

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例	杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)
基于不同电力需求的中国减排降碳协同增效路径	向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)
城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用	张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)
基于可解释性机器学习的城市 O ₃ 驱动因素挖掘	董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)
基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析	朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)
基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O ₃ 来源解析	王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)
基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测	朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)
2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析	李婷苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)
夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响	杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)
气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别	杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)
2000~2021 年成渝城市群 PM _{2.5} 时空变化及驱动机制多维探测	徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)
基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM _{2.5} 小时浓度估算	吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)
2013~2021 年邢台 PM _{2.5} 重污染过程输送和增长特性	江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)
基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源	朱书慧 (3760)
机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征	于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢峰, 曹芳, 章炎麟 (3771)
沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献	关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)
疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估	云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)
西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势	王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)
淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价	徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)
雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应	王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)
流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例	刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)
南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化	郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)
闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析	杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)
金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素	燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)
嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性	竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郭伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)
水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响	王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)
典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探	吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)
太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响	俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)
基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算	张有福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)
千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别	俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)
沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征	李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)
外秦淮河底泥污染及疏浚效果	张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)
新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为	葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)
镉砷在针铁矿界面共吸附的相互作用机制	苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)
环糊精键合 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H ₂ O ₂ 氧化水中有机微污染物	刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)
Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制	朱敬林, 汪舒 (3990)
微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征	谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)
中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价	王静, 魏恒, 潘波 (4006)
渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价	蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)
基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例	方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)
乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价	范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)
荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制	黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)
近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展	赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)
改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展	吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)
沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析	赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)
两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果	梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)
秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响	王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)
秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质	赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)
基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断	黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)
地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (4142)
浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险	张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)
生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响	刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)
低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响	周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡延江 (4170)
沼液施用对麦茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响	乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)
大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征	刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)
马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响	姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)
《环境科学》征订启事(3648) 《环境科学》征稿简则(3659) 信息(3714, 4150, 4178)	

淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价

徐振鹏^{1,2}, 钱雅慧^{1,2}, 洪秀萍³, 罗钟庚^{1,2}, 高秀龙^{1,2}, 梁汉东^{1,2*}

(1. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 3. 淮北师范大学生命科学院, 淮北 235000)

摘要: 淮北孙疃矿区是华北两淮地区典型的煤炭资源开采基地. 以往涉及煤矿区地表尘的环境研究多集中在重金属和水溶性离子等, 对多环芳烃类化合物(PACs)研究较少. 利用气相色谱-三重串联四极杆质谱(GC-MS/MS)检测了孙疃矿区及周边环境地表尘中16种母体多环芳烃(16PAHs)、烷基多环芳烃(aPAHs)及部分含氧多环芳烃(OPAHs)的含量. 结果表明, 孙疃矿区地表尘中 $\sum$ PACs 含量范围为283.8~36 852.5 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (均值为4 114.2 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). 其中, $\sum$ aPAHs (均值2 593.8 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 约为 $\sum$ 16PAHs (均值1 074.9 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的2.4倍, 是PACs污染的主要贡献者. 地表尘中16PAHs和aPAHs在组成上均以相对分子质量低的PACs为主. OPAHs含量较低, 均值为445.6 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 同时, PACs污染主要集中在矿区周边及煤矸石填埋道路附近. 利用正定矩阵因子分解(PMF)推测研究区主要受成岩源影响, 其次是煤和生物质燃烧, 交通源及石油产品泄漏的占比较小. 特征比值结果显示, 当 $\sum$ 16PAHs/ $\sum$ PACs < 0.25时主要受煤矿区污染. PMF结合终生致癌风险(ILCR)结果显示, 研究区对儿童存在潜在致癌风险, 风险主要来自煤和生物质燃烧及煤炭开采. 我国淮河流域煤矿区众多, 研究结果可为煤炭开采区PACs的污染防治提供参考.

关键词: 煤矿区; 多环芳烃类化合物(PACs); 地表尘; 源解析; 致癌风险

中图分类号: X513; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-3809-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202209062

Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei

XU Zhen-peng^{1,2}, QIAN Ya-hui^{1,2}, HONG Xiu-ping³, LUO Zhong-geng^{1,2}, GAO Xiu-long^{1,2}, LIANG Han-dong^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Beijing 100083, China; 2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 3. College of Life Sciences, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China)

Abstract: The Suntuan mining area of Huaibei is a typical coal resource mining base in the Huainan-Huaibei areas in North China. Previous environmental studies related to surface dust in coal mining areas mainly focused on heavy metals and water-soluble ions, with little research on polycyclic aromatic compounds (PACs). In this study, gas chromatography-triple tandem quadrupole mass spectrometry (GC-MS/MS) was used to determine the contents of 16 parent polycyclic aromatic hydrocarbons (16PAHs), alkyl polycyclic aromatic hydrocarbons (aPAHs), and some oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons (OPAHs) in surface dust from the Suntuan mining area and surrounding environment. The results showed that the $\sum$ PACs concentration range of surface dust in the Suntuan mining area was 283.8-36 852.5 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (mean: 4 114.2 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). $\sum$ aPAHs (mean: 2 593.8 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) was 2.4 times higher than $\sum$ 16PAHs (mean: 1 074.9 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), which was the main contributor to PAC pollution. The composition of 16PAHs and aPAHs in surface dust was dominated by low molecular polycyclic aromatic hydrocarbons. The average OPAH content was 445.6 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. At the same time, PAC pollution was mainly concentrated around the mining area and near the road of a coal gangue landfill. Based on the positive matrix factor (PMF) analysis, it was inferred that the study area was mainly affected by petroleum sources, followed by coal and biomass combustion, and traffic sources and petroleum product leakage accounted for a relatively small proportion. Based on the ratio and distribution pattern of 16PAHs and aPAHs, it was inferred that when $\sum$ 16PAHs/ $\sum$ PACs < 0.25, it was mainly polluted by the coal mining area. The results of PMF combined with lifetime carcinogenic risk (ILCR) showed that there were potential carcinogenic risks for children near the study area, mainly from coal and biomass burning and coal mining. There are many coal mining areas in Huaihe River Basin in China. The results of this study can provide reference for pollution prevention and control of PACs in these coal mining areas.

Key words: coal mine area; polycyclic aromatic compounds (PACs); dust; source analysis; carcinogenic risk

多环芳烃类化合物(polycyclic aromatic compounds, PACs)是自然界中分布广泛的、涉及有机质不完全燃烧和热解过程中难以避免产生的持久性有机污染物^[1,2]. 由于PACs具有“三致效应”^[3,4], 国内外颁布了关于16种母体多环芳烃(16PAHs)的各项标准, 并将其列为环境优先控制污染物^[5-7]. 近年来, 随着对16PAHs及其衍生物的深

入研究, 烷基多环芳烃(aPAHs)和含氧多环芳烃

收稿日期: 2022-09-06; 修订日期: 2022-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772157, 41902172); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金项目(SKLCRSM21KFA11); 安徽省自然科学基金项目(2008085QD169)

作者简介: 徐振鹏(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境监测与评价, E-mail: 402148455@qq.com

* 通信作者, E-mail: hdl6688@cumt.edu.cn

(OPAHs)因其与 16PAHs 毒性接近甚至更强而引起关注^[8,9],且有研究表明,aPAHs 较 16PAHs 在生物体内的富集时间更长^[10].OPAHs 作为多环芳烃的极性衍生物,被认为是多环芳烃化学降解的终产物^[11],因水溶性较高而在土壤中流动性更好,并能随着多环芳烃的降解而富集^[12].因此,多环芳烃衍生物在无形中威胁着生态环境及人体健康.目前,对 aPAHs 与 OPAHs 的研究多集中在土壤^[13]、河流^[14]、沉积物^[15,16]和气溶胶^[17,18]中,且研究区多为城市^[19]、农业区^[20]和工业区^[21]等,但是针对煤矿区多环芳烃衍生物的研究较少.

