

目次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响	朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)
不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析	秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)
不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异	陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧玮, 胡建林 (635)
2006~2021年夏半年上海臭氧浓度特征及其大气环流背景分析	郑庆峰, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)
基于大气成分观测网的山西省近地面O ₃ 体积分数分布特征	李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)
伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)
运城市四季VOCs特征、来源及臭氧形成敏感物种	阴世杰, 刘新翌, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)
郑州市秋冬季污染过程中大气VOCs污染特征、来源解析及活性分析	赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晓, 张瑞芹 (689)
郑州市PM _{2.5} 中有机酸的污染特征、来源解析及二次生成	李子涵, 董喆, 尚瑞琪, 孔梓涵, 李晓, 张瑞芹 (700)
中国三大城市群PM _{2.5} 浓度非线性变化分析	吴舒祺, 顾杨旸, 张天岳, 赵文吉 (709)
基于LEAP模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析	吴琼, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)
碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化	郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)
考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析	马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)
我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析	韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)
不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州水质的影响	谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)
深圳市2015~2021年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应	韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)
河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析	王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)
北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析	郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)
店埠河流域地表水-地下水水化学特征及其成因分析	郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)
张家口地区枯水期地下水水化学特征及其成因机制分析	金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)
黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布	闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)
制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法	彭安萍, 高虎, 张新波 (844)
水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响	汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)
富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除	刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)
壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中Cd ²⁺ 的吸附机制	姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)
硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制	邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)
磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性	韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 (898)
广东省高分辨率温室气体排放清单及特征	卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志炯, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)
辽河口“退塘还湿”修复区生态系统CO ₂ 交换及其环境调控	刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)
生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)
生物炭改良盐碱地研究与应用进展	魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董昱辰, 代红文 (940)
免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta分析	徐艺萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)
黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例	李月, 罗红芬 (961)
不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响	李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)
Ca改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制	张超, 翟付杰, 单保庆 (983)
秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素	闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)
我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险	杨炳彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)
广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估	邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015)
基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析	潘泳兴, 陈盟, 王楠楠 (1026)
基于Monte-Carlo模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析	罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)
基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估	袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)
基于APCS-MLR和PMF模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析	沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)
PE-Cd复合污染土壤中Cd释放迁移特征及机制	王迪, 徐绍辉, 邵明艳, 林青 (1069)
氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性	李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓旻, 蒋建东 (1080)
昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析	张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)
钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果	王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)
氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复	袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣, 赵科理 (1107)
关键生育期施加外源灌溉水对水稻镉吸收转运的影响	周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曹鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (1118)
外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响	张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)
稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应	张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 (1141)
根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用	郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)
高密度聚乙烯微塑料与氯噻磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应	胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)
微塑料的人体富集及毒性机制研究进展	包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)
机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展	白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)
微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展	侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)
水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展	郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)
基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素	郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)

广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估

邹子航^{1,2}, 陈莲^{1*}, 张培珍², 王雨菡^{1,2}, 王振江^{1,3}, 林森¹, 唐翠明^{1,3}, 罗国庆^{1,3}, 钟建武¹, 李智毅¹, 王圆¹

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 广州 510640; 2. 广东海洋大学电子与信息工程学院, 湛江 524088; 3. 农业农村部华南都市农业重点实验室, 广州 510610)

摘要: 为全面研究广州市土壤多环芳烃(PAHs)污染特征, 采集广州市222个表层土壤样品进行分析, 利用效应区间低/中值法(ERL/ERM)和(BaP)毒性当量法评价土壤PAHs污染生态风险状况, 终生癌症风险增量模型评价土壤PAHs污染健康风险状况, 特征化合物比值法和PMF模型对PAHs来源进行解析。结果表明, 广州市表层土壤 $\omega(\sum 16\text{PAHs})$ 为38~1115 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为526 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 16种多环芳烃单体均为强变异; 广州存在潜在生态风险, 个别采样点的PAHs污染已存在较大的生态风险, 整体处于轻度污染的状态; 基于健康风险评估结果表明, 成年和儿童的总致癌风险的贡献率都呈现为: 皮肤接触 > 误食土壤 > 呼吸摄入, 儿童的健康风险大于成年, 健康风险总体处于可接受范围; 源解析表明广州市土壤PAHs的主要来源为: 煤炭源(37.1%) > 柴油源(32%) > 炼焦源(17.3%) > 交通排放、生物质燃烧和石化产品挥发的混合源(13.6%), 整体土壤PAHs来源属于混合源。研究结果丰富了对广州市表层土壤PAHs污染特征的认识, 有助于推动土壤污染防治工作的开展。

