

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期
Vol.42 No.5

目 次

北京冬季 PM _{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析	徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)
北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析	尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)
北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析	廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)
青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比	孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)
太原市城乡居民采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价	黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)
西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价	范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)
超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征	胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)
合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析	姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)
郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响	董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳葆, 张瑞芹 (2179)
2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析	钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)
天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征	张喆, 王建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)
基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法	杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)
太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化	李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)
松花湖水空间差异及富营养化空间自相关分析	丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)
会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价	朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)
京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素	程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)
次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响	罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)
碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋	任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)
冰封状态下里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异	李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)
城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析: 以京津冀北运河为例	邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰茗, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)
太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素	赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)
三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系	陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)
铁硫改性生物炭去除水中的磷	桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)
钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析	罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)
BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附	王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)
Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能	高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)
可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A	张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)
铁钛共掺杂氧化铝诱导表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物	张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)
硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制	屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)
电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制	曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)
缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制	李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)
反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响	吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)
基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺	薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)
活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响	马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)
6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制	凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)
中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素	李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)
不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征	刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)
青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析: 以祁连山和藏东南地区为例	何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)
基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价	胡梦琨, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)
长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响	夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)
川南山区土壤与农作物重金属特征及成因	韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)
宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价	杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)
重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性	庞发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾宪, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)
典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响	张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱捍华, 朱奇宏 (2512)
油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响	蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)
土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响	徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)
渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落	程森, 路平, 冯启言 (2541)
3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响	李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)
污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨	陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)
《环境科学》征订启事 (2439)	
《环境科学》征稿简则 (2479)	
信息 (2152, 2231, 2286)	

宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价

杨帆¹, 罗红雪¹, 钟艳霞^{1,2,3*}, 王幼奇¹, 白一茹¹

(1. 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 银川 750021; 3. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021)

摘要: 为了解宁东能源化工基地核心区表层土壤多环芳烃(PAHs)的污染现状,按网格布点法在宁东能源化工基地核心区采集了146个代表性表层土壤样品,分析了16种优控多环芳烃(PAHs)的含量。结果表明,16种优控PAHs均检出,表层土壤中 $\sum$ PAHs含量介于ND~123.12 mg·kg⁻¹之间,平均值为10.19 mg·kg⁻¹;空间上存在3个PAHs高含量区,为研究区的西北部、西南部以及东部,且不同PAHs区域分异性显著;源解析表明宁东基地PAHs污染为混合源,石油污染、燃煤、交通污染及汽油源对 $\sum$ PAHs的贡献分别为39.4%、33.3%、19.2%和8.1%;质量基准与质量标准法生态风险评价表明,该区域PAHs产生的生态影响较小,出现负面生态效应的可能性较低;健康风险评价结果表明,该区域土壤PAHs对于不同年龄段的人群不存在潜在的致癌风险,主要的暴露途径是皮肤接触>误食>呼吸吸入。

关键词: 宁东能源化工基地; 多环芳烃(PAHs); 污染特征; 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(2021)05-2490-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.202009096

Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base

YANG Fan¹, LUO Hong-xue¹, ZHONG Yan-xia^{1,2,3*}, WANG You-qi¹, BAI Yi-ru¹

(1. College of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China, Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to evaluate the pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the topsoil of the core area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, 146 representative topsoil samples were collected using the grid method and the contents of 16 priority PAHs were analyzed. The results showed that the content of $\sum$ PAHs in topsoil ranged from ND to 123.12 mg·kg⁻¹ with an average of 10.19 mg·kg⁻¹. There were three high PAHs distribution areas in the northwest, southwest, and east of the core area. The source apportionment showed that the sources of PAHs in the Ningdong base were complex, and the main pollution sources were petroleum, coal combustion, traffic, and gasoline, which contributed 39.4%, 33.3%, 19.2%, and 8.1% to the total PAHs sources, respectively. The ecological risk assessment of the quality basis and quality standard method showed that the ecological impact of PAHs in the core area was slight and the possibility of negative ecological effects was low. The results of the health risk assessment showed that the order of exposure of the topsoil PAHs was skin contact > swallowing > respiratory inhalation, and the topsoil PAHs in the core area of the Ningdong base posed no potential carcinogenic risk to people of different ages.

Key words: Ningdong energy and chemical industry base; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); pollution characteristics; source apportionment; risk assessment

宁东能源化工基地(宁东基地)是国家重要的大型煤炭生产基地、“西电东送”火电基地、煤化工产业基地和循环经济示范区,被全国主体功能区规划确定为国家层面的重点开发区域。宁东基地自2003年开发建设以来,形成了煤炭、电力和煤化工三大主导产业的集群化发展,2017年工业总产值占全区的34.5%,已成为宁夏工业经济发展的重要引擎。在“绿水青山就是金山银山”的理念指导下,2017年宁夏回族自治区第十二次党代会将“生态立

区”战略确立为宁夏发展的三大战略之一。2020年6月8日,习近平总书记提出,宁夏要切实担负起建设黄河流域生态保护和高质量发展先行区的时代重

收稿日期: 2020-09-09; 修订日期: 2020-10-28

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2020AAC03052); 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)

作者简介: 杨帆(1977~),男,博士,主要研究方向为液相色谱分析、污染物空间分布与迁移, E-mail: hustamao@nxu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhongyx_w@163.com

任. 宁东基地距黄河仅 35 km, 目前探明的煤炭资源储量为 331 亿 t, 其三大主导产业及相关的公路运输均会产生多环芳烃, 而由此产生的风险却不得而知.

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 属于具有“三致”效应和较强的生态毒性的一类持久性有机污染物, 有 16 种 PAHs 被美国环保署 (USEPA) 列入优先控制的有毒有机污染物黑名单中^[1]. 土壤作为重要的环境介质, 在不断发展演变的工业化进程中已成为 PAHs 重要的汇, 且储存了环境中超过 90% 的 PAHs^[2]. 土壤中的 PAHs 除了对生态环境安全造成极大的威胁, 还会通过食物链等途径进入人体, 以生物蓄积、生物转化或化学反应等方式损害人体健康^[3,4]. 国内研究表明^[5~9], 废弃煤矿区、煤化工基地、钢铁企业、石化企业和燃煤电厂周边的表层土壤均受到不同程度的污染, 存在一定的生态风险. 刘江生^[10]对东北老工业基地浑蒲灌区土壤研究发现, 浑蒲灌区土壤中的生态风险处于中等和偏低水平, PAHs 对人体健康有一定的潜在风险. 目前, 针对 PAHs 的源解析, 主要方法包括特征比值法、诊断比率 (DR)、层次聚类分析 (HCA)、主成分分析 (PCA)、正定矩阵因子分解模型 (PMF) 和多元线性回归分析 (MLRA)^[11]. 其中, PMF 法可分析诸如化石燃料燃烧、煤炭燃烧和交通排放等特定来源, 并计算出每种来源的贡献率. 张希^[12]利用 PMF 模型, 根据因子贡献率得到上海道路旁表层土壤中 PAHs 的主要来源为交通排放. 袁文森^[13]对陕北能源化工基地土壤中 PAHs 健康风险评价发现, 终生致癌风险值 ($ILCRs_{\text{误食}}$) 是成人大于儿童, $ILCRs_{\text{皮肤接触}}$ 也是成人高于儿童.

本文以宁东基地核心区表层土壤为研究对象, 探讨了 16 种优控 PAHs 的分布特征、污染水平与健康风险, 对制定区域 PAHs 污染防治对策, 促进黄河流域生态安全 and 高质量发展、污染防治及保障民生具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁东基地所处的地形以低山丘陵和山地为主, 遍布半固定沙丘和平铺沙地, 西部和南部较高, 北部较低, 典型的大陆性气候, 具有干燥、雨量少而集中、蒸发量大、日照时间长和冬春季风沙多等特点, 年平均气温为 6.7~8.8℃. 研究区内的土壤有机质含量不足 1%, 植被覆盖度仅有 10%~25%, 属于 IV 级覆盖度, 植被分布稀少、类型单一, 通常以半灌木或草本植物为主, 生态脆弱度为 II 级中度脆弱.

