面清扫频率高于嘉金高速。相对于漕宝路, 嘉金高速污染物更易在路面累积, 因此 PAHs 浓度相对较高。

我国现阶段规定污水中 BaP 的排放标准为  $30 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  (GB 18918-2002), 还没有对其他单体或总的 PAHs 排放进行规定, 漕宝路和嘉金高速 BaP 几何均值分别为  $56.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $656.7 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , 采用该标准评价可知均超过国家的排放标准, 尤其嘉金

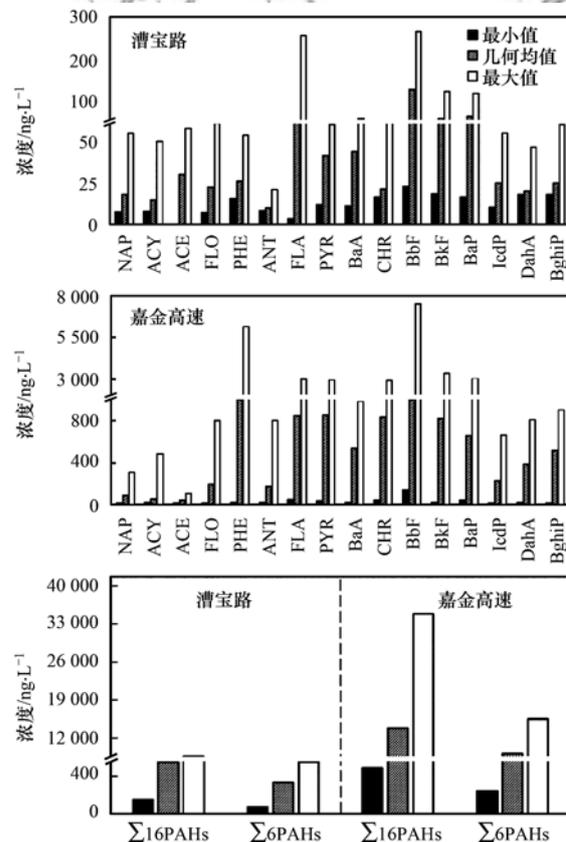


图 2 市、郊交通道路地表径流 PAHs 浓度对比  
Fig. 2 Comparison of PAHs concentration of runoff from urban and suburban traffic roads

高速超标 21 倍, 应当引起重视.

### 2.1.2 地表径流组成比例特征

7 场降雨的地表径流中 PAHs 各组分百分比(质量分数)见表 5. 7 场降雨径流中 PAHs 负荷中高环占比较高, 其中 4 环占比 24.6%~42.6%, 5~6 环占比 39.8%~69.7%, 低环占比较低, 2~3 环仅占 4.1%~24.9%, 其中 2 环的萘因挥发性较强所以在检测中值很低, 仅占  $\sum$ 16PAHs 的

8% 以下. Smith 等<sup>[17]</sup>的研究认为低环(2~3 环) PAHs 主要以气态形式存在, 中环(4 环) PAHs 以气态或颗粒态形式存在, 高环(5~6 环) PAHs 大部分以颗粒态形式存在, 说明中高环的 PAHs 更易吸附于颗粒物表面而在道路沉积, 低环由于结合力较小易扩散<sup>[18]</sup>. 两个采样点地表径流 PAHs 各组分比例规律差异不大, 均为 4~6 环占比较大, 在 80% 左右.

表 5 市、郊交通道路地表径流 PAHs 负荷组分百分比/%

Table 5 Percentage of PAHs load component of runoff from urban and suburban traffic roads/%

漕宝路	PAHs 组分				嘉金高速	PAHs 组分			
	2 环	3 环	4 环	5~6 环		2 环	3 环	4 环	5~6 环
2017-08-09	0	24.9	24.6	50.6	2017-10-11	0	4.1	26.2	69.7
2017-09-07	7.1	11.8	31.9	49.1	2018-02-27	0.7	18.4	37.5	43.4
2017-10-11	0	17.6	42.6	39.8	2018-04-12	0.8	17.0	32.7	49.5
					2018-04-23	0.2	21.0	36.0	42.9