地表尘是 PACs 的重要载体^[22].作为一种复杂的颗粒混合物,地表尘可能来源于建筑废料、车辆尾气、轮胎磨损颗粒和植物碎屑等^[23].以往地表尘中 PACs 的研究多集中在城市扬尘^[24]、室内灰尘^[25]和路边尘^[26]等,且目标污染物多为 16PAHs,关于地表尘中多环芳烃衍生物的研究较少.地表尘中的 PACs 可以在外界环境影响下通过挥发和再悬浮进入大气^[27],也可因降雨以径流形式输送到水环境中^[28],还能沉积在植物叶片表面^[29].同时,手口摄入、呼吸吸入和皮肤接触再悬浮的地表尘颗粒对人体健康存在严重威胁^[30].尽管国内外已逐步开展对地表尘中 PACs 污染的研究工作,但很少深入研究受煤矿开采及煤矸石颗粒影响地区地表尘中 PACs 的污染情况,相较于传统城市道路灰尘,煤矿周边地表尘的成分更复杂,存在的环境风险值得进一步研究.本文通过对淮北孙疃矿区及周边地表尘中 PACs 的研究,了解受煤矿区开采及煤矸石堆积

影响的地区中 PACs 的含量、组成、空间分布、来源和健康风险,以期为煤矿区 PACs 的污染控制及其环境治理提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

安徽省煤炭消耗量较大,土壤中 16PAHs 含量在全国范围内处于较高水平^[31,32],其中,两淮地区煤种齐全、煤质优良、分布广泛且储量丰富,已成为华北重要的煤炭资源基地^[33].孙疃矿区隶属于安徽省濉溪县淮北煤田中部($33^{\circ}33' \sim 33^{\circ}35'30''N$, $116^{\circ}42'30'' \sim 116^{\circ}46'E$),含煤地层主要为石炭系和二叠系^[34].与淮北煤田其他矿区相比,孙疃矿区周边水系丰富,紧邻矿区的浍河作为淮河北岸的支流,极易受到矿区开采影响.同时,孙疃矿区周边无工业区,不易引入其他类型的污染源.因此,孙疃矿区既具有淮北煤田典型矿区的共性,又有其地理位置上的特殊性.本研究以淮北孙疃矿区为中心,周围 2 km 范围内按照圆形布点采样法共布置 64 个采样点.采样时用毛刷收集地表尘样品,将 5 m^2 范围内采集的 3 个平行样混合均匀,去除落叶石块等杂质后用铝箔纸包裹置于塑封袋中(编号 A1 ~ A64),每个样品不少于 500 g,并用手持式 GPS 记录经纬度坐标(图 1).

1.2 样品前处理

使用实验室已建立的 PACs 的提取方法^[35]:向玻璃试管中依次加入 2 g 无水硫酸钠(马弗炉 400°C 烧 4 h 备用)、2 g 粒径在 150 ~ 400 目之间

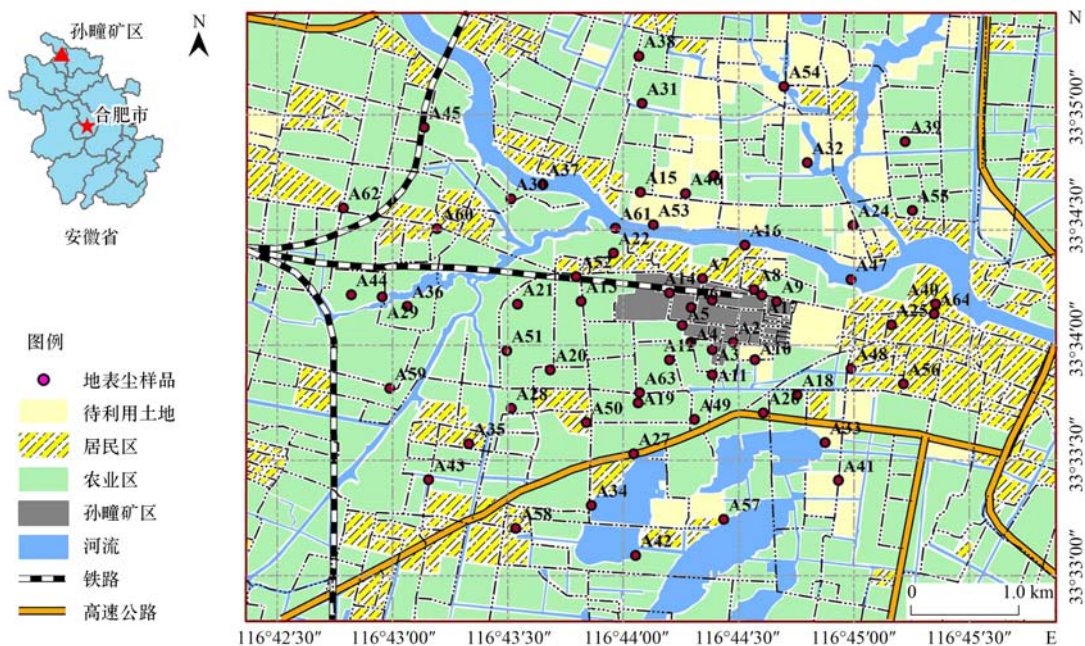


图1 淮北孙疃矿区地表尘采样点位置

Fig. 1 Location of surface dust sampling sites in Suntuan mining area, Huabei

的地表尘样品(自然风干、研磨过筛后备用)、4.4 mL 二氯甲烷和 100 μL 10 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 NAP-D8; 密封置于超声池中, 在不超过 20℃ 的超声温度下超声 5 h; 吸取上清液后离心; 经无菌型针式过滤器过滤后, 吸取 900 μL 置于样品瓶中; 向其加入 100 μL 4 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的定量内标, 涡旋后按仪器工作条件上机。

1.3 试剂与仪器

试剂: NAP-D8 为前处理内标; 定量内标为 ACE-D10、PHE-D10、CHR-D12 和 PER-D12; 16PAHs 混标: 萘(NAP)、蒽(ANT)、菲(PHE)、芘(ACE)、芘烯(ACY)、茚(FLU)、荧蒽(FLA)、芘(PYR)、苯并[a]蒽(BaA)、䓛(CHR)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、苯并[g,h,i]芘(BgP)、二苯并[a,h]蒽(DaA)和茚并[1,2,3-cd]芘(InP); 8 种 aPAHs 标准品: 1-甲基萘(1M-NAP)、1,2-二甲基萘(1,2M-NAP)、2-甲基蒽(2M-ANT)、2-甲基菲(2M-PHE)、3,6-二甲基菲(3,6M-PHE)、1-甲基芘(1M-PYR)、1-甲基䓛(1M-CHR)和 7-甲基苯并[a]芘(7M-BaP); 1 种 OPAHs 标准品: 9-芴酮(9-FLUO), 以上标准品均购自美国

AccuStandard 公司。试剂稀释均采用正己烷(色谱级, 北京百灵威科技有限公司); 萃取剂为二氯甲烷(质谱级, Thermal Fisher, USA); 干燥剂为无水硫酸钠(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

仪器条件: 气相色谱-三重四极杆串联质谱仪(Xevo TQ-GC, Waters, USA); DB-5MS 型毛细管色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm)。气相色谱条件: 进样口温度为 280℃, 进样模式为不分流进样, 载气为高纯氦气(纯度 > 99.999%), 流速为 1 mL $\cdot$ min $^{-1}$ 。色谱柱升温程序: 70℃ 保持 1 min、以 15 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 速度升温至 180℃ 并保持 2 min、以 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 速度升温至 230℃ 并保持 30 s、然后以 5 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 速度升温至 250℃ 并保持 2 min、最后以 8 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 速度升温至 300℃ 并保持 5 min。质谱条件: MRM 模式, 离子源为电子轰击源(EI), 源温度为 250℃, 电离能量为 70 eV, 色谱与质谱接口温度为 280℃。

1.4 健康风险评价

利用终生致癌风险(ILCR)模型计算当地儿童和成人通过手口摄入、呼吸吸入和皮肤接触这 3 种方式摄入 16PAHs 的致癌风险, 计算公式如下^[36,37]:

$$\begin{aligned} \text{ILCR}_{\text{呼吸吸入}} &= \frac{C_{\sum \text{TEQ7PAHs}} \times \text{CSF}_{\text{呼吸吸入}} \times \sqrt[3]{\frac{\text{BW}}{70}} \times \text{IR}_{\text{呼吸吸入}} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT} \times \text{PEF}} \\ \text{ILCR}_{\text{手口摄入}} &= \frac{C_{\sum \text{TEQ7PAHs}} \times \text{CSF}_{\text{手口摄入}} \times \sqrt[3]{\frac{\text{BW}}{70}} \times \text{IR}_{\text{手口摄入}} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT} \times 10^6} \\ \text{ILCR}_{\text{皮肤接触}} &= \frac{C_{\sum \text{TEQ7PAHs}} \times \text{CSF}_{\text{皮肤接触}} \times \sqrt[3]{\frac{\text{BW}}{70}} \times \text{SA} \times \text{AF} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT} \times 10^6} \\ \text{CR} &= \sum (\text{ILCR}_{\text{呼吸吸入}} + \text{ILCR}_{\text{手口摄入}} + \text{ILCR}_{\text{皮肤接触}}) \end{aligned}$$