1.2 点位布置及样品采集

基于网格布点法, 结合现实的采样条件, 在宁东基地核心区设置了 146 个采样点, 于 2019 年 5 月~6 月进行表层土壤 (0~20 cm) 样品采集, 采样点分布见图 1. 依据“五点法”在每个采样点划定一个正方形地块 (5 m×5 m), 避开人工填充物并去除地表的杂物, 在地块的四角及中心位置分别用不锈钢铲各采集一个土样, 将 5 个土样在野外充分混合均匀得到一个土壤样品 (约 500 g). 样品置于洁净的棕色磨口玻璃瓶中保存, 运输过程中避光、密封和冷藏, 如不能及时分析, 于 4℃ 冷藏、避光和密封保存.

1.3 主要仪器与试剂

高效液相色谱仪 (日本岛津 LC-15C, 配自动进

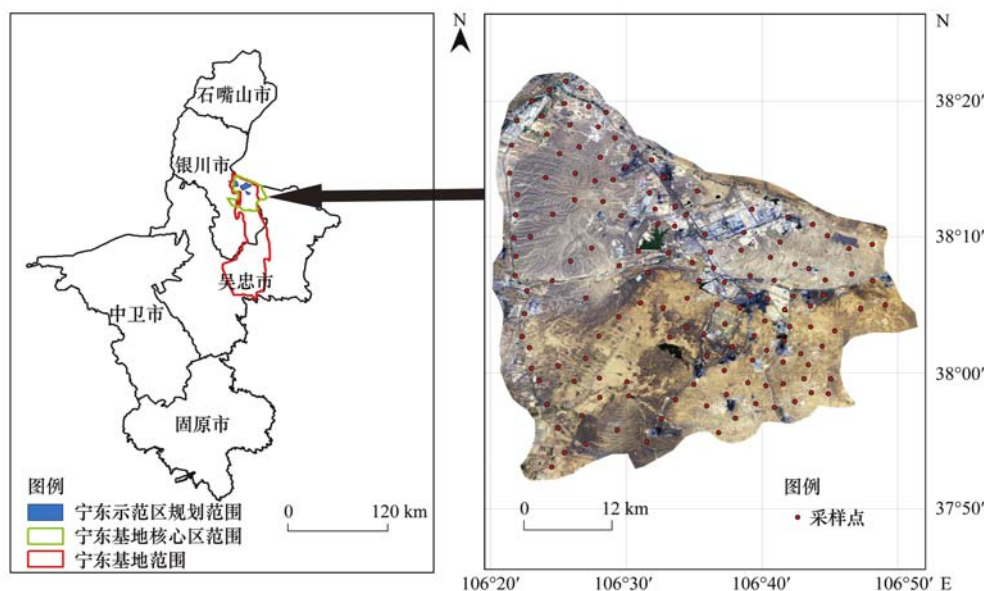


图 1 研究区采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points in the research area

样器); 超声波清洗器(洁汇超声洗净设备有限公司,PS-40A); 超声破碎提取仪(宁波新芝生物科技,SCINETZ-08 型探针式); 冷冻离心机(上海安亭科学仪器厂,TDL-40B 型); 固相萃取柱(迪马科技 ProElut C18 PK30, 500 mg, 6 mL); 固相萃取装置(北京康林科技有限公司,SPE57044 型); 无油隔膜真空泵(天津津腾实验设备有限公司,GM-0.33A 型); 氮吹浓缩仪(上海梓桂仪器有限公司,ZGDCY-24 型); 马弗炉(沈阳市节能电炉厂,SX2-1013); 有机系滤头(0.22 μm); 微量进样器(500、100 和 50 μL,上海高鸽工贸有限公司); 电子天平(万分之一,上海佑科仪器仪表有限公司,FA1004B); 超纯水仪(上海和泰仪器有限公司,QH-DI-15).

正己烷、丙酮、二氯甲烷为分析纯试剂,乙腈为色谱纯试剂. 无水硫酸钠(分析纯,使用前在 400℃ 下用马弗炉灼烧 6 h). 用甲醇溶解的 200 mg·mL⁻¹ 的 16 种 PAHs 混合标液 1 mL,使用时用色谱纯乙腈配成贮备溶液并稀释成标准梯度.

1.4 样品前处理

分析前,将土壤样品从冰箱取出,室温风干,用玛瑙研钵研磨过 60 目筛. 然后各称取 5.00 g 土壤样品,放入 50 mL 玻璃离心管中,加入提取剂正己烷-丙酮(1+1)25 mL,利用探针式超声波提取仪超声提取 5 min, 4500 r·min⁻¹ 离心 15 min 后转移上清液至 50 mL 离心管中,在残渣中再加入提取剂,重复超声提取,合并两次提取液于离心管中. 样品的净化与浓缩采用《土壤和沉积物 多环芳烃的测定 高效液相色谱法》(HJ 784-2016)中推荐的 C18 固相萃取柱和氮吹浓缩方法,将浓缩液过 0.22 μm 有机系滤膜过滤,进样测定.

1.5 分析方法

待测组分为美国环保署确定的优先控制的 16 种 PAHs,包括萘(Nap)、苊烯(Acy)、苊(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、蒾

(Chry)、苯并[a]蒽(BaA)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[a,h]蒽(DahA)、茚并[1,2,3-c,d]芘(InP)和苯并[g,h,i]芘(BghiP).

依据(HJ 784-2016)确定 HPLC 分析条件:柱温 35℃,流动相 A:超纯水; B:乙腈,梯度洗脱程序为:0~8 min,A 为 40%,B 为 60%; 8~18 min,B 由 60% 增至 100%; 18~28 min,B 保持 100%; 28~28.5 min,B 由 100%降低为 60%; 28~28.5 min,B 为 60%. 流速为 1 mL·min⁻¹,进样量为 10 μL,紫外检测器的吸收波长设定为 254 nm,外标法进行定量.

1.6 质量控制与保证

为保证实验结果的准确性和可靠性,样品测定之前做加标回收实验,替代物十氟联苯回收率控制范围为 63%~110%,各 PAHs 单体标准回归方程系数 $R^2 \geq 0.994$; 以石英砂代替土样设置空白样品,以检查可能存在的干扰,进行样品数据分析时,减去空白值,以减少环境因素对实验结果的影响.

1.7 数据处理

1.7.1 单因子及内梅罗指数法

单因子污染指数法及内梅罗污染指数法是常用的土壤有机物污染现状评价方法. 内梅罗污染指数法可以综合考虑所有因素,并突出显示高浓度污染物对环境质量的影响,因此采用这两种方法对土壤中的 PAHs 污染程度进行评价. 土壤综合污染程度分级标准见表 1.

