

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期  
Vol.42 No.2

目次

|                                                |                                                       |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 2013~2017年中国PM <sub>2.5</sub> 污染防治的健康效益评估      | 张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)                     |
| 区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估                          | 武文琪, 张凯山 (523)                                        |
| 2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估                   | 姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)                               |
| 广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响                     | 裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)            |
| 长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性                  | 夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)                                |
| 南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析                  | 张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)                      |
| 天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征                            | 丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)        |
| 输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析                   | 张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)   |
| 洛阳市秋冬季PM <sub>2.5</sub> 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价 | 齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)                          |
| 郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析                         | 王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)                 |
| 基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案                      | 李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)                          |
| 汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析                   | 叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)                                    |
| 兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估                | 郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)             |
| 2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析                      | 李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)         |
| 珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价                     | 王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)                |
| 乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险                     | 史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)                       |
| 乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系                 | 王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)                      |
| 张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响                            | 王维, 李叙勇 (681)                                         |
| 三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因                           | 杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)          |
| 巢湖沉积物氮磷分布及污染评价                                 | 王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)                               |
| 巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策                             | 杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)                               |
| 氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响                             | 徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)                 |
| 降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响                        | 陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)                               |
| 典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素                  | 刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂茂, 刘文胜 (740)                           |
| 江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状                          | 王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)                          |
| 尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征                            | 黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)                                   |
| 涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析                          | 郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)                      |
| 天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析                          | 何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)                           |
| 秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响                        | 张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)                      |
| 环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性                        | 张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)        |
| 浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响                           | 黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)                           |
| 松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应          | 于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)             |
| 汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测                     | 韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)               |
| 两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物                 | 李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)                       |
| 人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除                        | 周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)                     |
| 紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征                         | 韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)                           |
| 高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除                         | 孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)                          |
| 胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性                 | 汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)                           |
| 电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析                       | 谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)                     |
| 微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制                | 陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)            |
| 河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价                     | 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)           |
| 南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价                           | 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909) |
| 复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果                            | 丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)                                 |
| 石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田                             | 李光辉, 成晴, 陈宏 (925)                                     |
| 叶面喷施纳米MnO <sub>2</sub> 对水稻富集镉的影响机制             | 周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)           |
| 典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价                      | 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)              |
| 辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较               | 邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)                                   |
| 4种草本植物对镉的富集特征                                  | 陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)                           |
| 不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征                        | 熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)                 |
| 降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响            | 高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)                         |
| 水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征                          | 林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)       |
| 铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响                             | 葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)                                |
| 臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响           | 李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)                                   |
| 颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述                              | 李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)                         |
| 《环境科学》征订启事                                     | (522)                                                 |
| 《环境科学》征稿简则                                     | (722)                                                 |
| 信息                                             | (748, 899, 924)                                       |

# 洛阳市秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价

齐静文<sup>1,2</sup>, 张瑞芹<sup>2\*</sup>, 姜楠<sup>2</sup>, 李利萍<sup>1,2</sup>, 苗青青<sup>1,2</sup>

(1. 郑州大学化学学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学生态与环境学院, 郑州 450001)

**摘要:** 本研究于2018年10月4日至2019年1月30日在洛阳市高新和林校2个采样点位同步连续采集秋冬季PM<sub>2.5</sub>样品,使用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)对PM<sub>2.5</sub>中优先控制的16种多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)进行了分析测定。对优良天和污染天PM<sub>2.5</sub>中16种PAHs的质量浓度和组成分布特征进行了研究,利用特征比值法和主成分分析法对其主要来源进行了定性解析,并使用苯并[a]芘(BaP)毒性当量法和增量终生致癌风险模型评估了对人体的健康风险。结果表明在采样期内,高新和林校两个采样点的PM<sub>2.5</sub>中16种PAHs质量浓度变化范围分别为24.33~90.26 ng·m<sup>-3</sup>和23.81~76.99 ng·m<sup>-3</sup>。随着PM<sub>2.5</sub>污染程度的加重,PAHs浓度明显升高(污染天为优良天的1.3倍),不同环数PAHs贡献顺序均为:4环(43%~48%)>5~6环(32%~35%)>2~3环(20%~22%)。大气中PAHs主要来自于燃烧源,包括燃煤、生物质燃烧以及机动车排放等,其中燃煤对PAHs污染贡献最大(优良天:49.28%~56.38%,污染天:49.44%~60.60%)。BaP毒性当量浓度表明,污染天存在更高的人体健康风险;增量终生致癌风险结果表明,污染天致癌风险高于优良天,成人呼吸暴露风险高于儿童,在研究区域内不同污染水平下健康风险属于可接受水平(<1×10<sup>-6</sup>)。

**关键词:** 优良天; 污染天; 主成分分析; 燃煤; 增量终生致癌风险

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0595-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202006246

## Characterization, Sources, and Health Risks of PM<sub>2.5</sub>-bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City

QI Jing-wen<sup>1,2</sup>, ZHANG Rui-qin<sup>2\*</sup>, JIANG Nan<sup>2</sup>, LI Li-ping<sup>1,2</sup>, MIAO Qing-qing<sup>1,2</sup>

(1. College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In this study, PM<sub>2.5</sub> samples were collected synchronously at Gaoxin and Linxiao in Luoyang City during autumn and winter (4 October 2018 to 30 January 2019). Sixteen priority polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) associated with fine particulate matter were analyzed by gas chromatography mass spectrometry (GC-MS). The concentrations and composition characteristics of the PAHs on clean and polluted days were studied. Diagnostic ratio analysis and principal component analysis (PCA) were used to identify the emission sources of PM<sub>2.5</sub>-bound PAHs and the equivalent carcinogenic concentration of benzo[a]pyrene (BaP) and incremental lifetime cancer risks (ILCRs) model were applied to evaluate health risks. During the sampling period, the concentrations of PAHs at Gaoxin and Linxiao ranged 24.33-90.26 ng·m<sup>-3</sup> and 23.81-76.99 ng·m<sup>-3</sup>, respectively. With the increase in PM<sub>2.5</sub> pollution, PAH concentrations increase significantly (the mean PAH concentration on polluted days was approximately 1.3 times higher than during clean days). PAH profiles at different polluting levels were similar; 4-ring PAHs (43%-48%)>5-6 ring PAHs (32%-35%)>2-3-ring PAHs (20%-22%). Diagnostic ratios and PCA demonstrated that PAHs in the study area were mainly derived from combustion sources including coal combustion, biomass burning, and motor vehicle emissions. The coal combustion was the main pollution source in the study area (clean days = 49.28%-56.38%, polluted days = 49.44%-60.60%). The results of the equivalent carcinogenic concentration of benzo[a]pyrene (BaP) and ILCR model revealed that the human health risk on polluted days was higher. Moreover, the cancer risks from adult exposure to PAHs were higher than those child exposure, which has an acceptable level of risk (<10<sup>-6</sup>).

