

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期

Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案 ..... 严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)

天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源 ..... 王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)

重庆市主城区 O<sub>3</sub> 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)

汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性 ..... 陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)

2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析 ..... 毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)

北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估 ..... 党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)

郑州市 PM<sub>2.5</sub> 组分、来源及其演变特征 ..... 赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)

上海市 PM<sub>2.5</sub> 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应 ..... 程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)

粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析 ..... 段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)

河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征 ..... 高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)

广州地区室内灰尘中典型非邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险 ..... 刘晓途, 彭长风, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)

天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价 ..... 武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)

河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征 ..... 杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)

重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征 ..... 周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)

城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征 ..... 俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)

白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征 ..... 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)

夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化 ..... 宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)

洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素 ..... 陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)

农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响 ..... 罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)

沱江流域总氮面源污染负荷时空演变 ..... 肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)

微塑料对海水抗生素抗性基因的影响 ..... 周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)

磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用 ..... 王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)

潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果 ..... 程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)

三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价 ..... 黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锟, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素 ..... 李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)

淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析 ..... 李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)

DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制 ..... 丁翔, 李志武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)

市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性 ..... 王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)

亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响 ..... 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)

A<sup>2</sup>/O 与倒置 A<sup>2</sup>/O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析 ..... 李金成, 郭雅妮, 齐蝶, 杨敏 (3866)

厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析 ..... 闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)

活性污泥微生物群落结构与与环境因素响应关系分析 ..... 马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)

汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析 ..... 朱宇恩, 文瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)

基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析 ..... 管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)

典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价 ..... 唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)

大气 CO<sub>2</sub> 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)

椰糠生物炭对热区双季稻田 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放的影响 ..... 王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)

不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)

物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应 ..... 杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)

米利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析 ..... 秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)

黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应 ..... 林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)

秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响 ..... 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)

镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响 ..... 陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)

岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征 ..... 周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)

锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制 ..... 刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)

不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响 ..... 王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)

4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制 ..... 丁园, 教师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)

叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响 ..... 张雅荟, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)

镉对不同生长期籽粒菟植物螯合肽的影响 ..... 刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)

中国造纸业物质代谢演化特征 ..... 刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)

《环境科学》征订启事(3651) 《环境科学》征稿简则(3718) 信息(3836, 3885, 3893)

# 基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析

管贤贤<sup>1,2</sup>, 周小平<sup>1,2\*</sup>, 雷春妮<sup>2</sup>, 彭熾雯<sup>3</sup>, 张松林<sup>1\*</sup>

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 兰州海关技术中心, 兰州 730010; 3. 甘肃农业大学食品科学与工程学院, 兰州 730070)

**摘要:** 为了解兰州市主城区表层土壤多环芳烃 (PAHs) 的污染现状, 采集兰州市主城区表层土样 62 份, 利用 GC-MS (气相色谱-质谱联用仪) 分析土样中 16 种优控 PAHs 的含量, 采用描述性统计方法表征 PAHs 污染特征, 运用 APCS-MLR (绝对主成分分析-多元线性回归) 模型判断土壤 PAHs 的来源, 并验证模型结果的准确性, 最后结合地统计方法确定各 PAHs 来源的主要影响区域。结果表明, 兰州市主城区表层土壤  $\sum_{16}$  PAHs 的含量为 1 069 ~ 7 377  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均为 2 423  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 其中, 以 4 ~ 6 环的高分子量 PAHs 为主, 占  $\sum_{16}$  PAHs 的质量分数为 72.81%。APCS-MLR 模型验证结果表明, 实测值与预测值吻合性较高, 该模型对于研究区土壤 PAHs 源解析有很好的适用性。兰州市主城区表层土壤 PAHs 的来源主要为交通排放源 (35.42%)、石油排放源 (29.88%) 和煤炭与生物质燃烧混合源 (33.91%), 高值区主要分布在交通密集范围和工业区。结果表明研究区土壤 PAHs 来源复杂, 且受人为活动的影响较大, 应根据各污染源的贡献率和影响区域加强控制, 以减少污染源排放量, 从而降低土壤 PAHs 的污染程度。

**关键词:** 兰州; 多环芳烃 (PAHs); APCS-MLR 模型; 源解析; 分布特征

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3904-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202012215

## Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model

GUAN Xian-xian<sup>1,2</sup>, ZHOU Xiao-ping<sup>1,2\*</sup>, LEI Chun-ni<sup>2</sup>, PENG Yan-wen<sup>3</sup>, ZHANG Song-lin<sup>1\*</sup>

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Lanzhou Customs Technology Center, Lanzhou 730010, China; 3. College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** To evaluate the pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface soil of the core urban area of Lanzhou, 62 topsoil samples were collected from the area. The soil samples were analyzed for the content of 16 priority PAHs, using gas chromatography-mass spectrometry. Descriptive statistical methods were used to characterize contamination by PAHs. An absolute principal component analysis-multiple linear regression (APCS-MLR) model was applied to determine the sources of PAHs in the soil samples, and the accuracy of the model results was verified. Finally, the main influence regions of each source were determined with a geo-statistical method. The results showed that the contents of  $\sum_{16}$  PAHs in the surface soils of Lanzhou ranged from 1 069 to 7 377  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , with an average of 2 423  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . High molecular weight PAHs (4-6 rings) were dominant, accounting for 72.81% of the  $\sum_{16}$  PAHs. Verification results of the APCS-MLR model showed that the measured values were in good correspondence with the predicted values, which indicated that the model had good applicability for source apportionment of soil PAHs in the study area. The main sources of PAHs in Lanzhou were traffic emissions (35.42%), petroleum emissions (29.88%), and a mixture of coal and biomass combustion (33.91%). The sources were greatly affected by human activities, and high values were mainly distributed in traffic-intensive and industrial areas. The results indicated that the sources of soil PAHs were complex and influenced by anthropogenic activities in the study area. Stringent control measures should be placed on the sources and areas of influence that contribute to soil PAHs to reduce the emissions and the level of soil pollution resulting from PAHs.

**Key words:** Lanzhou; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); APCS-MLR model; source apportionment; distribution characteristic

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 持久普遍存在于环境中, 不少具有较强的毒性和致癌性<sup>[1,2]</sup>; 主要源于化石燃料和生物质燃烧、石油挥发或泄漏、机动车尾气和工业排放等<sup>[3,4]</sup>。PAHs 可通过大气干湿沉降进入土壤, 土壤作为 PAHs 的“汇”<sup>[5]</sup>, 据报道称约 90% 的 PAHs 留存在土壤中<sup>[6]</sup>。土壤也是 PAHs 的“源”, 由于其亲脂性、

持久性和疏水性特征, PAHs 在土壤环境中大量积聚且很难被降解, 通过雨水和地表径流进入水环境

收稿日期: 2020-12-23; 修订日期: 2021-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51068025)

作者简介: 管贤贤 (2000 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为有机污染物的检测与分析, E-mail: 2665954387@qq.com

\* 通信作者, E-mail: zhxp1123@163.com; zhangsonglin65@nwnu.edu.cn

中,造成水体或其他环境介质的污染<sup>[7,8]</sup>. 城市土壤作为人类活动的主要场所,也是 PAHs 的重要“源”和“汇”<sup>[9]</sup>. 因此,了解和识别城市土壤 PAHs 的来源,对研究区控源减排措施的制定十分重要.