式中, $C_{\sum \text{TEQ7PAHs}}$ 为 7 种高致癌性 16PAHs 的 BaP 毒性当量之和($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); $\text{CSF}_{\text{呼吸吸入}}$ 、 $\text{CSF}_{\text{手口摄入}}$ 和 $\text{CSF}_{\text{皮肤接触}}$ 分别为 3.85、7.30、25.0 ($\text{kg}\cdot\text{d}\cdot\text{mg}^{-1}$); BW 为体重(儿童和成人分别为 16.2 kg 和 61.8 kg); ED 为暴露年限(儿童和成人分别为 6 a 和 30 a); EF 为暴露频率(180 $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$); AT 为人均寿命(25 550 d); $\text{IR}_{\text{呼吸吸入}}$ 为呼吸频率(儿童和成人分别为 7.6 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 和 20 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$); $\text{IR}_{\text{手口摄入}}$ 为土壤摄取率(儿童和成人分别为 200 $\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 100 $\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$); SA 为皮肤暴露面积(儿童和成人分别为 2 800 cm^2 和 5 700 cm^2); AF 为土壤的皮肤粘附因子(儿童和成人分别为 0.7 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 0.07 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$); ABS 为皮肤吸附系数(0.1); PEF 为颗粒排放因子(1.36 $\times$ 10 9 $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)。

1.5 质量控制与数据分析

本实验前处理内标 NAP-D8 的回收率在 71.1% ~ 118.7% 之间, 实验过程中每 10 个样品设置 1 针空白和 1 针平行样, 每 20 针样品设置 1 个基质加标样品。本实验中基质加标回收率在 72.8% ~ 121.9% 范围内, 平行样品标准偏差小于 30%, 空白结果显示实验过程中未受到外界污染。MassLynx V4.1 软件用于实验数据定量; Origin 2021 用于数据分析及绘图; ArcGIS 10.2 用于采样图及空间分布图的绘制; EPA PMF 5.0 用于 PACs 的来源解析。

2 结果与讨论

2.1 地表尘中 PACs 的浓度与组成

孙疃矿区及周边地表尘中 PACs 含量差异较大

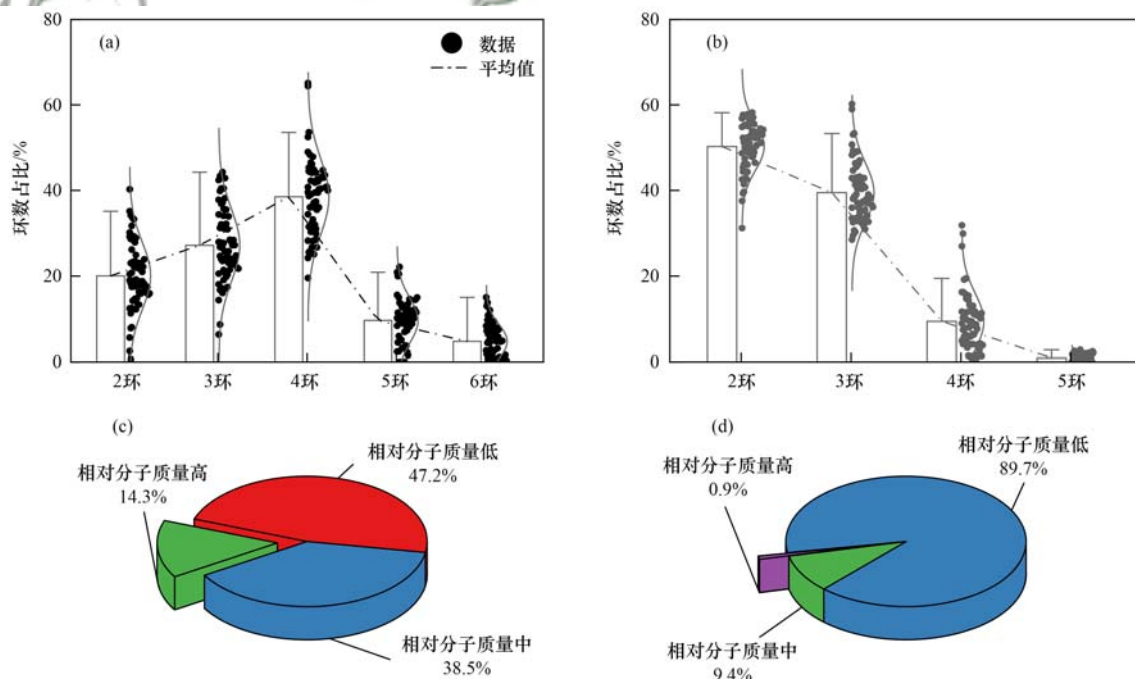
(表1), $\sum$ PACs 含量在 $283.8 \sim 36\,852.5 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内(均值 $4\,114.2 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。其中, $\sum$ 16PAHs 含量在 $93.1 \sim 18\,286.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内(均值 $1\,074.9 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 组成上以 NAP 和 PHE 为主; FLA、PYR、BaA 和 CHR 次之; 其余组分虽有检出但含量较低。7 种高致癌性 PAHs 均值为 $434.5 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 约占 $\sum$ 16PAHs 的 40%。与其他矿区相比, 孙疃矿区地表尘中 $\sum$ 16PAHs 含量明显低于新疆准东煤矿(均值 $4\,646.3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[39] 和内蒙古乌达煤矿(均值 $2\,054.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[40], 与辽宁铁法煤矿(均值 $1\,118.3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[41] 含量接近, 远高于重庆马家沟废弃煤矿(均值 $170.3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[42]。这可能是因为孙疃矿区煤种为我国稀缺的中灰、特低硫和特低磷的优质焦煤^[43], 并且近年来环境治理工作取得成效。同时, 研究区范围较广, 涉及农田和居民区 16PAHs 含量较低。

$\sum$ aPAHs 含量为 $171.0 \sim 27\,676.4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (均值 $2\,593.8 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 这一数值约为 $\sum$ 16PAHs 的 2.4 倍, 占 $\sum$ PACs 的 63% 以上, 说明 aPAHs 是当地 PACs 污染的主要贡献者。其中, aPAHs 组成上以 a-NAP 和 a-PHE 为主; a-FLU 和 a-CHR 含量较高; a-FLA、a-PYR 和 7M-BaP 含量较低; 2M-ANT 和 a-ACE 少有检出。同时, 萘和菲及其对应的烷基

衍生物(C0 ~ C5 NAP 和 C0 ~ C4 PHE)在含量上呈现出先上升后下降的趋势, 即中间高两边低的“钟形”分布, Hindersmann 等^[44]将这种分布类型定义为成岩源, 由此推测该地区 PACs 主要受孙疃矿区煤炭开采影响。

二苯并呋喃(DBF)是油气勘探过程中典型的生物标志物, 在判别有机质沉积环境方面有着广泛应用^[45]。由于煤和石油同属化石燃料, 因此煤矿区周边地表尘中可能同样含有 DBF。本研究中 $\sum$ OPAHs 含量在 $19.6 \sim 3\,971.4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内(均值 $445.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 这一数值虽远低于 16PAHs 和 aPAHs, 但仍不容忽视。通过对孙疃矿区及周边地表尘中 PACs 的检测, 可以看出研究区 PACs 种类丰富且含量较高, 以往仅考虑 16PAHs 的污染特征具有一定的局限性, aPAHs 和 OPAHs 同样存在严重的环境威胁。

16PAHs 和 aPAHs 的环数组成情况如图 2 所示。16PAHs 中 4 环 PAHs 占比最高(38.5%), 2 环(20.0%)和 3 环(27.2%) 16PAHs 次之, 5 ~ 6 环 PAHs 占比最少。若按 16PAHs 的相对分子质量进行划分: 相对分子质量低(47.2%) > 相对分子质量中(38.5%) > 相对分子质量高(14.3%), 而相对分子质量低的 16PAHs 主要来自成岩源, 煤和生物质燃烧主要产生相对分子质量中的 16PAHs^[46]。因此, 推测当地不仅受矿区煤和煤矸石污染, 还受到居民



(a) 和 (c) 为 16PAHs, (b) 和 (d) 为 aPAHs; 相对分子质量低的 PAHs 为 2 ~ 3 环 PAHs, 相对分子质量中的 PAHs 为 4 环 PAHs, 相对分子质量高的 PAHs 为 5 ~ 6 环 PAHs

图 2 地表尘中 16PAHs 和 aPAHs 的环数组成

Fig. 2 Ring number composition of 16PAHs and aPAHs in surface dust

区日常燃煤影响. aPAHs 中由于 a-NAP 和 a-PHE 占 89.7%. 结合 16PAHs 和 aPAHs 的含量及组成特征, 主导地位, 相对分子质量低的 aPAHs 占比高达 可以看出受煤矿影响的地区 aPAHs 含量较高.