关键词: 广州市; 土壤; 多环芳烃(PAHs); 污染; 风险评估

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-1015-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202303219

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou

ZOU Zi-hang^{1,2}, CHEN Lian^{1*}, ZHANG Pei-zhen², WANG Yu-han^{1,2}, WANG Zhen-jiang^{1,3}, LIN Sen¹, TANG Cui-ming^{1,3}, LUO Guo-qing^{1,3}, ZHONG Jian-wu¹, LI Zhi-yi¹, WANG Yuan¹

(1. Sericultural & Agricultural-food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. College of Electronics and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 3. Key Laboratory of Urban Agriculture in South China, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510610, China)

Abstract: In order to comprehensively study the pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils of Guangzhou, 222 topsoil samples were collected and analyzed. The ecological risk of soil PAHs pollution was evaluated using the effect interval low/median method (ERL/ERM) and the (BaP) toxicity equivalent method, and the health risk of soil PAHs pollution was evaluated using the lifelong cancer risk increment model. The source of PAHs was analyzed using the characteristic compound ratio method and PMF model. The results indicated that: the content of surface soil ($\sum 16\text{PAHs}$) in Guangzhou was 38-1115 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, with an average of 526 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, and 16 types of polycyclic aromatic hydrocarbon monomers showed strong variation. There was a certain degree of ecological risk of PAHs in Guangzhou, and there was already a significant ecological risk of PAHs pollution in individual sampling points, which were generally in a state of mild pollution. Based on the results of the health risk assessment, the contribution rates of total cancer risk in both adults and children were presented as follows: skin contact > ingestion of soil > respiratory intake. The health risk of children was greater than that of adults, and the overall health risk was within an acceptable range. Source analysis showed that the main sources of soil PAHs in Guangzhou were coal (37.1%); diesel (32%); coking (17.3%); and mixed sources of traffic emissions, biomass combustion, and petrochemical product volatilization (13.6%). The overall source of soil PAHs belonged to mixed sources. The research results have enriched our understanding of the pollution status of PAHs in the surface soil of Guangzhou and are helpful in promoting soil pollution prevention and control actions.

Key words: Guangzhou; soil; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); pollution; risk assessment

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)指由两个或两个以上苯环结构组成的烃类有机化合物, 是一种环境中普遍存在的一类具有强烈“三致”效应的典型持久性有机污染物, 可通过空气或水进行长、短距离输送, 参与全球和各圈层的循环, 最终在土壤中累积, 并通过土壤-作物系统迁移、积累和转化, 进而危及生态系统和人体健康, 美国国家环保署已将16种PAHs列为优先控制污染物黑名单^[1~4]。环境中PAHs大多来自于化学工业、交通运输和日常生活等方面, 如: 煤、石油、木材及有机高分子化合物的不完全燃烧等^[5]。由于PAHs水溶性差、辛

醇分配系数高, 常被吸附于土壤颗粒上, 土壤就成为环境中PAHs的储库和中转站, 有研究证实, 环境中90%以上的PAHs赋存于土壤中, 这势必会造成种植于土壤的作物的污染, 进而严重威胁农产品质量和人类生命健康安全^[6]。

收稿日期: 2023-03-27; 修订日期: 2023-05-17

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42007379); 广州市基础与应用基础研究项目(202201010672); 广东省农业科学院“优秀博士”人才引进项目(R2021YJ-YB3007); 广东省农业科学院青年导师制项目(R2020QD-044)

作者简介: 邹子航(1999~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污染土壤的环境评估及修复, E-mail: 2556165435@qq.com

* 通信作者, E-mail: chenlian@gdaas.cn

近年来,国内外对于城市土壤PAHs污染问题的关注度逐渐增加,研究内容主要包括环境污染水平、健康风险评价和源解析等.我国表层土壤中16种PAHs的含量平均值为 $730\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,除个别城市外,我国土壤PAHs污染整体属于轻微污染,与其他国家相比处于较低或中等水平^[7].此外,有研究发现我国表层土壤中PAHs含量沿着城市-郊区-乡村梯度下降^[8].同一地区土壤由于土地利用类型的不同,导致土壤中PAHs含量出现显著差异,有研究表明交通繁忙和人流量的城市商业中心土壤PAHs含量要高于公园和绿地土壤^[9].PAHs的含量和分布主要与经济发展水平、人口密度有关,受人为影响较大,交通尾气排放、煤和生物质燃烧为土壤中PAHs的主要来源.