**Key words:** clean days; pollution days; principal component analysis; coal combustion; incremental lifetime cancer risks

近年来,随着我国社会经济和工业化的快速发展,灰霾天气频繁发生,对大气环境、人体健康和大气能见度造成严重危害。细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)作为灰霾的主要元凶之一,其研究和控制受到了广泛关注<sup>[1]</sup>。已经有许多研究使用无机或有机物种作为示踪剂来估计PM<sub>2.5</sub>的来源。多环芳烃(PAHs)作为PM<sub>2.5</sub>中一类重要的有机组分,由于具有致畸、致癌和致突变的特性,且易于通过呼吸作用进入人体,长期累积会对人体健康造成极大的危害,因而备受研

究者的关注<sup>[2]</sup>。1976年美国环保署(US EPA)将16种PAHs确定为优先控制污染物,其中苯并[a]芘(BaP)被确认为高致癌性物质。

PAHs是指由两个或两个以上苯环组成的有机

收稿日期: 2020-06-24; 修订日期: 2020-07-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212400); 国家自然科学基金项目(51808510); 京津冀及周边“2+26”城市来源解析研究项目(DQGG0107-26)

作者简介: 齐静文(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气颗粒物污染与溯源,E-mail: 2076880167@qq.com

\* 通信作者,E-mail: rqzhang@zhu.edu.cn

化合物,是持久性有机污染物中的一类,在全球大气环境中普遍存在,通常更集中在城市中心附近<sup>[3]</sup>. 大气颗粒物中的 PAHs 主要来源于人为来源(如化石燃料、燃煤、工业排放、机动车排放和生物质燃烧等),自然来源(如火山喷发和森林火灾等)的贡献有限<sup>[4,5]</sup>. 中国作为世界上 PAHs 排放量最高的国家之一<sup>[6]</sup>,许多学者已经对国内大气颗粒物中的 PAHs 进行了大量的研究,包括浓度特征、季节变化、来源解析和健康风险等. Yan 等<sup>[7]</sup>对中国 67 个城市的研究结果进行系统地收集和整理,得到所有城市的 PAHs 浓度都有相似的季节性变化:冬季浓度最高,夏季浓度最低. 特征比值法和主成分分析法是研究最广泛的两种源解析方法. 张艺璇等<sup>[8]</sup>通过主成分分析法对长春市大气中的 PAHs 来源进行研究,结果表明机动车排放、煤燃烧和生物质燃烧源是主要的污染物来源. Gao 等<sup>[9]</sup>利用特征比值法和主成分分析法对北京市重污染时期大气中的 PAHs 进行来源解析,研究结果表明机动车排放和燃烧源排放是主要污染源,贡献率为 88.57%. 苯并[a]芘毒性当量(BaP-TEQ)法和增量终生致癌风险(ILCR)常被用来评估人类健康风险<sup>[10]</sup>. Wang 等<sup>[11]</sup>利用健康风险模型评估西安市 PAHs 的致癌风险,研究发现春冬季致癌风险高于秋夏季,成人致癌风险高于儿童.

洛阳市位于河南省西部,是中国重要的重工业城市之一,2017 年洛阳市第二产业占比 46.9%,在河南省占比属于较高水平,主要产业有装备制造业、有色金属工业和石油化工等. 截止 2017 年末,洛阳市常住人口 682 万人,城镇化率为 56%,机动车保有量增加到 97.9 万辆<sup>[12]</sup>,随着工业化和城镇化的发展,洛阳市空气污染比较严重<sup>[13]</sup>. 目前关于洛阳市

大气颗粒物的研究较少,周兵利等<sup>[14]</sup>利用 CMB 模型对洛阳市  $PM_{2.5}$  进行来源解析, Wang 等<sup>[11]</sup>分析了洛阳市 2014 年 10 月至 2015 年 8 月 PAHs 的季节变化特征. 另外,随着《大气污染防治行动计划》的实施,我国城市空气质量在逐年改善,细颗粒物浓度下降明显,同时  $PM_{2.5}$  治理难度和成本也在不断加大. 秋冬季为  $PM_{2.5}$  污染最重的季节,对该阶段开展深入研究有利于全年污染水平的改善. 目前关于洛阳市秋冬季  $PM_{2.5}$  中 PAHs 的污染特征和来源解析明显研究不足. 因此本研究通过采集洛阳市秋冬季大气中的  $PM_{2.5}$  样品,对比优良天和污染天 16 种 PAHs 的浓度及组成分布特征,利用特征比值法和主成分分析法对不同污染水平下的 PAHs 的排放来源进行定性判断,并使用 BaP 毒性当量法和增量终生致癌风险模型评估其对人体的健康风险,以期为秋冬季重污染应急管控政策提供科学依据,对改善空气质量提供方向.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

采样点位布设于洛阳市华夏路社区服务站(112.39°E, 34.62°N, 高新)和河南林业职业学院(112.50°E, 34.68°N, 林校,属于环境空气质量国控点,图 1). 高新点周围有周山森林公园和河南科技大学附属中学,属于居民生活区;林校点周边以居民区、商业交通和学校为主. 2 个采样点均是典型的城市站点,附近无明显的工业污染源和局地污染源,能较好地代表洛阳市城区大气污染状况. 本研究于 2018 年 10 月 4 日至 2019 年 1 月 30 日期间对上述 2 个采样点位同步连续每天采集秋冬季  $PM_{2.5}$  样品. 样品采集时间为上午 10:00 到次日上午

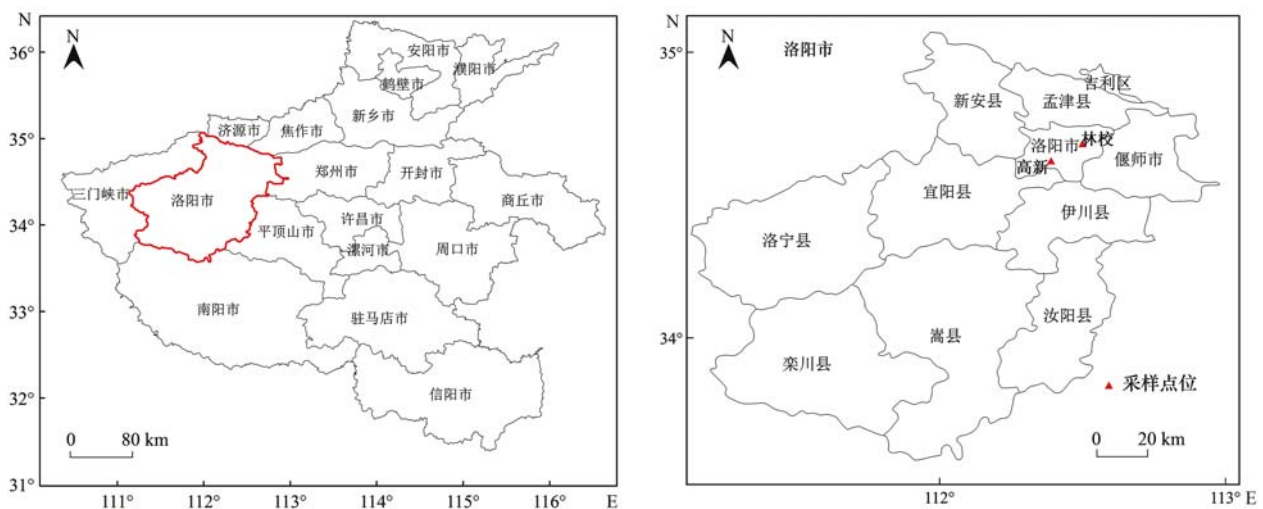


图1 采样点位置

Fig. 1 Locations of sampling sites

09:00, 采样时长为 23 h, 采样仪器为武汉市天虹仪表有限责任公司的四通道采样器(型号为 TH-16A, 流量为 16.7 L·min<sup>-1</sup>), 采样滤膜为 47 mm 的石英膜. 经过对采样样品的质量控制, 在高新和林校 2 个采样点位采集有效天数分别为 106 d(53 d 优良天 + 53 d 污染天)和 107 d(47 d 优良天 + 60 d 污染天). 本研究气象数据来源于文献[15].

1.2 样品分析

通过加速溶剂萃取仪(ASE350, Dionex, 美国)提取 PM<sub>2.5</sub> 中的 PAHs, 并采用气相色谱-质谱联用仪(Agilent 7890GC/7000MS, GC/MS)测定 PAHs 浓度. 关于 PAHs 的具体分析方法详见文献[16]. 分析测定得到的 16 种 PAHs 分别为: 萘(Nap)、苊烯(Acy)、二氢苊(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、䓛(Chry)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、茚并[1,2,3-cd]芘(InP)、二苯并[a,h]蒽(DahA)和苯并[ghi]芘(BghiP).

1.3 质量控制与质量保证

采样过程和样品分析过程均做严格的质量控制与质量保证, 排除其他因素对数据质量的影响. 关于本研究对样品的质量控制与质量保证详见文献[16,17].