城市土壤是 PAHs 重要的“源-汇”<sup>[9]</sup>,源解析及贡献分析是其风险管理和控源减排的前提<sup>[10,11]</sup>. 目前,PAHs 源解析的定性方法有特征化合物比值法<sup>[12]</sup>,定量方法有多元统计法、UMIX 模型<sup>[13]</sup>、正定矩阵因子分析法(PMF)<sup>[14]</sup>和绝对主成分分析与多元线性回归模型(APCS-MLR)<sup>[15]</sup>等. 其中,APCS-MLR 模型不仅可以识别污染源,而且可以计算各源的贡献率及每个因子对单个样本的源贡献率<sup>[16]</sup>;该模型在大气和水环境中应用较多,可以解析自然或者人为污染源的贡献<sup>[17,18]</sup>,近年来被用于土壤污染物,如武威市和张掖市<sup>[19,20]</sup>以及宁夏中宁县枸杞地<sup>[21]</sup>的土壤重金属源解析.

兰州市是“丝绸之路经济带”核心节点城市和西北地区重要的工业基地,包括石油化工、能源电力、有色冶金、装备制造和高新技术等行业,城市发展过程中化石燃料的消耗会释放大量的 PAHs 进入城市土壤和生态环境<sup>[22]</sup>. 因此,本文在兰州市主城区表层土壤 PAHs 污染特征分析的基础上,运用 APCS-MLR 模型分析其 PAHs 的来源和各因子源贡献量,结合地统计方法评价其空间分布特征,以期对土壤 PAHs 污染防控提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

兰州市位于 35.57° ~ 37.12° N, 102.59° ~ 104.57° E,研究区为兰州市 4 个主城区,包括城关、七里河、安宁和西固区(图 1). 兰州市面积 13 086 km<sup>2</sup>,常住人口 436 万<sup>[23]</sup>;温带大陆性气候,年平均气温 11.2℃,年均降水量 327 mm,主要集中在 6~9 月;地势西北高,东南低,南北群山对峙,黄河自西向东穿城而过,高山与盆地相间.

### 1.2 样品采集

2020 年 5 月,参照文献<sup>[24]</sup>,按照网格布点法采集主城区 0~20 cm 表层土壤 62 份(图 1),去除样品中杂质后,采用四分法取样将约 300 g 的土壤

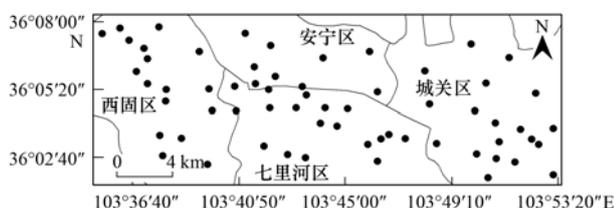


图 1 研究区土壤采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

样品装入棕色玻璃瓶中于 4℃ 下保存,待测 PAHs.

### 1.3 样品分析与测定

#### 1.3.1 样品分析

参考文献<sup>[25]</sup>方法提取土壤中 PAHs. 称取 5 g 土样,加入等量的无水硫酸钠混合,同时加入 2-氟联苯和 4,4-三联苯-d<sub>14</sub>作为替代物,用 30 mL 丙酮-正己烷(1:1,体积比)混合溶剂超声萃取 25 min,振荡 3 min,9 000 r·min<sup>-1</sup>离心 5 min,重复两次,合并萃取溶剂 50 mL,使用平行浓缩仪浓缩萃取液至 1 mL 左右. 将萃取柱固定在固相萃取装置上,先用 4 mL 二氯甲烷淋洗,再加 10 mL 正己烷平衡 Florisil 固相萃取柱. 移取浓缩液至固相萃取柱中,用 10 mL 二氯甲烷:正己烷(1:9,体积比)混合溶剂洗脱目标物,收集全部洗脱液. 用氮吹法浓缩洗脱液近干,用色谱纯正己烷置换原有溶剂,定容. 加入内标物(萘-d<sub>8</sub>、苊烯-d<sub>10</sub>、菲-d<sub>10</sub>、蒽-d<sub>12</sub>和芘-d<sub>12</sub>),涡旋混匀后过 0.22 μm 有机相滤膜,待测.

#### 1.3.2 样品测定

使用 QP-2010 Ultra 气相色谱质谱联用仪检测萘(Nap)、苊烯(Acy)、苊(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、蒽(Chry)、苯并[a]蒽(BaA)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[a,h]蒽(DahA)、茚并[1,2,3-cd]芘(InP)和苯并[g,h,i]芘(BghiP)等 16 种优先控制 PAHs. HP-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm)毛细管柱,高纯氦气载气,流速 0.8 mL·min<sup>-1</sup>;柱温箱升温程序为初始温度 50℃,保持 1 min,以 10℃·min<sup>-1</sup>升至 180℃,保持 2 min,再以 20℃·min<sup>-1</sup>升至 220℃,保持 2 min,最后以 7℃·min<sup>-1</sup>升至 290℃,保持 5 min;恒压分流,分流比为 10:1;离子源温度为 230℃,进样口温度 280℃,EI 电力源为 70 eV;扫描方式为全扫描(Scan),扫描范围 45~450 u. 使用内标法和多点校正曲线对 PAHs 进行定量分析.

#### 1.3.3 质量控制与保证

为保证分析的精密度和准确性,采用空白样品和基质加标,每间隔 8 个样品进行重复分析<sup>[26]</sup>. 重复分析( $n=3$ )的相对标准偏差(RSD)小于 7%. 替代物的回收率在 76.2%~104.5%之间. 用正己烷做溶剂,制备 PAHs 质量浓度分别为 0.1、0.5、0.8、1、2、5、8 和 10 μg·mL<sup>-1</sup>的校正曲线,相关系数  $R^2 > 0.995$ .