表 1 PACs 的含量、组成特征和毒性^[38]/μg·kg⁻¹

Table 1 Concentration, composition characteristics, and toxicity of PACs /μg·kg ⁻¹									
组分	含量					TEQ _{BaP}			
	最小值	最大值	平均值	中值	TEF	最小值	最大值	平均值	中值
NAP	23.2	908.6	106.9	63.2	0.001	0.0	0.9	0.1	0.1
ACY	nd	41.6	5.4	2.6	0.001	0.0	0.0	0.0	0.0
ACE	1.9	47.0	7.5	4.6	0.001	0.0	0.1	0.0	0.0
FLU	nd	186.6	17.8	10.4	0.001	0.0	0.2	0.0	0.0
PHE	15.3	1 468.7	167.7	74.6	0.001	0.0	1.5	0.2	0.1
ANT	nd	57.0	1.7	0.0	0.010	0.0	0.6	0.0	0.0
FLA	10.8	4 300.5	142.0	23.4	0.001	0.0	4.3	0.1	0.0
PYR	10.0	2 727.6	119.6	35.5	0.001	0.0	2.7	0.1	0.0
BaA	1.9	840.4	92.5	21.3	0.100	0.2	84.0	9.3	2.1
CHR	3.3	4 037.2	165.0	27.1	0.010	0.0	40.4	1.7	0.3
BbF	nd	1 544.0	52.2	0.0	0.100	0.0	154.4	5.2	0.0
BkF	nd	946.5	42.0	10.3	0.100	0.0	94.7	4.2	1.0
BaP	nd	755.9	37.1	8.2	1.000	0.0	755.9	37.1	8.2
InP	nd	373.2	12.7	0.0	0.100	0.0	37.3	1.3	0.0
DaA	nd	396.6	31.0	15.2	1.000	0.0	396.6	31.0	15.2
BgP	0.2	792.2	73.9	12.9	0.010	0.0	7.9	0.7	0.1
∑7PAHs	5.3	8 893.9	434.5	82.6	—	0.2	1 563.3	89.7	25.0
∑16PAHs	93.1	18 286.6	1 074.9	303.8	—	5.4	8 909.9	433.8	82.9
C1-NAP	12.6	1 789.7	139.6	54.6	0.001*	0.0	1.8	0.1	0.1
C2-NAP	37.8	7 915.9	594.9	207.7	0.001*	0.0	7.9	0.6	0.2
C3-NAP	13.4	4 447.7	391.6	136.6	0.001*	0.0	4.5	0.4	0.1
C4-NAP	7.2	1 703.9	185.6	80.1	0.001*	0.0	1.7	0.2	0.1
C5-NAP	nd	127.4	10.3	2.4	0.001*	0.0	0.1	0.0	0.0
C1-ACE	nd	38.9	1.3	3.5	0.001*	0.0	0.0	0.0	0.0
C1-PHE	22.6	3 931.7	400.2	152.0	0.001*	0.0	3.9	0.4	0.2
C2-PHE	nd	1 046.0	91.0	20.2	0.001*	0.0	1.1	0.1	0.0
C3-PHE	nd	591.1	54.0	9.3	0.001*	0.0	0.6	0.1	0.0
C4-PHE	nd	140.6	10.5	0.0	0.001*	0.0	0.1	0.0	0.0
2M-ANT	nd	37.4	1.1	0.0	0.010*	0.0	0.4	0.0	0.0
C1-FLU	43.3	1 841.7	212.0	133.0	0.001*	0.0	1.8	0.2	0.1
C2-FLU	nd	1 174.5	117.7	47.2	0.001*	0.0	1.2	0.1	0.1
1M-FLA	nd	341.4	37.6	13.0	0.001*	0.0	0.3	0.0	0.0
C1-PYR	0.5	690.7	78.5	31.6	0.001*	0.0	0.7	0.1	0.0
C1-CHR	nd	2 479.7	222.9	35.3	0.010*	0.0	24.8	2.2	0.4
7M-BaP	nd	534.2	42.8	9.1	1.000*	0.0	534.2	42.8	9.1
∑aPAHs	171.0	27 676.4	2 593.8	930.9	—	0.2	578.0	47.4	10.6
9-FLUO	nd	160.5	20.9	12.2	—	—	—	—	—
DBF	8.6	652.2	84.2	49.7	—	—	—	—	—
C1-DBF	7.5	2 888.1	300.2	119.8	—	—	—	—	—
C2-DBF	nd	460.2	40.3	14.4	—	—	—	—	—
∑OPAHs	19.6	3 971.4	445.6	201.0	—	—	—	—	—
∑PACs	283.8	36 852.5	4 114.2	1 543.8	—	—	—	—	—

1) nd 表示未检出; “—”表示因缺乏毒性当量因子(TEF)参考信息而未参与计算; * 表示 aPAHs 的 TEF 参考对应的母体 16PAHs; TEF 为无量纲数

2.2 PACs 的空间分布特征

孙疃矿区及周边地表尘中 PACs 的空间分布如图 3 所示, 可知 PACs 污染范围较广, aPAHs 相较于 16PAHs 和 OPAHs 污染程度更高. 根据文献[47]提出的土壤中 16PAHs 污染等级标准, 孙疃矿区周边

约 61% 的地表尘中 ∑PACs 达到重度污染水平; 22% 的样品 ∑PACs 达到中度污染水平. 其中位于西北部的样品 (A62) 中 ∑16PAHs 含量高达 18 286.6 μg·kg⁻¹, 明显高于 aPAHs (4 303.5

$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),这可能是附近铁路交通及居民燃煤联合污染造成.其次,矿区周边普遍存在用煤矸石铺路现象,在煤矿开采与交通运输的联合影响下 PACs 污染严重.此外,矿区东部的孙疃镇中心较为繁华,在居民日常生活、交通尾气及矿区开采的影响下 PACs 污染水平较高.农田周边 PACs 的污

染程度相对降低,这可能和土地的翻种及农作物对 PACs 的吸收降解有关^[48].从空间分布上看,aPAHs 和 OPAHs 污染主要集中在煤矿区周边,而 16PAHs 更易受周围环境影响,说明 aPAHs 和 OPAHs 相较于 16PAHs 更适合作为煤矿区污染溯源的特征因子.