广州是华南地区的政治、经济、科技、教育和文化中心,经济社会发展迅速,受人类活动影响,注定带来严重的环境污染,对人体健康产生威胁.目前针对广州市土壤PAHs污染状况的研究多集中于部分典型区域的研究,如Zhang等^[10]评估了广州市道路旁农田土壤区域的表层土壤PAHs环境风险,杨秀虹等^[11]对广州市工业区和交通区的表层土壤PAHs分布特征进行了研究,黄俊彪^[12]研究了广州市典型森林区表层土壤PAHs分布及其吸附性能,褚红榜^[13]对广州市垃圾填埋场及其周边区域水体及土壤PAHs污染状况进行探究,但以上研究均未对广州市整体表层土壤的PAHs污染特征、风险评估及来源解析进行全面地阐述.因此本文通过研究广州市整体表层土壤PAHs的含量特征,了解广州市土壤中污染物PAHs的污染水平,进行生态风险评价和健康风险评价,采用特征化合物比值法和PMF模型进行源解析,提升对广州市整体土壤PAHs污染状况的认识,对广州土壤污染防治行动开展具有一定的指导意义.

1 材料与方法

1.1 土壤样品的采集与分析

1.1.1 样品采集

本研究的采样时间为2021-01,利用网格布设法,在广州市土地利用类型图上共选取采样点222个,具体采样点的位置如图1所示.采样前去除地表的杂物,同时使用GPS记录采样点经纬度.为保证所取的土样具有代表性,每一区域按比例布设5个样点,在回避人工填充物的前提下垂直采集0~10 cm表层土壤,将5个点的土壤混合均匀封装于棕色玻璃瓶,完成标注后运回实验室进行避光低温保存.

1.1.2 样品预处理与分析

将土壤样品在常温并且洁净的状态下自然风干;风干后去除土壤中的草根、石头和动植物残体等

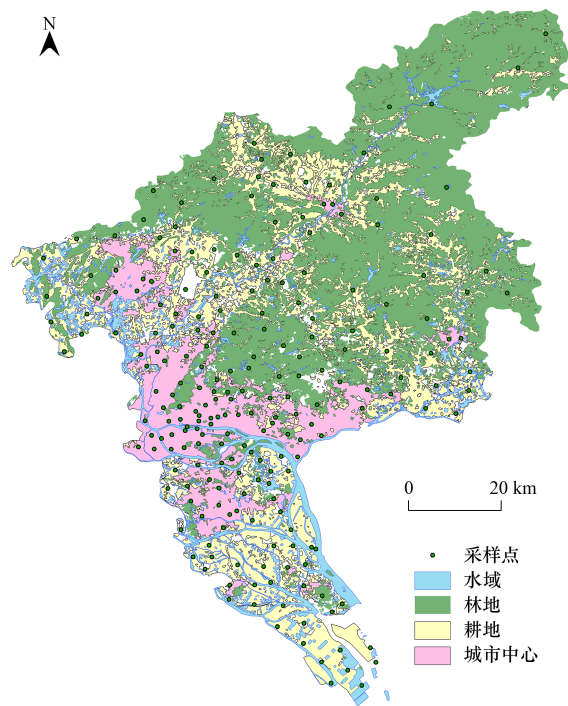


图1 广州市土壤采样点位示意

Fig. 1 Schematic diagram of soil sampling sites in Guangzhou

杂质,将土壤压碎、研磨后过100目的不锈钢筛.采用玻璃电极法测定pH,每个样品重复测定3次,取平均值作为该土壤样品的pH值;利用烧失量法测定土壤有机质含量.土壤PAHs含量测试预处理的步骤为:称取过100目的土壤样品10 g(精确到0.01 g),加入适量无水硫酸钠,研磨均化成流沙状,放入玻璃套管内,加入0.05 mL十氟联苯使用液,使用索氏提取器,加入100 mL丙酮-正己烷混合溶液,提取16 h.加入5 g无水硫酸钠至含有玻璃纤维滤膜的漏斗上,将提取液过滤至浓缩器皿中.使用丙酮-正己烷混合溶液洗涤提取容器和漏斗,洗液并入浓缩器皿.通过氮吹仪(水浴 50°C ,氮气 $4\times 10^5\text{ Pa}$)氮吹至约1 mL,加入约5 mL正己烷并浓缩至约1 mL,重复此浓缩过程3次后定容至1 mL.将浓缩后的提取液加入到预先制作好的硅胶层析柱进行分离净化.通过硅胶层析柱净化后,用氮吹浓缩法将洗脱液浓缩至1 mL,加入3 mL乙腈后浓缩至1 mL以下,并定容至1 mL待测.