单因子污染指数:

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

内梅罗综合指数:

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

式中, C_i 为土壤中污染物 i 的实测值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), S_i 是 PAHs 的评价标准值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

表 1 土壤综合污染程度分级标准

Table 1 Classification standard of the soil comprehensive pollution degree

项目	清洁	尚清洁	轻度污染	中度污染	重度污染
$P_{综}$	$P_{综} \leq 0.7$	$0.7 < P_{综} \leq 1.0$	$1.0 < P_{综} \leq 2.0$	$2.0 < P_{综} \leq 4.0$	$P_{综} > 4.0$
污染级别	I	II	III	IV	V

1.7.2 正定矩阵因子分解模型(PMF)

PMF 模型是一种基于因子分析的方法,具有不需要测量源指纹谱、分解矩阵中元素非负、可以利用数据标准偏差来进行优化等优点^[14]. PMF 假设 X 为 $n \times m$ 矩阵, n 为样品数, m 为化学成分数目,那么 X 可以分解为两个矩阵,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:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} \right]^2 / u_{ij} \tag{3}$$

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} 为每个样品/污染物种类的不确定性,计算方

法如下:

$$S_{ij} = \begin{cases} (5/6) \times L_{MDL}, & (x_{ij} \leq L_{MDL}), \\ \sqrt{(RSD \times x_{ij})^2 + (L_{MDL})^2}, & (x_{ij} > L_{MDL}). \end{cases} \quad (4)$$

式中,RSD 为化合物浓度值的相对标准偏差, L_{MDL} 为方法检出限.

1.7.3 终生致癌风险

终生癌症风险增量 (incremental lifetime cancer risk,ILCRs) 模型被广泛应用于环境介质中 PAHs 的健康风险评估^[15]. 因此,本文采用 USEPA 推荐的终生致癌风险 (ILCRs) 评估 PAHs 通过直接误食、皮肤接触和吸入对人体的潜在致癌风险. 3 种直接暴露途径对人体产生的终生致癌风险 (ILCRs) 公式如下:

$$ILCR_{\text{误食}} = \frac{C_{\text{土壤}} \times CSF_{\text{误食}} \times \sqrt[3]{BW/70}}{BW \times AT \times 10^6} \times IR_{\text{误食}} \times EF \times ED \quad (5)$$

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

$$ILCR_{\text{呼吸}} = \frac{C_{\text{土壤}} \times CSF_{\text{呼吸}}}{BW \times AT} \times \sqrt[3]{BW/70} \times IR_{\text{呼吸}} \times EF \times ED \quad (7)$$

$$C_{\text{土壤}} = \sum (C_i \times TEF_i) \quad (8)$$

$$CR = \sum (ILCR_{\text{误食}} + ILCR_{\text{呼吸}} + ILCR_{\text{皮肤接触}}) \quad (9)$$

式中, $C_{\text{土壤}}$ 表示土壤中 PAHs 单体基于 BaP 的等效毒性当量含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); CSF 为致癌斜率因子

$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, $CSF_{\text{误食}} = 7.3$, $CSF_{\text{呼吸}} = 3.85$ 和 $CSF_{\text{皮肤接触}} = 25$; 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 ; 公式中其他参数的取值来自文献 [16]. $C_{\text{土壤}}$ 由公式(8)计算得到; C_i 表示土壤 PAHs 的单体 i 的测量含量; TEF_i 是第 i 种 PAHs 单体基于 BaP 的毒性当量因子. CR 为手口误食土壤、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 ($CR < 10^{-6}$),存在潜在健康风险 ($10^{-6} < CR < 10^{-4}$),存在健康风险 ($CR > 10^{-4}$).

2 结果与讨论

2.1 表层土壤 PAHs 含量及组成特征

宁东基地核心区 146 个表层土壤样品 PAHs 描述性统计见表 2. 16 种优控 PAHs 均检出,蒽、荧蒽和苯并[k]荧蒽的检出率较低,苯并[b]荧蒽的检出率为 100%. 单体组分中含量较高的分别为萘、芴烯及蒎,最高的是 2 环的萘,含量介于 ND ~ 69.30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值为 3.69 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. $\sum$ PAHs 含量介于 ND ~ 123.12 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 10.19 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\sum$ PAHs 含量受萘影响大. 7 种致癌性物质:苯并[a]蒽、蒎、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、苯并[a]芘、二苯并[a,h]蒽及茚并[1,2,3-c,d]芘的含量占 $\sum$ PAHs 含量的 7.36%. 致癌性最强的苯并[a]芘浓度范围为 ND ~ 0.23 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为

表 2 宁东化工基地表层土壤 PAHs 描述性统计¹⁾

Table 2 Descriptive statistics of the surface soil PAHs in Ningdong the chemical base								
PAHs	环数	TEF	最小值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最大值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	平均值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准差 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	变异系数 /%	检出率 /%
萘 (Nap)	2	0.001	ND	69.30	3.69	13.34	3.61	81.51
芴烯 (Acy)	3	0.001	ND	38.06	5.53	6.68	1.21	89.04
芴 (Ace)	3	0.001	ND	2.56	0.03	0.21	8.10	69.18
芴 (Flu)	3	0.001	ND	0.18	0.02	0.03	1.37	63.01
菲 (Phe)	3	0.001	ND	0.96	0.09	0.14	1.51	90.41
蒽 (Ant)	3	0.01	ND	0.16	0.01	0.02	3.10	22.60
荧蒽 (Fla)	4	0.001	ND	0.04	0.00	0.01	2.81	30.14
芘 (Pyr)	4	0.001	ND	0.92	0.06	0.15	2.36	86.30
苯并[a]蒽 (BaA)	4	0.1	ND	0.65	0.04	0.10	2.29	75.34
蒎 (Chry)	4	0.01	ND	8.09	0.58	1.31	2.24	92.47
苯并[b]荧蒽 (BbF)	5	0.1	0.00	0.12	0.01	0.02	1.18	100.00
苯并[k]荧蒽 (BkF)	5	0.1	ND	0.16	0.01	0.02	3.81	19.18
苯并[a]芘 (BaP)	5	1	ND	0.23	0.01	0.03	3.52	38.36
二苯并[a,h]蒽 (DahA)	5	1	ND	1.27	0.06	0.18	2.93	73.29
苯并[g,h,i]芘 (BghiP)	6	0.01	ND	0.09	0.01	0.02	2.17	43.15
茚并[1,2,3-c,d]芘 (InP)	6	0.1	ND	0.32	0.04	0.06	1.41	80.14
$\sum$ PAHs	—	—	0.00	123.12	10.19	22.29	43.64	65.88

