环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2020

Vol.41 No.12

第41卷 第12期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第12期
2020年12月15日

目 次(卷终)

我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分 …… 闫慧, 张维, 侯墨, 李银松, 高平, 夏青, 孟晓艳, 范丽雅, 叶代启(5215)
2015~2018年我国$PM_{2.5}$健康损害价值的动态评估 …… 李惠娟, 周德群, 魏永杰(5225)
2011~2017年中国$PM_{2.5}$多尺度时空分异特征分析 …… 杨文涛, 谯鹏, 刘贤赵, 雷雨亮(5236)
关中地区$PM_{2.5}$时空演化及人口暴露风险 …… 黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 王森, 黄馨(5245)
中原城市冬季两次重污染形成机制及来源 …… 贾佳, 丛怡, 高清敏, 王玲玲, 杨静静, 张国辉(5256)
西北工业城市冬季$PM_{2.5}$污染特征及理化性质 …… 杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 杨丽丽(5267)
基于PMF模型的$PM_{2.5}$中金属元素污染及来源的区域特征分析 …… 邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 李欣悦, 武文琪, 向锌鹏(5276)
重庆主城大气降尘中重金属污染特征及评价 …… 张夏, 刘斌, 肖柏林, 王佳, 万达(5288)
鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析 …… 孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 呼群, 李瑞锋, 许彩琴(5295)
杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性 …… 景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 王倩, 彭亚荣, 李英杰, 王红丽(5306)
成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 …… 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王波, 李英杰, 王成辉, 刘政, 钱骏(5316)
石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析 …… 王帅, 崔建升, 冯亚平, 刘大喜, 陈静, 田亮, 冯超, 王梦璇, 王学臣, 王婷婷(5325)
厦门市工业源VOCs排放清单及控制对策分析 …… 吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 金磊, 吴义诚, 高攀峰, 刘建福, 金月正, 潘亚雷, 傅海燕(5336)
建筑胶黏剂使用VOCs排放系数与排放清单 …… 梁小明, 孙西勃, 苏燕花, 黄礼海, 陈锋, 任璐, 卢清, 赖君怡, 陈朋龙, 陈来国(5345)
我国西北工业区城市大气多氯联苯来源及健康风险 …… 毛潇萱, 李子璇, 宋世杰, 章晓冬, 高宏, 李春新, 黄韬, 马建民(5352)
基于广州塔观测的城市近地面甲醛垂直分布特征 …… 黄山, 裴成磊, 张莹, 宋奇聪, 齐吉朋, 赵一鸣, 王鸣, 邵敏(5362)
新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析 …… 卓海华, 娄保锋, 吴云丽, 王瑞琳, 陈杰, 兰静(5371)
三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征 …… 钱田, 黄祺, 何丙辉, 李天阳, 刘淑婧, 付适, 曾荣昌, 向可翠(5381)
衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价 …… 张嘉雯, 魏健, 刘利, 王俭, 朱元荣, 段亮(5389)
宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征 …… 崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 唐婉莹, 殷鹏, 尹洪斌(5400)
梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析 …… 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 黎坤, 溜映雪, 李睿, 陈建耀(5410)
汉江流域金水河与淇河潜在硝化速率及硝化功能基因的影响因子 …… 赵彬洁, 王旭, 张健, 谭香, 何睿, 周全, 史航, 张全发(5419)
山东省滨海旅游度假区水体环境典型全氟化合物污染特征及潜在生态风险 …… 王世亮, 曹雪稚(5428)
太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析 …… 吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 张恒, 王春英, 罗莹, 郭昌胜, 徐建(5438)
岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价 …… 叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 朱琳跃, 徐昕(5448)
澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素 …… 孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 苗令占, 刘胜, 袁秋生(5458)
白洋淀优势鱼类中喹诺酮类抗生素的生物累积特征及其与环境因子相关性 … 申立娜, 付雨, 张璐璐, 秦珊, 剧泽佳, 姚波, 崔建升(5470)
生物质粒径对负载MgO生物炭吸附水体中磷的影响 …… 王鹏飞, 郅蒙蒙, 储昭升, 崔冠楠(5480)
Bi_2MoO_6/Bi_2S_3异质结光催化降解四环素-铜复合物 …… 黄文鑫, 魏虎, 蒋彩云, 王玉萍(5488)
超滤膜负载UiO-66@Fe_3O_4@UiO-66强化PPCPs去除和膜污染控制 …… 尹越, 吴道文, 孙梦瑶, 吕路, 张炜铭(5500)
低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试 …… 廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 陈诚, 何东, 吴月龙, 陈求稳(5509)
盐度渐增对水解微生物群落结构与功能的影响 …… 高京, 张少华, 王锐, 金鹏康(5518)
限NH_4^+和限NO_2^-厌氧氨氧化系统的运行特性及微生物种群特征 …… 宋家俊, 朱明奕, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(5527)
厌氧氨氧化菌富集培养过程微生物群落结构及多样性 …… 闫冰, 夏嵩, 桂双林, 付嘉琦, 吴九九, 熊继海, 魏源送(5535)
二价铁活化过氧化钙提高剩余活性污泥的脱水性能 …… 毕薇薇, 阮书瑜, 陈吴傲啸, 梁方艺, 陈智文, 谢松儒, 唐晶, 邓靖(5544)
中国北方某市城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析 …… 赵靓, 梁云平, 陈倩, 徐谦, 荆红卫(5552)
我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术 …… 窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 董明明(5562)
硒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值 …… 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 何忠库, 梁绍标, 董金秀, 苏黎明(5571)
广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评价 …… 叶脉, 张景茹, 张路路, 李朝晖, 李兴远, 周永章(5579)
胺鲜酯与螯合剂GLDA联合强化柳枝稷吸收积累镉效果 …… 王正, 孙兆军, SAMEH Mohamed, 王珍, 何俊, 韩磊(5589)
毛竹遗态Fe/C复合材料对As(Ⅴ)污染土壤的钝化修复性能 …… 赵宁宁, 何豪, 冯国杰, 朱宗强, 方雅莉, 李超, 朱义年, 张立浩(5600)
大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解 …… 杨莉, 刘颖, 高婕, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5609)
1株耐油甲醛降解菌的分离鉴定及降解特性 …… 韩茜, 王蓉蓉, 史纯珍(5617)
铜尾矿白羊草叶际和根际细菌群落特征 …… 贾彤, 姚玉珊, 王瑞宏(5628)
生物质炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响 …… 崔丙健, 崔二苹, 胡超, 樊向阳, 高峰(5636)
废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响 …… 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章(5648)
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 …… 夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 白一茹, 王幼奇, 杨帆, 李鸣骥(5656)
氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤N_2O排放的影响 …… 许宏伟, 李娜, 冯永忠, 任广鑫, 谢呈辉, 吕宏菲, 马星霞, 郝嘉琪(5668)
《环境科学》第41卷(2020年)总目录 …… (5677)
《环境科学》征订启事(5344) 《环境科学》征稿简则(5361) 信息(5287, 5499, 5508)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第12期 2020年12月
Vol.41, No.12 Dec., 2020

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

夏子书[1,2], 王玉玉[1,2], 钟艳霞[1], 白一茹[1,2], 王幼奇[1,2*], 杨帆[1,2], 李鸣骥[1]
(1. 宁夏大学资源环境学院, 银川 750021; 2. 中阿旱区特色资源与环境治理国际合作联合实验室, 银川 750021)

摘要: 随着城市化和工业化进程加速,城市土壤多环芳烃(PAHs)含量及污染状况受到广泛关注. 以石嘴山市为例,分析 8 个城市功能区 156 个表层土壤(0 ~ 20 cm)样品 PAHs 含量的空间分布特征,运用单因子指数、内梅罗综合指数和终生癌症风险增量模型评价土壤 PAHs 污染状况,利用正定矩阵因子分解模型(PMF)对 PAHs 来源进行解析. 结果表明,石嘴山市表层土壤 PAHs 总含量均值为 489.82 ng·g^{-1},除芘(Pyr)外的 15 种 PAH 单体变异系数均大于 100%,属强变异; 不同功能区土壤 PAHs 含量呈现出:交通区(1 217.61 ng·g^{-1}) > 工业区(809.58 ng·g^{-1}) > 公园(273.66 ng·g^{-1}) > 文教区(268.18 ng·g^{-1}) > 商业区(240.05 ng·g^{-1}) > 农业区(226.81 ng·g^{-1}) > 医疗区(211.90 ng·g^{-1}) > 居民区(183.49 ng·g^{-1}); 内梅罗综合指数显示 82.58% 的样点不存在污染,轻微、轻度和中度污染占比分别为 6.45%、4.52% 和 0.65%, 5.8% 的样点存在重度污染; 健康风险评价结果表明,皮肤接触和误食是最主要的土壤 PAHs 暴露途径,其健康风险处于可接受水平; 源解析表明石嘴山市土壤 PAHs 的主要来源为交通排放源、煤炭燃烧源、生物质/重油燃烧的混合源以及石油源,其贡献率分别为 10.5%、36.6%、50.3% 和 2.6%,且高值大多分布在工业或煤炭生产区域. 研究结果可为工业城市土壤污染研究提供参考,并对预防土壤污染、保障土壤环境质量及人体健康安全有积极作用.