PAHs含量测试仪器选用高效液相色谱仪(岛津LC-20A),测试步骤如下:进样量 $10\text{ }\mu\text{L}$,柱温 35°C ,流速 $1.0\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,流动相:A乙腈、B水,梯度洗脱程序(0 min:60% A;8 min:60% A;18 min:100% A;28 min:100% A;28.5 min:60% A;35 min:60% A),进行定量检测美国环保署优先测量的16种PAHs:萘(Nap)、苊烯(Acy)、苊(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、苯并(a)蒽(BaA)、䓑(Chry)、苯并(b)荧蒽(BbF)、苯并(k)荧蒽(BkF)、苯并(a)芘

(BaP)、茚并(1,2,3-c,d)芘(InP)、二苯并(a,h)蒽(DaA)和苯并(ghi)芘(BgP)^[14];16种PAHs具体紫外线吸收波长见文献[15].

1.2 风险评估

1.2.1 生态风险评价方法

效应区间低值(effects range low, ERL)法以及效应区间中值(effects range median, ERM)法^[16]已被广泛用于评价各环境介质中PAHs的生态风险水平.当PAHs含量低于ERL值时,潜在PAHs毒性发生的概率就小于10%,即几乎不会对生态环境产生毒副作用;若PAHs含量处于两个值之间时,则可能对土壤造成偶然性的毒副作用;PAHs含量大于ERM值时,土壤中PAHs则有较大可能对周围的生态造成毒副作用.在16种PAHs单体中,BbF、BkF、InP和BgP具有高致癌性,这些PAHs单体即使在环境中含量很低也会对生物和人类的健康造成危害^[17].为量化广州市表层土壤PAHs的毒性,同时采用BaP毒性当量法对广州市生态风险进行评价.PAHs单体A的毒性当

量含量计算如式(1).

$$TEQ_A = \sum TEF_A \times C_A \tag{1}$$

式中, C_A 为土壤样品中PAHs单体A的含量, TEQ_A 为PAHs单体A的毒性当量含量, TEF_A 为PAHs单体A的毒性当量因子系数.

1.2.2 健康风险评价方法

目前对环境介质中PAHs的健康风险评估常用终生癌症风险增量(ILCRs)模型^[14]来进行度量.根据美国环境保护总署规定的风险范围可知,当ILCRs模型得到的值小于 10^{-6} 则代表土壤中PAHs的含量处于安全可接受范围;当ILCRs模型得到的值处于 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 之间时则代表土壤中PAHs含量有一定可能会对人体造成潜在威胁;当ILCRs模型得到的值处于 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 之间则代表有可能对人体造成较大的潜在风险^[18].一般情况下,通过评估成人和儿童这两大暴露群体在经手-口误食、呼吸吸入和皮肤接触土壤颗粒物这3种途径下暴露土壤PAHs的健康风险.关于人体与土壤各暴露途径的计算方法分别表达如式(2)~(4).

$$ILCR_{皮肤接触} = \frac{CS \times CSF_{皮肤接触} \times \sqrt[3]{BW/70} \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT \times 10^6} \tag{2}$$

$$ILCR_{摄食} = \frac{CS \times CSF_{摄食} \times \sqrt[3]{BW/70} \times IR_{摄食} \times EF \times ED}{BW \times AT \times 10^6} \tag{3}$$

$$ILCR_{呼吸} = \frac{CS \times CSF_{呼吸} \times \sqrt[3]{BW/70} \times IR_{呼吸} \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} \tag{4}$$

$$CR = \sum (ILCR_{皮肤接触} + ILCR_{摄食} + ILCR_{呼吸}) \tag{5}$$

$$CS = \sum TEQ_A \tag{6}$$

式中,CS为16种土壤PAHs单体的毒性当量含量之和($mg \cdot kg^{-1}$),CSF为致癌斜率因子($kg \cdot d \cdot mg^{-1}$),BW为人体平均体重(kg),SA为接触土壤的皮肤面积($cm^2 \cdot d^{-1}$),AF为土壤附着因子($mg \cdot cm^{-2}$),ABS为皮肤吸附系数,EF为暴露频率($d \cdot a^{-1}$),ED为暴露年数

(a),AT为人均寿命(d), $IR_{摄食}$ 为土壤摄取速率($mg \cdot d^{-1}$), $IR_{呼吸}$ 为呼吸速率($m^3 \cdot d^{-1}$),PEF为土壤尘形成系数($m^3 \cdot kg^{-1}$), 10^6 为土壤污染物含量的转换系数($mg \cdot kg^{-1}$).CR为3种暴露途径的风险总和,风险等级划分标准为: $CR < 10^{-6}$ 为风险在可接受安全范围内, $10^{-6} \leq CR < 10^{-4}$ 存在人体可耐受的潜在风险, $CR \geq 10^{-4}$ 有较大风险.表1为终生癌症风险增量模型各参数的具体参考值.