1) “—”表示物质无相关数据; ND 表示未检出

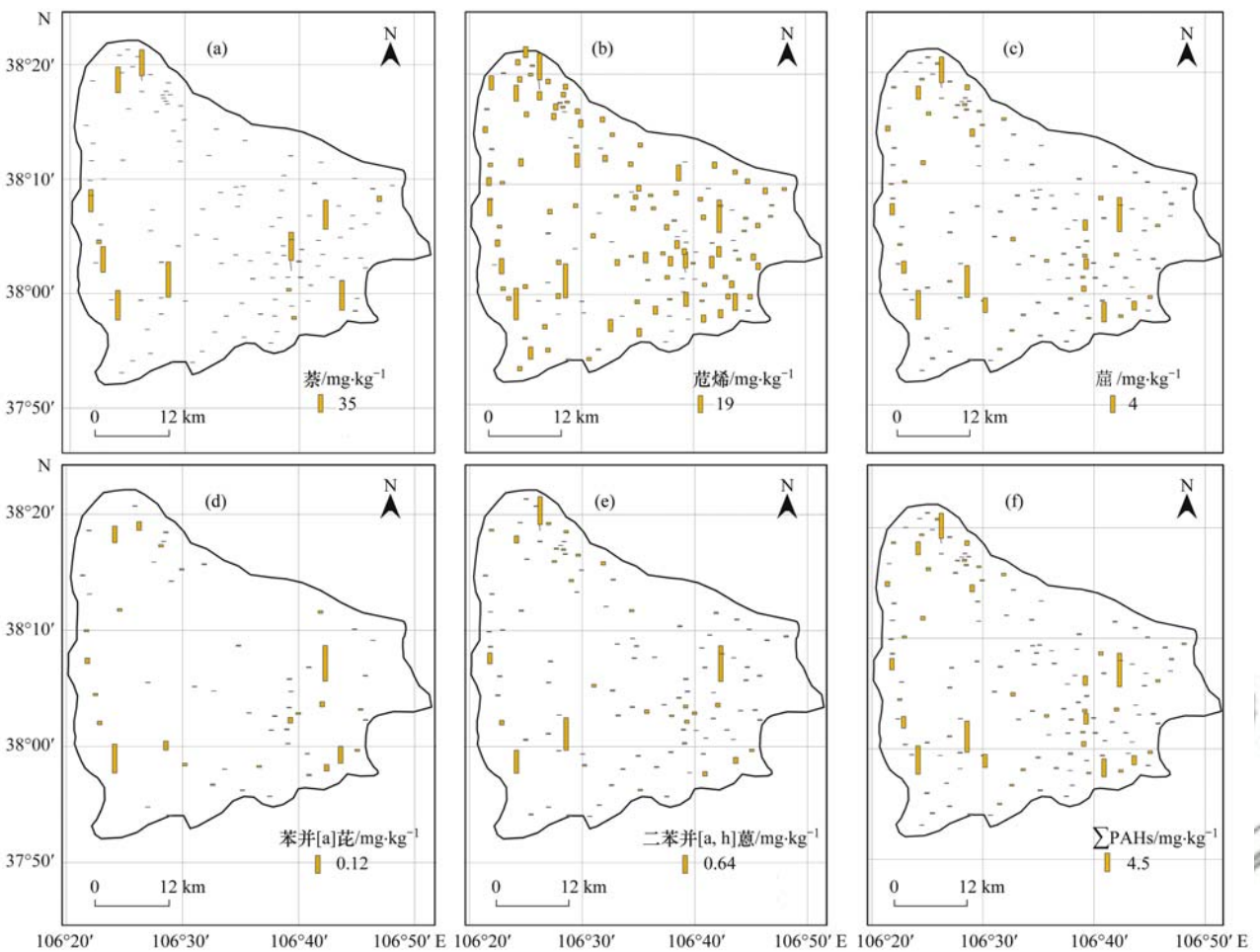


图2 含量较高 PAH 及 $\sum$ PAHs 的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the high concentration PAH monomer and $\sum$ PAHs contents

0.01 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 图 2 为含量较高的 PAHs 单体及 $\sum$ PAHs 的空间分布,其余 PAHs 单体空间分布(略). 单体变异系数均 $>100\%$,其中萘、苊、蒽、荧蒽、芘、苯并[a]蒽、蒽、苯并[k]荧蒽、苯并[a]芘、二苯并[a,h]蒽和苯并[g,h,i]芘的变异系数均大于 200%,属于强变异,表明 PAHs 区域分异显著.

146 个点位土壤 PAHs 的含量中,不同环数 PAHs 的平均含量(质量分数)为:3 环(58.56%) $>$ 2 环(33.37%) $>$ 4 环(6.35%) $>$ 5 环(1.18%) $>$ 6 环(0.54%). 根据 PAHs 的性质和分子量的不同,可以将 16 种 PAHs 分为含 2~3 环的低环多环芳烃(LMWPAHs)、含 4 环的中环多环芳烃(MMWPAAHs)和含 5~6 环的高环多环芳烃(HMWPAAHs). 从图 3 可以看出,LMWPAHs 占总量的 0.36%~99.69%,平均为 86.31%; MMWPAAHs 占总量的 0~92%,平均为 10.46%; HMWPAAHs 占总量的 0.03%~46.97%,平均为 3.23%. 宁东基地核心区表层土壤中 PAHs 以低中环(LMWPAHs 和 MMWPAAHs)为主,这可能是受到采样地点周围大型化学公司污染排放的影

响,使得土壤中 LMWPAHs 的大气沉降量要大于土壤中生物挥发量和降解量^[17],造成土壤中 LMWPAHs 的积累.

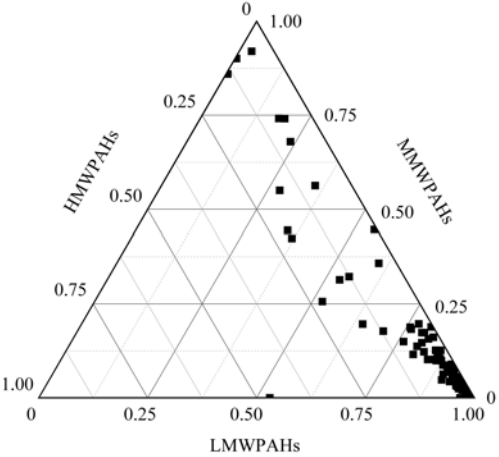


图3 表层土壤不同分子量 PAHs 组成比例

Fig. 3 Composition ratio of PAHs with hydrocarbons with different ring numbers

2.2 表层土壤 PAHs 污染现状评价
生态环境部于 2018 年发布了《土壤环境质量

建设用地污染土壤风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018),其中对 8 种毒性较大的 PAHs 规定了风险筛选值与管制值. 建设用地根据保护对象暴露情况的不同,可分为第一类用地和第二类用地,第二类用地包括工业用地,商业设施用地,道路交通用地等. 基于第二类用地的风险筛选值,利用单因子及内梅罗指数法来判断研究区内土壤

PAHs 的污染水平. 从表 3 可知 8 种 PAHs 的所有采样点的单因子指数值均小于 1,均处于无污染状态,表明宁东基地核心区表层土壤中 PAHs 单体的含量均小于相应的风险筛选值,此时可以忽略污染物对人体健康的风险性. 根据内梅罗综合指数进行的污染分级显示 NAP 的污染级别为尚清洁,其余的均为清洁.

表 3 8 种 PAHs 的指数评价
Table 3 Index evaluation of eight PAHs

PAH _s	单因子指数统计			内梅罗综合指数	污染分级
	最大值	均值	标准偏差		
Nap	0.990	0.053	0.191	0.701	尚清洁
Chry	0.006	0.000	0.001	0.004	清洁
BaA	0.043	0.003	0.006	0.030	清洁
BaP	0.157	0.005	0.019	0.111	清洁
BbF	0.008	0.001	0.001	0.006	清洁
BkF	0.001	0.000	0.000	0.001	清洁
DahA	0.847	0.040	0.118	0.600	清洁
InP	0.022	0.003	0.004	0.016	清洁

参考 Maliszewska-Kordybach^[18] 根据欧洲国家土壤 PAHs 数据建立的土壤 PAHs 污染评价标准:未污染土壤($\sum 16\text{PAHs} < 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);轻度污染土壤($0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \leq \sum 16\text{PAHs} < 0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);污染土壤($0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \leq \sum 16\text{PAHs} < 1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);严重污染土壤($\sum 16\text{PAHs} > 1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)来分析 PAHs 的污染情况. 宁东基地的 146 个表层土样中,5 个土壤样品 $\sum 16\text{PAHs} < 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 未受污染,占总数的 3.42%;9 个土壤样品 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \leq \sum 16\text{PAHs} < 0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,受到了轻度污染,占总数的 6.16%;5 个土壤样品 $0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \leq \sum 16\text{PAHs} < 1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,受到中度污染,占总数的 3.42%;127 个土壤样品 $\sum 16\text{PAHs} > 1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 受到重度污染,占总数的 87.00%.

2.3 研究区表层土壤中 PAHs 空间分布

采用地统计学中普通克里格(Kriging)插值方法用于描述宁东基地核心区土壤 PAHs 的空间分布特征. 在进行克里格插值前,利用 K-S 检验法对 16 种 PAHs 所测含量值进行正态分布检验. 结果表明,芴、蒽、荧蒽、苯并[a]蒽、苯并[g,h,i]芘及茚并[1,2,3-c,d]芘的含量符合正态分布($P > 0.05$),因此绘制该 6 种 PAHs 空间分布.