2 结果与讨论

2.1 PM<sub>2.5</sub> 及 PAHs 的污染特征

采样期间洛阳市 2 个采样点的 PM<sub>2.5</sub>、PAHs 的质量浓度及气象参数变化如图 2 所示. 高新和林校 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化范围分别为 20.14 ~ 198.12 μg·m<sup>-3</sup> 和 24.28 ~ 194.81 μg·m<sup>-3</sup>, 可以看出 2 个采样点的 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化趋势基本一致. 在整个采样期内, 高新和林校的 PM<sub>2.5</sub> 平均质量浓度分别为 (81.91 ± 40.21) μg·m<sup>-3</sup> 和 (87.36 ± 39.38) μg·m<sup>-3</sup>, 分别有 53 d 和 60 d 的 PM<sub>2.5</sub> 日均浓度超标[75 μg·m<sup>-3</sup>, 《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)], 超标比例分别占 50% 和 56%, 表明洛阳市秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 污染严重. 为了更好地了解洛阳市秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的污

染特征, 本研究根据《环境空气质量指数(AQI)技术规范(HJ 633-2012)(试行)》, 将采样天划分为优良天(PM<sub>2.5</sub> ≤ 75 μg·m<sup>-3</sup>)和污染天(PM<sub>2.5</sub> > 75 μg·m<sup>-3</sup>).

从图 2 可知, 高新和林校两个采样点的 PM<sub>2.5</sub> 中 16 种 PAHs 浓度变化范围分别为 24.33 ~ 90.26 ng·m<sup>-3</sup> 和 23.81 ~ 76.99 ng·m<sup>-3</sup>. 与国内其他城市的研究结果相比, 高于上海<sup>[18]</sup> (6.5 ~ 7.2 ng·m<sup>-3</sup>, 2014 年)和香港<sup>[19]</sup> (0.4 ~ 16.3 ng·m<sup>-3</sup>, 2011 年)地区, 低于太原<sup>[20]</sup> (62.5 ~ 547 ng·m<sup>-3</sup>, 2013 年)和京津冀<sup>[21]</sup> (6.3 ~ 251.4 ng·m<sup>-3</sup>, 2013 年)等地区, 洛阳市 PAHs 污染较为严重. 高新和林校优良天 PAHs 的日均质量浓度分别为 (39.00 ± 9.90) ng·m<sup>-3</sup> 和 (42.13 ± 11.02) ng·m<sup>-3</sup>; 污染天 2 个采样点的日均质量浓度分别为 (52.05 ± 11.93) ng·m<sup>-3</sup> 和 (53.42 ± 12.83) ng·m<sup>-3</sup>. PAHs 的日变化趋势与 PM<sub>2.5</sub> 表现出显著相关性 ( $r = 0.56$ ,  $P < 0.01$ ), 随着 PM<sub>2.5</sub> 污染程度的加重, PAHs 浓度明显升高, 污染天的 PAHs 浓度大约是优良天的 1.3 倍, 和薛国艳等<sup>[22]</sup> 在长三角背景点的研究结果相似.

已有研究表明气象条件是影响 PAHs 浓度和空间分布的重要因素<sup>[23]</sup>, 会影响 PAHs 的气固分配、累积、扩散和去除等. 不同污染水平下 PAHs 浓度与气象参数的相关性分析见图 2 和表 1, 2 个采样点优良天和污染天的 PAHs 与气象参数的相关性分析相似. 由表 1 可知, PAHs 浓度与温度之间呈显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 温度较高时有利于低分子质量的 PAHs 从颗粒相挥发到气相. 大气压与 PAHs 含量呈显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 当大气压增加时, 大气稳定度更高, 不利于大气污染物的扩散和稀释, 导致 PAHs 浓度增加<sup>[24]</sup>. PAHs 与风速之间无显著相关性, 可能是因为大气中 PAHs 的浓度变化同时受风速和风向影响, 与李皓等<sup>[25]</sup> 的研究结果一致. 降水可以去除部分颗粒相 PAHs, 在污染天 PAHs 浓度与相对湿度之间呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 而在优良天两者相关性不明显, 且相关系数较小, 说明优良天相对湿度对 PAHs 浓度影响有限.

表 1 不同污染水平下 PAHs 与气象参数的皮尔逊相关系数<sup>1)</sup>

Table 1 Pearson's correlation coefficients of PAHs concentrations and meteorological parameters under different PM<sub>2.5</sub> levels

| 项目   | 高新           |              | 林校           |              |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|      | 优良天 (n = 53) | 污染天 (n = 53) | 优良天 (n = 47) | 污染天 (n = 60) |
| 温度   | -0.666 **    | -0.709 **    | -0.689 **    | -0.792 **    |
| 风速   | -0.165       | -0.007       | -0.007       | -0.101       |
| 相对湿度 | -0.185       | -0.340 *     | -0.265       | -0.373 **    |
| 大气压  | 0.588 **     | 0.461 **     | 0.609 **     | 0.514 **     |

1) \*\* 表示在置信度为 0.01 时, 相关性是显著的; \* 表示在置信度为 0.05 时, 相关性是显著的

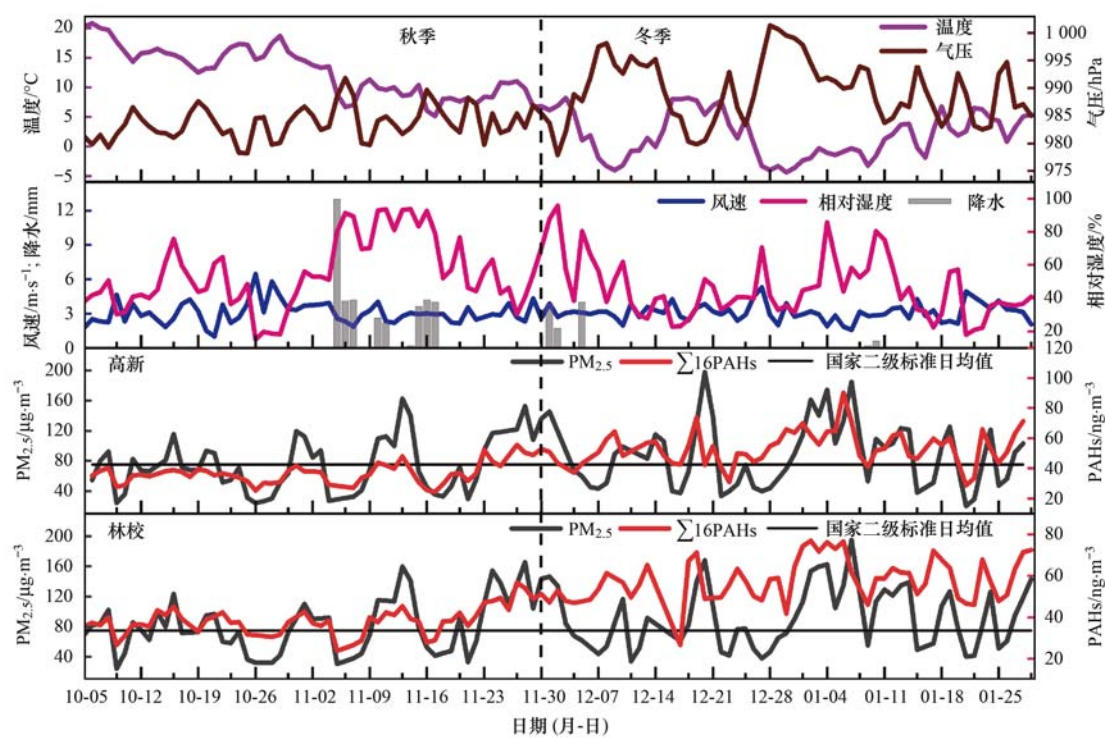


图 2 采样期间  $PM_{2.5}$ 、PAHs 的质量浓度及气象参数的时间序列

Fig. 2 Time-series of  $PM_{2.5}$ , PAHs, and meteorological parameters during the sampling periods

2.2 PAHs 的组分特征

2 个采样点不同污染水平下 16 种 PAHs 的平均质量浓度和质量分数分布见表 2 和图 3. 结果表明, 随着  $PM_{2.5}$  污染的加重, 16 种 PAHs 单体平均质量浓度有不同程度地显著升高, 与总 PAHs 的质量浓

度变化趋势一致. 不同单体的 PAHs 来自不同的污染排放源, 在 2 个采样点不同污染水平下 PAHs 组分中 Fla、BaA、Pyr、BaP 和 Phe 等单体相对含量较高, 占总 PAHs 浓度的 55%~61%, 这表明不同污染水平下的主要污染物来源相似.