关键词:石嘴山市; 多环芳烃(PAHs); 污染特征; 来源解析; 风险评估
中图分类号: X53 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)12-5656-12 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202005066

Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil PAHs in Shizuishan City Based on GIS and PMF Model

XIA Zi-shu[1,2], WANG Yu-yu[1,2], ZHONG Yan-xia[1], BAI Yi-ru[1,2], WANG You-qi[1,2*], YANG Fan[1,2], LI Ming-ji[1]
(1. College of Resources and Environmental Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. China-Arab Joint International Research Laboratory for Featured Resources and Environmental Governance in Arid Regions, Yinchuan 750021, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization and industrialization, the content and pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils have been sources of widespread concern. Taking Shizuishan City as an example, the spatial distribution characteristics of PAHs in 156 surface soil samples (0-20 cm) from eight urban functional areas were analyzed. Single factor and Nemero composite indices, as well as a lifetime cancer risk increment model were used to evaluate PAHs pollution in soils. The sources of PAHs were analyzed using the positive matrix factorization (PMF) model. The results showed that the mean value of PAHs in the surface soil of Shizuishan City was 489.82 ng·g^{-1} and the coefficient of variation of 15 PAHs except for Pyr were more than 100%, indicating strong variation. The PAH contents of urban surface soils in different functional areas showed the following: traffic area (1 217.61 ng·g^{-1}) > industrial area (809.58 ng·g^{-1}) > park (273.66 ng·g^{-1}) > cultural and educational area (268.18 ng·g^{-1}) > commercial area (240.05 ng·g^{-1}) > agricultural area (226.81 ng·g^{-1}) > medical area (211.90 ng·g^{-1}) > residential area (183.49 ng·g^{-1}). The Nemero composite index showed that 82.58% of the samples had no pollution, and the proportion of slight, mild, and moderate pollution were 6.45%, 4.52%, and 0.65%, respectively. Only 5.8% of the samples had serious pollution. The results of health risk assessment showed that skin contact and ingestion were the main routes of PAH exposure in soil, and the health risk was acceptable. Source analysis showed that the main sources of PAHs in Shizuishan City were traffic emissions, coal combustion, mixed biomass/heavy oil combustion, and oil sources, with contribution rates of 10.5%, 36.6%, 50.3%, and 2.6% respectively, and most of the high values were distributed in industrial or coal production areas. These results could provide reference for the study of soil pollution in industrial cities, and play an important role in preventing soil pollution, ensuring the environmental quality of the soil and human health and safety.

Key words: Shizuishan City; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); pollution characteristics; source apportionment; risk evaluation

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是土壤环境中常见的一种持久性有机污染

收稿日期: 2020-05-08; **修订日期**: 2020-06-22
基金项目: 宁夏回族自治区科技重大专项(2018BFG02016); 国家自然科学基金项目(41867003, 41761049); 宁夏自然科学基金项目(2018AAC03027); 宁夏环境保护科学技术研究项目(2018-007)
作者简介: 夏子书(1997 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤属性的空间分析,E-mail: xzs0131@163.com
* 通信作者,E-mail: wyq0563@163.com

物[1]，许多 PAHs 具有三致（致癌、致畸和致基因突变）毒性[2]，其土壤污染状况受到世界各国研究人员的广泛关注．近年来，化石燃料和木材等的不完全燃烧、石油泄漏和交通排放已经成为环境介质中 PAHs 的主要来源[3,4]，其中土壤环境是 PAHs 的主要“汇”[5]．以各种方式释放到大气中的 PAHs 最终都会通过干湿沉降渗入土壤，加之其性质稳定且很难被降解会导致土壤长期蓄积性污染，严重时甚至会造成地下水污染[6]．进入土壤的 PAHs 可通过皮肤和口腔直接进入人体，危及人类健康．因此准确了解城市土壤 PAHs 污染状况及其来源对保障土壤环境质量及人体健康安全具有重要意义．

近年来，国内外学者对土壤 PAHs 污染问题的研究日益增多，主要包括污染水平[7,8]、健康风险评价[9,10]及来源解析[11,12]等．其中确定土壤 PAHs 来源，搞清是人为活动污染所致还是来源于土壤母质是很多学者所关心的问题．目前，有许多方法被用来识别源特征及评价源贡献，如特征化合物比值法[9]、主成分分析法[13]和正定矩阵因子分析法（PMF）[14]等．比值法多用于简单的定性解析，判断可能存在一定偏差；主成分分析法在应用过程中会产生负的因子载荷，而该方法中只有非负值才具有物理意义，因此在解析污染源方面会存在困难．PMF 法对于土壤污染来源特征具有可解释性和明确的物理意义，且可计算出各污染源对每个样本的贡献量，因此被一些学者应用于土壤 PAHs 源解析研究．如赵涵等[15]、李嘉康等[16]和陈敏等[17]分别在深圳市、沈北新区和乌鲁木齐市利用 PMF 方法定量解析出土壤 PAHs 污染来源及各污染源平均贡献量．目前 PAHs 污染源解析大多集中在京津冀和长三角等发达城市[11,18]．然而不同环境体系中的土壤 PAHs 受多种因素影响，会导致其污染和分布特征具有一定差异性，且类似于石嘴山市这种老工业城市土壤污染问题也一直存在[19]．因此研究工业城市土壤 PAHs 污染特征及来源解析对了解土壤 PAHs 分布特征和预防由于 PAHs 污染而导致的居民健康问题具有重要作用．

石嘴山市地处西北干旱半干旱区，生态环境脆弱，是宁夏重要的工业基地之一，分布有大量工矿类、化工类和机械制造类等企业[20]，城市发展和企业生产过程中频繁的化石燃料燃烧排放了大量 PAHs[21]，在对城市经济发展做出巨大推动的同时也带来了土壤污染和环境破坏等一系列问题，威胁着人类的身体健康[22]．因此，本研究在评价石嘴山市土壤 PAHs 污染状况的基础上，将 PMF 与克里金插值方法相结合，定量解析研究区土壤 PAHs 的主要来源及各自贡献量，同时分析其空间分布特征，有助于深入了解该区域土壤 PAHs 的分布及环境污染趋势，对区域环境保护和土壤污染治理有着较为重要的作用．

1　材料与方法

1.1　研究区概况

石嘴山市隶属于宁夏回族自治区，地处东经 105°58′～106°39′，北纬 38°21′～39°25′之间，区域面积1 008 km^2，总土地面积 877 km^2，地势自西北向东南倾斜，平均海拔1 202 m；气候为典型的温带大陆性气候，干燥多风，年降水量 180～190 mm，蒸发量1 700～2 500 mm，年平均气温 9.1℃；土壤主要为灰漠土、砾质土及砂质土．随着“一带一路”战略提出，石嘴山市成为宁夏内陆开放型经济试验区建设的核心区之一，工业快速发展和城市化大力推进使得越来越多的污染物以各种方式进入城市土壤中，该区域也随之出现了一些环境污染问题[20]．

1.2　样品采集

2018 年 5 月，参照《土壤环境监测技术规范》（HJ/T 166-2004），采用网格布点与重点区域加密布点相结合的方法，在石嘴山市 8 个功能区共采集表层土壤 156 个，采样深度为 0～20 cm．其中，交通区 20 个、工业区 35 个、商业区 12 个、医疗区 17 个、住宅区 18 个、公园 12 个、科教区 20 个和农田 22 个（图 1）．具体方法依据“五点法”采样，在每个采样点划定一个 5 m×5 m 正方形地块，避开人工填充物并去除地表的杂物，分别在地块的四角及中心位置用不锈钢铲各采集一个土样，将 5 个土壤样品在野外充分混合均匀（约 500 g），采集后的样品装入棕色玻璃瓶中低温存放并尽快带回实验室．土壤样品置于室内阴凉处自然风干，剔除杂物后研磨、过筛，标注编号、地点等信息后装入棕色玻璃瓶于 -4℃低温保存备用．

1.3　样品处理与测定

1.3.1　提取

称取风干且过 60 目筛的土壤 5 g，加入正己烷-丙酮（1+1）混合液 25 mL，超声振荡 30 min，超声萃取 5 min，离心 15 min（3 000 $r \cdot min^{-1}$），抽滤过 0.45 μm 有机系滤膜，收集滤液于离心管中．

1.3.2　净化

用 C_{18} 固相萃取柱作为净化柱，在固相萃取柱表层加入约 5 g 无水硫酸钠．将萃取柱固定在固相萃取装置上，用 4 mL 二氯甲烷冲洗净化柱，再用 10 mL 正己烷平衡净化柱，待柱充满后关闭流速控制阀浸润 5 min，打开控制阀，弃去流出液．在溶剂流干

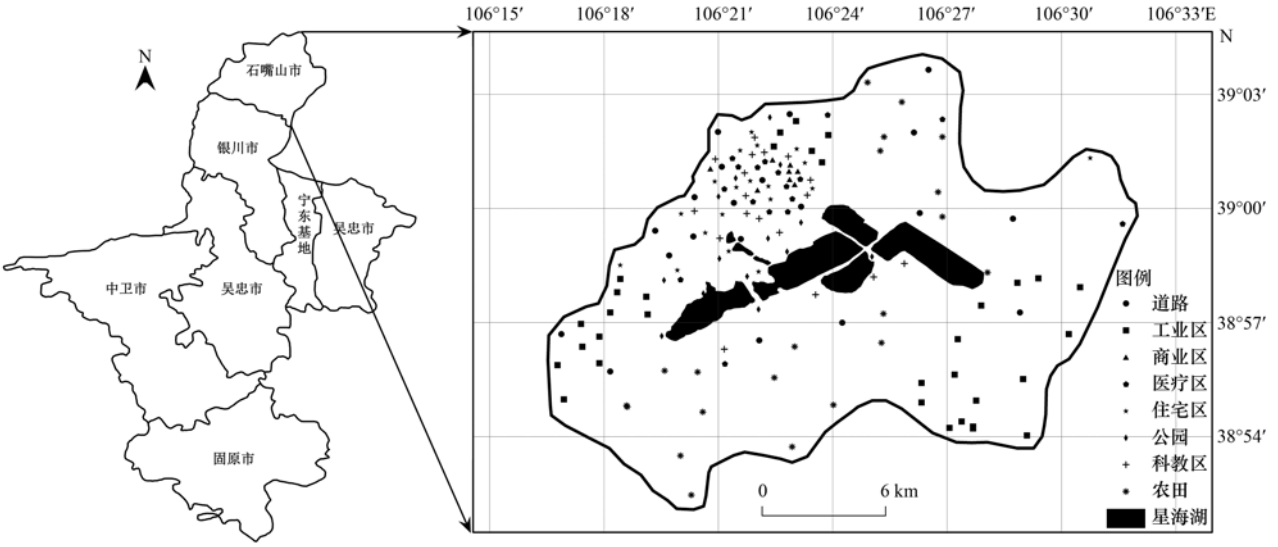

图 1 研究区样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sample points in the study area

前,将提取液移入柱内,用 3 mL 正己烷洗涤装有提取液的离心管 3 次,将所有洗涤液移入柱内,用 10 mL 二氯甲烷-正己烷(1 + 1)混合液进行洗脱,待洗脱液浸满净化柱后,关闭流速控制阀,浸润 5 min,然后打开控制阀,接收洗脱液,直到其完全流出.