### 1.4 绝对主成分分析-多元线性回归受体模型(APCS-MLR)

APCS-MLR 由 Thurston 等<sup>[27]</sup>提出,将原始数据标准化后,在因子分析的基础上得到绝对主成分因

子得分 (APCS), 结合多元线性回归模型计算各因子对单个样本的贡献率。

(1) 首先, 对原始数据进行标准化得到因子分数:

$$Z_{ij} = (C_{ij} - \bar{C}_j) / \delta_j \quad (1)$$

式中,  $Z_{ij}$  为标准化后的因子分数 (无量纲),  $C_{ij}$  为第  $i$  个样本中第  $j$  个 PAHs 的浓度,  $\bar{C}_j$  和  $\delta_j$  为多环芳烃  $j$  的平均浓度和标准偏差。

(2) 对所有 PAHs 引入 1 个含量为 0 的人为样本, 并进行标准化得到因子分数:

$$Z_0 = \frac{0 - \bar{C}_j}{\delta_j} = \frac{-\bar{C}_j}{\delta_j} \quad (2)$$

(3) 每个 PAHs 的 APCS 是通过每个样本的因子得分减去 0 含量样本的因子得分来估计的。

(4) 以 PAHs 实测浓度为因变量和 APCS 为自变量进行多元线性回归分析, 得到的回归系数可将 APCS 转化为每个污染源对每个样本的含量贡献:

$$C_j = b_{0j} + \sum_{k=1}^p b_{kj} \cdot \text{APCS}_k \quad (3)$$

式中,  $C_j$  为污染物的总浓度,  $b_{0j}$  为多环芳烃  $j$  做多元回归所得常数,  $b_{kj}$  为源  $k$  对多环芳烃  $j$  的回归系数;  $p$  为因子个数,  $b_{kj} \cdot \text{APCS}_k$  为源  $p$  对  $C_j$  的贡献, 所有样本的  $b_{kj} \cdot \text{APCS}_k$  平均值为绝对贡献量。

### 1.5 数据处理与分析

土壤中 PAHs 的含量以干重表示<sup>[28]</sup>。实验数据统计使用 Excel 2016, 空间分析和制图在 ArcGIS 10.1 和 Origin 2018 中完成, 多元线性回归使用 SPSS 21.0 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 描述性统计特征分析

兰州市主城区表层土壤样品中 16 种 PAHs 的含量统计结果见表 1。∑<sub>16</sub> PAHs 为 1 069 ~ 7 377 μg·kg<sup>-1</sup>, 平均值为 2 423 μg·kg<sup>-1</sup>。低环 PAHs (2 ~ 3 环) 占 ∑<sub>16</sub> PAHs 的 27.19%, 高环 PAHs (4 ~ 6 环) 为 72.81%。7 种致癌 PAHs 的总含量为 323.41 ~ 3 173.34 μg·kg<sup>-1</sup>, 平均含量为 1 126.15 μg·kg<sup>-1</sup>, 占 ∑<sub>16</sub> PAHs 的 46.13%。Phe、Fla 和 Pyr 对 16 种 PAHs 的平均贡献率分别为 11.82%、11.31% 和 9.84%。其中强致癌单体 BaP 的含量为 66.34 ~ 675.80 μg·kg<sup>-1</sup>, 平均含量为 160.15 μg·kg<sup>-1</sup>, 占 ∑ PAHs 含量的 6.63%。根据《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600-2018) 的筛选值, 所有采样点的单体 PAH 污染指数均为无污染状态, 城市土壤环境污染状况相对乐观。

变异系数 (CV) 是表示数据离散程度的一个归一化量度, 可以反映土壤中元素的变异性和离散特性<sup>[29]</sup>。Flu 和 Ant 的变异系数值为 0.22 和 0.27, 属于中度变异 (0.16 < CV < 0.36), 其它 PAHs 的变异系数值均为高度变异 (CV > 0.36)<sup>[30]</sup>。变异系数越大, 表明研究区土壤 PAHs 空间差异越显著。峰度和偏度主要用来衡量数据的分布状态<sup>[31]</sup>, 除 Acy、Ace 和 InP 外, 其余 PAHs 的偏度值均大于 1, 属于正偏状态, 表明土壤 PAHs 的含量分布受到不同程度的外界影响。

表 1 土壤 PAHs 描述性特征及相关标准<sup>1)</sup>/μg·kg<sup>-1</sup>

Table 1 Descriptive statistics and related standards for PAHs in the study area/μg·kg<sup>-1</sup>

PAHs	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数	峰度	偏度	筛选值/mg·kg <sup>-1</sup>
Nap	132.22	38.03	72.49	39.06	0.54	1.49	1.29	25
Acy	186.36	39.23	53.11	22.77	0.43	1.86	-1.01	—
Ace	100.02	46.26	64.35	31.07	0.48	3.80	0.56	—
Flu	173.61	47.76	92.56	19.93	0.22	7.63	2.22	—
Phe	183.82	69.75	287.73	153.91	0.53	16.65	3.57	—
Ant	113.31	137.01	88.86	24.25	0.27	9.79	2.65	—
Fla	1 260.47	98.34	275.48	214.33	0.78	8.88	2.66	—
Pyr	784.97	88.47	237.64	144.66	0.61	5.27	2.15	—
BaA	546.16	58.63	160.13	83.46	0.52	8.38	2.40	5.5
Chry	846.08	66.73	212.11	167.45	0.79	6.12	2.36	490
BbF	516.10	45.57	199.26	134.17	0.67	1.40	1.27	5.5
BkF	752.18	55.58	177.28	123.67	0.70	11.83	3.15	55
BaP	675.80	66.34	160.15	96.48	0.60	15.73	3.40	0.55
DahA	458.23	67.46	140.46	63.43	0.45	11.74	2.85	0.55
InP	228.48	62.16	76.76	36.16	0.47	6.32	0.77	5.5
BghiP	387.39	54.71	125.49	64.52	0.51	6.47	2.32	—

1) “—”表示无数据; 变异系数、偏度和峰度无单位

## 2.2 污染源解析

### 2.2.1 污染源识别

本研究采用数据标准化的方法,将原始数据进行标准化处理,采用 KMO-Bartlett 球形检验(KMO 为 0.875,  $P < 0.01$ )说明各变量的相关性显著,表明 PAHs 的初始数据适合进行因子分析.主成分分析提取 3 个因子(F1、F2 和 F3)的累计方差贡献率为 84.05%,旋转后各指标变量对各因子的载荷如图 2 所示.