## 2.2 地表径流 PAHs 来源解析

### 2.2.1 特征比值法解析

图 3 为漕宝路和嘉金高速道路地表径流 PAHs 的特征比值分析结果. 漕宝路  $BaA/(BaA + Chr)$  主要集中在 0.2~0.35, 说明部分 PAHs 来自燃煤源,  $Fla/(Fla + Pyr)$  主要在 0.5~0.9, 说明部分 PAHs 来自煤炭、生物质燃料燃烧,  $IcdP/(IcdP + BghiP)$  主要集中在 0.2~0.5, 表示部分 PAHs 来自交通源. 漕宝路属于市区道路, 附近无工业区, 机动车车排放是 PAHs 的一个重要来源, 因此, 漕宝路 PAHs 主要来自燃煤源和交通源. 嘉金高速  $BaA/(BaA + Chr)$  主要集中在 0.35~0.5, 说明部分 PAHs 来自燃煤源,  $Fla/(Fla + Pyr)$  主要在 0.4~0.7, 说明部分 PAHs 来自石油、煤和生物质燃烧.  $IcdP/(IcdP + BghiP)$  主要集中在 0.2~0.5, 表明部分 PAHs 来自于交通源, 因此, 嘉金高速 PAHs 主要来自石油、煤等燃烧源和交通源. 两个采样点特征比值法定性分析显示市区漕宝路地表径流 PAHs 主要来源与郊区的嘉金高速有一定的相似性, 燃煤源、石油燃烧源以及交通源是两个采样点

的主要来源.

### 2.2.2 正定矩阵因子分解法(PMF)解析

利用 EPA PMF5.0 对漕宝路和嘉金高速采集的径流样品中 PAHs 进行定量源解析. 本研究采用 PAHs 浓度测量值的 10% 作为不确定度<sup>[19]</sup>, 在 3~7 之间调整因子数, 采用 Robust 模式运行 20 次, 选择残差集中在 -3.0~3.0 之间的结果<sup>[20]</sup>, 运行结果显示漕宝路和嘉金高速的最优因子数分别是 3 个和 4 个,  $r^2$  较大, 说明模型拟合结果较好. 漕宝路和嘉金高速的 PAHs 来源分别见图 4 和图 5.

漕宝路 PMF 源解析成分谱图显示(图 4), 因子 1 中 BaA、PYR 是主要的载荷元素, PLA、CHR 所占比重也较大, 说明因子 1 与燃烧源密切相关的特点. 有研究表明 BaA 是天然气燃烧的指示物<sup>[21~23]</sup>, 而高载荷的 PYR、PLA、CHR 是典型的燃煤源指示物<sup>[24~26]</sup>, 由此推断因子 1 代表燃气、燃煤源. 因子 2 中的主要载荷元素是 BkF、BaP、BbF、IcdP、BghiP, 高环组分 PAHs 具有较高载荷与石油类物质燃烧有关<sup>[27]</sup>, 且 BaP、BbF 是汽油燃烧的重要化合物, 是典型的交通排放源指示物<sup>[27~28]</sup>; BkF、IcdP

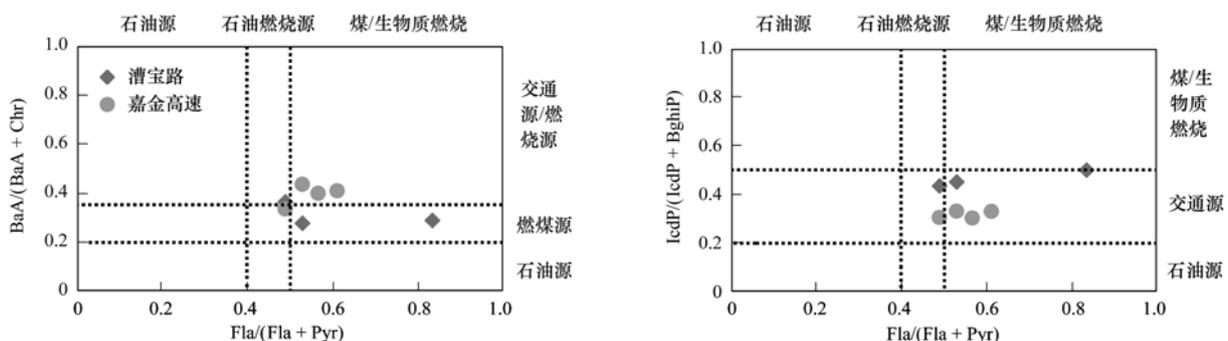


图 3 市、郊交通道路地表径流 PAHs 特征比值

Fig. 3 Characteristic ratios of PAHs of runoff from urban and suburban traffic roads