1.3.3 浓缩

用氮吹法将洗脱液浓缩至约 1 mL,加入约 3 mL 乙腈,再浓缩至 1 mL 以下,将样品的溶剂完全转换为色谱纯乙腈,并准确定容至 1.0 mL 待测.

1.3.4 样品的测定

根据国家标准给出的高效液相色谱法(HPLC)来进行. 使用日本岛津高效液相色谱仪(Essentia LC-15C),仪器配备紫外检测器. 流动相 A:超纯水,流动相 B:色谱纯乙腈,柱温箱温度设置为 35℃. 该方法设置的梯度洗脱程序为:0 ~ 8 min,流动相 B 的体积比保持 60% 不变; 8 ~ 18 min,流动相 B 的体积比由 60% 增加至 100%; 18 ~ 28 min,流动相 B 的体积比保持 100% 不变; 28 ~ 28.5 min,流动相 B 的体积由 100% 降低至 60%; 28.5 ~ 35 min,流动相 B 的体积比保持 60% 不变. 将泵的流速设置为 1 mL·min^{-1},使用自动进样器进样,进样体积为 20 μL,采集峰时所用的紫外吸收波长为 254 nm. 依据出峰的时间对 16 种 PAH 单体进行定性(SD 小于 1%),使用外标法对 16 种 PAH 单体进行定量的含量计算,包括萘(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)、二苯并[a,h]蒽(DahA)、苯并[g,h,i]苝(BghiP)和茚并[1,2,3-c,d]芘(InP).

1.3.5 标准曲线的绘制

量取适量的 16 种 PAHs 混合标准使用液(ρ = 200 mg·L^{-1}),用色谱纯乙腈稀释,制备 5 个浓度点的标准系列,PAHs 的质量浓度分别为 0.04、0.10、0.50、1.00 和 5.00 μg·mL^{-1},贮存于棕色进样瓶中,待测. 从低浓度到高浓度依次对标准系列溶液进样 20 μL,以标准系列溶液中目标组分浓度为纵坐标,以其对应的峰面积为横坐标,建立校准曲线. 所测得校准曲线的相关系数 $R \geqslant 0.995$,否则重新绘制标准曲线.

1.4 污染评价与健康风险评价

1.4.1 污染指数法

单因子指数和内梅罗综合污染指数可以全面反映出土壤样品的污染状况[23],其计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i \tag{1}$$

$$P_{综} = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)^2_{max} + (C_i/S_i)^2_{ave}}{2}} \tag{2}$$

式中,P_i 为土壤 PAH 单体 i 的污染指数; $P_{综}$ 是内梅罗综合污染指数,反映土壤样品综合污染状况; C_i 是样品中 PAHs 实测含量(ng·g^{-1}); S_i 是 PAHs 评价标准(ng·g^{-1})[24],采用国家建设用地土壤环境评价质量参比标准(GB 36600-2018)中的第二级标准限值. 当 $P_{综} \leqslant 0.7$ 为无污染,$0.7 < P_{综} \leqslant 1$ 为轻微污染, $1 < P_{综} \leqslant 2$ 为轻度污染, $2 < P_{综} \leqslant 3$ 为中度污染,$P_{综} > 3$ 为重度污染.

1.4.2 健康风险评价法

应用终生癌症风险增量模型[25]评价石嘴山市土壤 PAHs 暴露的致癌和非致癌风险. 当地居民摄入 PAHs 的主要方式包括饮食和非饮食途径,饮食途径主要是食物的摄入,指食用蔬菜和粮食等,非饮

食途径包括土壤误食摄入、呼吸和皮肤接触. 计算公式如下：

$$ILCR_{误食} = \frac{C_{土壤} \times CSF_{误食} \times \sqrt[3]{BW/70}}{BW \times AT \times 10^6} \times IR_{误食} \times EF \times ED \quad (3)$$

$$ILCR_{呼吸} = \frac{C_{土壤} \times CSF_{呼吸} \times \sqrt[3]{BW/70}}{BW \times AT} \times IR_{呼吸} \times EF \times ED \quad (4)$$

$$ILCR_{皮肤接触} = \frac{C_{土壤} \times CSF_{皮肤接触} \times \sqrt[3]{BW/70}}{BW \times AT \times 10^6} \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED \quad (5)$$

$$C_{土壤} = \sum (C_i \times TEF_i) \quad (6)$$

$$CR = \sum (ILCR_{误食} + ILCR_{呼吸} + ILCR_{皮肤接触}) \quad (7)$$

式中，$C_{土壤}$表示土壤中 PAH 单体基于 BaP 的等效毒性当量含量（$mg \cdot kg^{-1}$）；CSF 为致癌斜率因子（$mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$），$CSF_{误食} = 7.3$，$CSF_{呼吸} = 3.85$ 和 $CSF_{皮肤接触} = 25$；ABS 为皮肤呼吸系数，成人和儿童均取值 0.13；AT 为人均寿命，成人和儿童均取值 74.83 × 365；公式中其他参数和取值来自文献[10]. $C_{土壤}$由公式(4)计算得到；表示土壤 PAH 单体 i 的测量含量；TEF_i 是第 i 种 PAH 单体基于 BaP 的毒性当量因子. CR 为误食土壤、呼吸和皮肤接触这 3 种暴露途径下的总和，根据 CR 的大小，致癌风险可分为 3 个等级：不存在健康风险（$CR \leqslant 10^{-6}$），存在潜在健康风险（$10^{-6} < CR \leqslant 10^{-4}$），存在健康风险（$CR > 10^{-4}$）.

1.5　正定矩阵因子分解法（PMF）

采用美国环保署（EPA）推出的 PMF 5.0 模型对石嘴山市表层土壤 PAHs 进行源解析[12]. PMF 模型将采样数据分解成两个矩阵，即系数的贡献（G）和因子数（F），利用样品的浓度和不确定度数据进行各个点加权，使得目标函数 Q 最小化：

$$Q = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \left[\left(x_{ij} - \sum_{k=1}^{p} g_{ik} f_{kj} \right) \Big/ u_{ij} \right] \quad (8)$$

式中，Q 为累积残差，i 为样品数，j 为测定的污染物种类；p 为 PMF 模型找到的合适因子数；f 为每个源的成分矩阵；g 为样品中每种污染物的贡献矩阵；u_{ij}为样品中污染物种类的不确定性，计算方法如下：

$$s_{ij} = \begin{cases} \frac{5}{6} \times L_{MDL} & (x_{ij} \leqslant L_{MDL}), \\ \sqrt{(RSD \times x_{ij})^2 + (L_{MDL})^2} & (x_{ij} > L_{MDL}). \end{cases} \quad (9)$$

式中，RSD 是化合物浓度值的相对标准偏差，L_{MDL}为方法检出限.

2　结果与分析

2.1　研究区土壤 PAHs 含量和构成

研究区 156 个表层土壤样品 16 种 PAHs 含量统计结果见表 1. 测得 16 种 PAHs 总含量（$\sum$PAHs）为 10.39 ~ 11 737.45 $ng \cdot g^{-1}$，平均值为 489.82 $ng \cdot g^{-1}$. 低环 PAHs（LMWPAHs）总含量为 8.31 ~ 7 628.42 $ng \cdot g^{-1}$，平均值为 445.72 $ng \cdot g^{-1}$，占 $\sum$PAHs 含量的 89.58%. 高环 PAHs（HMWPAHs）总含量为 2.08 ~ 4 109.03 $ng \cdot g^{-1}$，平均值为 44.10 $ng \cdot g^{-1}$，占 $\sum$PAHs 含量的 10.42%. 其中强致癌性单体 BaP 含量为 0.05 ~ 15.44 $ng \cdot g^{-1}$，平均含量为 0.61 $ng \cdot g^{-1}$，占 $\sum$PAHs 含量的 0.12%. 研究区土壤 LMWPAHs 以 2 环 Nap 为主，占 $\sum$PAHs 含量的 67.32%；HMWPAHs 以 4 环 Pyr 为主，占 $\sum$PAHs 含量的 8.01%. 研究区土壤中除 Pyr 外的 15 种 PAH 单体变异系数均大于 100%，属于强变异，其中 Nap、Acy、Ace、Flu、Phe 和 Ant 的变异系数高于 200%，说明 LMWPAHs 在研究区范围内受外界因素影响较大，导致其变异性强.

石嘴山市表层土壤 PAHs 构成如图 2 所示. 不同 PAHs 平均质量分数为：2 环（67.32%）> 3 环（22.24%）> 4 环（8.36%）> 6 环（1.42%）> 5 环（0.64%）. 这与 Xu 等[26] 发现我国低、中、高环 PAHs 排放量分别为 70%、19% 和 11% 的结论相似. 石嘴山市不同功能区土壤 PAHs 均以 2、3 和 4 环为主，均占各功能区总 PAHs 的 95% 以上，其中低环所占比例明显高于高环，且低环中以 Nap 为主.