表 2 洛阳市不同污染时期大气  $PM_{2.5}$  中 PAHs 的平均质量浓度<sup>1)</sup>

Table 2 Mean PAHs concentrations in  $PM_{2.5}$  under different  $PM_{2.5}$  levels in Luoyang City

| 项目       | 环数 | 高新           |               |               | 林校            |               |               |
|----------|----|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|          |    | 优良天 (n = 53) | 污染天 (n = 53)  | 平均 (n = 106)  | 优良天 (n = 47)  | 污染天 (n = 60)  | 平均 (n = 107)  |
| Nap      | 2  | 0.68 ± 0.14  | 1.18 ± 0.21   | 0.93 ± 0.31   | 0.70 ± 0.14   | 1.23 ± 0.29   | 1.00 ± 0.36   |
| Acy      | 3  | 1.10 ± 0.16  | 1.28 ± 0.20   | 1.19 ± 0.20   | 1.14 ± 0.19   | 1.32 ± 0.20   | 1.24 ± 0.21   |
| Ace      | 3  | 0.62 ± 0.16  | 1.11 ± 0.21   | 0.87 ± 0.31   | 0.64 ± 0.16   | 1.16 ± 0.26   | 0.93 ± 0.34   |
| Flu      | 3  | 0.89 ± 0.36  | 1.52 ± 0.41   | 1.20 ± 0.50   | 0.97 ± 0.41   | 1.63 ± 0.46   | 1.34 ± 0.55   |
| Phe      | 3  | 3.21 ± 0.68  | 4.05 ± 1.09   | 3.63 ± 1.00   | 3.44 ± 0.81   | 4.17 ± 1.07   | 3.85 ± 1.03   |
| Ant      | 3  | 1.33 ± 0.48  | 1.99 ± 0.58   | 1.66 ± 0.62   | 1.58 ± 0.70   | 2.13 ± 0.59   | 1.89 ± 0.69   |
| Fla      | 4  | 6.61 ± 2.07  | 7.80 ± 2.43   | 7.21 ± 2.33   | 7.09 ± 2.34   | 8.25 ± 2.58   | 7.74 ± 2.53   |
| Pyr      | 4  | 4.05 ± 1.92  | 4.95 ± 2.17   | 4.50 ± 2.09   | 4.27 ± 2.07   | 4.75 ± 2.23   | 4.54 ± 2.16   |
| BaA      | 4  | 6.20 ± 1.29  | 7.56 ± 1.88   | 6.88 ± 1.74   | 6.78 ± 1.44   | 7.59 ± 1.84   | 7.23 ± 1.72   |
| Chry     | 4  | 2.15 ± 1.67  | 3.01 ± 1.82   | 2.58 ± 1.79   | 2.14 ± 1.57   | 2.74 ± 2.00   | 2.48 ± 1.84   |
| BbF      | 5  | 1.51 ± 0.72  | 2.03 ± 0.90   | 1.77 ± 0.85   | 1.82 ± 0.78   | 2.25 ± 1.05   | 2.06 ± 0.96   |
| BkF      | 5  | 2.72 ± 0.89  | 3.78 ± 0.79   | 3.25 ± 0.99   | 3.15 ± 0.80   | 4.06 ± 1.06   | 3.66 ± 1.05   |
| BaP      | 5  | 3.92 ± 1.10  | 4.67 ± 1.18   | 4.30 ± 1.99   | 3.72 ± 1.36   | 4.77 ± 1.01   | 4.30 ± 1.28   |
| DahA     | 5  | 0.52 ± 0.15  | 1.11 ± 0.29   | 0.81 ± 0.37   | 0.61 ± 0.15   | 1.20 ± 0.33   | 0.94 ± 0.39   |
| InP      | 6  | 1.66 ± 0.73  | 2.96 ± 0.61   | 2.31 ± 0.93   | 1.99 ± 0.88   | 3.00 ± 0.84   | 2.55 ± 0.99   |
| BghiP    | 6  | 1.84 ± 0.57  | 3.05 ± 0.75   | 2.44 ± 0.90   | 2.11 ± 0.66   | 3.16 ± 0.62   | 2.70 ± 0.82   |
| ∑ 16PAHs |    | 39.00 ± 9.90 | 52.05 ± 11.93 | 45.52 ± 12.73 | 42.13 ± 11.02 | 53.42 ± 12.83 | 48.46 ± 13.26 |

1) PAHs 单位为  $ng \cdot m^{-3}$

根据苯环数量和相对分子质量将 16 种 PAHs 分为低分子质量 (2~3 环) PAHs、中分子质量 (4 环) PAHs 和高分子质量 (5~6 环) PAHs. 由图 3 可

以看出, 2 个采样点不同污染水平下不同环数 PAHs 的分布存在差异, 且 2 个采样点的分布特征基本相同. 不同污染水平下 PAHs 环数贡献顺序相似, 4 环

PAHs(43%~48%)>5~6 环 PAHs(32%~35%)>2~3 环 PAHs(20%~22%)。与优良天相比,污染天 4 环 PAHs 占比降低,5~6 环和 2~3 环 PAHs 所占比例增加。这可能与 PAHs 的物理性质和污染源排放有关,2~3 环 PAHs 主要以气相存在,易挥发,是 2~3 环 PAHs 占比较低的主要原因;4 环 PAHs 是半挥发性有机物,同时存在于气相和固相中,受温度影响较大,秋冬季温度相对较低,有利于挥发性有机物向固

相颗粒物富集<sup>[26]</sup>;5~6 环 PAHs 是难挥发性化合物,主要在固相颗粒物积累。另外,不同环数 PAHs 来自不同的排放源,4 环 PAHs 是燃煤排放的标志性物质<sup>[20]</sup>,冬季研究区域处于集中供暖阶段,燃煤贡献大幅度增加造成 4 环 PAHs 贡献较大,5~6 环 PAHs 被认为是机动车尾气排放的标志性组分<sup>[27]</sup>,且在污染天浓度增加明显,因此表明煤炭燃烧和机动车尾气是洛阳市秋冬季 PAHs 的重要来源。