具有较高载荷与柴油发动机尾气排放有关<sup>[27,29]</sup>; BghiP 主要为汽油或柴油机的排放物,被认为是汽车尾气的示踪剂<sup>[29,30]</sup>, 综上分析表明因子 2 代表交通排放源. 因子 3 中主要载荷元素是 NAP, 其次

ACY、ACE 等低环 PAHs 所占比重也较大, 有研究指出 NAP 与未燃烧的石油有关<sup>[31,32]</sup>; ACY、ACE 主要来源于石油的开采、加工以及运输<sup>[33]</sup>, 因此可以确定因子 3 代表的污染源是石油源.

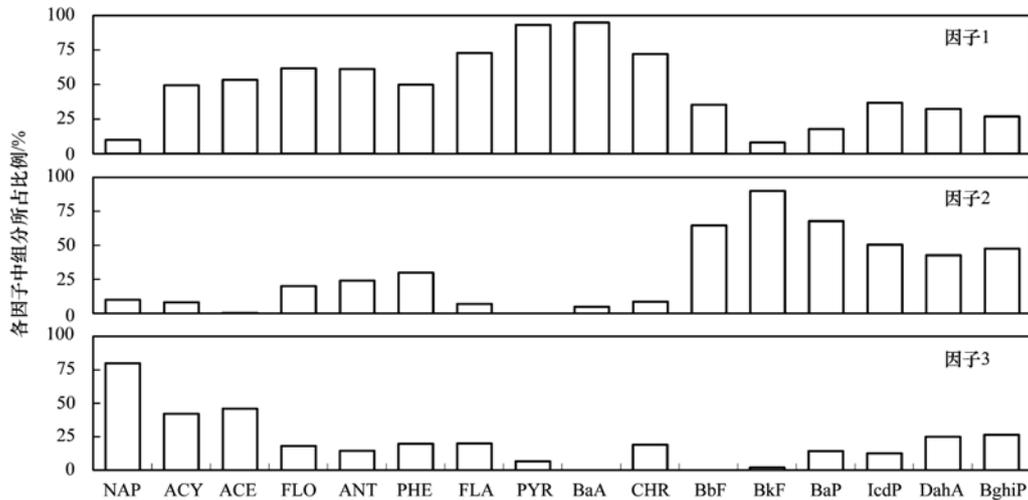


图 4 漕宝路 PMF 模型解析成分谱图

Fig. 4 Spectrogram of PAHs analytical components of Caobao Road by PMF model

嘉金高速 PMF 源解析成分谱图(图 5)显示, 因子 1 中主要载荷元素是 BghiP、IcdP、DahA、BaP、BbF, 均为高环组分 PAHs, 是典型的交通排放源指示物<sup>[27]</sup>, 该因子主要载荷元素与漕宝路因子 2 的主要载荷元素相似, 代表交通排放源; 与漕宝路相比, 嘉金高速的 BghiP、IcdP 在因子中所占比例更高, 说明嘉金高速柴油车尾气排放对交通排放源的贡献率高于漕宝路. 因子 2 中主要载荷元素是 ANT、FLA、PHE、PYR, 有研究指出 ANT、PHE 是燃煤的主要污染物<sup>[28]</sup>, PYR、FLA 也是漕宝路因子 2 中的主要载荷元素, 为燃煤源指示

物<sup>[34]</sup>, 由此可以推断嘉金高速因子 2 代表燃煤源. 因子 3 中主要载荷元素是 NAP, 这与漕宝路因子 3 的主要荷载元素一致, NAP 主要来自石油源, 所以嘉金高速因子 3 代表石油源. 因子 4 中主要载荷元素是 FLO, 有研究表明 FLO 是焦炉排放的主要多环芳烃之一<sup>[21,28,35]</sup>, 因而因子 4 可代表炼焦源.