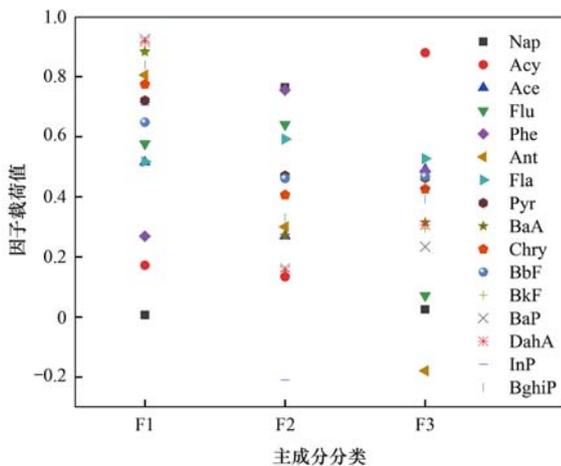


图 2 旋转因子载荷矩阵

Fig. 2 Rotation factor loading matrix

F1 解释了总方差的 47.52%,主要载荷变量为高分子量多环芳烃(HMW PAHs),包括 BaP、DahA、BkF、BaA、BghiP 和 Ant.有研究表明, HMW PAHs 与汽车尾气排放和化石燃料燃烧有关, BaP 和 InP 代表柴油燃烧排放<sup>[32]</sup>, DahA 和 BghiP 标识汽油燃烧<sup>[33]</sup>.因此, F1 指示汽车尾气排放的交通污染源. F2 占总方差的 18.71%,因子载荷较大的是 Nap, Nap 可能来源包括石油及相关产品的挥发泄漏<sup>[34]</sup>,为石油源示踪剂. F3 占总方差的 17.82%,以 Acy、Ace、Fla 和 Pyr 为主,这类低分子量多环芳烃(LMW PAHs)是生物质燃烧的标志产物<sup>[35]</sup>, Fla 和 Pyr 被认为是煤炭燃烧的示踪剂<sup>[36]</sup>,即 F3 为生物质和煤炭燃烧的混合来源.可见,石油源、煤炭和生物质燃烧以及汽车尾气排放是研究区 PAHs 污染的主要来源.

### 2.2.2 APCS-MLR 模型分析

在 PCA 识别研究区各主要污染源组成的基础上,利用 APCA-MLR 模型建立了各污染源与 PAHs 浓度的函数关系,基于该函数关系,预测了各 PAH 单体浓度,并将预测浓度与实测浓度进行线性拟合(图 3).图 3 表明,利用 APCA-MLR 模型预测的 16 种 PAHs 浓度与实测浓度线性拟合的  $R^2$  为 0.55 ~ 0.94,意味着该模型的 3 个因子可用于研究区土壤

16 种 PAHs 的源分析,说明其对 PAHs 来源分配估算的效果较好.例如, Pyr、Chry、DahA 和 BghiP 预测值与测量值的  $R^2$  分别为 0.953、0.950、0.951 和 0.964,较 LMW PAHs(低分子量多环芳烃)的  $R^2$  更接近于 1.这是因为 LMW PAHs 相对更容易挥发或者降解;而 HMW PAHs 相对更稳定,更容易留存在排放源周边的土壤环境中<sup>[8]</sup>,使该模型对 HMW PAHs 的预测结果更准确.

根据多元线性回归方程的回归系数分别计算各 PAHs 来源的贡献率(图 4).因子 1(交通排放源)对土壤 PAHs 贡献率为 35.42%,其对 BaP、DahA 和 BghiP 的贡献率均超过 45%,而这些化合物是汽车尾气排放的典型产物,与采样点主要位于兰州市主城区、交通道路密集和车流量大相关.因子 2 对 Nap 的贡献率(59.18%)远高于其它因子.有研究发现, Nap 的可能来源包括 Nap 产品的合成生产(即染料中间体、橡胶助剂和杀虫剂)以及精炼作业(如焦炭、重油和钢铁冶炼工业)<sup>[37]</sup>等.兰州市石油化工相关行业发达,因此,可认为因子 2 是与未经燃烧的石油原油和石油制品相关的石油源.因子 3 对 Acy、Ace、Fla、Pyr 和 Flu 的贡献率相对较高,分别为 47.50%、82.51%、85.43%、41.12% 和 53.34%.一般认为 Fla、Pyr 和 Flu 是工业锅炉、热电厂和发电厂等燃煤产生的污染物<sup>[36]</sup>,说明研究区可能大量使用煤炭作为燃烧能源;Acy 和 Ace 是生物质燃烧的标志物<sup>[35]</sup>,因此可认为因子 3 代表煤炭和生物质高温燃烧源.

### 2.2.3 土壤 PAHs 空间分布特征

用 ArcGIS 绘制兰州市表层土壤 PAHs 空间分布(图 5),PAHs 分布特征整体在研究区西部区域含量最高.其中, Acy、Ace 和 DahA 的分布相似,中东部区域呈团状分布格局,其含量值明显高于周边. Chry、BbF、Phe、Pyr、Fla 和 BaP 的空间分布特征相似,除西北部的高值区外,中东部北部区域含量也较高,低值主要分布于中部偏南. BghiP、BkF 和 InP 的分布特征相似,中东部主要为低值且差异较小.研究区土壤中 Nap 的高值分布最广. Flu 含量低值区主要分布于中东部两侧. Ant 高值在西北部,低值在中东部的北侧边缘和东部南部. BahA 呈斑块状分布,高值零星分布于西北部和南部,低值分布于中部和东部南侧区域.

根据土壤 PAHs 来源贡献率空间分布表明(图 6).因子 1 代表的交通排放源贡献率超过 40% 的高值分布在研究区西北部、东南部和中部区域.因子 2 代表石油源,源贡献率大于 37% 的高值区呈分散团状,主要分布在西北偏北侧与中东部偏南区域,个别