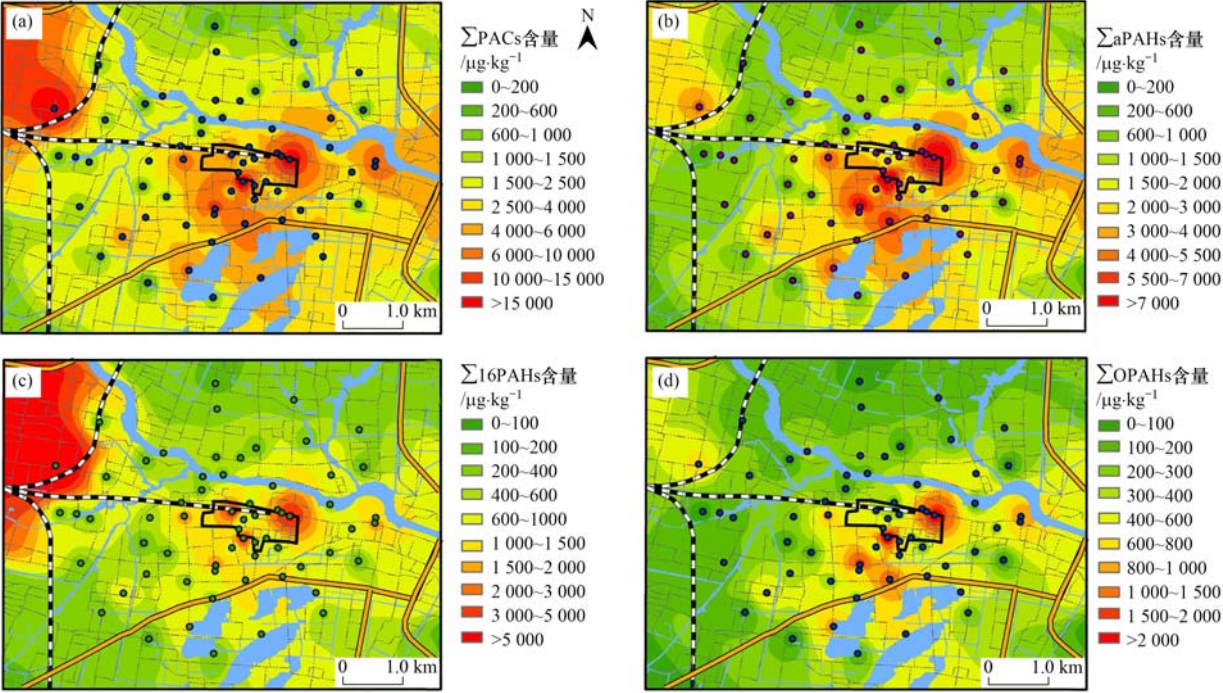
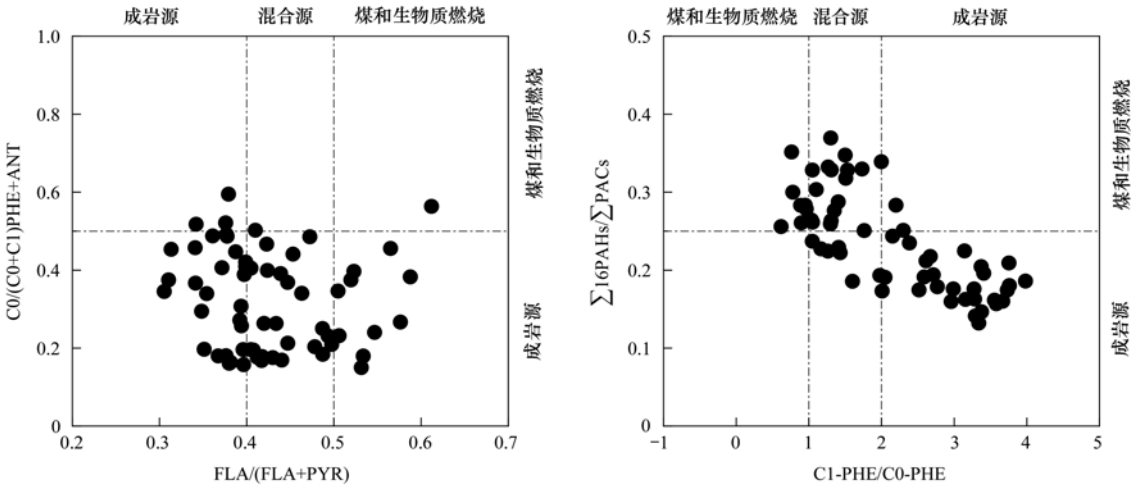


图3 多环芳烃类化合物空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of polycyclic aromatic compounds

2.3 地表尘中 PACs 的可能来源

PACs 的来源解析通常依据 16PAHs 的特征比值^[49,50].本文选取 FLA/(FLA + PYR) 结合 aPAHs 比值对地表尘中 PACs 溯源,并结合正定矩阵因子分解模型(PMF)判断各因子的贡献率.比值结果如

图4所示,绝大部分地表尘样品 $\text{FLA}/(\text{FLA} + \text{PYR}) < 0.4$, $\text{C0}/(\text{C0} + \text{C1})\text{PHE} + \text{ANT} < 0.5$,说明研究区主要受矿区开采过程中成岩源影响^[51,52];小部分呈现混合源或热解源特征,说明可能受到居民日常燃煤和汽车尾气排放污染.此外,多数样品 $\text{C1-PHE}/$



C0 表示对应的母体 PAHs; C1 表示一甲基取代 PAHs
图4 基于 16PAHs 与 aPAHs 的特征比值法
Fig. 4 Characteristic ratio method based on 16PAHs and aPAHs

$C0-PHE > 2$ 而呈成岩源特征^[20]. 因此, 结合 $\sum 16PAHs / \sum PACs$ 、 $FLA / (FLA + PYR)$ 、 $C0 / (C0 + C1)PHE + ANT$ 以及萘和菲及其对应的烷基衍生物分布模式提出: 当 $\sum 16PAHs / \sum PACs < 0.25$ 时主要受煤矿区污染, 并且 $PACs$ 含量越高, 针对煤矿区 $PACs$ 的比值评价指标效果越好^[53].

PMF 的运行结果如图 5 所示, 因子 1 中 $PACs$ 各组分浓度较高, 其中 $aPAHs$ 占比最高, 且 $C0 \sim C5$ NAP 、 $C0 \sim C4$ PHE 在含量上呈“钟形”分布, 说明因子 1 与成岩源(煤和煤矸石颗粒)有关^[44]. 此外, DBF 及其烷基衍生物含量在因子 1 中占比较高, 说明 DBF 也是煤矿开采的重要标志物. 因子 2 中 $16PAHs$ 以 NAP 、 ACE 和 ACY 等 2~3 环为主, 其中, ACE 是木材燃烧的主要成分^[54]; FLA 和 PYR

是生物质燃烧的典型指标^[55,56], 并且 $C0 \sim C5$ NAP 呈“V 型”分布^[53], 因此推测因子 2 为生物质燃烧. 因子 3 以 FLA 、 PYR 、 BaA 、 CHR 、 BbF 、 BkF 、 BaP 和 InP 为主, 由于煤炭燃烧主要产生 3~4 环 $16PAHs$ ^[57], 如 BbF 、 CHR 、 PYR 和 BaP 等. 同时 $aPAHs$ 、 $OPAHs$ 含量和占比较低可能是因为 $16PAHs$ 较其衍生物在热力学上更稳定, 高温燃烧过程中 $aPAHs$ 和 $OPAHs$ 被消耗^[58], 因此推测因子 3 与燃煤有关. 因子 4 中, 除低环的 NAP 、 ACY 、 ACE 、 FLU 和 PHE 外, $OPAHs$ 也占有一定比例, 而低环 $PACs$ 和 DBF 通常与石油产品的泄漏和挥发有关^[45,59]; DBA 是交通源的典型标志物^[60], 因此推测因子 4 来源于交通污染和石油泄漏. 矿区周边高速公路附近存在许多加油站, 并且煤矿运输和居民区日常交通过程中极易出现燃油泄漏现象.