采用 PMF 模型得到漕宝路和嘉金高速道路径流 PAHs 的来源贡献率, 见图 6 和表 6. 漕宝路道路径流 PAHs 来源以燃气、燃煤源为主, 占 48.6%, 其次为交通排放源和石油源, 分别占 29.8% 和

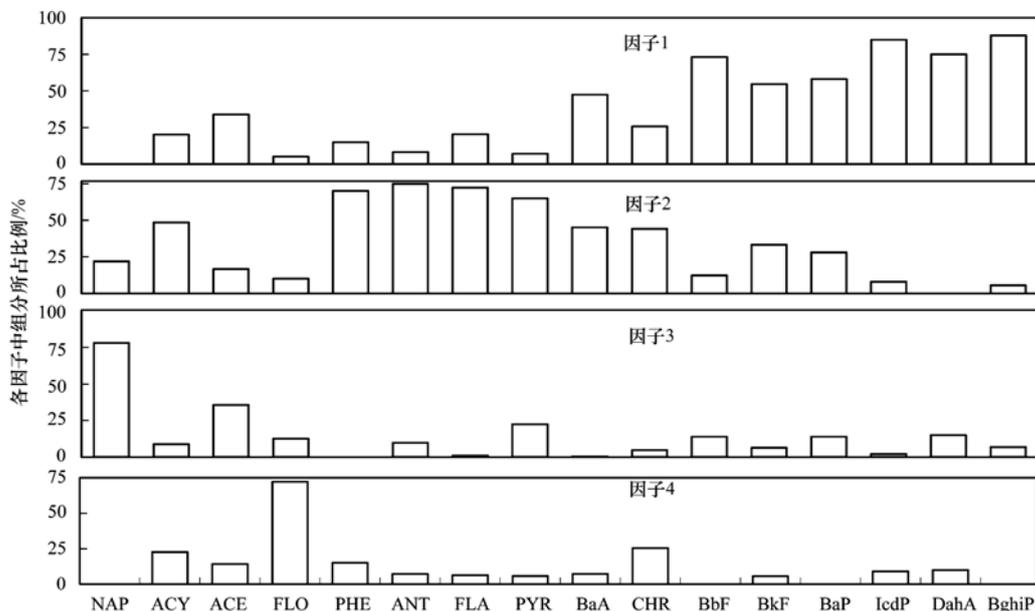


图 5 嘉金高速 PMF 模型解析成分谱图

Fig. 5 Spectrogram of PAHs analytical component of Jiabin Expressway by PMF model

21.7%；嘉金高速道路径流 PAHs 来源为交通排放源、燃煤源、石油源以及炼焦源，其贡献率分别为 38.5%、34.6%、14.6% 和 12.6%，这与两个采样点采用特征比值法分析的结论基本一致。然而，两个采样点来源及贡献率有所差异：首先，漕宝路燃气、燃煤源是地表径流 PAHs 主要来源之一，与所属徐汇区人口密度大、燃气使用量相对较多有关，徐汇区人口密度是青浦区的 11 倍，燃气年使用量是青浦区的 2 倍，漕宝路附近人口密集，居民生活和附近商业餐饮使用较多天然气等燃料产生

PAHs<sup>[36]</sup>，而嘉金高速附近居民较少，燃气源贡献率低，燃气源不是嘉金高速 PAHs 主要来源；其次，嘉金高速交通排放源贡献率高于漕宝路，与嘉金高速属于郊区道路，客、货车较多，排放的 PAHs 远高于小轿车<sup>[35]</sup>有关，从两个点位实时监测的车流量可以看出，漕宝路以轿车为主，占 81.8%，嘉金高速以客、货车为主，占 68.2%。最后，嘉金高速 PAHs 来源中有炼焦源，与郊区炼焦工业污染物迁移有关，青浦区工业较多，煤炭年使用量达 658 万吨，远高于徐汇区。