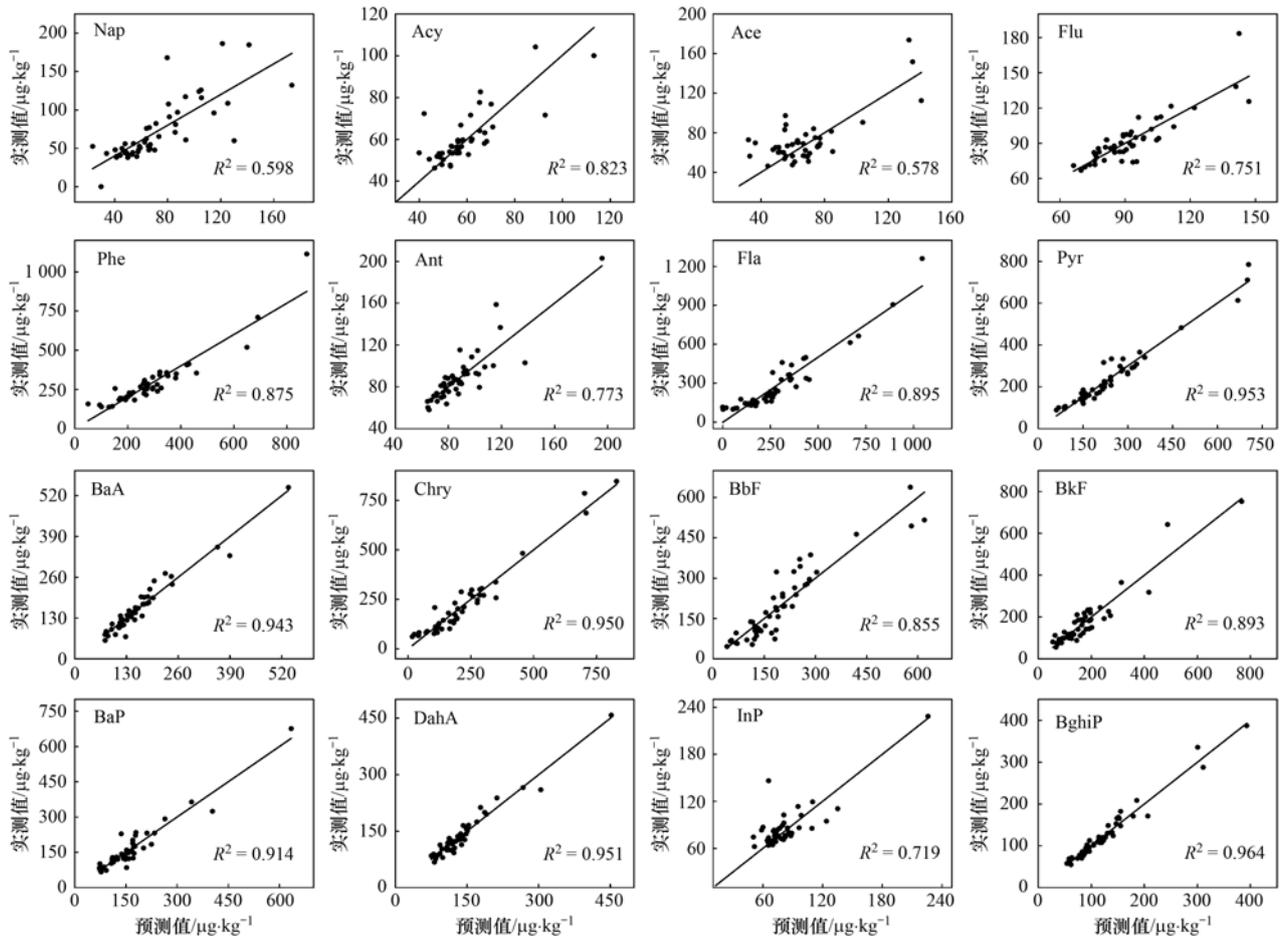


图3 PAHs 预测浓度与实测浓度对比

Fig. 3 Predict concentration of PAHs compared with measured concentration

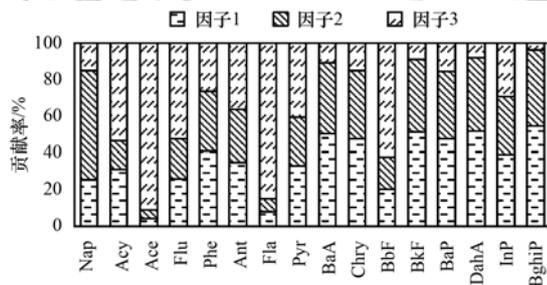


图4 研究区土壤 PAHs 污染源贡献率

Fig. 4 Source contribution ratios of soil PAHs in the study area

区域的贡献率高达62%；其次是高值区域周边范围和中东部北侧区域，石油源贡献率均高于27%。因子3代表煤炭和生物质燃烧源，源贡献率超过39%的高值区主要分布在西部、中部北侧边缘和东部区域，大部分区域的贡献率超过33%。

### 3 讨论

城市化进程加快导致城市人口、交通、工业分布格局和土地利用类型变化<sup>[38]</sup>，对城市土壤也带来一定的污染，了解城市土壤 PAHs 的污染特征具有重要意义。兰州市主城区表层土壤 PAHs 含量的平均值 ( $2\,423\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 高于石嘴山市土壤 ( $489.8$

$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[39]</sup>，低于扬州市工业区土壤 ( $5\,817\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[40]</sup> 和山东省某工业园区土壤 PAHs ( $3\,089\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[41]</sup>。与中国土壤 PAHs 污染的风险筛选值相比，16 种 PAHs 的污染指数值均低于 1；但是，强致癌单体 BaP ( $66.34 \sim 675.80\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 在个别土壤样品中含量较高，因此有必要加强兰州市城市土壤 PAHs 污染的防治。

PAHs 源解析对控源减排至关重要，不同区域土壤 PAHs 来源受能源消耗、人类活动和社会经济等因素影响而复杂多样<sup>[42,43]</sup>。利用 APCS-MLR 受体模型得出研究区土壤 PAHs 主要来源有 3 种，即交通排放源 (35.42%)，石油源 (29.88%) 和煤炭与生物质燃烧源 (33.91%)。研究区土壤 PAHs 的不同污染源贡献率差异较小，交通排放源超过 30%，主要原因是主城区人口密集、活动频繁，汽车保有量多且交通繁忙。同时，作为西北地区重要的交通枢纽，交通运输过程中导致的路面扬尘、磨损的轮胎和沥青成分等成为土壤 PAHs 的重要污染源<sup>[44]</sup>。煤炭和生物质燃烧源超过 30%，与兰州市热力、电力、冶金和石化行业的能源构成 (以煤炭为主)<sup>[23]</sup> 有关；结合 Acy 的空间分布可知 (图 5)，其高值除在研究区重