由图 2 和图 4 可看出,PAHs 在宁东基地核心区空间分布各异,呈现出明显的斑块分布特征. 研究区内存在 3 个 PAHs 高值分布区,分别为核心区的西北部、西南部以及东部,并且 PAHs 含量由污染区域

向四周逐渐降低,中部 PAHs 含量相对低. 研究区多环芳烃的空间分布状况与宁东基地的产业特征和人类活动方式密切相关. 宁东基地核心区的北部设有临河综合工业园,包括青铜峡铝业、宝丰能源、宝塔石化及永大石化等大型企业,焦化产业和煤化工相关产业发达,化石燃料的高温燃烧会产生大量多环芳烃;煤化工园区及装备制造园区位于基地东部,而西南部分布有 344 国道等重要交通线及加油站,均有可能造成多环芳烃污染.

2.4 PAHs 源解析

特征比值法作为一种定性方法,广泛应用于污染源类型的判别. 常用于判断 PAHs 来源的指数包括 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 、 $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr})$ 、 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$ 及 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 这 4 组特征比值. 本研究利用这几组同分异构体总量之比来初步判断研究区域土壤中多环芳烃的来源. 其中, $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 比值 < 0.1 ,来源为石油源, > 0.1 为煤及生物质燃烧; $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr}) < 0.4$,为交通源, $0.4 \sim 0.5$ 为液化化石燃料燃烧, > 0.5 为生物质和煤燃烧; $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry}) < 0.2$ 为石油源,介于 0.20 和 0.35 之间为石油源和燃烧源的混合源, > 0.35 为燃烧源; $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 比值在 $0.2 \sim 0.5$ 之间,来源为交通污染, > 0.5 即为煤炭或生物质燃料燃烧^[19]. 宁东基地核心区表层土壤中 PAHs 特征比值结果如图 5 所示,可以看出 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$ 比值集中在 $0 \sim 0.35$ 之间,表明主要来源为石油源和燃烧源; $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 比值集中于 $0.5 \sim 1.0$ 之间,表明主要来源为煤炭或生物质燃料燃烧; $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 与 $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr})$ 的比值均在 $0 \sim 1.00$

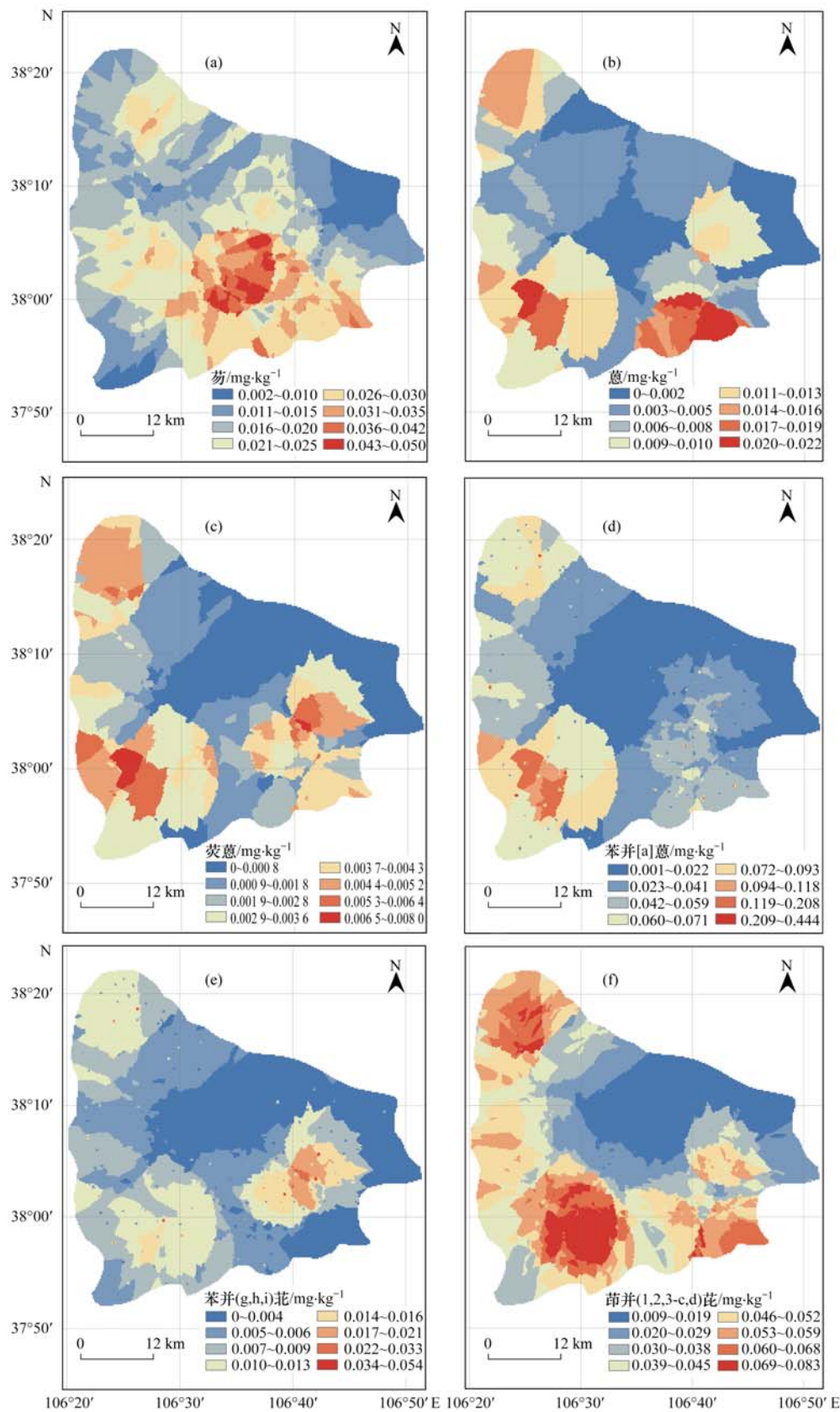


图 4 6 种 PAHs 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of six PAHs

之间,表明污染源为复合源. 宁东基地 PAHs 来源复杂,污染源为混合源,主要为石油污染、煤的燃烧及交通污染源. 有研究表明^[18],宁东基地园区各工厂

附近主要的污染源既有煤炭燃烧源又有交通污染源,与本研究结果相近.

由于特征比值法中的多环芳烃同分异构体的环

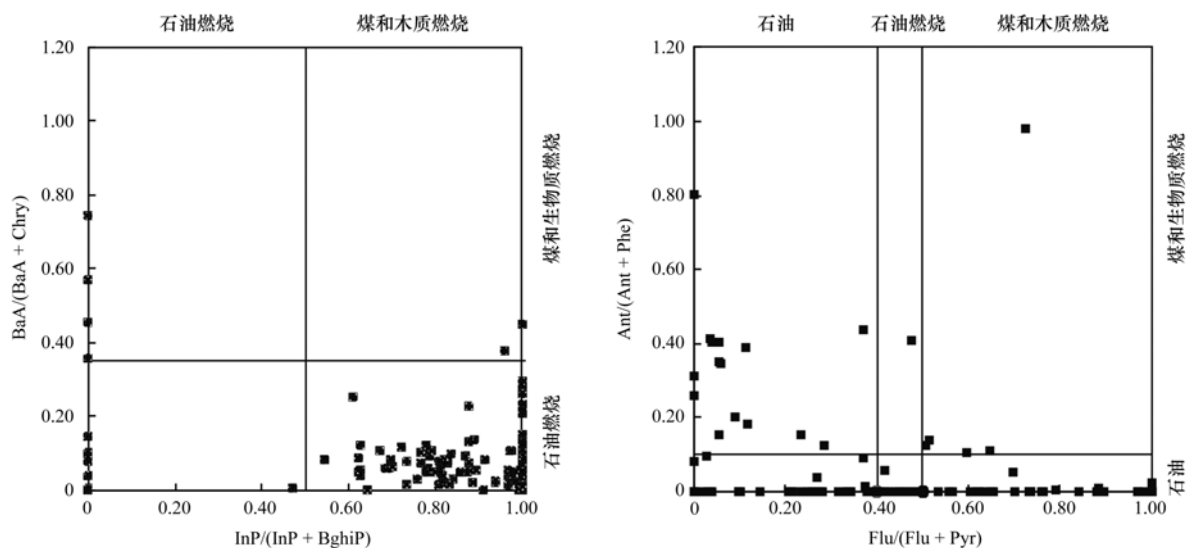


图5 宁东能源化工基地核心区土壤中 PAHs 特征比值判源

Fig. 5 Source of PAHs characteristic ratio in the core area of the Ningdong energy and chemical industry base