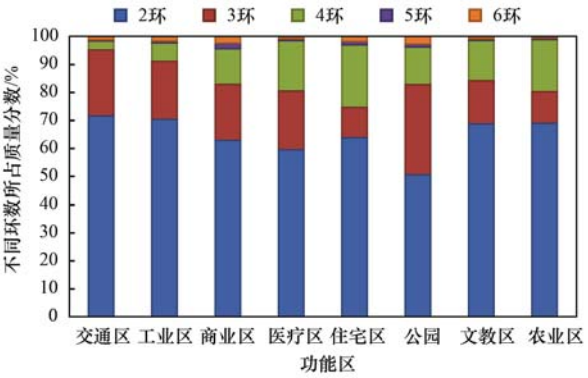

图 2　土壤 PAHs 的构成

Fig. 2　Constitution of PAHs in soils

2.2　不同功能区土壤 PAHs 分布特征

由表 2 可以看出，石嘴山市 8 个功能区表层土壤 PAHs 含量存在明显差异. 从均值看，不同功能区土壤PAHs总量大小为交通区（1 217.61 $ng \cdot g^{-1}$）

表 1 PAHs 描述统计量[1)]

Table 1 Descriptive statistics of PAHs

PAH 单体	环数	最小值 /ng·g^{-1}	最大值 /ng·g^{-1}	平均值 /ng·g^{-1}	标准差 /ng·g^{-1}	变异系数 /%	检出率 /%
Nap	2	2.34	9 696.46	342.87	1 076.44	313.95	100
Acy	3	0.29	202.13	7.06	18.98	261.43	100
Ace	3	ND	1 006.93	42.65	121.77	285.51	92
Flu	3	0.53	974.55	40.75	101.56	249.23	100
Phe	3	ND	559.29	4.99	46.37	929.26	60
Ant	3	ND	144.81	7.94	19.01	239.42	76
Fla	4	0.09	9.22	1.11	1.57	141.44	100
Pyr	4	0.14	220.90	40.78	33.05	81.04	100
BaA	5	0.004	0.82	0.13	0.14	107.69	100
Chry	4	0.05	5.80	0.56	0.83	148.21	100
BbF	5	0.04	26.67	1.51	2.64	174.83	100
BkF	5	0.02	1.55	0.12	0.16	133.33	100
BaP	5	0.05	15.44	0.61	1.51	247.54	100
DahA	5	0.17	14.91	0.97	1.72	178.35	100
BghiP	6	0.03	12.42	0.99	1.64	165.66	100
InP	6	0.09	103.13	5.80	16.51	284.66	100
∑PAHs	—	10.39	11 737.45	489.82	1 279.24	261.17	92.83
LMWPAHs	—	8.31	7 628.42	445.72	1 416.42	317.78	—
HMWPAHs	—	2.08	4 109.03	44.10	60.44	137.05	—

1)“—”表示该物质无环数;“ND”表示未检出

>工业区(809.58 ng·g^{-1})>公园(273.66 ng·g^{-1})>文教区(268.18 ng·g^{-1})>商业区(240.05 ng·g^{-1})>农业区(226.81 ng·g^{-1})>医疗区(211.90 ng·g^{-1})>居民区(183.49 ng·g^{-1}). 从 PAH 单体含量来看, 8 个功能区中 Nap 含量均为最高,其次,交通区和工业区 Ace 含量较高,商业区、居民区、公园区、文教区和农业区 Pyr 含量较高,医疗区 Flu 含量较高.

对 8 个功能区 PAHs 含量进行方差分析,其中交通区 Nap 和 Fla 与除了工业区外的其它功能区均存在显著差异($P<0.05$). 而 Nap 和 Fla 通常被认为与未燃烧的油料有关[27,28],主要包括各种方式泄漏在地面的燃油,以及在燃料装载和加油过程中挥发的油料等[29],导致交通区 Nap 和 Fla 含量升高. 工业区 Fla、BbF 和 BghiP 含量与居民区、公园、文教区和农业区均存在显著差异($P<0.05$),这是因为工业区进行工业生产活动需要的动力主要来自化石燃料的燃烧,同时机械运行需要的大量润滑油等也会使 Fla、BbF 和 BghiP 含量升高,带来 PAHs 污染[30]. 总体上看,石嘴山市交通区和工业区部分 PAH 单体与其他功能区存在显著差异($P<0.05$),而其余功能区各 PAH 单体间不存在显著差异($P>0.05$).

表 2 不同功能区 PAHs 含量水平[1)]/ng·g^{-1}

Table 2 Mean values of PAHs in different functional zones/ng·g^{-1}

PAHs 单体	交通区	工业区	商业区	医疗区	居民区	公园	文教区	农业区
Nap	871.76±2 237.71a	569.84±1 388.21ab	150.92±89.44b	126.12±64.68b	117.06±53.02b	138.44±55.37b	184.39±285.32b	156.38±39.11b
Acy	17.65±44.04a	11.55±18.14ab	8.50±11.74ab	2.03±1.86b	2.34±2.07b	3.46±3.85b	2.71±3.74b	2.72±3.97b
Ace	120.69±243.81a	87.15±143.90ab	24.18±42.65bc	3.47±4.05bc	6.14±9.20c	31.37±79.43c	5.46±8.69c	2.49±5.40c
Flu	109.35±242.48a	48.34±85.60b	12.79±16.99b	35.27±32.02b	9.33±14.81b	34.91±60.12b	30.64±18.93b	19.04±18.36b
Phe	28.26±124.99a	5.00±25.11a	0.36±0.48a	0.35±0.60a	0.25±0.44a	0.24±0.38a	0.27±0.45a	0.09±0.23a
Ant	11.49±21.23a	15.78±23.38ac	2.19±3.34ab	3.44±3.29b	1.82±2.19bc	18.23±42.52b	2.41±2.95bc	1.39±1.92b
Fla	1.63±2.05a	2.18±2.21ab	0.96±1.43bc	0.45±0.29bc	0.72±0.56c	0.94±1.21c	0.44±0.26c	0.37±0.24c
Pyr	36.93±39.77a	50.36±51.78a	29.01±18.24a	37.39±19.79a	39.75±21.47a	35.14±21.11a	37.91±21.59a	41.71±13.23a
BaA	0.14±0.14a	0.25±0.18b	0.09±0.04bc	0.07±0.03bc	0.11±0.08bc	0.11±0.10c	0.08±0.08c	0.04±0.02c
Chry	0.50±0.65a	0.99±0.94ab	0.68±0.89ab	0.30±0.22ab	0.58±1.32ab	0.74±1.10b	0.25±0.21b	0.18±0.12b
BbF	3.02±5.92a	2.56±2.19ab	1.74±2.71abc	0.71±0.72bc	0.86±0.66c	1.01±0.82c	0.51±0.45c	0.58±0.58c
BkF	0.14±0.15a	0.21±0.26ab	0.11±0.09ab	0.06±0.03b	0.10±0.13b	0.09±0.07b	0.07±0.08b	0.06±0.05b
BaP	0.74±1.31a	0.15±2.59ab	0.59±0.87ab	0.19±0.12ab	0.55±1.32ab	0.53±0.69ab	0.39±0.65b	0.22±0.43b
DahA	1.03±1.23a	1.44±1.89ab	2.28±4.76abc	0.47±0.23abc	0.71±1.06bc	1.21±1.91bc	0.57±0.72c	0.37±0.39c
BghiP	1.07±1.54a	1.66±1.74ab	2.13±3.97abc	0.48±0.41bc	0.80±1.83c	0.59±0.74c	0.60±0.95c	0.44±0.62c
InP	13.20±29.31a	11.11±21.36ab	3.52±6.18abc	1.09±1.46abc	2.36±6.23bc	6.66±19.39bc	1.48±2.51c	0.73±1.42c
∑PAHs	1 217.61±2 769.69a	809.58±1 547.47ab	240.05±150.52b	211.90±108.50b	183.49±70.64ab	273.66±186.90b	268.18±289.70b	226.81±47.17b

1)数据为平均值±标准误差,每行不同小写字母表示 PAHs 在不同功能区之间差异显著($P<0.05$)

2.3　土壤 PAHs 污染评价

根据国家建设用地土壤环境评价质量参比标准计算出土壤 PAHs 的 P_i（表 3），除 Fla、BaA、Chry、BbF、BkF 和 BghiP 外，其他 10 种被研究的 PAHs 在石嘴山市都存在不同程度污染，在 156 个样品中 Nap 有 109 个没有受到污染，占总样品的 71.24%；9 个受到重度污染，占总样品的 5.88%. Ace 和 Flu 存在少量重度污染的样品，均占总样品数的 0.69%；Acy、Phe 和 Pyr 存在少量轻微污染，分别占总样品的 0.65%、1.05% 和 0.65%；Ant、BaP、DahA 和 InP 均存在轻微污染、轻度污染和中度污染样品. 通过 $P_{综}$ 可知，石嘴山市轻微、轻度、中度和重度 PAHs 污染占比分别为 6.45%、4.52%、0.65% 和 5.8%，可以看出石嘴山市表层土壤已经受到 PAHs 污染，同时石嘴山市 82.58% 的样点不存在 PAHs 污染，因此城市总体污染状况相对乐观.