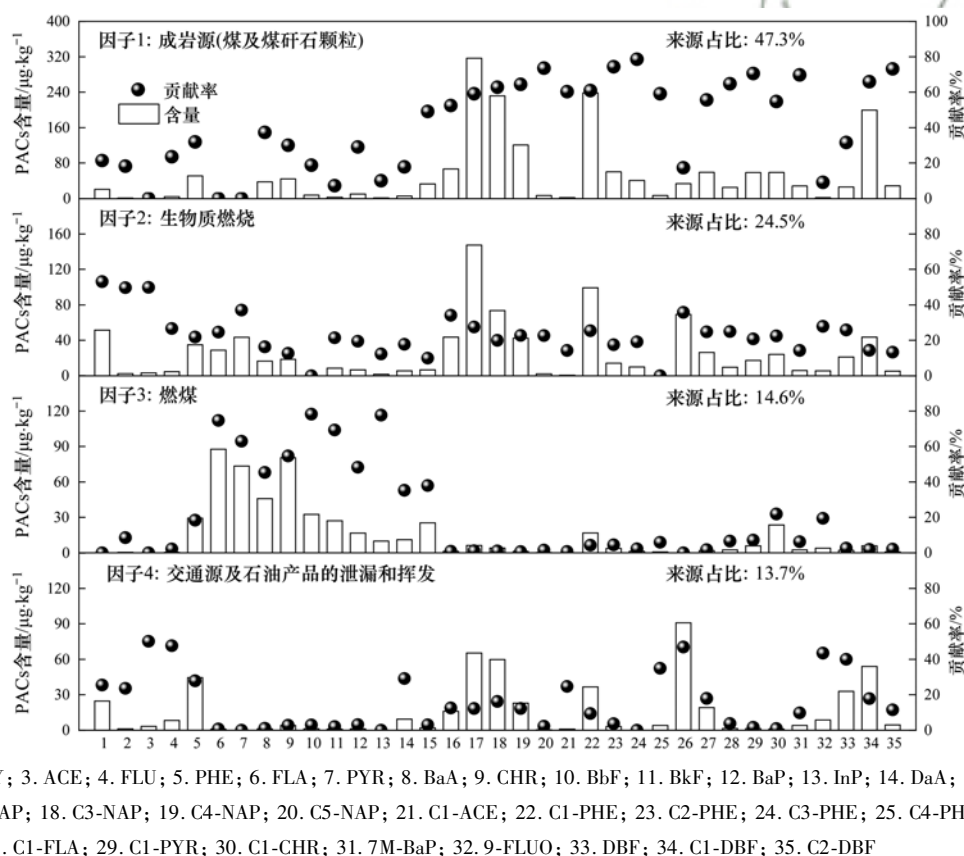


图 5 各来源 PMF 的因子特征和贡献率

Fig. 5 Factor characteristics and contribution rate of PMF from various sources

结合 PMF 因子的贡献率可以看出, 孙疃矿区及周边环境地表尘中 $PACs$ 污染主要来源于煤和煤矸石颗粒扩散, 占比高达 47.3%. 同时, 矿区周边堆积的煤矸石经过长期风化过程表面极易破碎化并随风扩散, 污染周边环境. 其次是附近居民区日常生活中煤和生物质燃烧过程造成的 $PACs$ 污染, 占比分别为 14.6% 和 24.5%; 最后, 交通污染主要有居民日常交通和煤矿运输两部分组成, 并且过程中伴随着

石油产品的挥发和泄漏, 占比为 13.7%. 因此, 应合理控制煤矿开采及运输过程中扬尘的扩散, 加大对废弃矸石堆的资源化利用以降低其对周围环境的污染.

2.4 地表尘中 $PACs$ 的毒性和致癌风险评价

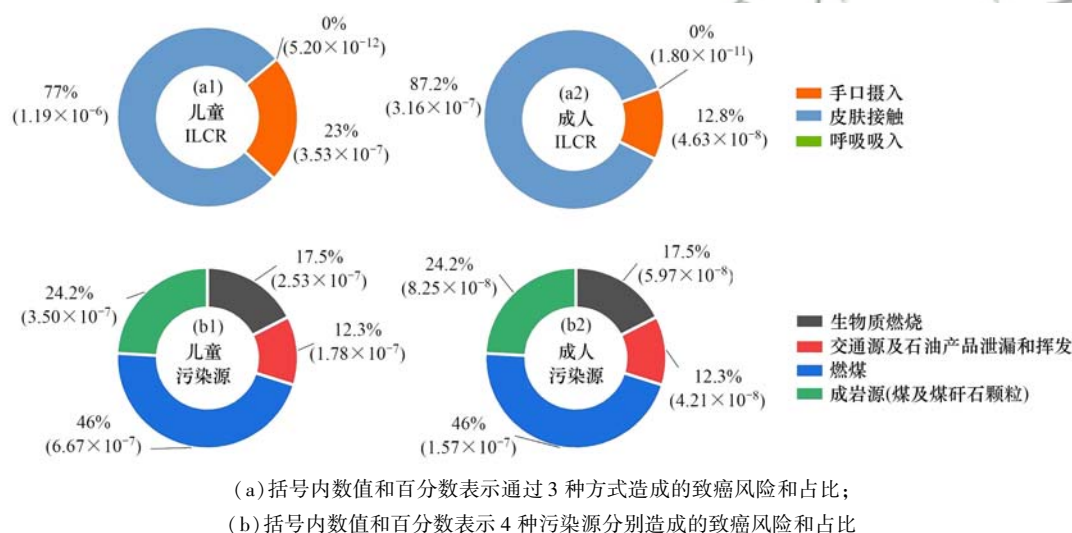
地表尘中 $PACs$ 的毒性用 BaP 毒性当量含量 (TEQ_{BaP}) 表示, 计算结果示于表 1. $\sum TEQ_{16PAHs}$ 在 $5.4 \sim 8909.9 \mu g \cdot kg^{-1}$ 范围内 (均值 433.8

$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), $\sum \text{TEQ}_{\text{aPAHs}}$ 在 $0.2 \sim 578.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内(均值为 $47.4 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),这一结果超过了荷兰土壤标准目标参考值($33.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[61],其中贡献最大的主要来自 7 种高致癌性 PAHs. 尽管从计算结果看 aPAHs 毒性较低,但以 16PAHs 的 TEF 计算 aPAHs 的毒性低估了 aPAHs 的风险,且并未计算 OPAHs 的毒性,实际多环芳烃衍生物的毒性更强.

ILCR 计算结果如图 6(a) 所示,儿童 ILCR 在 $1.45 \times 10^{-7} \sim 2.59 \times 10^{-5}$ 范围内(均值 1.54×10^{-6});成人 ILCR 在 $3.41 \times 10^{-8} \sim 6.11 \times 10^{-6}$ 范围内(均值 3.63×10^{-7}),明显低于儿童. 结合 USEPA 在国家风险计划中划分的 ILCR 等级可以看出^[62],孙疃矿区及周边环境地表尘中 16PAHs 仅对儿童存在潜在致癌风险,对于成人的致癌风险可以忽略不

计. 无论是成人还是儿童,皮肤接触均为 PAHs 进入人体的主要方式,其次是手口摄入,而呼吸吸入可忽略不计. 尽管多环芳烃衍生物的致癌风险没有纳入计算,矿区周边仍存在潜在风险.

结合 PMF 的运行结果计算 4 种来源下儿童与成人的 ILCR 和占比,利用 PMF 模型中 7 种高致癌性 16PAHs 代入 ILCR 公式进行运算. 根据图 6(b) 可以看出:儿童与成人污染源 ILCR 占比类似,尽管成岩源是当地 PACs 的主要来源,但燃煤 ILCR 占比最高(46%);其次是成岩源(煤及煤矸石颗粒),ILCR 占比高达 24.2%;生物质燃烧、交通源及石油产品的泄漏和挥发占比较小,各占 17.5% 和 12.3%. 因此,在治理矿区污染的同时,应合理控制周边居民区及企业的燃煤,推行环保节能的燃煤方式,减少煤炭的不完全燃烧.



(a) 括号内数值和百分数表示通过 3 种方式造成的致癌风险和占比;

(b) 括号内数值和百分数表示 4 种污染源分别造成的致癌风险和占比

图 6 地表尘中 16PAHs 的致癌风险和污染源占比

Fig. 6 Carcinogenic risk of 16PAHs in surface dust and proportion of pollution sources

3 结论

(1) 淮北孙疃矿区地表尘中 $\sum \text{PACs}$ 在 $283.8 \sim 36852.5 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内(均值 $4114.2 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); $\sum 16\text{PAHs}$ 含量(均值 $1074.9 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)约占 $\sum \text{PACs}$ 的 26%,以中低环 PAHs 为主; $\sum \text{aPAHs}$ 含量(均值 $2593.8 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)占 $\sum \text{PACs}$ 的 63%以上,组成上以烷基萘和烷基菲为主; $\sum \text{OPAHs}$ 含量较低(均值 $445.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),主要含有 DBF 及其烷基衍生物. 因此,除 16PAHs 外,多环芳烃衍生物同样存在严重的环境威胁.

(2) 对比 PACs 污染的空间分布可以看出,研究区内 PACs 影响范围较广,且多环芳烃衍生物更适

合作为煤矿污染溯源的指示物. 此外,煤矸石填埋道路附近存在严重的 PACs 污染,应加大对煤矸石的资源化利用.

(3) 特征比值结果显示,当 $\sum 16\text{PAHs} / \sum \text{PACs} < 0.25$ 时主要受煤矿区污染. PMF 结果显示,煤矿开采及煤矸石堆积为 PACs 的主要来源,占比高达 47.3%,其次为煤和生物质燃烧,交通源及石油产品泄漏的占比较低.