境行为不完全相同,其进入环境后在不同环境介质中的比例不是恒定的,因此结合 PMF 模型对源解析结果进行进一步确认.运用 PMF 模型对 PAHs 来源进行解析时,随机选取 86 作为初始起点进行迭代计算,取 2~5 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 10 次最佳, Q_{robust} 与 Q_{true} 较为接近,表明 16 种 PAHs 模拟效果较好.

PMF 模型运行结果见图 6, 4 个因子对 PAHs 总来源的贡献分别为 8.1%、39.4%、19.2% 和 33.3%.主因子 1 中 Acy、Ant 和 Chry 的载荷较高,

Chry 主要是来自汽油燃烧的特征物^[20].故主成分 1 指示的 PAHs 来源是石油和汽油混合源.主因子 2 中 Nap、Fla 和 BbF 的载荷较高,Nap 主要是石油源的特征物,主因子 2 指示的是石油源.主因子 3 中 Ace、Flu、BkF、BaP、BghiP 及 InP 载荷较高,Flu 是焦炭燃烧的特征物^[21],Ace 主要是生物质燃烧的产物^[22],BkF、InP 和 BghiP 是汽车尾气燃烧源的重要标志物^[23],故主成分 3 指示的 PAHs 的来源是生物质和交通燃烧源.主因子 4 中的特征物 Phe 载荷较高,Phe 是燃煤的特征物^[24],故其指示的 PAHs 来源

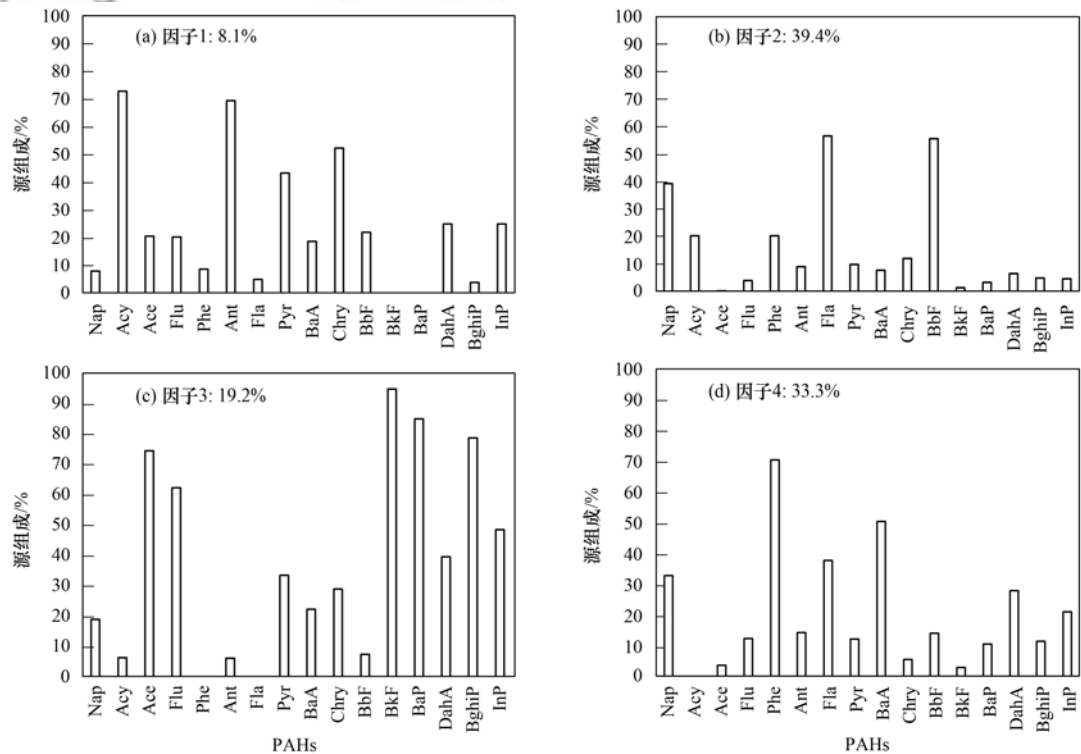


图6 基于 PMF 模型的土壤 PAHs 源解析

Fig. 6 Source profiles of PAHs in soil obtained with the PMF model

是燃煤. 综上, 宁东基地核心区表层土壤中多环芳烃主要来源于汽油和石油源、交通源和燃煤.

2.5 PAHs 风险评价

2.5.1 生态风险评价

目前为止, 国内外尚未建立统一的土壤 PAHs 生态风险评价标准方法, 质量基准法 (SQGs) 和质量标准法 (SQSs) 是常用的 PAHs 的生态风险评价方法^[25,26]. 因此本研究利用这两种方法综合评估宁东化工基地核心区土壤中 PAHs 的生态风险.

SQGs 给出了效应区间低值 (ERL, 风险几率:

10%) 和效应区间中值 (ERM, 风险几率: 50%). 当污染物浓度低于 ERL 时, 则产生负面生态效应的可能性很低; 当污染物浓度介于 ERL 和 ERM 之间时, 会偶尔发生负面生态效应, 具有潜在的生态风险; 当污染物浓度高于 ERM, 经常会出现负面生态效应, 可能产生严重的生态风险^[25,26]. SQSs 是在 SQGs 的基础上规定的, SQSs 主要包含 5 个效应水平, 分别为罕见效应水平 (REL)、临界效应水平 (TEL)、偶然效应水平 (OEL)、可能效应水平 (PEL) 和频繁效应水平 (FEL). SQGs 和 SQSs 的阈值如表 4 所示.

表 4 PAHs 的生态风险评价标准/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Ecological risk assessment criteria of PAHs/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

PAHs	SQGs 阈值		SQSs 阈值				
	ERL	ERM	REL	TEL	OEL	PEL	FEL
Nap	0.16	2.1	0.017	0.035	0.12	0.39	1.2
Acy	0.016	0.5	0.003	0.006	0.03	0.13	0.34
Ace	0.044	0.64	0.004	0.007	0.021	0.089	0.94
Flu	0.019	0.54	0.01	0.021	0.061	0.14	1.2
Phe	0.24	1.5	0.025	0.042	0.13	0.52	1.1
Ant	0.085	1.1	0.016	0.047	0.11	0.24	1.1
Fla	0.6	5.1	0.047	0.11	0.45	2.4	4.9
Pyr	0.665	2.6	0.029	0.053	0.23	0.88	1.5
BaA	0.261	1.6	0.014	0.032	0.12	0.39	0.76
Chry	0.384	2.4	0.026	0.057	0.24	0.86	1.6
BaP	0.43	1.6	0.011	0.032	0.15	0.78	3.2
DahA	0.063	0.26	0.003	0.006	0.043	0.14	0.2

SQGs 评价结果显示, BaP 及 FLT 的最大浓度值显著低于风险效应低值 ERL, 其余 10 种多环芳烃均存在超过 ERL 的点位, 萘、苊烯、蒽及二苯并蒽均存在超过 ERM 的点位, 超标程度不同. 其中, 有 33 个点位的萘超过了 ERM 值, 29 个点位的苊烯低于 ERM 值, 11 个点位的蒽超过其 ERM 值, 5 个点位的二苯并蒽超过 ERM 值. 萘、苊烯及蒽属于中低环多环芳烃 (2~4 环), 由此可见, 中低环多环芳烃产生的生态风险高, 宁东化工基地核心区土壤 PAHs 存在潜在的生态风险, 会偶尔发生负面效应.