表 3　不同污染级别样点数占总样点数百分比

Table 3　Percentages of samples of different pollution levels across all samples

参数	元素	不同污染级别样点比例/%				
		无污染	轻微污染	轻度污染	中度污染	重度污染
P_i	Nap	71.24	15.03	6.54	1.31	5.88
	Acy	99.35	0.65	0	0	0
	Ace	90.97	2.78	4.17	1.39	0.69
	Flu	94.52	1.37	2.73	0.69	0.69
	Phe	98.95	1.05	0	0	0
	Ant	91.67	2.50	5.00	0.83	0
	Fla	100	0	0	0	0
	Pyr	99.35	0.65	0	0	0
	BaA	100	0	0	0	0
	Chry	100	0	0	0	0
	BbF	100	0	0	0	0
	BkF	100	0	0	0	0
	BaP	98.05	0.65	0.65	0.65	0
	DahA	94.67	2.67	2	0.66	0
	BghiP	100	0	0	0	0
	InP	93.66	1.41	1.41	3.52	0
$P_{综}$	—	82.58	6.45	4.52	0.65	5.80

2.4　土壤 PAHs 健康风险评价

采用终生癌症风险增量模型计算石嘴山市土壤 PAHs 对儿童和成人在误食、呼吸和皮肤接触这 3 种暴露途径下的致癌风险（ILCRs）和总风险（CR），结果见表 4. 总体上除误食这一途径外，成人 ILCRs 和 CR 的均值都大于儿童，表明土壤中 PAHs 对成人的致癌风险高于儿童. 儿童较成年人活泼好动，与土壤接触相对较多，使得儿童平均误食致癌风险值高于成人，$ILCR_{误食}$ 为 2.34×10^{-6}. 成年人空气摄入量高于儿童，使得成年人平均呼吸接触致癌风险值高于儿童. 3 种途径儿童与成人致癌风险值均显著高于西安市公园土壤[9]；除儿童皮肤接触外，其余途径致癌风险值均高于宁波土壤[31].

当 ILCRs 为 10^{-6} 或更小时可忽略此风险，当 ILCRs 介于 10^{-6} ~ 10^{-4} 之间为存在潜在风险[32,33]. 本研究中除了呼吸摄入小于 10^{-6} 之外，其余两种摄入方式均大于 10^{-6}. 误食、皮肤接触是 PAHs 进入人体的主要途径，具有较高致癌风险. 此结果与张玉等[34]对某大型化工场地土壤 PAHs 研究相似.

表 4　儿童和成人不同暴露的 ILCRs 和 CR

Table 4　Different exposed ILCRs and CR in children and adults

人群	统计值	$ILCR_{误食}$	$ILCR_{呼吸}$	$ILCR_{皮肤接触}$	CR
儿童	最小值	7.14×10^{-9}	1.88×10^{-10}	8.90×10^{-8}	9.63×10^{-8}
	最大值	6.62×10^{-6}	1.64×10^{-7}	7.75×10^{-5}	8.39×10^{-5}
	平均值	2.34×10^{-6}	3.09×10^{-8}	1.46×10^{-5}	1.58×10^{-5}
成人	最小值	1.43×10^{-8}	1.51×10^{-9}	2.54×10^{-7}	2.69×10^{-7}
	最大值	1.24×10^{-5}	1.31×10^{-6}	2.21×10^{-4}	2.35×10^{-4}
	平均值	1.17×10^{-6}	2.47×10^{-7}	4.16×10^{-5}	4.42×10^{-5}

2.5　PMF 方法源解析

运用 PMF 模型对 PAHs 来源进行解析，随机选取 20 作为初始起点进行迭代计算，取 3 ~ 8 个因子分别运算，对比发现选择因子数为 4 时，模

型运算在第 9 次最佳，Q_{robust} 与 Q_{true} 较为接近，且大部分 PAH 单体化合物残差都在 -3 和 3 间并服从正态分布，表明此时 16 种 PAHs 能被很好地模拟.

PMF 模型运行结果如图 3 所示，主因子 1 占 PAHs 总来源的 10.5%，BghiP、InP、BaP、DahA 和 BkF 在主因子 1 中载荷较高，其中 BghiP、BaP 和 DahA 被认为是汽油燃烧的重要化合物，是典型交通排放源指示物[35]，InP 和 BkF 被认为是柴油燃烧指示物[36]，综上分析表明主因子 1 代表交通排放源. 主因子 2 中 Pyr 为特征元素，BaA、Fla 所占比重也较大，有研究表明，Pyr、BaA 和 Fla 的主要来源是煤炭燃烧[37,38]，因子贡献为 36.6%，所占比例较大. 石嘴山市众多发电厂、化工厂等工业企业大量使用煤作为能源，导致煤炭是该区域土壤 PAHs 污染重要来源. 主因子 3 占 PAHs 总来源的 50.3%，Acy 为特征元素，Chry、BbF 和 BkF 等也占有较大比重. 其中，Acy 是木材燃烧的特征指示物[14]，Chry、BbF 和 BkF 与重油的燃烧密切相关[39,40]. 石嘴山市主要的工业活动有钢铁冶炼、金属加工、运输业等，这些工业活动均会产生重油燃烧污染，且工业生产过程中的柴油燃烧以及重型柴油机车均会排放 BbF 和 BkF[41]，由此推断因子 3 代表生物质/重油燃烧的混合源. 主因子 4 贡献率为 2.6%，Flu、Nap 和 Ant 的载荷较高，其中 Nap 和 Ant 的来源主要包括不完全燃烧和石油挥发[42,43]，因此主因子 4 判断为石油源. 综上所述，石嘴山市表层土壤中 PAHs 的主要来源为交通排放源、煤炭燃烧源、生物质/重油燃烧的混合源及石油源，其贡献率分别为 10.5%、36.6%、50.3% 和 2.6%.

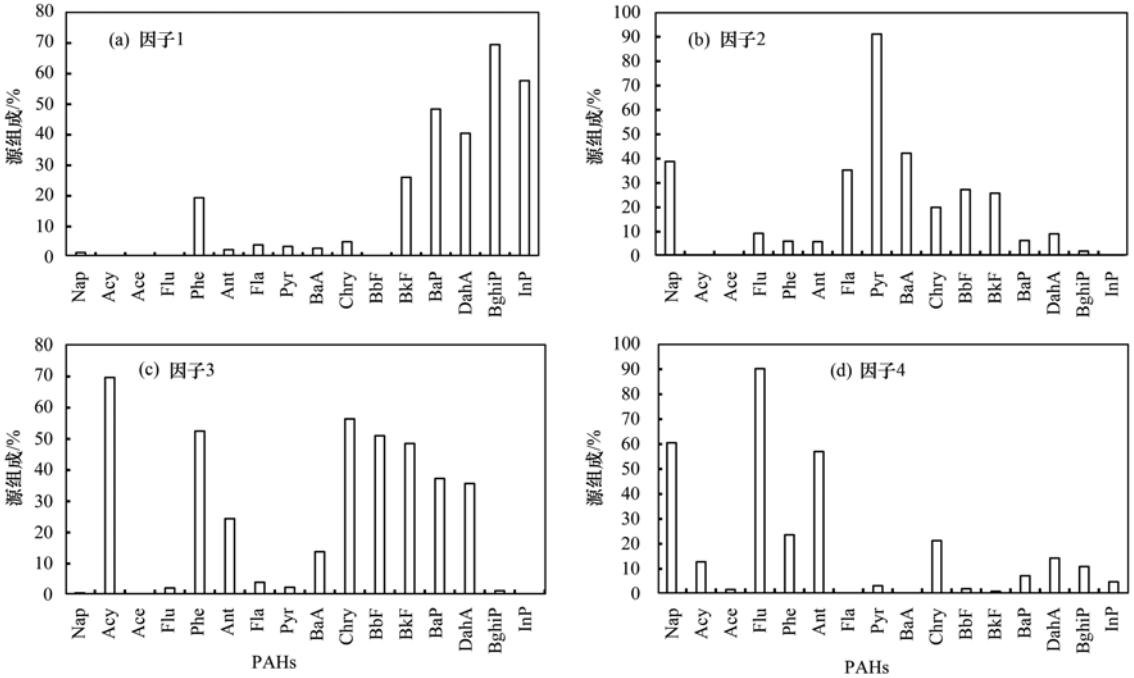

图 3 基于 PMF 模型的土壤 PAHs 源解析

Fig. 3 Source profiles of PAHs in soils obtained with the PMF model

2.6 土壤 PAHs 空间分布特征

用 ArcGIS 绘制石嘴山市表层土壤 PAHs 空间分布图(图 4)，Nap、Acy、Flu 和 Phe 的空间分布特征大致相似，以东部、西北和西南部含量最高并向中部地区递减；Chry、BbF、DahA 和 InP 的空间分布特征较为相似，东南和西部两个方向上含量较高，中部含量低；Ace、BkF 和 BaP 在东南方向上含量明显偏高；Ant、Fla 和 BaA 含量在东部明显偏高，向西部区域依次递减并在西南方再次出现高值；BghiP 高值区域出现在东部和西北部，其余区域含量较低；Pyr 含量由西北和东南向中部降低. $\sum$PAHs 含量在北部和东部出现高值区，中部偏西和西南方向的 PAHs 含量也相对较高.