(4) 将 ILCR 与 PMF 相结合,可以看出研究区内 PACs 污染已对儿童产生潜在风险. 尽管成岩源是当地 PACs 的主要来源,但煤及生物质燃烧对当地居民致癌风险最高(46%);其次是煤及煤矸石污染,交通污染及石油的挥发与泄漏风险最低.

参考文献:

[1] 张广龙, 曲明昕, 高师昀, 等. 全自动固相萃取-串联四级杆

- 质谱测定水中 16 种多环芳烃[J]. 环境科学导刊, 2015, **34**(5): 92-95.
- Zhang G L, Qu M X, Gao S Y, *et al.* Determination of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in water by auto solid-phase extraction and gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry[J]. Environmental Science Survey, 2015, **34**(5): 92-95.
- [2] Yu H Y, Li T J, Liu Y, *et al.* Spatial distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon contamination in urban soil of China[J]. Chemosphere, 2019, **230**: 498-509.
- [3] 周宇森, 张焕新, 钟玮, 等. 多环芳烃类污染物对斑马鱼胁迫效应的研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, **17**(2): 109-117.
- Zhou Y M, Zhang H X, Zhong W, *et al.* Advances in research on stress effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on zebrafish[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, **17**(2): 109-117.
- [4] Chen S C, Liao C M. Health risk assessment on human exposed to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons pollution sources[J]. Science of the Total Environment, 2006, **366**(1): 112-123.
- [5] WHO. Selected non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons[R]. Geneva: WHO, 1998.
- [6] Meng Y, Liu X H, Lu S Y, *et al.* A review on occurrence and risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in lakes of China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **651**: 2497-2506.
- [7] 张艳红, 李德祥, 张凤桦, 等. 气相色谱质谱联用法测定饲料原料中 16 种多环芳烃[J]. 中国粮油学报, 2020, **35**(9): 150-157.
- Zhang Y H, Li D X, Zhang F P, *et al.* Determination of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in feed materials by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, **35**(9): 150-157.
- [8] 康欣媛, 王国文, 丁小璘, 等. 莱州湾大气颗粒相中多环芳烃及其衍生物的赋存特征[J]. 海洋环境科学, 2022, **41**(1): 113-121.
- Kang X Y, Wang G W, Ding X L, *et al.* Occurrence of different type polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) in particle atmosphere of Laizhou Bay[J]. Marine Environmental Science, 2022, **41**(1): 113-121.
- [9] 张玉洁, 云洋. 环境中的氧化多环芳烃综述[J]. 环境化学, 2021, **40**(1): 150-163.
- Zhang Y J, Yun Y. Oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons in the environment: a review[J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(1): 150-163.
- [10] Golzadeh N, Barst B D, Baker J M, *et al.* Alkylated polycyclic aromatic hydrocarbons are the largest contributor to polycyclic aromatic compound concentrations in traditional foods of the Bigstone Cree Nation in Alberta, Canada[J]. Environmental Pollution, 2021, **275**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116625.
- [11] Cerniglia C E. Fungal metabolism of polycyclic aromatic hydrocarbons: past, present and future applications in bioremediation[J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 1997, **19**(5-6): 324-333.
- [12] Idowu O, Semple K T, Ramadass K, *et al.* Analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their polar derivatives in soils of an industrial heritage city of Australia[J]. Science of the Total Environment, 2020, **699**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134303.
- [13] Bandowe B A M, Wei C, Han Y M, *et al.* Polycyclic aromatic compounds (PAHs, oxygenated PAHs, nitrated PAHs and azaarenes) in soils from China and their relationship with geographic location, land use and soil carbon fractions[J]. Science of the Total Environment, 2019, **690**: 1268-1276.
- [14] 付璐婧, 乔梦, 赵旭, 等. 京津潮白河多环芳烃及其衍生物分布[J]. 生态毒理学报, 2019, **14**(3): 233-239.
- Fu L J, Qiao M, Zhao X, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives in Chaobai river of Beijing-Tianjin area[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, **14**(3): 233-239.
- [15] Lin Y X, Deng W, Li S Y, *et al.* Congener profiles, distribution, sources and ecological risk of parent and alkyl-PAHs in surface sediments of Southern Yellow Sea, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, **580**: 1309-1317.
- [16] Han M S, Kong J J, Yuan J L, *et al.* Method development for simultaneous analyses of polycyclic aromatic hydrocarbons and their nitro-, oxy-, hydroxy- derivatives in sediments[J]. Talanta, 2019, **205**, doi: 10.1016/j.talanta.2019.120128.
- [17] Li J S, Yang L X, Gao Y, *et al.* Seasonal variations of NPAHs and OPAHs in PM_{2.5} at heavily polluted urban and suburban sites in North China: concentrations, molecular compositions, cancer risk assessments and sources[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **178**: 58-65.
- [18] 李宏宇, 李沛祺, 黄娟, 等. 兰州市大气 OPAHs 污染特征及潜在来源分析[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(8): 3561-3571.
- Li H Y, Li P Q, Huang J, *et al.* Pollution characteristics and potential pollution source regions of atmospheric OPAHs in Lanzhou[J]. China Environmental Science, 2022, **42**(8): 3561-3571.
- [19] Ren K F, Wei Y, Li J H, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their derivatives (oxygenated PAHs, azaarenes, and sulfur/oxygen-containing heterocyclic PAHs) in surface soils from a typical city, south China[J]. Chemosphere, 2021, **283**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131190.
- [20] Chen W X, Wu X Y, Zhang H Y, *et al.* Contamination characteristics and source apportionment of methylated PAHs in agricultural soils from Yangtze River Delta, China[J]. Environmental Pollution, 2017, **230**: 927-935.
- [21] Wang P C, Qi A A, Huang Q, *et al.* Spatial and temporal variation, source identification, and toxicity evaluation of brominated/chlorinated/nitrated/oxygenated-PAHs at a heavily industrialized area in eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2022, **822**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153542.
- [22] 查燕, 张银龙. 城市地表尘中多环芳烃来源、暴露特征及生态风险评价[J]. 中国城市林业, 2015, **13**(3): 6-12.
- Zha Y, Zhang Y L. Source, exposure characteristic and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban surface dust[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2015, **13**(3): 6-12.
- [23] Bandowe B A M, Nkansah M A. Occurrence, distribution and health risk from polycyclic aromatic compounds (PAHs, oxygenated-PAHs and azaarenes) in street dust from a major West African Metropolis[J]. Science of the total Environment, 2016, **553**: 439-449.
- [24] Gope M, Masto R E, Basu A, *et al.* Elucidating the distribution and sources of street dust bound PAHs in Durgapur, India: a probabilistic health risk assessment study by Monte-Carlo simulation[J]. Environmental Pollution, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115669.
- [25] 曾迪娅, 陈志伟, 张彬. 成都市室内灰尘中多环芳烃的浓度