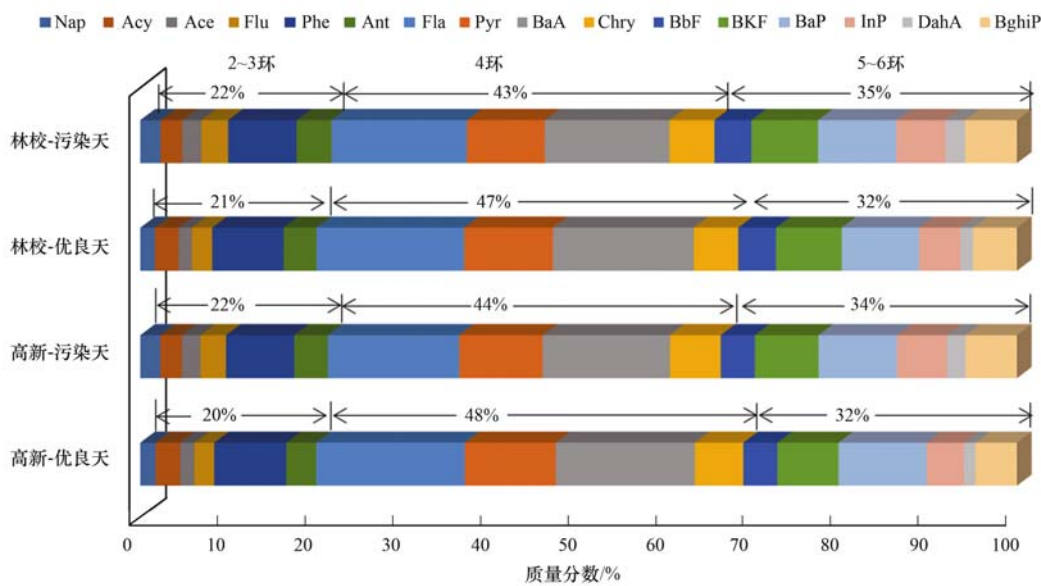


图3 洛阳市不同污染时期大气 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的质量分数分布

Fig. 3 Distribution of PAHs in atmospheric PM<sub>2.5</sub> under different PM<sub>2.5</sub> levels in Luoyang City

2.3 来源解析

2.3.1 特征比值法

特征比值法被广泛应用于大气 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的定性来源解析<sup>[28]</sup>。本研究通过计算 BaA/(BaA + Chry)、Fla/(Fla + Pyr)、Ant/(Ant + Phe) 和 InP/(InP + BghiP) 的比值来探究洛阳市不同污染水平下 PAHs 的潜在污染来源,详见表 3。当 BaA/(BaA + Chry) 比值小于 0.2、0.2~0.35、大于 0.35 时分别代表石油源、燃煤源和机动车排放源<sup>[29]</sup>;当 Fla/(Fla + Pyr) 的比值小于 0.4、0.4~0.5、大于 0.5 时分别代表

石油、化石燃料燃烧、煤和生物质燃烧的贡献<sup>[30]</sup>;当 Ant/(Ant + Phe) 比值小于 0.1 时表示石油来源,大于 0.1 时表示 PAHs 来自燃烧源<sup>[29]</sup>;当 InP/(InP + BghiP) 小于 0.2、0.2~0.5 及大于 0.5 时分别代表石油源、石油燃烧源及燃煤和生物质燃烧的混合源<sup>[28]</sup>。由表 3 可见,2 个采样点优良天和污染天的不同特征比值分布无显著差异,表明洛阳市优良天和污染天大气中 PAHs 的污染来源相似。从以上讨论可以得到,洛阳市秋冬季大气中 PAHs 主要来自于燃烧源,包括燃煤、生物质燃烧和机动车排放等。

表3 洛阳市不同污染时期大气 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的特征比值

Table 3 Diagnostic ratios of airborne particulate PAHs under different PM<sub>2.5</sub> levels in Luoyang City

| 特征比值              | 高新-优良天    |           | 高新-污染天    |           | 林校-优良天    |           | 林校-污染天    |           |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                   | 范围        | 均值        | 范围        | 均值        | 范围        | 均值        | 范围        | 均值        |
| BaA/(BaA + Chry)  | 0.48~0.95 | 0.77±0.11 | 0.17~0.98 | 0.73±0.13 | 0.62~0.97 | 0.79±0.11 | 0.59~0.92 | 0.76±0.12 |
| Fla/(Fla + Pyr)   | 0.55~0.70 | 0.63±0.05 | 0.15~0.75 | 0.62±0.09 | 0.56~0.72 | 0.64±0.05 | 0.16~0.73 | 0.65±0.08 |
| Ant/(Ant + Phe)   | 0.18~0.51 | 0.29±0.07 | 0.24~0.71 | 0.33±0.07 | 0.11~0.63 | 0.31±0.09 | 0.25~0.68 | 0.34±0.07 |
| InP/(InP + BghiP) | 0.28~0.69 | 0.47±0.10 | 0.35~0.64 | 0.49±0.06 | 0.31~0.70 | 0.47±0.09 | 0.32~0.64 | 0.48±0.06 |

2.3.2 主成分分析法

由于特征比值法只能提供 PAHs 的潜在来源,不能提供污染源的贡献率。为了更好地识别不同污染水平下 PAHs 的主要排放源及其贡献,本研究运

用 SPSS 22 软件对洛阳市 2 个采样点优良天和污染天 PM<sub>2.5</sub> 中的 16 种 PAHs 进行了主成分分析,结果如表 4 所示。在高新优良天,因子 1 中贡献率较高的组分是 Flu、Phe、Fla、Pyr、BaA、Chry、BbF 和

Bap,其中 Phe、Fla、Pyr、BaA、Chyr 和 BaP 是燃煤排放的标志物种,此外,BbF 在燃煤电厂中含量较高<sup>[31~33]</sup>,因此因子 1 被识别为燃煤源. InP 是汽油源燃烧的标志物<sup>[34]</sup>,在因子 2 中载荷较高,被识别为汽油车排放. 因子 3 中 Acy 和 BkF 含量较高,有研究表明 BkF 在柴油车尾气中载荷较高<sup>[35]</sup>,Acy 主要来自于石油挥发<sup>[9]</sup>,因此因子 3 可被识别为柴油车排放源. 因子 4 中仅 BghiP 含量较高,是汽油源燃烧的标志物<sup>[34]</sup>,识别为汽油车排放. 高新污染天,因子 1 中 Flu、Phe、Fla、Pyr、Chry 和 Bap 负载较大,识别为燃煤源. NaP、Ace、DahA 和 BghiP 在因子 2 载荷较大,NaP 和 Ace 与生物质燃烧活动有关<sup>[27,31]</sup>,DahA 和 BghiP 为机动车尾气排放的标志性组分<sup>[27]</sup>,识别为生物质燃烧和机动车排放的混合源. InP 在因子 3 贡献较高,为汽油车排放.

在林校不同污染水平下得到的 PAHs 解释来源与高新相似:林校优良天,因子 1 代表燃煤源; Nap、Ace 和 InP 在因子 2 中负载较高,识别为生物质燃

烧和机动车排放的混合源; Ant 和 BkF 在因子 3 和因子 4 中的含量较高,分别识别为燃煤源和柴油车排放. 林校污染天,因子 1 识别为燃煤源; Nap、InP、DahA 和 BghiP 在因子 2 中贡献显著,被识别为机动车尾气排放. PCA 结果表明洛阳市秋冬季 PM<sub>2.5</sub>中的 PAHs 主要来自于燃煤、机动车尾气和生物质燃烧. 在不同污染水平下,燃煤对 PAHs 污染贡献最大(优良天:49.28%~56.38%,污染天:49.44%~60.60%),与洛阳市以燃煤为主的能源结构特点相一致,洛阳市市区有集中供热燃煤锅炉,冬季供暖使燃煤消耗量增大,另外燃煤电厂作为洛阳市原煤消耗的主要行业<sup>[14]</sup>,使用清洁能源替代燃煤对洛阳市大气污染控制具有重要意义. 其次机动车排放源贡献较大,文献[13]的数据显示,洛阳市 2017 年机动车保有量增加到 97.9 万辆,2 个采样点周边居民区和学校较多,人口密度较高,车流量较大及车速较慢,引起采样点 PAHs 浓度较高,应提高机动车的用油品质,减少机动车排放贡献.