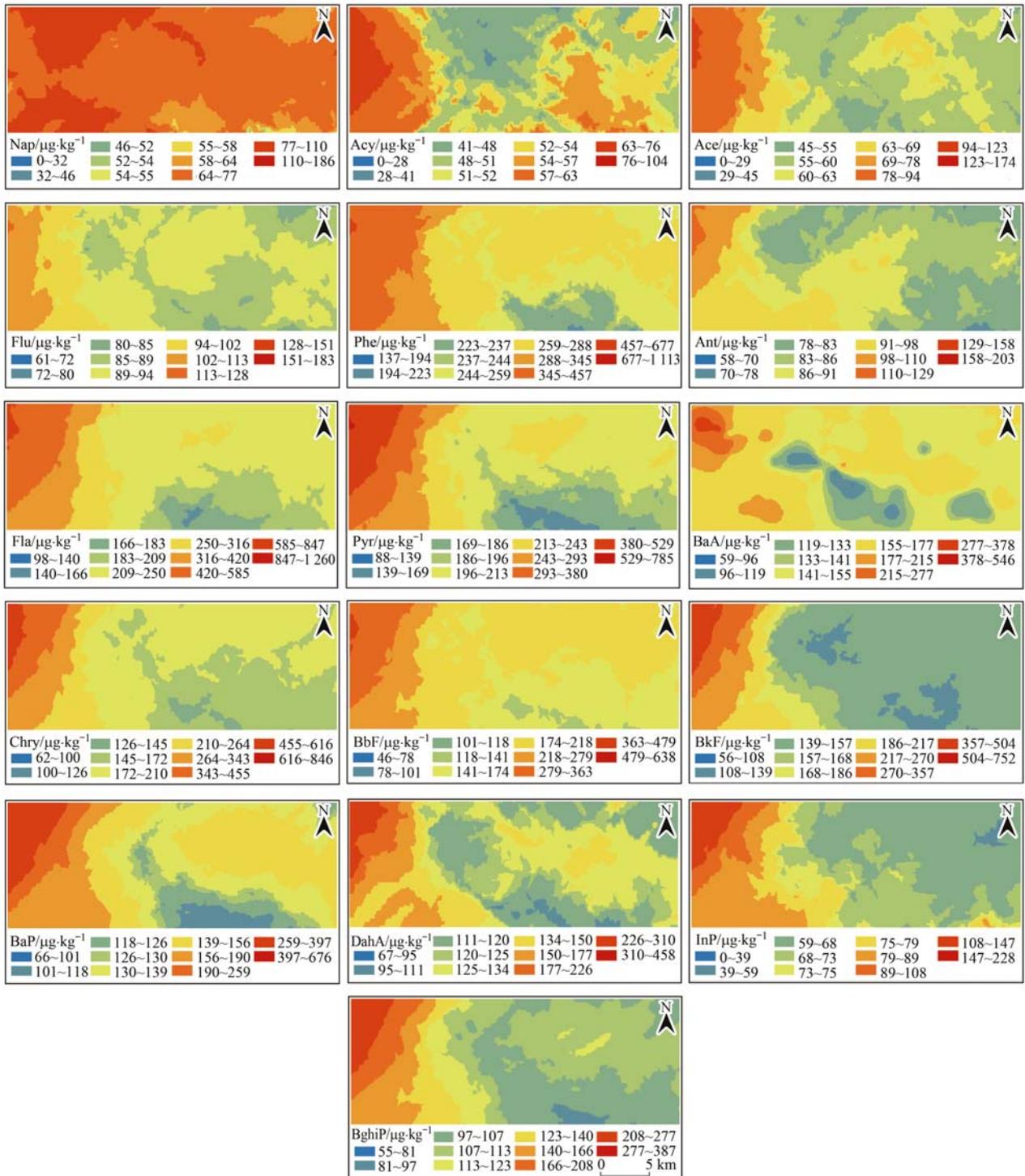


图 5 研究区土壤 PAHs 空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of soil PAHs in the study area

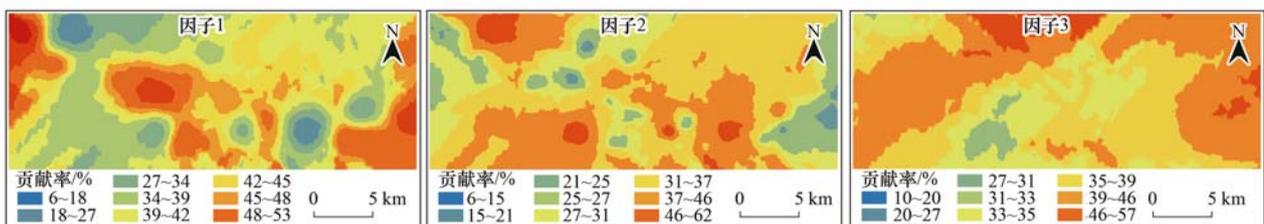


图 6 研究区土壤 PAHs 来源贡献率空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of source contributions to soil PAHs in the study area

工业基地西固区外,还出现在中东部南侧的郊区区域,这一发现可以解释生物质燃料燃烧也是该范围的生产生活方式<sup>[45]</sup>,故煤炭和生物质燃烧源所占比例也高.石油源贡献率接近30%,是由于兰州市西固区是中国西部最大的石油化工基地,有大量的原油储备和相应的石油化工生产过程和产品;其中,因子2对易挥发石油源示踪剂Nap<sup>[37]</sup>的贡献率为59.18%,故石油源的贡献率也较高.程明超<sup>[46]</sup>的研究利用APCS-MLR模型确定山西省土壤PAHs的主要来源为机动车和燃煤源(72.64%)、焦化源(17.20%)和生物质燃烧源(10.16%);而利用PMF模型确定来源为燃煤源(42.98%)、生物质燃烧源(10.68%)、焦化源(18.96%)和机动车源(27.38%),两种模型源解析的结果基本吻合.本文基于APCA-MLR模型确定的兰州市主城区表层土壤中PAHs的预测值和实测值之间的线性拟合较好(图3),表明可以利用APCS-MLR方法定量解析研究区土壤PAHs的污染来源.

结合PAHs空间分布可以看出,16种PAHs均在研究区西北区域出现高值,这是由于西北部是兰州市石油化工、装备与新材料制造、冶金和热电工业聚居区,大量的工业污染物<sup>[47]</sup>最终汇入土壤;低值区在中部南侧区域,结合兰州市土地利用类型分布分析,源贡献率小的区域主要为研究区两边的山地和公园等,这些区域人为活动相对较少,且山地和公园海拔较高,污染物不易迁移扩散到该区域,污染相对较轻.

交通排放源贡献率的空间分布表明,贡献率高值区在交通枢纽或市中心,除工业中心西固区外,城关区和七里河区也有高值区.这是由于西固区作为重要的化工产品输出产地,交通运输业较为发达,工业活动和汽车尾气都会对该区域造成一定PAHs污染,这与沈阳和扬州等城市研究结果相一致<sup>[40,48]</sup>.而城关区和七里河区是兰州市人口与交通最为密集地区,这与相关研究结果相一致<sup>[49,50]</sup>.石油源贡献率空间分布表明,高值区在各功能区呈分散团状分布,并且PAHs含量由污染区域向四周逐渐扩散,影响范围较广.这是由于石油源指示剂低分子量多环芳烃的熔点和沸点较低,易挥发逸散<sup>[51]</sup>,如焦炭和重油等精炼作业,染料中间体、橡胶加工剂和杀虫剂等合成生产均会释放大量的Nap.煤炭和生物质燃烧源贡献率的高值区主要分布在兰州市主城区的西部、中部北侧和东部,这里西有兰炼兰化等大型石化企业,东有能源电力、有色冶金、装备制造和高新技术等支柱企业,北部为以科教文化为主,人口密度和交通流量较高<sup>[52]</sup>以及具有一定规模航天器材、电子

仪表与信息产品等生产企业的安宁区.综上所述,基于地统计分析的PAHs空间分布研究,能够进一步明确土壤PAHs的污染源,说明应用APCS-MLR模型结合地统计分析进行土壤PAHs源解析的效果较好,有助于识别土壤PAHs的污染来源和污染规律,能够为控源减排提供科学依据.

#### 4 结论

(1)兰州市主城区表层土壤中16种PAHs的含量为1069~7377  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,平均值为2423  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ .PAHs以高分子量多环芳烃(4~6环)为主.所有采样点的PAHs含量均低于中国土壤污染风险管控值.除Flu和Ant外,其余PAHs含量的变异系数均高于0.36,表明PAHs含量的空间分布差异明显.

(2)APCS-MLR模型解析结果显示,兰州市主城区表层土壤PAHs的来源为混合源,交通排放源、石油排放源和煤炭与生物质燃烧源对本研究区PAHs的贡献率分别为35.42%、29.88%和33.91%,各污染源贡献差异不大.因此应该重点关注交通和工业活动排放源.