3 讨论

经测定石嘴山市表层土壤 PAHs 含量为 10.39 ~ 11 737.45 $ng \cdot g^{-1}$，均值为 489.82 $ng \cdot g^{-1}$. 其含量低于东北某大型化工场地土壤(PAHs 平均含量为 67 000 $ng \cdot g^{-1}$)[34]和山东省某化工园区土壤(PAHs 平均含量为3 089.8 $ng \cdot g^{-1}$)[44]，高于宁波地区土壤(PAHs 平均含量为 221 $ng \cdot g^{-1}$)[31]. 不同功能区土壤 $\sum$PAHs 含量大小为交通区 > 工业区 > 公园 > 文教区 > 商业区 > 农业区 > 医疗区 > 居民区，这与天津西青区[18]和南京市[45]土壤 PAHs 含量趋势大

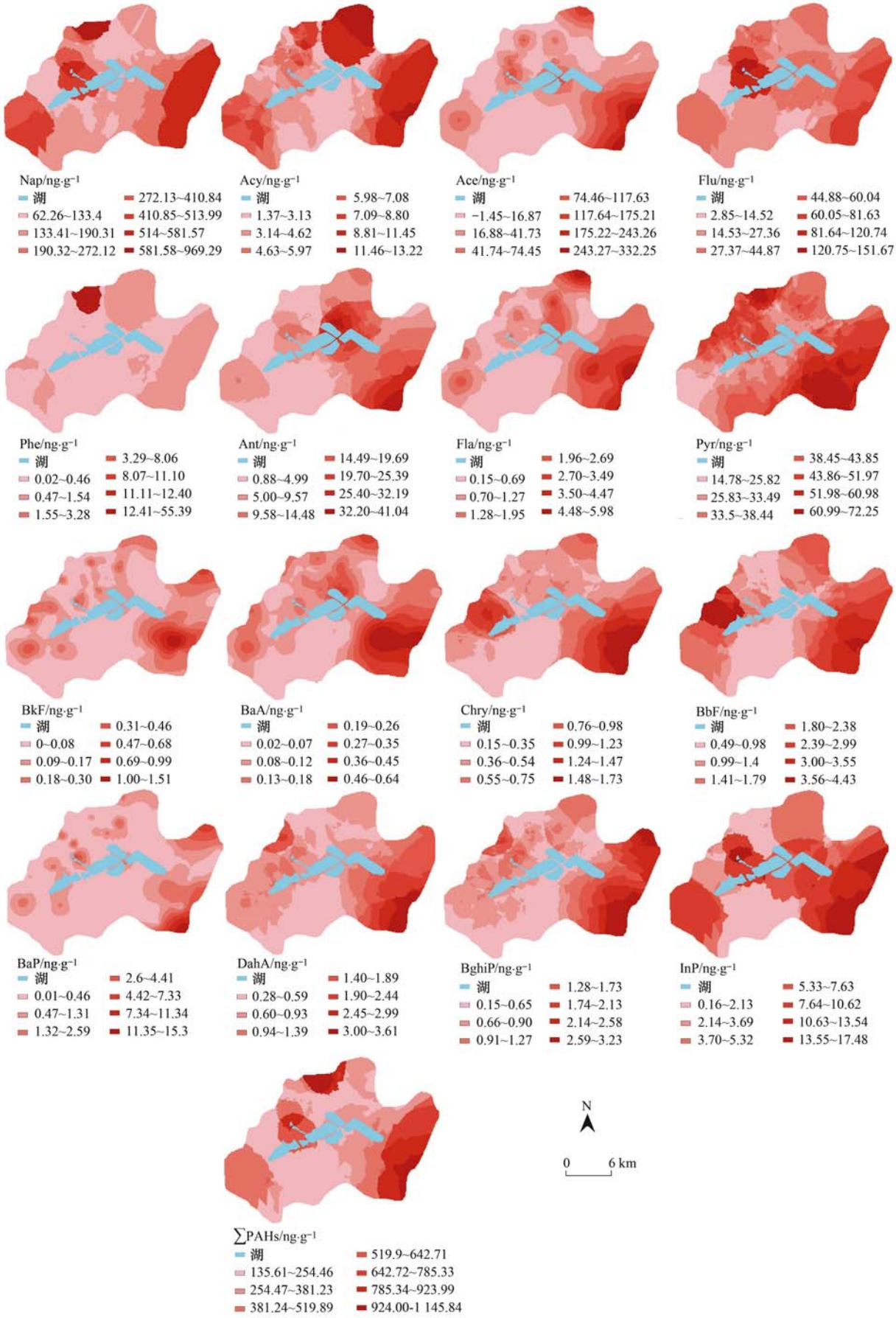

图 4　石嘴山市土壤 PAHs 空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of soil PAHs in Shizuishan City

致相同. 交通区和工业区显著高于其他功能区($P<0.05$),原因在于石嘴山市重工业和交通运输业较为发达,工业排放[46]和车辆运输[47]会导致周边环境中 PAHs 含量升高,PAHs 被吸附并存留在土壤中. Mielke 等[48]对美国新奥尔良市的研究结果显示,繁华的街道附近 PAHs 含量较城市其他功能区高. 姚成等[49]对扬州市不同功能区表层土壤 15 种 PAHs 含量研究表明,工业区 PAHs 含量显著高于科教区、居民区和公园等功能区.

土壤 PAHs 污染评价结果表明石嘴山市总体污染状况相对乐观, 82.58% 的样点不存在 PAHs 污染,仅有 5.8% 的样点存在重度污染. 与国内相比,受污染比例与沈北新区[16]土壤相近,且低于大连市公路土壤[50]和山东省农田土壤[51]; 与国外相比同西班牙塔拉戈纳省化工区[52]土壤相当,且明显低于法国塞纳河流域工业土壤[53]和美国新泽西州城区土壤[54]. 石嘴山市土壤 PAHs 污染较轻的原因在于该市属于典型的干旱半干旱气候,具有气温高、蒸发强烈和太阳照射久等气候特点,有利于土壤中 PAHs 的挥发和光解. 同时近几年在国家积极推进生态环境保护战略的大背景下,自治区大力开展城市环境综合整治,石嘴山市升级、搬迁和关停了大量高耗能、高污染企业,对城市环境改善起到积极作用,一定程度上也减轻了土壤 PAHs 的积累.

土壤 PAHs 来源解析对于防治土壤污染、制定环境管理政策和维护区域生态环境安全有重要作用[11]. 不同区域、不同土壤 PAHs 输入输出途径、经济社会发展和工业分布等因素导致土壤 PAHs 来源复杂多样[16]. 利用 PMF 方法得出石嘴山市土壤 PAHs 有 4 种主要来源,即交通排放源(10.5%)、煤炭燃烧源(36.6%)、生物质/重油燃烧的混合源(50.3%)以及石油源(2.6%). 生物质/重油燃烧对土壤表层 PAHs 来源占比超过 50% 的原因在于,石嘴山市主要的工业活动有钢铁冶炼、金属加工和煤炭开采等,电锅炉一般配备柴油罐用于点火发电,故其重油燃烧源所占比例高. 煤炭燃烧源超过 30%,原因在于石嘴山市发电厂和化工厂等工业企业是以燃煤来提供热源从事生产,故煤炭燃烧所占比例同样较高. 郭瑾等[44]利用 PMF 方法定量解析出岚山化工园区周围土壤 PAHs 来源中燃煤源占 36%,汽油和柴油燃烧源占 21.6%,生物质燃烧源占 19.1%,石油源和焦炭燃烧混合源占 19.3%,煤炭和重油燃烧占比较大,与本研究结果相似. 同时 PMF 方法得到的源成分谱和源贡献率具有非负性且与实际情况相符,结果相对合理[15,17,19]. 综上可知,利用 PMF 方法定量解析石嘴山市土壤 PAHs 污染来源是可行的.

结合空间插值图可以看出, 16 种 PAH 单体含量在研究区呈现出明显的斑块分布特征,其总含量在北部和东部高达 924 ~ 1 145 $ng \cdot g^{-1}$,中部偏西和西南方向的 PAHs 含量也相对较高. 其中东部区域 PAHs 含量较高是因为东部道路较多且靠近石炭井煤矿,运煤车辆经过时会有煤块、煤灰掉落在土壤表面,同时大量车辆排放的尾气也造成该区域土壤 PAHs 含量较高; 西南区域土壤 PAHs 含量高的原因可能与当地太沙工业园区生产活动有关,工业生产时煤炭和石油等化石燃料燃烧和热解都会释放出大量的环烃类物质,随烟气排放到环境中. 中部偏西区域地处星海湖,位于城区中心,频繁的人类活动和密集的交通导致周边环境中 PAHs 排放量较高. 北部区域靠近贺兰山,山上有不少矿区和运输公路,汽车尾气和工业生产都会对该区域造成一定 PAHs 污染,且由于贺兰山山体较高,污染物容易在该区域沉积. 综上可知,石嘴山市表层土壤 PAHs 已受到人类活动影响存在部分污染但并不严重,后续要进一步加强研究区土壤污染监测和防治,监督企业规范生产,加强机动车尾气污染监管.

4 结论

(1)石嘴山市表层土壤 16 种 PAHs 含量为 10.39 ~ 11 737.45 $ng \cdot g^{-1}$, 平均值为 489.82 $ng \cdot g^{-1}$,构成主要以 2、3 环为主,占 $\sum$PAHs 的质量分数为 89.56%. 交通区和工业区表层土壤 PAHs 含量显著高于其他功能区($P<0.05$).

(2)误食、皮肤接触两种摄入方式对儿童的致癌风险分别为 2.34×10^{-6} 和 1.46×10^{-5},对成人的致癌风险为 1.17×10^{-6} 和 4.16×10^{-5},均大于 10^{-6},属潜在致癌风险等级.

(3)石嘴山市表层土壤 PAHs 的交通排放源、煤炭燃烧源、生物质/重油燃烧的混合源及石油源的贡献率分别为 10.5%、36.6%、50.3% 和 2.6%. 从 $\sum$PAHs 含量空间分布可知,高值区主要集中在北部和东部,中部偏西和西南方向的 PAHs 含量也相对较高.

参考文献:

[1] 刘增俊, 滕应, 黄标, 等. 长江三角洲典型地区农田土壤多环芳烃分布特征与源解析[J]. 土壤学报, 2010, **47**(6): 1110-1117.
Liu Z J, Teng Y, Huang B, *et al*. Distribution and sources analysis of PAHs in farmland soils in areas typical of the Yangtze River delta, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, **47**(6): 1110-1117.

[2] 彭驰, 王美娥, 廖晓兰. 城市土壤中多环芳烃分布和风险评

价研究进展[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(2): 514-522.
Peng C, Wang M E, Liao X L. Distribution and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, **21**(2): 514-522.

[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] Sanders M, Sivertsen S, Scott G. Origin and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surficial sediments from the savannah river[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2002, **43**(4): 438-448.

[5] Safe S, Hutzinger O. Polychlorinated biphenyls (PCBs) and polybrominated biphenyls (PBBs): biochemistry, toxicology, and mechanism of action [J]. CRC Critical Reviews in Toxicology, 1984, **13**(4): 319-395.

[6] 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.