- 及风险评估[J]. 能源与环境, 2022, (4): 111-113.
- [26] 张春辉, 郭建阳, 石顺权, 等. 贵阳市主干道降尘中的多环芳烃及其健康风险评估[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(10): 2810-2816.
- Zhang C H, Guo J Y, Shi S Q, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons and their health risk assessment in urban surface dust from main roads of Guiyang, Southwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, **33**(10): 2810-2816.
- [27] Lorenzi D, Entwistle J A, Cave M, *et al.* Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust: implications for human health[J]. Chemosphere, 2011, **83**(7): 970-977.
- [28] Mostafa A R, Hegazi A H, El-Gayar M S, *et al.* Source characterization and the environmental impact of urban street dusts from Egypt based on hydrocarbon distributions[J]. Fuel, 2009, **88**(1): 95-104.
- [29] 张俊叶, 俞菲, 刘晓东, 等. 城市森林植物叶面颗粒物中重金属和多环芳烃的研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2019, **21**(10): 140-147.
- Zhang J Y, Yu F, Liu X D, *et al.* Advance of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in foliar particulate matter of urban forest plants[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, **21**(10): 140-147.
- [30] Wei C, Bandowe B A M, Han Y M, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their derivatives (alkyl-PAHs, oxygenated-PAHs, nitrated-PAHs and azaarenes) in urban road dusts from Xi'an, Central China[J]. Chemosphere, 2015, **134**: 512-520.
- [31] 张俊叶, 俞菲, 俞元春. 中国主要地区表层土壤多环芳烃含量及来源解析[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(6): 1059-1067.
- Zhang J Y, Yu F, Yu Y C. Content and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil in major areas of China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(6): 1059-1067.
- [32] 刘静静, 王儒威, 刘桂建, 等. 淮北芦岭矿区土壤中PAHs的分布特征及分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2010, **40**(7): 661-666.
- Liu J J, Wang R W, Liu G J, *et al.* Concentrations, distributions, and source of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil of Luling coal mine in Huaibei[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2010, **40**(7): 661-666.
- [33] 刘凯旋, 刘启蒙, 柴辉婵, 等. 孙疃矿区地下水化学特征及其控制因素研究[J]. 煤炭工程, 2019, **51**(4): 74-79.
- Liu K X, Liu Q M, Chai H C, *et al.* Chemical characteristics and control factors of groundwater in Suntuan coal mine[J]. Coal Engineering, 2019, **51**(4): 74-79.
- [34] 任泽强, 何金先, 董守华, 等. 淮北孙疃煤矿下石盒子组主采煤层沉积环境与聚煤特征[J]. 中国煤炭地质, 2018, **30**(10): 10-14, 60.
- Ren Z Q, He J X, Dong S H, *et al.* Xiashihezi formation main mineable coal seam sedimentary environment and coal accumulation features in Suntuan coalmine, Huaibei[J]. Coal Geology of China, 2018, **30**(10): 10-14, 60.
- [35] 钱雅慧, 汪婷, 洪秀萍, 等. 煤矿区地表土中烷基多环芳烃的定量方法研究[J]. 质谱学报, 2022, **43**(2): 168-177.
- Qian Y H, Wang T, Hong X P, *et al.* Quantitative method of alkyl polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils of coal mines[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2022, **43**(2): 168-177.
- [36] Liang M, Liang H D, Rao Z, *et al.* Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban-rural integration area soil, North China: spatial distribution, sources and potential human health risk assessment[J]. Chemosphere, 2019, **234**: 875-884.
- [37] 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.
- [38] 张雅茹, 桂和荣, 黄伊恒. 煤矿周边土壤多环芳烃研究方法综述[J]. 内蒙古煤炭经济, 2020, (7): 1-4.
- [39] 娜孜拉·扎曼别克, 孔利锋, 沙拉·托合塔尔汗, 等. 新疆准东煤矿开采区降尘中PAHs的污染特征及健康风险[J]. 中国资源综合利用, 2019, **37**(10): 17-21, 46.
- Zamanbek N, Kong L F, Tohtarhan S, *et al.* Pollution characteristics and health risks of PAHs in dustfall in mining Area of Zhundong coal mine in Xinjiang [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, **37**(10): 17-21, 46.
- [40] 袁珂月, 钱雅慧, 许丹丹, 等. 内蒙古乌达矿区土壤多环芳烃空间分布特征及分析[J]. 地球与环境, 2022, **50**(5): 698-707.
- Yuan K Y, Qian Y H, Xu D D, *et al.* Distribution characteristics of soil PAHs in Wuda mining area, Inner Mongolia [J]. Earth and Environment, 2022, **50**(5): 698-707.
- [41] Liu J J, Liu G J, Zhang J M, *et al.* Occurrence and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil from the Tiefs coal mine district, Liaoning, China [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2012, **14**(10): 2634-2642.
- [42] 孙翔, 王锋文, 郭天锋, 等. 重庆废弃煤矿区表层土壤多环芳烃污染特征及风险评价[J]. 地球与环境, 2019, **47**(4): 502-509.
- Sun X, Wang F W, Guo T F, *et al.* Occurrence and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in topsoil of an abandoned coal mine area in Chongqing [J]. Earth and Environment, 2019, **47**(4): 502-509.
- [43] 冯松宝, 顿亚鹏, 刘瑞. 淮北煤田二叠系煤的元素特征-以孟庄和孙疃煤矿为例[J]. 宿州学院学报, 2014, **29**(5): 81-83.
- Feng S B, Dun Y P, Liu R. The elements characteristics of Huaibei coalfield-taking the Mengzhuang coalmine and Sun tuan coalmine as examples[J]. Journal of Suzhou University, 2014, **29**(5): 81-83.
- [44] Hindersmann B, Achten C. Urban soils impacted by tailings from coal mining: PAH source identification by 59 PAHs, BPCA and alkylated PAHs[J]. Environmental Pollution, 2018, **242**: 1217-1225.
- [45] 谷元龙. 准噶尔盆地玛湖凹陷西斜坡原油油源解析——基于单体烃碳同位素组成和分子比值与浓度定量分析[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2021.
- Gu Y L. Determination of oil sources in the western slope of Mahu Sag, Junggar Basin on the basis of compound specific carbon isotopes and molecular parameters and concentrations [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [46] Jiao H H, Wang Q, Zhao N N, *et al.* Distributions and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils around a chemical plant in Shanxi, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, **14**(10), doi: 10.3390/ijerph14101198.
- [47] Maliszewska-Kordybach B. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agroecosystems-example of Poland [J]. Polycyclic Aromatic

- Compounds, 2000, **21**(1-4): 287-295.
- [48] 林超霸, 张馥颖, 朱雪竹, 等. 我国农业土壤及农作物中多环芳烃污染特征与来源[J]. 生物加工过程, 2021, **19**(4): 440-447.
- Lin C B, Zhang F Y, Zhu X Z, *et al.* Characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons contaminations in agricultural soils and crops in China[J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2021, **19**(4): 440-447.
- [49] Wang W, Huang M J, Kang Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban surface dust of Guangzhou, China: status, sources and human health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(21): 4519-4527.
- [50] Chen Y N, Zhang J Q, Zhang F, *et al.* Contamination and health risk assessment of PAHs in farmland soils of the Yinma River Basin, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **156**: 383-390.
- [51] Luo X J, Chen S J, Mai B X, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in suspended particulate matter and sediments from the Pearl River Estuary and adjacent coastal areas, China[J]. Environmental Pollution, 2006, **139**(1): 9-20.
- [52] Pies C, Hoffmann B, Petrowsky J, *et al.* Characterization and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in river bank soils[J]. Chemosphere, 2008, **72**(10): 1594-1601.
- [53] Hindersmann B, Förster A, Achten C. Novel and specific source identification of PAH in urban soils: alk-PAH-BPCA index and "V"-shape distribution pattern[J]. Environmental Pollution, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113594.
- [54] Biache C, Mansuy-Huault L, Faure P. Impact of oxidation and biodegradation on the most commonly used polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) diagnostic ratios: implications for the source identifications[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **267**: 31-39.
- [55] Chen Y J, Sheng G Y, Bi X H, *et al.* Emission factors for carbonaceous particles and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustion in China[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(6): 1861-1867.
- [56] Zuo Q, Duan Y H, Yang Y, *et al.* Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil in Tianjin, China[J]. Environmental Pollution, 2007, **147**(2): 303-310.
- [57] Wang C H, Wu S H, Zhou S L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from urban to rural areas in Nanjing: concentration, source, spatial distribution, and potential human health risk[J]. Science of the Total Environment, 2015, **527-528**: 375-383.
- [58] Saha M, Togo A, Mizukawa K, *et al.* Sources of sedimentary PAHs in tropical Asian waters: differentiation between pyrogenic and petrogenic sources by alkyl homolog abundance[J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, **58**(2): 189-200.
- [59] 杨剑洲, 龚晶晶, 马生明, 等. 海南岛北部种植园土壤中多环芳烃的质量分数、来源及生态风险[J]. 地质科技通报, 2021, **40**(6): 268-275.
- Yang J Z, Gong J J, Ma S M, *et al.* Contents, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in agricultural soils of plantations in northern Hainan Island[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, **40**(6): 268-275.
- [60] 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.
- [61] VROM. Environmental quality objectives in the Netherlands: a review of environmental quality objectives and their policy framework in the Netherlands[M]. The Hague: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, 1994.
- [62] Ouyang R T, Yang S D, Xu L Y. Analysis and risk assessment of PM_{2.5}-bound PAHs in a comparison of indoor and outdoor environments in a middle school: a case study in Beijing, China[J]. Atmosphere, 2020, **11**(9): 904, doi: 10.3390/atmos11090904.

CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O ₃ Based on Explainable Machine Learning	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O ₃ Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM _{2.5} Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM _{2.5} Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM _{2.5} Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatial-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waqinhui River	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H ₂ O ₂ and Oxidize Organic Micropollutants in Water	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrilotris (Methylene Phosphonic Acid)	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulphurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i>	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)