(3)PAHs含量空间分布显示,高值区主要出现在西部工业区,低值区在中东部偏南郊区范围.各源贡献率的高值区(贡献率均超过46%)较分散,交通源高值区在西北部、东南部和中部,石油源高值区主要在西北部偏北侧与中东部的南侧,煤炭和生物质燃烧源高值区在中部北侧和东部.可根据污染源贡献率拟定兰州市主城区表层土壤PAHs污染的防治措施.

#### 参考文献:

- [1] Tong R P, Cheng M Z, Zhang L, *et al.* The construction dust-induced occupational health risk using Monte-Carlo simulation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **184**: 598-608.
- [2] Tong R P, Yang X Y, Su H R, *et al.* Levels, sources and probabilistic health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the agricultural soils from sites neighboring suburban industries in Shanghai [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 1365-1373.
- [3] 杜芳芳,杨毅,刘敏,等.上海市表层土壤中多环芳烃的分布特征与源解析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(4): 989-995.  
Du F F, Yang Y, Liu M, *et al.* Distribution and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils in Shanghai [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(4): 989-995.
- [4] Aichner B, Bussian B M, Lehnik-Habrink P, *et al.* Regionalized concentrations and fingerprints of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in German forest soils [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **203**: 31-39.
- [5] Cetin B. Investigation of PAHs, PCBs and PCNs in soils around a heavily industrialized area in Kocaeli, Turkey: Concentrations,

- distributions, sources and toxicological effects[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **560-561**: 160-169.
- [6] 鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 等. 不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 3369-3377.
- Lu Y T, Xiang X X, Zhang S C, *et al.* Vertical distribution characteristics of PAHs in soils with different land use types during rapid urbanization[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3369-3377.
- [7] Watanabe H, Nakajima F, Kasuga I, *et al.* Toxicity evaluation of road dust in the runoff process using a benthic ostracod *Heterocypris incongruens*[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(12): 2366-2372.
- [8] 李英红, 饶志国, 谭吉华, 等. 兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2428-2435.
- Li Y H, Rao Z G, Tan J H, *et al.* Pollutional characteristics and sources analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric fine particulate matter in Lanzhou City [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2428-2435.
- [9] Haritash A K, Kaushik C P. Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **169**(1-3): 1-15.
- [10] Khanal R, Furumai H, Nakajima F, *et al.* Carcinogenic profile, toxicity and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons accumulated from urban road dust in Tokyo, Japan [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **165**: 440-449.
- [11] Liu H, Yu X L, Liu Z R, *et al.* Occurrence, characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in arable soils of Beijing, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **159**: 120-126.
- [12] 管贤贤, 齐安安, 雷春妮, 等. 兰州市大气苯系物的化学活性特征与健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(2): 459-468.
- Guan X X, Qi A A, Lei C N, *et al.* Chemical activity characteristics and health risk assessment of atmospheric benzene homologues in Lanzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(2): 459-468.
- [13] Hou D Y, O'Connor D, Nathanail P, *et al.* Integrated GIS and multivariate statistical analysis for regional scale assessment of heavy metal soil contamination: a critical review [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **231**: 1188-1200.
- [14] Liu Y G, Gao P, Su J, *et al.* PAHs in urban soils of two Florida cities: Background concentrations, distribution, and sources [J]. *Chemosphere*, 2019, **214**: 220-227.
- [15] 孟利, 左锐, 王金生, 等. 基于 PCA-APCS-MLR 的地下水污染源定量解析研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(10): 3773-3786.
- Meng L, Zuo R, Wang J S, *et al.* Quantitative source apportionment of groundwater pollution based on PCA-APCS-MLR[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(10): 3773-3786.
- [16] Cao A Y, Xin B M, Wang B B, *et al.* Spatiotemporal distribution, source, and ecological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the urbanized semi-enclosed Jiaozhou Bay, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137224.
- [17] 费蕾蕾. 闪电活动对近地面大气中氮氧化物、臭氧及颗粒物的影响[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2017.
- Fei L L. Effect of lightning activities on surface atmospheric nitrogen dioxides, ozone and particles [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [18] 杜展鹏, 王明净, 严长安, 等. 基于绝对主成分-多元线性回归的滇池污染源解析[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(3): 1130-1137.
- Du Z P, Wang M J, Yan C A, *et al.* Pollution source apportionment of Lake Dianchi based on absolute principal component score-multiple linear regression [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(3): 1130-1137.
- [19] Guan Q Y, Zhao R, Pan N H, *et al.* Source apportionment of heavy metals in farmland soil of Wuwei, China: comparison of three receptor models[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **237**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117792.
- [20] Zhao R, Guan Q Y, Luo H P, *et al.* Fuzzy synthetic evaluation and health risk assessment quantification of heavy metals in Zhangye agricultural soil from the perspective of sources [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **697**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134126.
- [21] 白一茹, 张兴, 赵云鹏, 等. 基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2885-2894.
- Bai Y R, Zhang X, Zhao Y P, *et al.* Spatial distribution characteristics and source apportionment of soil heavy metals in Chinese Wolfberry Land based on GIS and the receptor model [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2885-2894.
- [22] 张慧, 郭文建, 朱晨, 等. 不同类型企业周边土壤中多环芳烃来源解析与风险评估[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, **31**(4): 28-32.
- Zhang H, Guo W J, Zhu C, *et al.* Hydrocarbons in soils around different type of enterprises [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019, **31**(4): 28-32.
- [23] 兰州市统计局, 国家统计局兰州调查队. 兰州统计年鉴-2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- Lanzhou Bureau of Statistics, Lanzhou Investigation Team of National Bureau of Statistics. Lanzhou statistical yearbook 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [24] HJ/T 166-2004, 土壤环境监测技术规范[S].
- [25] HJ 805-2016, 土壤和沉积物 多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法[S].
- [26] Zheng H, Xing X L, Hu T P, *et al.* Biomass burning contributed most to the human cancer risk exposed to the soil-bound PAHs from Chengdu Economic Region, western China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **159**: 63-70.
- [27] Thurston G D, Spengler J D. A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter pollution in metropolitan Boston [J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1985, **19**(1): 9-25.
- [28] Yurdakul S, Çelik I, Çelen M, *et al.* Levels, temporal/spatial variations and sources of PAHs and PCBs in soil of a highly industrialized area[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10**(4): 1227-1238.
- [29] 李娇, 滕彦国, 吴劲, 等. 基于 PMF 模型及地统计法的乐安河中游地区土壤重金属来源解析[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(6): 984-992.
- Li J, Teng Y G, Wu J, *et al.* Source apportionment of soil heavy metal in the middle and upper reaches of Le'an river based on PMF model and geostatistics [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(6): 984-992.
- [30] 韩琳, 徐夕博. 基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 5114-5124.