表 4 洛阳市不同污染时期 PM<sub>2.5</sub>中 PAHs 的主成分分析<sup>1)</sup>  
Table 4 PCA loading factors for PAHs in PM<sub>2.5</sub> under different PM<sub>2.5</sub> levels

| 化学物质  | 高新-优良天      |             |             |             | 高新-污染天      |             |             | 林校-优良天      |             |             |             | 林校-污染天      |             |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|       | 因子1         | 因子2         | 因子3         | 因子4         | 因子1         | 因子2         | 因子3         | 因子1         | 因子2         | 因子3         | 因子4         | 因子1         | 因子2         |
| Nap   | 0.50        | 0.49        | -0.11       | 0.20        | 0.43        | <b>0.77</b> | -0.03       | 0.43        | <b>0.68</b> | 0.22        | -0.22       | 0.44        | <b>0.77</b> |
| Acy   | 0.60        | 0.10        | <b>0.65</b> | -0.21       | 0.59        | -0.57       | 0.28        | 0.60        | 0.26        | -0.30       | -0.05       | 0.59        | -0.18       |
| Ace   | 0.46        | 0.46        | -0.37       | -0.20       | 0.32        | <b>0.82</b> | 0.00        | 0.38        | <b>0.68</b> | 0.05        | -0.39       | 0.49        | 0.70        |
| Flu   | <b>0.86</b> | 0.05        | -0.07       | -0.09       | <b>0.86</b> | 0.07        | 0.05        | <b>0.85</b> | 0.08        | -0.01       | -0.14       | <b>0.93</b> | 0.11        |
| Phe   | <b>0.87</b> | 0.08        | 0.12        | -0.19       | <b>0.84</b> | -0.41       | 0.03        | <b>0.92</b> | 0.15        | -0.06       | 0.01        | <b>0.86</b> | -0.32       |
| Ant   | 0.54        | 0.25        | -0.38       | -0.44       | 0.71        | -0.16       | 0.04        | 0.47        | 0.16        | <b>0.71</b> | 0.03        | <b>0.83</b> | -0.04       |
| Fla   | <b>0.90</b> | -0.34       | -0.01       | 0.11        | <b>0.88</b> | -0.30       | 0.03        | <b>0.92</b> | -0.33       | 0.02        | 0.03        | <b>0.84</b> | -0.40       |
| Pyr   | <b>0.88</b> | -0.38       | -0.12       | 0.03        | <b>0.90</b> | -0.03       | -0.21       | <b>0.90</b> | -0.38       | 0.04        | -0.11       | <b>0.90</b> | -0.29       |
| BaA   | <b>0.90</b> | -0.18       | 0.07        | 0.00        | 0.77        | -0.26       | 0.34        | <b>0.90</b> | -0.30       | -0.14       | -0.11       | <b>0.87</b> | -0.08       |
| Chry  | <b>0.83</b> | -0.38       | -0.14       | 0.29        | <b>0.86</b> | 0.09        | -0.34       | <b>0.84</b> | -0.42       | -0.01       | 0.14        | 0.75        | -0.36       |
| BbF   | <b>0.85</b> | -0.27       | 0.04        | 0.32        | 0.80        | 0.11        | -0.38       | <b>0.81</b> | -0.45       | -0.16       | 0.10        | 0.76        | -0.40       |
| BkF   | 0.43        | 0.29        | <b>0.69</b> | -0.30       | 0.76        | 0.00        | -0.08       | 0.28        | 0.03        | 0.58        | <b>0.63</b> | <b>0.83</b> | 0.33        |
| BaP   | <b>0.85</b> | -0.16       | -0.16       | -0.18       | <b>0.87</b> | -0.28       | 0.12        | <b>0.91</b> | 0.04        | -0.07       | -0.10       | <b>0.87</b> | -0.35       |
| InP   | 0.15        | <b>0.68</b> | -0.21       | 0.14        | 0.23        | 0.43        | <b>0.75</b> | 0.22        | <b>0.64</b> | -0.41       | 0.34        | 0.31        | <b>0.75</b> |
| DahA  | 0.68        | 0.50        | -0.13       | 0.09        | 0.50        | <b>0.70</b> | 0.08        | 0.58        | 0.52        | 0.19        | -0.04       | 0.60        | <b>0.68</b> |
| BghiP | 0.26        | 0.50        | 0.31        | <b>0.62</b> | 0.41        | <b>0.67</b> | 0.02        | 0.35        | 0.46        | -0.34       | 0.56        | 0.37        | <b>0.76</b> |
| 特征值   | 7.89        | 2.10        | 1.43        | 1.08        | 7.91        | 3.17        | 1.10        | 7.66        | 2.66        | 1.36        | 1.12        | 8.52        | 3.11        |
| 解释方差  | 49.28       | 13.14       | 8.90        | 6.76        | 49.44       | 19.84       | 6.84        | 47.90       | 16.61       | 8.48        | 7.02        | 60.60       | 19.41       |

1) 黑体字对应在某一因子中具有更高载荷值的元素

2.4 健康风险

大气颗粒物中的 PAHs 会通过吸入等途径进入人体,对人体健康造成不利的影响. 2 个采样点不同污染水平下 BaP、BaP-TEQ 和 CANPAHs 的浓度水平如图 4 所示. 在 16 种 PAHs 单体中,BaP 被确认为高致癌性物质,具有相当高的健康风险. 高新和林校优良天 BaP 日均浓度分别为(3.92±1.10) ng·m<sup>-3</sup>和(3.72±1.36) ng·m<sup>-3</sup>,污染天分别为(4.67±1.18) ng·m<sup>-3</sup>和(4.77±1.01) ng·m<sup>-3</sup>,采样

期内高新和林校分别有 93% 和 89% 的采样天超过我国空气质量日均标准限值(2.5 ng·m<sup>-3</sup>)<sup>[36]</sup>,表明洛阳市秋冬季 BaP 污染严重,应该受到更多的重视. 高新和林校优良天致癌多环芳烃(CANPAHs, 包括 BaA、BbF、BkF、BaP、Chry、DahA 和 InP)浓度平均值分别为(18.68±4.81) ng·m<sup>-3</sup>和(22.31±4.72) ng·m<sup>-3</sup>,污染天分别为(25.12±5.70) ng·m<sup>-3</sup>和(28.77±6.55) ng·m<sup>-3</sup>,CANPAHs/∑16PAHs 在 2 个采样点不同污染水平下的变化范围为 0.48

~0.54, 与 Wang 等<sup>[13]</sup> 在 2014~2015 年的研究结果 (0.58) 相比有所下降, 但仍处于较高水平。不同种类 PAHs 对人体的健康风险影响不同, 本研究根据世界卫生组织 (WHO) 规定使用毒性等效因子 (equivalent factors, TEFs) 来描述 PAHs 单体相对于 BaP 的致癌潜力<sup>[37]</sup>。通过加和得到 PAHs 总毒性当量浓度, 用来表征 PAHs 的致癌性。具体计算公式参考文献<sup>[16]</sup>。结果显示, 污染天的 BaP-TEQ 浓度明显高于优良天, 表明污染天存在更高的潜在致癌风险。

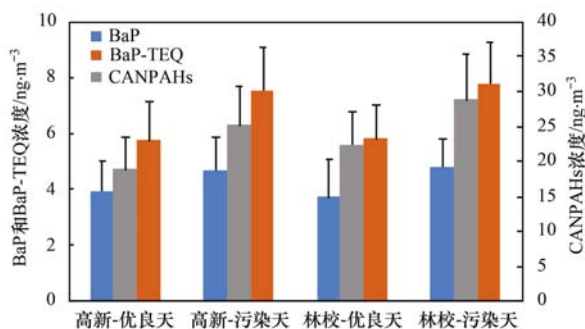


图4 洛阳市不同污染时期 BaP、BaP-TEQ 和 CANPAHs 浓度水平

Fig. 4 Concentrations of BaP, BaP-TEQ, and CANPAHs in PAHs under different PM<sub>2.5</sub> levels in Luoyang City

基于 US EPA 健康风险评价模型, 使用增量终生致癌风险 (ILCR) 模型进一步评估 PAHs 经过呼吸暴露途径进入人体后所产生的致癌风险。本研究以儿童和成年人作为研究对象计算了呼吸暴露途径对成年人的致癌风险<sup>[16,38,39]</sup>, 计算公式如下:

$$ILCR = \frac{CSF \times C \times IR \times T \times EF \times ED}{BW \times AT} \times cf \quad (1)$$