SQSs 评价结果表明, 除荧蒽之外, 其余 11 种 PAHs 均存在超过 REL 值的情况. 其中, 2 环的有 112 个 (76.71%) 点位处于 REL 和 OEL 之间; 3 环中有 117 个点位的苊烯高于 FEL; 4 环的有 18 个点位介于 PEL 和 FEL 之间; 5 环的有 5 个点位高于 FEL; 大部分点位的 PAHs 处于 REL 和 OEL 之间, 表明该区域的 PAHs 的生态效应水平为罕见效应水平到偶然效应水平之间.

综合质量基准法及质量标准法可以得出该区域的 PAHs 产生的生态影响较小, 出现负面生态效应的可能性较低, 对长期生活在此区域的生物体可能会造成一定的不良生物效应, 因此有必要加强后续监测并制定详细控制计划.

2.5.2 健康风险评价

终生致癌风险增量模型 (ILCR) 常用于评价某致癌物对人体的致癌风险, 即某时间周期内人体暴露于一定剂量的致癌物而引起的癌症发病率. ILCR 为 10^{-6} 或更小可以认为没有风险或其风险可以忽略, ILCRs 值在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间则被认为存在潜在风险^[27], 应考虑此类的健康问题.

宁东基地核心区表层土壤中的 PAHs 针对成人和儿童经过 3 种暴露途径的 ILCRs 和 CR 如表 5 所示. 结果表明, 评估成人和儿童通过误食、皮肤接触和呼吸摄入的 ILCRs 的范围为 $5.322 \times 10^{-10} \sim 4.300 \times 10^{-6}$ 、 $8.497 \times 10^{-10} \sim 5.963 \times 10^{-6}$ 和 $1.322 \times 10^{-14} \sim 2.604 \times 10^{-10}$. 3 种途径的暴露顺序是皮肤接触 > 误食 > 呼吸吸入, 皮肤接触是土壤 PAHs 最主要的暴露途径, 吸入土壤 PAHs 暴露途径占比最小, 低于其他 2 种途径 4~5 个数量级, 不足 0.01%, 其原因是土壤中由挥发而进入大气的 PAHs 量非常少, 因此可忽略不计. 对于不同年龄段的人而言, 成年人皮肤接触 (平均 3.215×10^{-7}) 比儿童 (2.890×10^{-7}) 患癌症的风险更高. 这可以归因于成年人的皮肤接触量更大和接触时间更长^[4]. 由于儿童的手到嘴活动, 儿童通过误食而增加的终身癌症风险 (ILCR) (平均 2.318×10^{-7}) 比

成人(平均 1.810×10^{-7})要高. ILCRs 和 CR 的平均值和最大值均接近或小于 10^{-6} , 因此, 宁东基地核心区表层土壤对于不同年龄段的人群不存在潜在的致癌风险.

表 5 成人和儿童不同暴露途径的致癌风险值

Table 5 ILCRs and CR values of different exposure routes for adults and children					
人群	统计值	ILCRs _{误食}	ILCRs _{皮肤接触}	ILCRs _{呼吸}	CR
成人	最大值	3.357×10^{-6}	5.963×10^{-6}	2.604×10^{-10}	9.320×10^{-6}
	最小值	5.322×10^{-10}	9.453×10^{-10}	4.127×10^{-14}	1.478×10^{-9}
	均值	1.810×10^{-7}	3.215×10^{-7}	1.404×10^{-11}	5.025×10^{-7}
儿童	最大值	4.300×10^{-6}	5.360×10^{-6}	8.337×10^{-11}	9.659×10^{-6}
	最小值	6.816×10^{-10}	8.497×10^{-10}	1.322×10^{-14}	1.531×10^{-9}
	均值	2.318×10^{-7}	2.890×10^{-7}	4.494×10^{-12}	5.208×10^{-7}

3 讨论

国内相关研究区域土壤中 PAHs 含量的对比分析见表 6. 宁东基地核心区表层土壤 $\sum$ PAHs 含量低于某焦化厂地、东北某大型化工场地及北京市某焦化厂 PAHs 的含量, 但远高于陕北能源化工基地、内蒙古重点污染源企业、锦州市石油化工园区及河南省某工业园区 PAHs 的含量. 宁东基地核心区土壤 $\sum$ PAHs 含量是陕北能源化工基地的 98 倍, 是

锦州市石油化工园区的含量的 24 倍, 较高于天津滨海新区化工区及岚山化工园区. 天津滨海新区土壤中 PAHs 单体组分中浓度最高的是 2 环的 NAP, 与本研究结果一致. 岚山化工园区 7 种致癌 PAHs (BaA、Chry、BbF、BkF、BaP、InP 和 DahA) 占 $\sum$ PAHs 的 52.4%, 远高于本研究中 7 种致癌 PAHs 占 $\sum$ PAHs 的比例. 总体而言, 宁东基地核心区表层土壤 PAHs 含量处于中高等水平.

表 6 国内相关研究区域土壤中 PAHs 含量的对比分析¹⁾

Table 6 Comparative analysis of PAHs content in soils from related research areas					
研究区域	采样日期 (年-月-日)	采样数 /个	含量范围 /mg·kg ⁻¹	均值 /mg·kg ⁻¹	文献
宁东镇工业园区	2017-04-13	12	0.39 ~ 3.88	2.16	[28]
某焦化场地	—	114	0.01 ~ 4 100	233.99	[29]
东北某大型化工场地	2017-10	95	0.13 ~ 553.5	67.0	[30]
北京市某焦化厂	2005-11	26	0.67 ~ 144.81	32.45	[31]
某大型钢铁企业	2008-05	22	0.21 ~ 20.06	2.56	[7]
成都 4 个石油加工园区	—	20	0.19 ~ 1.60	0.58 ± 0.37	[32]
岚山化工园区	2015-06	10	2.76 ~ 3.44	3.09	[33]
天津滨海新区	2006-09 ~ 2006-10	28	—	1.19	[34]
陕北能源化工基地	—	38	0.00 ~ 0.86	0.10	[13]
内蒙古重点污染源企业	2011-08 ~ 2011-09	37	0.08 ~ 0.89	0.2	[35]
锦州市石油化工园区	—	81	—	0.39	[36]
河南省某工业园区	—	64	0.00 ~ 0.09	0.03	[37]
宁东能源化工基地核心区	2019-05 ~ 2019-06	146	ND ~ 123.12	10.19	本研究

1) “—”表示文献未提供相关数据; ND 表示未检出

4 结论

(1) 宁东基地核心区表层土壤中 16 种优控 PAHs 普遍检出, 且不同 PAHs 的区域分异性显著, PAHs 以低中环(LMwPAHs、MMwPAHs)为主. 与国内相关研究区域对比发现, 宁东基地核心区表层土壤 PAHs 浓度处于中高等水平.