[7] 张晗, 刘凯, 邹天森, 等. 某地区两个燃煤电厂周边农田土壤中多环芳烃污染特征及生态安全评价[J]. 环境化学, 2019, **38**(8): 1832-1841.
Zhang H, Liu K, Zou T S, *et al*. Pollution characteristics and evaluation ecological safety of the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) pollution in surface soil of farmland around two coal-fired power plants[J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(8): 1832-1841.

[8] 周洁, 张敬锁, 刘晓霞, 等. 北京市郊农田土壤中多环芳烃污染特征及风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2018, **36**(4): 534-540.
Zhou J, Zhang J S, Liu X X, *et al*. Pollution characteristics and risk assessment of PAHs in agricultural soil in suburb of Beijing [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, **36**(4): 534-540.

[9] 周燕, 卢新卫. 西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4800-4808.
Zhou Y, Lu X W. Assessment of pollution, sources, and risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil from urban parks in Xi'an City, China[J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4800-4808.

[10] 陈轶楠, 马建华, 段海静, 等. 河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 711-720.
Chen Y N, Ma J H, Duan H J, *et al*. Compositions, sources and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface dusts from driving-schools in a City of Henan province, China[J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 711-720.

[11] 吴杰, 熊丽君, 吴健, 等. 上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2240-2248.
Wu J, Xiong L J, Wu J, *et al*. Comparison and source apportionment of PAHs pollution of runoff from roads in suburb and urban areas of Shanghai[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2240-2248.

[12] 田大年, 党丽慧, 丁润梅, 等. 银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3068-3077.
Tian D N, Dang L H, Ding R M, *et al*. Distribution, sources, and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface waters of the Yinchuan wetlands [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3068-3077.

[13] 陈锋, 孟凡生, 王业耀, 等. 基于主成分分析-多元线性回归的松花江水体中多环芳烃源解析[J]. 中国环境监测, 2016, **32**(4): 49-53.
Chen F, Meng F S, Wang Y Y, *et al*. The research of polycyclic aromatic hydrocarbons in the river based on the principal component-multivariate linear regression analysis [J]. Environmental Monitoring in China, 2016, **32**(4): 49-53.

[14] 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 等. 基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3789-3797.
Wang C L, Zou X Q, Zhao Y F, *et al*. Source apportionment and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water from Yangtze River, China: based on PMF model [J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3789-3797.

[15] 赵涵, 赵军, 徐晓晔, 等. 快速城市化地区土壤多环芳烃的空间分布及来源: 以深圳市为例[J]. 生态与农村环境学报, 2019, **35**(1): 38-45.
Zhao H, Zhao J, Xu X Y, *et al*. Spatial distribution, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in a rapid urbanization city: Shenzhen[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, **35**(1): 38-45.

[16] 李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 等. 沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 379-388.
Li J K, Song X Y, Wei J B, *et al*. Pollution characteristics and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Shenyang north new area[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 379-388.

[17] 陈敏, 陈莉, 黄平. 乌鲁木齐土壤中多环芳烃的污染特征及生态风险评价[J]. 中国环境监测, 2015, **31**(2): 84-91.
Chen M, Chen L, Huang P. Concentration and ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soils of Urumqi area, China[J]. Environmental Monitoring in China, 2015, **31**(2): 84-91.

[18] 朱媛媛, 田靖, 魏恩琪, 等. 天津市土壤多环芳烃污染特征、源解析和生态风险评价[J]. 环境化学, 2014, **33**(2): 248-255.
Zhu Y Y, Tian J, Wei E Q, *et al*. Characteristics, sources apportionment and ecological risks assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Tianjin, China [J]. Environmental Chemistry, 2014, **33**(2): 248-255.

[19] 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 等. 大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5272-5281.
Song N N, Feng J S, Yu Y, *et al*. Comparison of characteristics and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in different environmental media in the urban area of Daqing City [J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5272-5281.

[20] 樊新刚, 米文宝, 马振宁, 等. 宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1887-1894.
Fan X G, Mi W B, Ma Z N, *et al*. Spatial and temporal characteristics of heavy metal concentration of surface soil in Hebin industrial park in Shizuishan northwest China [J]. Environmental Science, 2013, **34**(5): 1887-1894.

[21] 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价[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]. Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2019, **31**(4): 28-32.

[22] 周燕, 卢新卫. 西安市文教区表层土壤中 PAHs 来源及风险分析[J]. 地球与环境, 2018, **46**(4): 381-387.
Zhou Y, Lu X W. Sources identification and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils of educational areas in Xi'an[J]. Earth and Environment, 2018, **46**(4): 381-387.

[23] 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.

[24] Wang N N, Lang Y H, Cheng F F, *et al*. Concentrations, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils of Liaohe estuarine wetland[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2011, **87**(4): 463-468.

[25] 佟瑞鹏, 杨校毅. 基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价: 以 PAHs 为例[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2522-2529.
Tong R P, Yang X Y. Risk Environmental health risk assessment of contaminated soil based on Monte Carlo method: a case of PAHs[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2522-2529.

[26] Xu S S, Liu W X, Tao S. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons in China [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(3): 702-708.

[27] 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.

[28] Dong T T T, Lee B K. Characteristics, toxicity, and source apportionment of polycylic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Ulsan, Korea[J]. Chemosphere, 2009, **74**(9): 1245-1253.

[29] Mostafa A R, Wade T L, Sweet S T, *et al*. Distribution and characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments of Hadhramout coastal area, Gulf of Aden, Yemen [J]. Journal of Marine Systems, 2009, **78**(1): 1-8.

[30] 冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 等. 典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4594-4603.
Ran Z X, Chen J Y, Wang Y T, *et al*. Characteristics and influencing factors of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from typical industrial areas of Chengdu[J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4594-4603.

[31] 冯焕银, 傅晓钦, 赵倩, 等. 宁波土壤中多环芳烃的健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(10): 1998-2004.
Feng H Y, Fu X Q, Zhao Q, *et al*. Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Ningbo area, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(10): 1998-2004.

[32] 孙焰, 祁士华, 李绘, 等. 福建闽江沿岸土壤中多环芳烃含量、来源及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(6): 1821-1829.
Sun Y, Qi S H, Li H, *et al*. Concentrations, sources and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils collected along the banks of Minjiang River, Fujian, China[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(6): 1821-1829.

[33] 刘庚, 毕如田, 王世杰, 等. 某焦化场地土壤多环芳烃污染数据的统计特征[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(6): 1722-1728.
Liu G, Bi R T, Wang S J, *et al*. Statistical characteristic analysis of soil PAHs in a coking contaminated site of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, **24**(6): 1722-1728.

[34] 张玉, 宋光卫, 刘海红, 等. 某大型化工场地土壤中多环芳烃(PAHs)污染现状与风险评价[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(11): 3408-3415.
Zhang Y, Song G W, Liu H H, *et al*. Pollution status and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil of a large chemical engineering site [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, **38**(11): 3408-3415.

[35] Hassanien M A, Abdel-Latif N M. Polycyclic aromatic hydrocarbons in road dust over Greater Cairo, Egypt[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **151**(1): 247-254.

[36] 王学彤, 贾英, 孙阳昭, 等. 典型污染区河流表层沉积物中 PAHs 的分布、来源及生态风险[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 153-158.
Wang X T, Jia Y, Sun Y Z, *et al*. Distribution, possible source and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments from a typical contaminated area [J]. Environmental Science, 2010, **31**(1): 153-158.

[37] Larsen R K, Baker J E. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: a comparison of three methods[J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(9): 1873-1881.

[38] Tian F L, Chen J W, Qiao X L, *et al*. Sources and seasonal variation of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in Dalian, China: factor analysis with non-negative constraints combined with local source fingerprints [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(17): 2747-2753.

[39] Lee J H, Gigliotti C L, Offenberg J H, *et al*. Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons to the Hudson River Airshed [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(35): 5971-5981.

[40] Callén M S, Iturmendi A, López J M, *et al*. Source apportionment of the carcinogenic potential of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) associated to airborne PM_{10} by a PMF model [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(3): 2064-2076.

[41] 刘炎坤, 汪青, 刘敏, 等. 上海市大气沉降物中多环芳烃赋存特征及其来源[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(9): 2605-2614.
Liu Y K, Wang Q, Liu M, *et al*. Concentration characteristics and potential sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric deposition in Shanghai [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(9): 2605-2614.

[42] Simcik M F, Eisenreich S J, Lioy P J. Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(30): 5071-5079.

[43] Soclo H H, Garrigues P, Ewald M. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal marine sediments: case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine (France) areas[J]. Marine Pollution Bulletin, 2000, **40**(5): 387-396.

[44] 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.

[45] 杨靖宇, 俞元春, 王小龙. 南京市不同功能区林业土壤多环芳烃含量与来源分析[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(2): 314-319.
Yang J Y, Yu Y C, Wang X L. Characterization and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban forestry soil from different functional areas of Nanjing City[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(2): 314-319.

[46] 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价[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.

[47] 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.

[48] Mielke H W, Wang G, Gonzales C R, *et al*. PAH and metal mixtures in New Orleans soils and sediments[J]. Science of the Total Environment, 2001, **281**(1-3): 217-227.

[49] 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.

[50] Wang Z, Chen J W, Qiao X L, *et al*. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons from urban to rural soils: a case study in Dalian, China[J]. Chemosphere, 2007, **68**(5): 965-971.

[51] 葛蔚, 程琪琪, 柴超, 等. 山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1587-1596.
Ge W, Cheng Q Q, Chai C, *et al*. Pollution characteristics and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils from Shandong[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1587-1596.

[52] Nadal M, Schuhmacher M, Domingo J L. Levels of PAHs in soil and vegetation samples from Tarragona County, Spain[J]. Environmental Pollution, 2004, **132**(1): 1-11.

[53] Mielke H W, Wang G D, Gonzales C R, *et al*. PAHs and metals in the soils of inner-city and suburban New Orleans, Louisiana, USA[J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2004, **18**(3): 243-247.