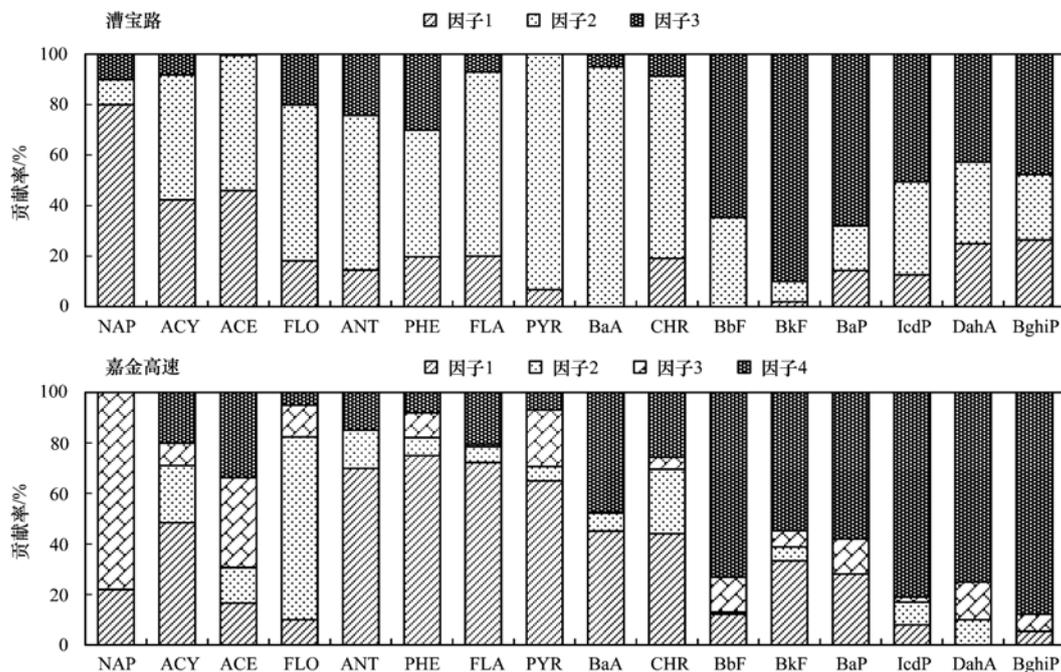


图 6 市、郊交通道路地表径流 16 种 PAH 源贡献率

Fig. 6 16 PAH source contribution rates of surface runoff from urban and suburban traffic roads

表 6 市、郊交通道路道路径流 PAHs 的来源及贡献率

Table 6 PAHs sources and contribution rates of runoff from urban and suburban traffic roads

采样点	漕宝路			嘉金高速			
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
来源	燃气、燃煤源	交通排放源	石油源	交通排放源	燃煤源	石油源	炼焦源
贡献率/%	48.6	29.8	21.7	38.5	34.6	14.6	12.6

### 3 结论

(1) 上海市的市区漕宝路和郊区嘉金高速道路径流中  $\sum 16\text{PAHs}$  浓度范围分别为  $152.4 \sim 1441.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  (几何均值  $548.1 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 和  $481.2 \sim 34790.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  (几何均值  $5539.2 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )，嘉金高速 PAHs 平均质量浓度高于漕宝路 10 倍以上，主要因为嘉金高速货车居多且清扫频率低于漕宝路。漕宝路和嘉金高速 BaP 几何均值分别为  $56.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ， $656.7 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ，均超过国家的排放标准，尤其嘉金高速超标 21 倍，存在生态风险，应当引起

重视。

(2) 两个采样点降雨径流 PAHs 中高环占比较高，其中 4 环占比 24.6% ~ 42.6%，5 ~ 6 环占比 39.8% ~ 69.7%；PAHs 组分比例差异不大，均为 4 ~ 6 环占比较大，在 80% 左右。