式中, CSF 为 BaP 的呼吸致癌斜率因子 [ $3.1 (\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$ ]; C 为 BaP-TEQ 的质量浓度 ( $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ); IR 为呼吸速率 (儿童和成人分别为  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  和  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ); T 为日暴露时间 (4 h); EF 为年暴露频率 (350 d); ED 为暴露期 (儿童和成人分别为 6 a 和 53 a); BW 为体重 (儿童和成人分别为 15 kg 和 70 kg); AT 为平均寿命 (25 550 d); cf 为转换因子 ( $10^{-6}$ ), 结果如图 5 所示。两组人群存在一定差异: 成人呼吸暴露风险高于儿童, 主要原因是成人吸入速率较高, 暴露时间较长。在污染天呼吸暴露的致癌风险高于优良天, 根据 US EPA 规定, 研究区域内不同污染水平下健康风险属于可接受水平 ( $< 1 \times 10^{-6}$ ), 与洛阳市 2014~2015 年结果 ( $12.5 \times 10^{-4}$ )<sup>[13]</sup> 相比下降明显, 说明洛阳市减排效果明显。考虑到 PAHs 对人类健康的不利影响, 因此政府应当继续坚持防污减排措施, 减少 PAHs 污染刻不容缓。

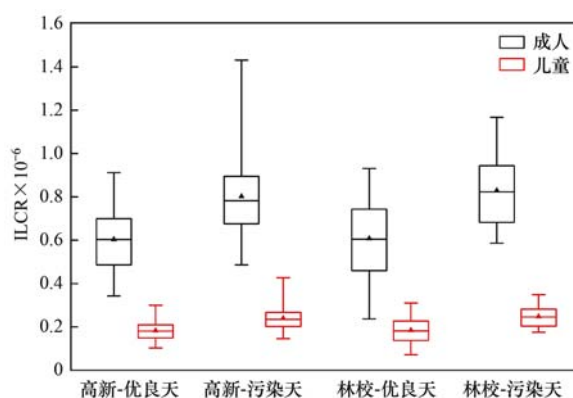


图5 洛阳市不同污染时期 PAHs 的 ILCR 值

Fig. 5 Incremental lifetime cancer risk (ILCR) of PAHs under different PM<sub>2.5</sub> levels in Luoyang City

### 3 结论

(1) 采样期内, 高新和林校两个采样点的 PM<sub>2.5</sub> 中 16 种 PAHs 浓度变化范围分别为  $24.33 \sim 90.26 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $23.81 \sim 76.99 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。随着 PM<sub>2.5</sub> 污染程度的加重, PAHs 浓度明显升高, 污染天的 PAHs 浓度大约是优良天的 1.3 倍。

(2) 随着 PM<sub>2.5</sub> 污染的加重, 2 个采样点不同污染水平下 16 种 PAHs 单体平均质量浓度有不同程度地显著升高, 其中 Fla、BaA、Pyr、BaP 和 Phe 等单体相对含量较高, 占总 PAHs 浓度的 55%~61%。2 个采样点不同污染水平下 PAHs 环数贡献顺序相似, 4 环 (43%~48%) > 5~6 环 PAHs (32%~35%) > 2~3 环 (20%~22%)。

(3) 特征比值法和主成分分析法结果表明, 洛阳市秋冬季大气中 PAHs 主要来自于燃烧源, 包括燃煤, 生物质燃烧以及机动车排放等, 其中燃煤对 PAHs 污染贡献最大 (优良天: 49.28%~56.38%, 污染天: 49.44%~60.60%)。

(4) BaP-TEQ 浓度表明, 污染天存在的人体健康风险比优良天更高; 增量终生致癌风险 (ILCR) 结果表明, 成人呼吸暴露风险高于儿童, 在研究区域内不同污染水平下健康风险属于可接受水平 ( $< 1 \times 10^{-6}$ ), 且对人体健康的影响污染天 > 优良天。

#### 参考文献:

- [1] Chai F H, Gao J, Chen Z X, *et al.* Spatial and temporal variation of particulate matter and gaseous pollutants in 26 cities in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(1): 75-82.
- [2] Ames B N, McCann J, Yamasaki E. Methods for detecting carcinogens and mutagens with the salmonella/mammalian-microsome mutagenicity test [J]. *Mutation Research/Environmental Mutagenesis and Related Subjects*, 1975, **31**(6): 347-363.
- [3] Abdel-Shafy H I, Mansour M S M. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: source, environmental impact, effect on

- human health and remediation [J]. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2016, **25**(1): 107-123.
- [4] 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.
- [5] Jenkins B M, Jones A D, Turn S Q, *et al.* Particle concentrations, gas-particle partitioning, and species intercorrelations for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) emitted during biomass burning[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(22): 3825-3835.
- [6] Zhang Y X, Tao S. Global atmospheric emission inventory of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) for 2004 [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(4): 812-819.
- [7] Yan D H, Wu S H, Zhou S L, *et al.* Characteristics, sources and health risk assessment of airborne particulate PAHs in Chinese cities: a review[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **248**: 804-814.
- [8] 张艺璇, 曹芳, 郑涵, 等. 2017 年秋季长春市 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的污染来源及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 564-573.
- Zhang Y X, Cao F, Zheng H, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM<sub>2.5</sub> in Changchun City, autumn of 2017[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 564-573.
- [9] Gao Y, Ji H B. Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons components in fine particle during heavy polluting phase of each season in urban Beijing[J]. *Chemosphere*, 2018, **212**: 346-357.
- [10] Slezakova K, Castro D, Delerue-Matos C, *et al.* Impact of vehicular traffic emissions on particulate-bound PAHs: levels and associated health risks[J]. *Atmospheric Research*, 2013, **127**: 141-147.
- [11] Wang L J, Dong S Z, Liu M M, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in the semi-arid city of Xi'an, Northwest China: seasonal variations, sources, health risks, and relationships with meteorological factors [J]. *Atmospheric Research*, 2019, **229**: 60-73.
- [12] 河南省统计局, 国家统计局河南调查总队. 河南统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [13] Wang Q, Dong Z S, Guo Y, *et al.* Characterization of PM<sub>2.5</sub>-bound polycyclic aromatic hydrocarbons at two central China cities: seasonal variation, sources, and health risk assessment [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020, **78**(1): 20-33.
- [14] 周兵利, 刘献辉, 张攀, 等. 洛阳市大气颗粒物来源解析研究[J]. *环保科技*, 2018, **24**(5): 23-25.
- Zhou B L, Liu X H, Zhang P, *et al.* Study on source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in ambient air of Luoyang [J]. *Environmental Protection and Technology*, 2018, **24**(5): 23-25.
- [15] 2+26城市颗粒物组分数据分析平台[EB/OL]. <http://106.37.181.120:9011/bfs/login.html>.
- [16] 董喆, 姜楠, 王佳, 等. 郑州市大气 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的污染特征及健康风险评估[J]. *郑州大学学报(理学版)*, 2020, **52**(2): 108-113.
- [17] Jiang N, Duan S G, Yu X, *et al.* Comparative major components and health risks of toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons of PM<sub>2.5</sub> in winter and summer in Zhengzhou: based on three-year data [J]. *Atmospheric Research*, 2018, **213**: 173-184.
- [18] Wang Q, Liu M, Yu Y P, *et al.* Characterization and source apportionment of PM<sub>2.5</sub>-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from Shanghai City, China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 118-128.
- [19] Ma Y Q, Cheng Y B, Qiu X H, *et al.* A quantitative assessment of source contributions to fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>)-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their nitrated and hydroxylated derivatives in Hong Kong [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 742-749.
- [20] 郭志明, 刘頔, 林田, 等. 太原城区 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃、硝基多环芳烃的污染特征、来源解析和健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(3): 1102-1108.
- Guo Z M, Liu D, Lin T, *et al.* Concentration, source identification, and exposure risk assessment of PM<sub>2.5</sub>-bound PAHs and nitro-PAHs in the atmosphere of Taiyuan[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(3): 1102-1108.
- [21] 王超, 张霖琳, 刀谓, 等. 京津冀地区城市空气颗粒物中多环芳烃的污染特征及来源[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(1): 1-6.
- Wang C, Zhang L L, Dao X, *et al.* Pollution characteristics and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons in airborne particulates of Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(1): 1-6.
- [22] 薛国艳, 王格慧, 吴灿, 等. 长三角背景点夏季大气 PM<sub>2.5</sub> 中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 554-563.
- Xue G Y, Wang G H, Wu C, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of *n*-Alkanes and PAHs in summertime PM<sub>2.5</sub> at background site of Yangtze River Delta [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 554-563.
- [23] He J B, Fan S X, Meng Q Z, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) associated with fine particulate matters in Nanjing, China: distributions, sources and meteorological influences [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 207-215.
- [24] 顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 等. 常州市大气 PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3110-3119.
- Gu A J, Liu J S, Luo S P, *et al.* Pollution characteristics and source identification of PAHs in atmospheric PM<sub>2.5</sub> in Changzhou City[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3110-3119.
- [25] 李皓, 樊曙先, 张悦, 等. 南京市市区郊区大气 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 中 PAHs 的分布特征及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(1): 60-68.
- Li H, Fan S X, Zhang Y, *et al.* Characteristics and influence factors of PAHs in PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in urban and suburban Nanjing, China[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(1): 60-68.
- [26] 马社霞, 张啸, 陈来国, 等. 海南五指山背景点 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的污染特征[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(S1): 103-107.
- Ma S X, Zhang X, Chen L G, *et al.* Characteristics of PAHs concentration in the atmospheric PM<sub>2.5</sub> in Wuzhi Mountain background in Hainan, South China[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(S1): 103-107.
- [27] Bourotte C, Forti M C, Taniguchi S, *et al.* A wintertime study of PAHs in fine and coarse aerosols in São Paulo City, Brazil[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(21): 3799-3811.
- [28] Guillon A, Le Ménach K, Flaud P M, *et al.* Chemical characterization and stable carbon isotopic composition of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons issued from