表1 终生致癌风险模型参数
Table 1 Lifetime carcinogenic risk model parameters

参数	单位	暴露群体		文献
		儿童	成人	
平均体重(BW)	kg	6.94	58.55	[19]
暴露频率(EF)	$d \cdot a^{-1}$	350	350	[20]
暴露年数(ED)	a	6	24	[21]
呼吸速率($IR_{呼吸}$)	$m^3 \cdot d^{-1}$	5.65	13.04	[19]
土壤摄取速率($IR_{摄食}$)	$mg \cdot d^{-1}$	200	100	[20]
接触土壤的皮肤面积(SA)	$cm^2 \cdot d^{-1}$	2 800	5 700	[20]
土壤附着因子(AF)	$mg \cdot cm^{-2}$	0.2	0.07	[20]
皮肤吸附系数(ABS)	无量纲	0.13	0.13	[22]
人均寿命(AT)	d	82.90×365	82.90×365	[23]
土壤尘形成系数(PEF)	$m^3 \cdot kg^{-1}$	1.316×10 ⁹	1.316×10 ⁹	[22]
皮肤接触致癌斜率因子($CSF_{皮肤接触}$)	$kg \cdot d \cdot mg^{-1}$	25	25	[24,25]
摄食致癌斜率因子($CSF_{摄食}$)	$kg \cdot d \cdot mg^{-1}$	7.3	7.3	[24,25]
呼吸致癌斜率因子($CSF_{呼吸}$)	$kg \cdot d \cdot mg^{-1}$	3.85	3.85	[24,25]

1.3 源解析

PAHs来源较为复杂,为了有效控制PAHs污染,识别其来源具有非常重要的意义.但由于PAHs的迁移和转化过程较为复杂,很难特别精确地判断其来源.源解析常用的方法有多元统计法、正定矩阵因子分解法(PMF)以及特征化合物比值法.本研究中对广州市土壤PAHs来源解析采用的是污染物特征化合物比值法^[26]和PMF模型分析.

1.3.1 特征化合物比值法

采用被广泛运用于PAHs源解析,具有相对稳定特征的Ant/Phe、Flu/Pyr、BaA/Chry和InP/BgP的值解析广州市土壤PAHs的源^[27],其中各个比值的取值与所对应来源如表2所示.

表2 PAHs特征化合物比值代表来源
Table 2 Representative sources of PAHs characteristic compound ratios

项目	比值(<i>n</i>)	主要来源
InP/(InP+BgP)	$n < 0.2$	石油挥发
	$0.2 \leq n < 0.5$	化石燃料燃烧
	$n \geq 0.5$	煤炭和生物质燃烧
BaA/(BaA+Chry)	$n \leq 0.2$	石油挥发
	$0.2 < n \leq 0.35$	煤炭和生物质燃烧
	$n > 0.35$	机动车尾气
Ant/(Ant+Phe)	$n < 0.1$	石油挥发
	$n \geq 0.1$	煤炭和石油等高温燃烧
Flu/(Flu+Pyr)	$n \leq 0.4$	石油挥发
	$0.4 < n \leq 0.6$	化石燃料燃烧
	$n > 0.6$	煤炭和生物质燃烧

1.3.2 正定矩阵因子分解法(PMF)

采用美国环保署推荐的PMF 5.0模型对广州市土壤中PAHs进行源解析^[28].指定总质量为PAHs,土壤中总的PAHs的不确定度为10%,分别读入含量数据及不确定数据文件,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*),利用样品的含量和不确定度数据进行各个点加权,使得目标函数*Q*最小化.

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\left(x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} \right) / u_{ij} \right]^2 \quad (6)$$

式中,*Q*为累积残差,*i*为样品数,*j*为土壤样本中污染物的种类;*p*为PMF模型拟合出的合适因子数;*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^[27],本研究设定为10%.

1.4 数据分析方法

采用Excel表格进行数据整理,SPSS 21进行数据分析和统计性描述,ArcMap 10.8用于空间特征分析与制图,Origin 2021进行相关图形绘制.