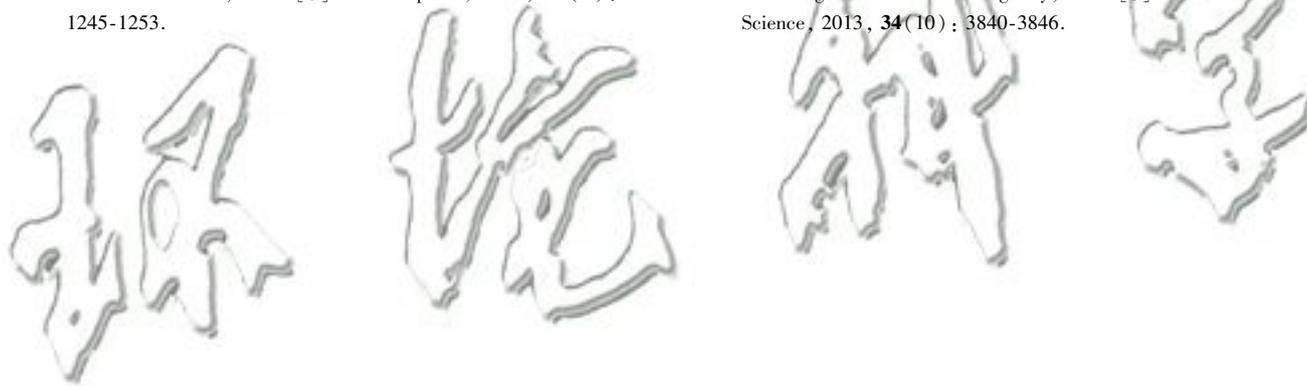
(3) 通过特征比值法和 PMF 模型对 PAHs 来源进行解析发现，漕宝路径流 PAHs 来源以燃气、燃煤源为主，占 48.6%，其次为交通排放源和石油源，分别占 29.8% 和 21.7%。嘉金高速道路径流 PAHs 来源为交通排放源、燃煤源、石油源以及炼焦源，其贡献率分别为 38.5%、34.6%、14.6% 和

12.6%。漕宝路在市区,人口密集,居民生活和商业餐饮产生的 PAHs 是燃气源的主要来源;嘉金高速货车较多,排放的 PAHs 远高于小轿车,交通排放源高于漕宝路;炼焦源也是嘉金高速 PAHs 来源的其中之一,与郊区工业污染物迁移有关。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Deletic A B, Maksimovic C T. Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1998, **124**(9): 869-879.
- [ 2 ] Deletic A, Orr D W. Pollution buildup on road surfaces[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, **131**(1): 49-59.
- [ 3 ] Perdikaki K, Mason C F. Impact of road run-off on receiving streams in eastern England[J]. *Water Research*, 1999, **33**(7): 1627-1633.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] Beasley G, Kneale P. Reviewing the impact of metals and PAHs on macroinvertebrates in urban watercourses[J]. *Progress in Physical Geography*, 2002, **26**(2): 236-270.
- [ 6 ] 谢继锋, 李静静, 窦月芹, 等. 不同下垫面类型对地表径流中多环芳烃污染特征的影响分析[J]. *环境化学*, 2015, **34**(4): 733-740.  
Xie J F, Li J J, Dou Y Q, *et al.* Pollution characteristics of PAHs in urban runoffs on different types of underlying surfaces[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(4): 733-740.
- [ 7 ] 武子澜, 杨毅, 刘敏, 等. 城市不同下垫面降雨径流多环芳烃(PAHs)分布及源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4148-4156.  
Wu Z L, Yang Y, Liu M, *et al.* Distribution and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban rainfall runoff[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4148-4156.
- [ 8 ] 吴巧花, 陈步峰, 裴男才, 等. 广州不同地表下垫面对暴雨径流 PAHs 含量的影响特征[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(4): 736-743.  
Wu Q H, Chen B F, Pei N C, *et al.* The influence characteristics of the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) content of rainstorm runoff in different surface in Guangzhou city[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(4): 736-743.
- [ 9 ] Zhang W, Zhang S C, Wan C, *et al.* Source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road runoff, dust, rain and canopy throughfall[J]. *Environmental Pollution*, 2008, **153**(3): 594-601.
- [ 10 ] 李大雁. 交通道路沿线农田土壤多环芳烃的分布特征和生态风险研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2018.  
Li D Y. Distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in agricultural soil of roadside [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2018.
- [ 11 ] 上海统计年鉴局. 2017 年上海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [ 12 ] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al.* PAHs in the Fraser River basin: A critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**(4): 489-515.
- [ 13 ] 李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 等. 沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 379-388.  
Li J K, Song X Y, Wei J B, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Shenyang North New Area[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 379-388.
- [ 14 ] 李嘉康, 宋雪英, 崔小维, 等. 土壤中多环芳烃源解析技术研究进展[J]. *生态科学*, 2017, **36**(5): 223-231.  
Li J K, Song X Y, Cui X W, *et al.* Research advances in source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil[J]. *Ecological Science*, 2017, **36**(5): 223-231.
- [ 15 ] 韩景超, 毕春娟, 陈振楼, 等. 城市不同下垫面径流中 PAHs 污染特征及源解析[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(2): 503-510.  
Han J C, Bi C J, Chen Z L, *et al.* Pollution characteristics and source identification of PAHs in urban runoff from different surfaces[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(2): 503-510.
- [ 16 ] Lee B K, Dong T T T. Effects of road characteristics on distribution and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road dust of Ulsan, Korea [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **175**(1-3): 540-550.
- [ 17 ] Smith D J T, Harrison R M. Concentrations, trends and vehicle source profile of polynuclear aromatic hydrocarbons in the U. K. atmosphere[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(14): 2513-2525.
- [ 18 ] Ashley J T F, Baker J E. Hydrophobic organic contaminants in surficial sediments of baltimore harbor: Inventories and sources [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1999, **18**(5): 838-849.
- [ 19 ] Norris G, Vedantham R, Wade K, *et al.* EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 3.0 Fundamentals & User Guide [M]. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 2008.
- [ 20 ] Yakovleva E, Hopke P K, Wallace L. Receptor modeling assessment of particle total exposure assessment methodology data [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(20): 3645-3652.
- [ 21 ] Simcik M F, Eisenreich S J, Liroy P J, *et al.* Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(30): 5071-5079.
- [ 22 ] Yang F, Zhai Y B, Chen L, *et al.* The seasonal changes and spatial trends of particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in the summer and autumn in Changsha city[J]. *Atmospheric Research*, 2010, **96**(1): 122-130.
- [ 23 ] Khalili N R, Scheff P A, Holsen T M. PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and, gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions[J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**(4): 533-542.
- [ 24 ] Tian F L, Chen J W, Qiao X L, *et al.* Sources and seasonal variation of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in Dalian, China: Factor analysis with non-negative constraints combined with local source fingerprints [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(17): 2747-2753.
- [ 25 ] Harrison R M, Smith D J T, Luhana L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, U. K.[J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(3): 825-832.
- [ 26 ] 苗迎, 孔祥胜, 李成展. 重工业城市岩溶地下水多环芳烃