- combustion of 10 Mediterranean woods [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(5): 2703-2719.
- [29] Mancilla Y, Mendoza A, Fraser M P, *et al.* Organic composition and source apportionment of fine aerosol at Monterrey, Mexico, based on organic markers [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(2): 953-970.
- [30] De La Torre-Roche R J, Lee W Y, Campos-Diaz S I. Soil-borne polycyclic aromatic hydrocarbons in El Paso, Texas: analysis of a potential problem in the United States/Mexico border region[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **163**(2-3): 946-958.
- [31] Kulkarni P, Venkataraman C. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in Mumbai, India[J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(17): 2785-2790.
- [32] Bragato M, Joshi K, Carlson J B, *et al.* Combustion of coal, bagasse and blends thereof: part II: speciation of PAH emissions [J]. Fuel, 2012, **96**: 51-58.
- [33] Li J W, Li X D, Li M, *et al.* Influence of air pollution control devices on the polycyclic aromatic hydrocarbon distribution in flue gas from an ultralow-emission coal-fired power plant[J]. Energy & Fuels, 2016, **30**(11): 9572-9579.
- [34] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 5.  $\text{C}_1$ - $\text{C}_{32}$  organic compounds from gasoline-powered motor vehicles [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(6): 1169-1180.
- [35] Kameda Y, Shirai J, Komai T, *et al.* Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: size distribution, estimation of their risk and their depositions to the human respiratory tract[J]. Science of the Total Environment, 2005, **340**(1-3): 71-80.
- [36] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [37] Zhu Y H, Yang L X, Yuan Q, *et al.* Airborne particulate polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) pollution in a background site in the North China Plain: concentration, size distribution, toxicity and sources [J]. Science of the Total Environment, 2014, **466-467**: 357-368.
- [38] 王飞, 孙如峰, 韩斌, 等. 儿童多环芳烃个体暴露特征及健康风险评价[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2013, **46**(6): 48-57.
- Wang F, Sun R F, Han B, *et al.* The characterization and the health-risk assessment of children respiratory exposure to PAHs in  $\text{PM}_{2.5}$  [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2013, **46**(6): 48-57.
- [39] Wang J, Geng N B, Xu Y F, *et al.* PAHs in  $\text{PM}_{2.5}$  in Zhengzhou: concentration, carcinogenic risk analysis, and source apportionment[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, **186**(11): 7461-7473.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                               |                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Health Impact Attributable to the Control of PM <sub>2.5</sub> Pollution in China During 2013-2017 .....                                                      | ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> ( 513 )  |
| Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement .....                                                  | WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan ( 523 )                                   |
| Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016 .....                 | YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> ( 534 )          |
| Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020 .....                                                        | PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> ( 546 )        |
| Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta .....                             | XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> ( 556 )               |
| Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing .....               | ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> ( 564 )       |
| Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin .....                                                                            | DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> ( 574 )      |
| Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling .....                             | ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> ( 584 )            |
| Characterization, Sources, and Health Risks of PM <sub>2.5</sub> -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City .....                                   | QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> ( 595 )        |
| Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City .....                                                   | WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> ( 604 )         |
| Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods .....                             | LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> ( 616 )        |
| Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai .....                             | YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming ( 624 )                           |
| Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou .....                             | GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> ( 634 )         |
| Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017 .....                                                                                              | LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> ( 643 )         |
| Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta .....                                | WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> ( 653 )         |
| Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed .....                            | SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> ( 663 )              |
| Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai .....                     | WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> ( 673 )       |
| Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City .....                                                    | WANG Wei, LI Xu-yong ( 681 )                                        |
| Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir .....                                               | YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> ( 688 )           |
| Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation .....                                                               | WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> ( 699 )          |
| Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake .....                                                                | YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> ( 712 )           |
| Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide .....                                                             | XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> ( 723 )             |
| Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir .....                                                     | CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> ( 732 )          |
| Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River .....                                                                     | LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> ( 740 )            |
| Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province .....                                | WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> ( 749 )    |
| Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds .....                                                                                | HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang ( 761 )                   |
| Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin .....                                                                | ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> ( 766 )               |
| Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin .....                                                                              | HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> ( 776 )         |
| Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution .....                                | ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> ( 786 ) |
| Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes .....                                             | ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> ( 796 )           |
| Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties .....                                                         | HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> ( 808 )            |
| Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019 .....                  | YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> ( 819 )             |
| Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season ..... | HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> ( 831 )      |
| Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands .....                                       | LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> ( 842 )         |
| Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems .....                                                    | ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> ( 850 ) |
| Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection .....                       | HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> ( 860 )              |
| Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron .....                                                | SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> ( 867 )    |
| Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution .....                                                | WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> ( 874 )          |
| Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters .....                             | XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> ( 883 )     |
| Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste ..... | CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> ( 891 )     |
| Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province .....             | MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> ( 900 )    |
| Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City .....                                                | CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> ( 909 )      |
| Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil .....                                                                    | DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> ( 917 )               |
| Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter .....                                             | LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong ( 925 )                         |
| Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO <sub>2</sub> on Cadmium Enrichment of Rice .....                                                          | ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> ( 932 )     |
| Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area .....                                            | WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> ( 941 )            |
| Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells .....             | SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong ( 952 )                    |
| Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs .....                                                                                                      | CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> ( 960 )           |
| Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments .....                                  | XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> ( 967 )        |
| Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China .....      | GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> ( 977 )  |
| Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils .....                                                                 | LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> ( 988 )       |
| Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems .....                                                                              | GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> ( 996 )               |
| Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar .....           | LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong ( 1004 )                      |
| Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter .....                                                                      | LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> ( 1013 )        |