2 结果与讨论

2.1 广州市土壤PAHs含量及空间分布特征

2.1.1 土壤PAHs含量特征

广州市土壤中16种PAHs含量的描述性统计如表3所示.其中,16种PAHs含量的最小值均为ND,即测定结果低于检出限以未检出报出,根据标准HJ/T 166-2004可知,低于分析方法检出限的测定结果以未检出报出,参加统计时按最低检出限的一半进行计算^[29].*ω*(单体PAHs)范围为ND~10 600 μg·kg⁻¹,16种PAHs的总含量 $\left[\omega \left(\sum 16 \text{PAHs} \right) \right]$ 范围为38~11 115 μg·kg⁻¹,平均值为526 μg·kg⁻¹,通过与国内其他城市土壤PAHs进行比较,发现不同城市的土壤PAHs污染存在差异性,广州市土壤 $\omega \left(\sum 16 \text{PAHs} \right)$ 平均值低于上海(2 500 μg·kg⁻¹)^[29]、天津(765 μg·kg⁻¹)^[30]、南京(3 330 μg·kg⁻¹)^[31]、青岛(1 081.22 μg·kg⁻¹)^[32]、福州(595.9 μg·kg⁻¹)^[33]、乌鲁木齐(5 018 μg·kg⁻¹)^[34]、兰州(2 360 μg·kg⁻¹)^[35]和济南(1 270 μg·kg⁻¹)^[36],高于北京(508.7 μg·kg⁻¹)^[37]和深圳(290 μg·kg⁻¹)^[9],土壤PAHs污染在国内处于中等含量水平;造成各城市土壤PAHs污染状况存在高低差异可能与不同城市的人口密度和当地存在差异的工业活动相关.本研究选用文献[38]建议的土壤中16种优控PAHs污染标准,基于数据结果进行评价,广州市土壤PAHs总体污染情况属于轻度污染.广州市土壤中16种PAHs单体的变异系数均大于100%,表现出较大的离散性,属于强变异,说明广州市表层土壤PAHs具有较强空间分布差异性.姚万程等^[39]对山西某工厂及其周边区域研究表明,该研究区域土壤中15种PAHs单体变异性均大于100%,为强变异.利用ArcMap10.8地统计模块中的反距离插值法对广州市土壤PAHs的空间分布特征进行分析,结果如图2所示.高值区主要分布于广州中部地区,可能是由于该区域属于城市中心,人类活动较为复杂;低值区主要分布在中南部,该区域属于森林区域,可能原因是受人类活动影响较小^[12],然而在森林区域出现高值可能是由于在森林木材自燃或裂解过程中会产生一定的PAHs.

2.1.2 土壤PAHs组成特征

将16种PAHs按照化学结构中的苯环个数,可分为2~3环的低环芳烃:Nap、Acy、Ace、Flu、Phe和Ant;4环的中环芳烃:Fla、Pyr、BaA和Chry;5~6环的高环芳烃:BbF、BkF、BaP、DaA、BgP和InP.图3为广州市土壤PAHs组分特征.2~3环PAHs占比在1.08%~97.00%之间;4环PAHs占比在0.34%~

表3 广州市土壤中PAHs的描述性统计¹⁾
Table 3 Descriptive statistics of PAHs in soil of Guangzhou

PAHs	环数	最小值/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数/%	检出率/%
萘(Nap)	2	ND	2 320	27.8	160	577	37.40
苊烯(Acy)	3	ND	228	4.76	17.5	367	15.80
苊(Ace)	3	ND	343	12.2	35.9	296	36.50
芴(Flu)	3	ND	634	35.8	74.7	208	68.50
菲(Phe)	3	ND	617	36.1	88.4	245	70.30
蒽(Ant)	3	ND	278	12.5	30.2	242	44.10
荧蒽(Fla)	4	ND	676	16.1	59.7	370	37.80
芘(Pyr)	4	ND	636	16.8	65.4	389	44.10
苯并(a)蒽(BaA)	4	ND	364	9.88	35.7	362	32.00
䓛(Chry)	4	ND	450	14.4	39.9	277	58.60
苯并(b)荧蒽(BbF)	5	ND	10 600	162	855	528	75.20
苯并(k)荧蒽(BkF)	5	ND	219	10.6	24.6	232	32.00
苯并(a)芘(BaP)	5	ND	1 790	121	212	175	85.60
茚并(1,2,3-c,d)芘(InP)	6	ND	281	8.64	24.5	284	25.20
二苯并(a,h)蒽(DaA)	5	ND	181	17.2	30.4	177	45.90
苯并(ghi)芘(BgP)	6	ND	1 340	19.8	92.3	465	45.90
$\sum 7\text{cPAHs}$		ND	11 000	344	908	264	
$\sum 16\text{PAHs}$		38	11 115	526	1 010	192	