[54] Motelay-Massei A, Ollivon D, Garban B, *et al*. Distribution and spatial trends of PAHs and PCBs in soils in the Seine River basin, France[J]. Chemosphere, 2004, **55**(4): 555-565.

HUANJING KEXUE Vol. 41 No. 12
Environmental Science (monthly) Dec. 15, 2020

CONTENTS

Sources and Control Area Division of Ozone Pollution in Cities at Prefecture Level and Above in China ····· YAN Hui, ZHANG Wei, HOU Mo, *et al.* (5215)
Dynamic Assessment of $PM_{2.5}$ Health Damage Value in China from 2015 to 2018 ····· LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (5225)
Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Differentiation Characteristics of $PM_{2.5}$ in China from 2011 to 2017 ····· YANG Wen-tao, QIAO Peng, LIU Xian-zhao, *et al.* (5236)
Spatio-temporal Evolution and Population Exposure Risk to $PM_{2.5}$ in the Guanzhong Area ····· HUANG Xiao-jun, QI Ming-yue, LI Yan-yu, *et al.* (5245)
Formation Mechanism and Source Analysis of Two Heavy Pollution Periods in Winter in a Central Plains City ····· JIA Jia, CONG Yi, GAO Qing-min, *et al.* (5256)
Winter Pollution Characteristics and Physicochemical Properties of $PM_{2.5}$ in a Northwest Industrial City ····· YANG Yan-ping, CHEN Qiang, WANG Li-na, *et al.* (5267)
Characterization of Metal Pollution of Regional Atmospheric $PM_{2.5}$ and Its Sources Based on the PMF Model ····· DENG Lin-li, ZHANG Kai-shan, YIN Zi-yuan, *et al.* (5276)
Pollution Characteristics and Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in Core Urban Areas, Chongqing ····· ZHANG Xia, LIU Bin, XIAO Bo-lin, *et al.* (5288)
Factors Influencing New Atmospheric Particle Formation in Ordos During Summer and Autumn 2019 ····· KONG Xiang-chen, WANG Hong-lei, ZHANG Lian-xia, *et al.* (5295)
Characteristics and Reactivity of Ambient VOCs in Urban Hangzhou, China ····· JING Sheng-ao, GAO Ya-qin, SHEN Jian-dong, *et al.* (5306)
Characteristics and Sources of Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution in Summer in Chengdu ····· XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, *et al.* (5316)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs and O_3 in Shijiazhuang ····· WANG Shuai, CUI Jian-sheng, FENG Ya-ping, *et al.* (5325)
Analysis of Industrial VOCs Emission Inventory and Countermeasures in Xiamen ····· WU Dong-yang, ZHUANG Ma-zhan, WU Yan-cong, *et al.* (5336)
Emission Inventory and Emission Factors of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Architectural Adhesives ····· LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, SU Yan-hua, *et al.* (5345)
Sources and Health Risks of Atmospheric Polychlorinated Biphenyls in an Urban/Industrial Areas, Northwest China ····· MAO Xiao-xuan, LI Zi-xuan, SONG Shi-jie, *et al.* (5352)
Vertical Distribution of Surface Formaldehyde in the Pearl River Delta Urban Area Based on Observations at the Canton Tower ····· HUANG Shan, PEI Cheng-lei, ZHANG Ying, *et al.* (5362)
Temporal and Spatial Characteristics of Total Phosphorus in the Middle and Lower Yangtze River Mainstem Under New Water and Sediment Conditions ····· ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, WU Yun-li, *et al.* (5371)
Seasonal Variations in Nitrogen and Phosphorus Concentration and Stoichiometry of Hanfeng Lake in the Three Gorges Reservoir Area ····· QIAN Tian, HUANG Qi, HE Bing-hui, *et al.* (5381)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Hengshui Lake Sediments ····· ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LIU Li, *et al.* (5389)
Endogenous Pollution and Release Characteristics of Bottom Sediments of Hengshan Reservoir in Yixing City ····· CUI Hui-fang, CHEN Shu-yun, YANG Chun-hui, *et al.* (5400)
Pollution and Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin ····· JIANG Tao, LIN Wei-wen, CAO Ying-jie, *et al.* (5410)
Influence Factors of Potential Nitrification Rates and Functional Genes Abundance in the Jinshui River and the Qihe River of the Hanjiang River Basin ····· ZHAO Bin-jie, WANG Xu, ZHANG Jian, *et al.* (5419)
Contamination Characteristics and Potential Ecological Risks of Typical Perfluoroalkyl Substances in the Water and Sediment of Coastal Tourism Resorts in Shandong Province ····· WANG Shi-liang, CAO Xue-zhi (5428)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organophosphate Esters in Key Waters Areas of Taihu Lake ····· LÜ Jia-pei, ZHANG Zhen-fei, LIU Yang, *et al.* (5438)
Residual Characteristics and Health Assessment Analysis of OCPs and PCBs in Karst Groundwater ····· YE Kai, SUN Yu-chuan, JIA Ya-nan, *et al.* (5448)
Biogeographic Distribution Patterns of Diatoms in Lancang River and Their Key Drivers ····· SUN Sheng-hao, CHEN Juan, WANG Pei-fang, *et al.* (5458)
Bioaccumulation Characteristics of Quinolones (QNs) in Dominant Fish Species and Their Correlation with Environmental Factors in Baiyangdian Lake ····· SHEN Li-na, FU Yu, ZHANG Lu-lu, *et al.* (5470)
Effect of Biomass Particle Size on the Adsorption of Phosphorus from Aqueous Solution by MgO-loaded Biochar ····· WANG Peng-fei, ZHI Meng-meng, CHU Zhao-sheng, *et al.* (5480)
Photocatalytic Degradation of Tetracycline and Copper Complex by Bi_2MoO_6/Bi_2S_3 Heterojunction ····· HUANG Wen-xin, WEI Hu, JIANG Cai-yun, *et al.* (5488)
Enhancing PPCPs Removal and Membrane Fouling Control of Ultrafiltration Membrane by UiO-66@Fe_3O_4@UiO-66 ····· YIN Yue, WU Dao-wen, SUN Meng-yao, *et al.* (5500)
Advanced Treatment of Tail Water Using Pilot-scale Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands in Low-temperature Seasons ····· LIAO Xue-ke, YAN Han-lu, WANG Zhi-yuan, *et al.* (5509)
Metagenomic Insights into Salinity Build-up in Microbial Communities and Metabolism of Hydrolytic Bioreactor Treating High-color PDWW ····· GAO Jing, ZHANG Shao-hua, WANG Rui, *et al.* (5518)
Performance and Microbial Characteristics of Ammonium-limited and Nitrite-limited ANAMMOX Systems ····· SONG Jia-jun, ZHU Ming-yi, GUO Kai-cheng, *et al.* (5527)
Microbial Community Structure and Diversity During the Enrichment of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria ····· YAN Bing, XIA Song, GUI Shuang-lin, *et al.* (5535)
Enhanced Dewaterability of Waste-Activated Sludge in Presence of Fe(Ⅱ)-Activated Calcium Peroxide ····· BI Wei-wei, RUAN Shu-yu, CHEN Wu-ao-xiao, *et al.* (5544)
Spatial Distribution, Contamination Assessment, and Sources of Heavy Metals in the Urban Green Space Soils of a City in North China ····· ZHAO Liang, LIANG Yun-ping, CHEN Qian, *et al.* (5552)
Technological Classification of Cadmium Quality in the Rice Producing Areas of South China ····· DOU Wei-qiang, AN Yi, QIN Li, *et al.* (5562)
Distribution Characteristics of Selenium in a Soil-Crop System and the Threshold of Selenium-Rich Soils ····· WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, *et al.* (5571)
Transfer Factor and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Crop System in a High Incidence Area of Nasopharyngeal Carcinoma, Guangdong ····· YE Mai, ZHANG Jing-ru, ZHANG Lu-lu, *et al.* (5579)
DA-6 and GLDA Enhanced *Pancium virgatum* L. to Phytoextract Cd from Contaminated Soils ····· WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh Mohamed, *et al.* (5589)
Remediation Performance via the Passivation of a Porous Biomorph Genetic Composite of α-Fe_2O_3/Fe_3O_4/C Using a Bamboo Template on As(Ⅴ) Contaminated Soils ····· ZHAO Ning-ning, HE Hao, FENG Guo-jie, *et al.* (5600)
Biodegradation of Expanded Polystyrene Foams in *Zophobas morio*: Effects of Gut Microbiota ····· YANG Li, LIU Ying, GAO Jie, *et al.* (5609)
Isolation, Identification, and Degrading Characteristics of an Oil Resistant Formaldehyde-Degrading Bacterium ····· HAN Xi, WANG Rong-rong, SHI Chun-zhen (5617)
Characteristics of Phyllosphere and Rhizosphere Bacterial Communities in *Bothriochloa ischaemum* in Copper Tailings ····· JIA Tong, YAO Yu-shan, WANG Rui-hong (5628)
Effects of Selected Biochars Application on the Microbial Community Structures and Diversities in the Rhizosphere of Water Spinach (*Ipomoea aquatica* Forssk.) Irrigated with Reclaimed Water ····· CUI Bing-jian, CUI Er-ping, HU Chao, *et al.* (5636)
Effects of Modified Biowaste-based Hydrochar on Rice Yield and Nitrogen Uptake ····· HOU Peng-fu, XUE Li-hong, FENG Yan-fang, *et al.* (5648)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil PAHs in Shizuishan City Based on GIS and PMF Model ····· XIA Zi-shu, WANG Yu-yu, ZHONG Yan-xia, *et al.* (5656)
Effects of Nitrogen Fertilizer and Straw Returning Methods on N_2O Emissions in Wheat-Maize Rotational Soils ····· XU Hong-wei, LI Na, FENG Yong-zhong, *et al.* (5668)