- Han L, Xu X B. Quantitative evaluation of human health risk of heavy metals in soils based on positive matrix factorization model and geo-statistics[J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (11): 5114-5124.
- [31] McGrath D, Zhang C S, Carton O T. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland[J]. *Environmental Pollution*, 2004, **127**(2): 239-248.
- [32] Ilić P, Nišić T, Farooqi Z U R. Polycyclic aromatic hydrocarbons contamination of soil in an industrial zone and evaluation of pollution sources[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2021, **30**(1): 155-162.
- [33] Riaz R, Ali U, Li J, *et al.* Assessing the level and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil and sediments along Jhelum riverine system of lesser Himalayan region of Pakistan[J]. *Chemosphere*, 2019, **216**: 640-652.
- [34] 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.
- [35] Qu Y J, Gong Y W, Ma J, *et al.* Potential sources, influencing factors, and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface soil of urban parks in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114016.
- [36] 杜远江. 呼和浩特土壤中持久性有机污染物分布特征、来源及健康风险评估[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- Du Y J. Characteristic distribution and source of POPs pollution in soil of Hohhot [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019.
- [37] Yang J, Yang Y, Chen R S, *et al.* Modeling and evaluating spatial variation of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban lake surface sediments in Shanghai [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **235**: 1-10.
- [38] 姚宏, 张士超, 刘明丽, 等. 基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评估[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 889-898.
- Yao H, Zhang S C, Liu M L, *et al.* Sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons from the urbanization process of topsoil[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 889-898.
- [39] 夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 等. 基于 GIS 和 PMF 模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5656-5667.
- Xia Z S, Wang Y Y, Zhong Y X, *et al.* Spatial distribution characteristics and source apportionment of soil PAHs in Shizuishan city based on GIS and PMF model[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5656-5667.
- [40] 姚成, 倪进治, 刘瑞, 等. 扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险[J]. *环境科学*, 2020, **41** (4): 1847-1854.
- Yao C, Ni J Z, Liu R, *et al.* Contents, sources, and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface soils of various functional zones in Yangzhou city, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1847-1854.
- [41] 郭瑾, 葛蔚, 柴超, 等. 化学工业区周边土壤中多环芳烃含量、来源及健康风险评估[J]. *环境化学*, 2018, **37**(2): 296-309.
- Guo J, Ge W, Chai C, *et al.* Concentrations, sources, and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils around chemical plants[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(2): 296-309.
- [42] 董捷, 黄莹, 李永霞, 等. 北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评估[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3540-3546.
- Dong J, Huang Y, Li Y X, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soils of a large steel enterprise in the north of China[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3540-3546.
- [43] 胡伟, 钟秦, 袁青青, 等. 不同类型机动车尾气中的多环芳烃含量分析[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(12): 2493-2498.
- Hu W, Zhong Q, Yuan Q Q, *et al.* The analysis of PAHs concentrations of vehicular tail gas in different types[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(12): 2493-2498.
- [44] Suman S, Sinha A, Tarafdar A. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) concentration levels, pattern, source identification and soil toxicity assessment in urban traffic soil of Dhanbad, India[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **545-546**(68): 353-360.
- [45] 张希. 上海交通沿线农田土壤中 PAHs 赋存、来源及风险评估[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- Zhang X. PAHs distribution Characteristics, source analysis and risk assessment in farmland soil along Shanghai traffic line[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.
- [46] 程明超. 山西省土壤中 PAHs 分布特征及影响因素研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2018.
- Cheng M C. Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons distribution and its influence factors in soil in Shanxi province, China [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2018.
- [47] Davis E, Walker T R, Adams M, *et al.* Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in small craft harbor (SCH) surficial sediments in Nova Scotia, Canada[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **691**: 528-537.
- [48] 侯伟, 刘伟, 万志强, 等. 沈阳市不同功能区地表土壤多环芳烃 (PAHs) 污染特征研究[J]. *气象与环境学报*, 2020, **36** (1): 108-112.
- Hou W, Liu W, Wan Z Q, *et al.* Study on PAHs pollution characteristics of surface soil in different functional areas in Shenyang[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2020, **36**(1): 108-112.
- [49] 张希, 杨静, 刘敏, 等. 上海交通沿线农田土壤中 PAHs 分布特征及源解析[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(2): 741-749.
- Zhang X, Yang J, Liu M, *et al.* Distribution characteristics and source analysis of PAHs in farmland soils along Shanghai traffic artery[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 741-749.
- [50] 胡梦珺, 王佳, 张亚云, 等. 基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染[J]. *环境科学*, 2020, **41** (4): 1838-1846.
- Hu M J, Wang J, Zhang Y Y, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in surface dust of Lanzhou schools based on random forests[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1838-1846.
- [51] Qi P Z, Qu C K, Albanese S, *et al.* Investigation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Caserta provincial territory, southern Italy: Spatial distribution, source apportionment, and risk assessment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **383**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121158.
- [52] Cao H B, Chao S H, Qiao L, *et al.* Urbanization-related changes in soil PAHs and potential health risks of emission sources in a township in Southern Jiangsu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 692-700.

## CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai .....	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i>	(3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin .....	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing .....	..... LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry .....	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i>	(3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei .....	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin	(3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu .....	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i>	(3622)
Chemical Components and Sources of PM <sub>2.5</sub> and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou .....	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i>	(3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> in Shanghai .....	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i>	(3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-nui, <i>et al.</i>	(3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019 .....	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i>	(3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou .....	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i>	(3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin .....	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i>	(3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks .....	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i>	(3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu .....	..... ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i>	(3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies .....	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i>	(3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake .....	..... ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	(3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed .....	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i>	(3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake .....	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i>	(3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir .....	..... LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i>	(3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin .....	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i>	(3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater .....	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi	(3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater .....	..... WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo	(3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes .....	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i>	(3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area .....	..... HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i>	(3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt .....	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan	(3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems .....	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i>	(3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles .....	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i>	(3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent .....	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai	(3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System .....	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i>	(3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A <sup>2</sup> /O Sewage Treatment Processes in Winter .....	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i>	(3866)
Diversity and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX .....	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i>	(3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors .....	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i>	(3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River .....	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i>	(3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model .....	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i>	(3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area .....	..... TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i>	(3913)
Effect of Elevated CO <sub>2</sub> on N <sub>2</sub> O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields .....	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i>	(3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas .....	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i>	(3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N <sub>2</sub> O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan .....	..... WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i>	(3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings .....	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i>	(3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings .....	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i>	(3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone .....	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i>	(3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation .....	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i>	(3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure .....	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i>	(3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields .....	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i>	(4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site .....	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i>	(4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil .....	WANG Can, ZHANG Yu-hang, HE Ming-jing, <i>et al.</i>	(4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil .....	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i>	(4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice .....	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i>	(4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods .....	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i>	(4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry .....	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i>	(4061)