1)ND表示未检出; $\sum 7\text{cPAHs}$ 包括BaA、Chry、BbF、BkF、BaP、InP和DaA; $\sum 16\text{PAHs}$ 为16种PAHs的总和

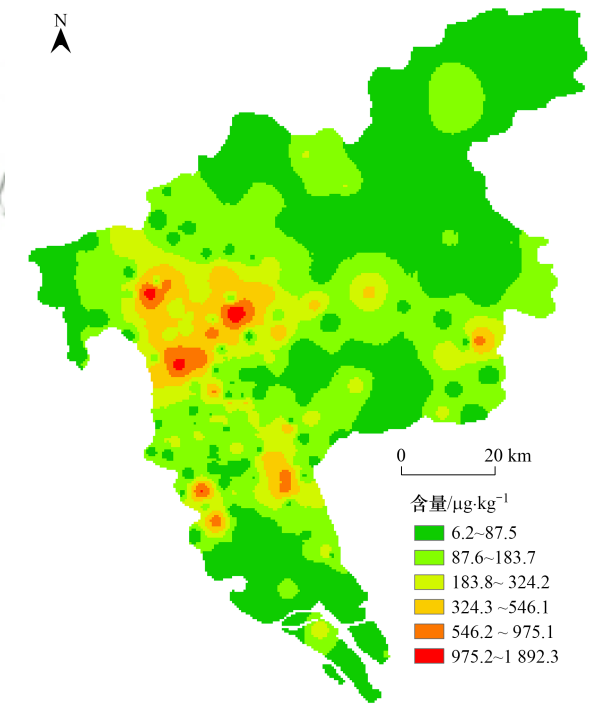


图2 广州市土壤PAHs空间分布状况
Fig. 2 Spatial distribution of soil PAHs in Guangzhou

82.37%之间;5~6环PAHs占比在1.95%~98.58%之间,因此广州市土壤PAHs组分比例总体呈现5~6环>2~3环>4环的趋势。周燕^[40]对西安市表层土壤PAHs的组分特征进行研究发现,西安市的占比特征为2~4环占比大于5~6环;侯伟等^[41]对沈阳市表

层土壤PAHs的组分特征进行研究发现,沈阳市的占比特征为4环的占比大于3环和5环;管贤贤^[42]对兰州市表层土壤PAHs的组分特征进行研究,结果表明兰州市PAHs主要以4环和5环为主。不同城市的土壤PAHs占比特征存在差异,代表其PAHs主要来源存在差异,可能与各城市的产业结构和发展差异有关。

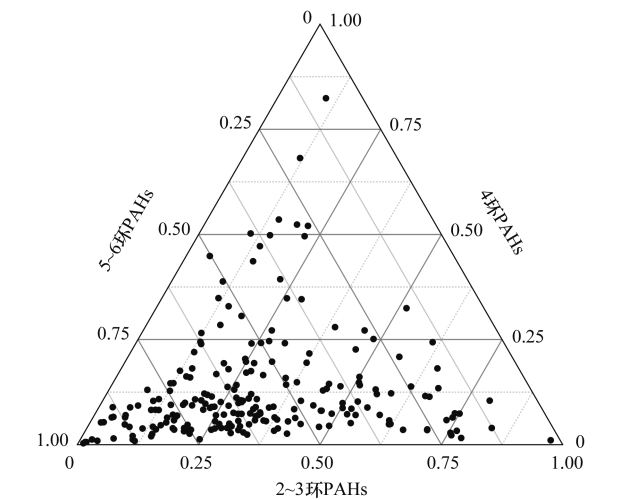


图3 广州市土壤PAHs组分特征
Fig. 3 Characteristics of PAHs components in soil of Guangzhou

2.1.3 土壤理化性质和PAHs含量的相关性

土壤酸碱度和土壤有机质含量是体现土壤理化性质两个较为重要的指标。本研究通过检测土壤pH

值和土壤的有机质含量(OM)以检验土壤理化性质和土壤 PAHs 含量是否存在相关性影响,得到结果如表 4:广州市土壤 pH 值在 4.18 ~ 8.43 之间,平均值为 7.08;广州市土壤的 OM 含量在 2.347% ~ 9.031% 之间,平均值为 5.056%. 经显著性检验分析得出广州市土壤 pH 值和 OM 均与土壤 PAHs 含量无明显的相

关性,其原因可能为土壤中 PAHs 含量受多重因素影响,如土壤中 PAHs 存在新的输入源:如工业和交通排放等,导致土壤理化性质与 PAHs 并未达到动态平衡,此外,PAHs 污染的途径、来源以及污染历史情况都会影响土壤理化性质和 PAHs 的相关性^[43].