- 污染特征及来源[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 239-247.
- Miao Y, Kong X S, Li C Z. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in a karst groundwater system in a Strongly industrial city[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 239-247.
- [27] Larsen R K, Baker J E. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: A comparison of three methods[J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(9): 1873-1881.
- [28] Li J, Zhang G, Li X D, *et al.* Source seasonality of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a subtropical city, Guangzhou, South China[J]. Science of the Total Environment, 2006, **355**(1-3): 145-155.
- [29] Lee J H, Gigliotti C L, Offenberg J H, *et al.* Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons to the Hudson River Airshed [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(35): 5971-5981.
- [30] Kavouras I G, Koutrakis P, Tsapakis M, *et al.* Source apportionment of urban particulate aliphatic and polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) using multivariate methods[J]. Environmental Science & Technology, 2001, **35**(11): 2288-2294.
- [31] Dong Trang T T, Lee B K. Characteristics, toxicity, and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Ulsan, Korea[J]. Chemosphere, 2009, **74**(9): 1245-1253.
- [32] 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.
- [33] Marr L C, Kirchstetter T W, Harley R A, *et al.* Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in motor vehicle fuels and exhaust emissions [J]. Environmental Science & Technology, 1999, **33**(18): 3091-3099.
- [34] Tian F L, Li F Y, Wang D G, *et al.* Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment by the application of non-negative factor analysis: A case study of Dalian Bay [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**(4): 761.
- [35] Wang C H, Wu S H, Zhou S L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from urban to rural areas in Nanjing: Concentration, source, spatial distribution, and potential human health risk[J]. Science of the Total Environment, 2015, **527-528**: 375-383.
- [36] 边璐, 李田, 侯娟. PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源 [J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 3840-3846.
- Bian L, Li T, Hou J. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons using two mathematical models for runoff of the Shanghai elevated inner highway, China[J]. Environmental Science, 2013, **34**(10): 3840-3846.



## CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM <sub>2.5</sub> During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM <sub>2.5</sub> Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM <sub>2.5</sub> Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly-and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoideis</i> on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, GUO Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiang, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH <sub>4</sub> Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)