(2) 依据《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018), 单因子指数评价表明: 8 种 PAHs 的所有采样点的单因子指数值均小于 1, 均处于无污染状态, 内梅罗综合指数评价

的污染分级显示 NAP 的污染级别为尚清洁, 其余均为清洁. 参照 Maliszewska-Kordybach 的土壤 PAHs 污染评价标准, 大部分土壤受到严重污染.

(3) 特征比值法及 PMF 模型分析显示, 宁东基地核心区表层土壤中多环芳烃来源为混合源, 石油污染、燃煤、交通污染及汽油源对该区域 PAHs 的贡献分别为 39.4%、33.3%、19.2% 和 8.1%.

(4) 健康风险评估显示, 该区域表层土壤中 PAHs 对儿童和成人不存在潜在的致癌风险. SQGs 及 SQSs 评价显示, 可能产生的生态影响较小, 出现负面生态效应的可能性较低, 但对长期生活在此区

域的生物体可能会造成一定的不良生物效应。

参考文献:

- [1] 吴志远, 张丽娜, 夏天翔, 等. 基于土壤重金属及 PAHs 来源的人体健康风险定量评价: 以北京某工业污染场地为例[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4180-4196.
Wu Z Y, Zhang L N, Xia T X, *et al.* Quantitative assessment of human health risks based on soil heavy metals and PAHs sources: take a polluted industrial site of Beijing as an example [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4180-4196.
- [2] 鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 等. 不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3369-3377.
Lu Y T, Xiang X X, Zhang S C, *et al.* Vertical distribution characteristics of PAHs in soils with different land use types during rapid urbanization [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3369-3377.
- [3] Baig JA, Kazi TG, Shah AQ, *et al.* Speciation and evaluation of Arsenic in surface water and groundwater samples: a multivariate case study [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, **73**(5): 914-923.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 钟岩. 云南曲靖某煤化工基地及周边土壤中多环芳烃的检测研究[J]. 干旱环境监测, 2016, **30**(4): 165-169.
Zhong Y. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons of coal chemical plant and the surrounding soil in Qujing of Yunnan province [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2016, **30**(4): 165-169.
- [7] 李永霞, 刘燕, 王文刚, 等. 某钢铁企业表层土壤中多环芳烃含量特征与生态风险评[J]. 环境化学, 2017, **36**(6): 1320-1327.
Li Y X, Liu Y, Wang W G, *et al.* Concentration characteristic and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soils of a steel plant [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(6): 1320-1327.
- [8] 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.* Source apportionment and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils around different type of enterprises [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019, **31**(4): 28-32.
- [9] 邹祎萍, 姜满君, 么琳颖, 等. 燃煤电厂土壤中多环芳烃污染特征及其源解析[J]. 矿业科学学报, 2019, **4**(2): 170-178.
Zou Y P, Lou M J, Yao L Y, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil of coal fired power plant [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2019, **4**(2): 170-178.
- [10] 刘江生. 东北老工业基地浑蒲灌区土壤中多环芳烃污染特征、断代、溯源及风险评价研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [11] 白莉, 荆钰童. 多环芳烃源解析方法对比[J]. 吉林建筑大学学报, 2020, **37**(1): 45-50.
Bai L, Jing Y T. Comparison of source apportionment methods for PAHs [J]. *Journal of Jilin Jianzhu University*, 2020, **37**(1): 45-50.
- [12] 张希. 上海交通沿线农田土壤中 PAHs 赋存、来源及风险评价[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [13] 袁文森. 陕北能源化工基地土壤中重金属与多环芳烃污染现状及其污染风险分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [14] 田福林. 受体模型应用于典型环境介质中多环芳烃、二噁英和多氯联苯的来源解析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [15] 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.
- [16] 段海静, 蔡晓强, 陈轶楠, 等. 开封市公园地表灰尘 PAHs 污染与健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(12): 4500-4509.
Duan H J, Cai X Q, Chen Y N, *et al.* Occurrence and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface dust from parks in Kaifeng, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(12): 4500-4509.
- [17] 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.
- [18] Maliszewska-Kordybach B. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination [J]. *Applied Geochemistry*, 1996, **11**(1-2): 121-127.
- [19] 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.
- [20] Simcik M F, Eisenreich S J, Liou 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.
- [21] Harrison R M, Smith D J T, Luhana L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, U. K. [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(3): 825-832.
- [22] 倪进治, 陈卫锋, 杨红玉, 等. 福州市不同功能区土壤中多环芳烃的含量及其源解析[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(5): 921-926.
Ni J Z, Chen W F, Yang H Y, *et al.* Concentrations and sources of soil PAHs in various functional zones of Fuzhou City [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(5): 921-926.
- [23] Bozlaker A, Muezzinoglu A, Odabasi M. Atmospheric

- concentrations, dry deposition and air-soil exchange of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an industrial region in Turkey [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **153**(3): 1093-1102.
- [24] Wang C F, Wang X P, Gong P, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil across the Tibetan Plateau: Spatial distribution, source and air-soil exchange [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **184**: 138-144.
- [25] 何书海, 曹小聪, 李腾崖, 等. 三亚河表层沉积物中多环芳烃分布、来源解析及生态风险评价[J]. *环境化学*, 2019, **38**(4): 967-970.
- He S H, Cao X C, Li T Y, *et al.* Distribution, source and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from Sanya River [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(4): 967-970.
- [26] 廉欢, 于潇, 鞠振宇, 等. 上海某场地多环芳烃污染现状 & 生态风险评价[J]. *上海国土资源*, 2019, **40**(3): 67-71.
- Lian H, Yu X, Ju Z Y, *et al.* Pollution status and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons at a site in Shanghai [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2019, **40**(3): 67-71.
- [27] 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.
- [28] 丁润梅, 田大年, 李兆君, 等. 宁东工业园区土壤多环芳烃的污染特征与来源[J]. *环境与健康杂志*, 2018, **35**(10): 909-912.
- Ding R M, Tian D N, Li Z J, *et al.* Pollution characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil of Ningdong Industrial Park [J]. *Journal of Environment and Health*, 2018, **35**(10): 909-912.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 冯嫣, 吕永龙, 焦文涛, 等. 北京市某废弃焦化厂不同车间土壤中多环芳烃(PAHs)的分布特征及风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2009, **4**(3): 399-407.
- Feng Y, Lv Y L, Jiao W T, *et al.* Distribution and risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from different workshops of an abandoned coking factory in Beijing [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2009, **4**(3): 399-407.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 焦文涛, 吕永龙, 王铁宇, 等. 化工区土壤中多环芳烃的污染特征及其来源分析[J]. *环境科学*, 2009, **30**(4): 1166-1172.
- Jiao W T, Lv Y L, Wang T Y, *et al.* Characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil from chemical industrial areas [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(4): 1166-1172.
- [35] 周海军, 孙文静, 团良, 等. 重点污染源企业周边农田土壤中多环芳烃污染水平与风险评价[J]. *环境化学*, 2013, **32**(10): 1976-1982.
- Zhou H J, Sun W J, Tuan L, *et al.* Pollution level and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soil around pollution sources [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(10): 1976-1982.
- [36] 杜永强, 曲蛟, 丛俏, 等. 石油化工园区周边土壤中多环芳烃的分布研究[J]. *中国环境监测*, 2012, **28**(1): 33-36.
- Du Y Q, Qu J, Cong Q, *et al.* Study on the distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil around the area of petroleum engineering [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2012, **28**(1): 33-36.
- [37] 王潇磊, 高镜清, 申进朝. 典型区域土壤中多环芳烃的污染分布特征[J]. *环境监测管理与技术*, 2014, **26**(2): 22-25.
- Wang X L, Gao J Q, Shen J C. The pollution distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in representative region soil [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2014, **26**(2): 22-25.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphoterically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PENG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)