表 4 广州市土壤理化指标与 PAHs 含量的相关性¹⁾

Table 4 Correlation between PAHs indexes and PAHs content in Guangzhou

	pH	OM	2 ~ 3 环 PAHs	4 环 PAHs	5 ~ 6 环 PAHs	∑ PAHs
pH	1					
OM	0.083	1				
2 ~ 3 环 PAHs	-0.023	0.055	1			
4 环 PAHs	0.039	0.093	0.312**	1		
5 ~ 6 环 PAHs	0.072	0.061	0.093	0.13	1	
∑ PAHs	0.067	0.084	0.361**	0.358**	0.948**	1

1) **表示在 0.01 水平(双尾),相关性显著

2.2 广州市土壤 PAHs 风险评估

2.2.1 土壤中 PAHs 生态风险评价

(1)效应区间中/低值法 采用 ERL 和 ERM 法对广州市土壤 PAHs 的潜在生态风险进行评价,结果如表 5. 其中 4 种 PAHs 单体:BbF、BkF、InP 和 BgP 无最低安全值,在环境中存在即会对生态环境、生物乃至人类健康造成危害. 基于筛选结果进行分析,可知广州市存在潜在生态风险,个别采样点的 PAHs 污染已

较大可能性存在潜在生态风险. 张楷悦等^[44]采用效应区间中/低值法对黄河三角洲自然保护区的土壤进行生态风险评估,结果表明该区域潜在生态风险极低;王飞等^[45]对太原市表层土壤采用效应区间中/低值法进行生态风险评估,结果为太原市存在较低的生态风险. 不同区域土壤的生态环境质量不同导致其潜在生态风险出现差异,需要提高对土壤潜在生态风险的重视程度.

表 5 PAHs 生态风险评价标准及广州市土壤样品筛选结果¹⁾/μg·kg⁻¹

Table 5 PAHs ecological risk assessment standards and soil sample screening results in Guangzhou/μg·kg⁻¹

PAHs	Nap	Acy	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	BaA	Chry	BbF	BkF	BaP	DaA	BgP	InP	∑16PAHs
质量标准	ERL	160	44	16	19	240	85.3	600	665	261	384	NA	NA	430	63.4	NA	4 022
	ERM	2 100	640	500	540	1 500	1 100	5 100	2 600	1 600	2 800	NA	NA	1 600	260	NA	44 792
超过 ERL 值的样品数		5	4	37	111	8	7	1	0	2	1	0	0	14	20	0	3
超过 ERM 值的样品数		1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

1) NA 表示无最低安全值

(2)BaP 毒性当量法 广州市表层土壤 PAHs 的 TEQ_A 结果如表 6, 单体 PAHs 的 TEQ_A 平均值范围为 0.004 8 ~ 121.19 μg·kg⁻¹, 已有部分样品 PAHs 单体 TEQ_A 平均值超过荷兰土壤标准参考值(33 μg·kg⁻¹)^[43]. 对各土壤样品 TEQ_A 进行空间插值模拟后得到广州市 PAHs 生态风险分布如图 4. 从中可知:广州市中部和南部部分点位土壤 PAHs 潜在生态风险较高,南北部大部分区域生态风险较低. 生态风险评价高值区域主要集中在广州市中部,较大可能存在潜在生态风险,土壤的 PAHs 污染状况较为严重;广州北部和南部小部分地区潜在生态风险水平较低,土壤的 PAHs 污染状况相对轻微,基本符合广州市中部居民密度高于北部和南部的特点,说明 PAHs 污染与人口密度密切相关. 朱媛媛等^[30]、管贤贤^[42]和姚成等^[43]利用 BaP 毒性当量法分别对天津市、兰

州市和扬州市进行生态风险评估,结果表明各城市部分区域均存在潜在生态风险,应高度关注毒性含量高的区域的土地保护.

2.2.2 土壤中 PAHs 健康风险评价

采用 ILCRs 模型对成人和儿童在 3 种不同暴露途径下暴露于 PAHs 的致癌风险和总的致癌风险进行了评估,结果如表 7 所示. 从中可知,广州市土壤 PAHs 含量平均值儿童和成人的致癌总风险都低于 10⁻⁶,表明广州市土壤 PAHs 健康风险总体处于可接受安全范围内;在 3 种暴露途径的致癌风险上,成人和儿童都呈现:皮肤接触带来的致癌风险大于误食土壤带来的致癌风险远大于呼吸摄入带来的致癌风险的规律. 由于生活习惯和人体结构的不同,儿童和成人在不同暴露途径的致癌风险上出现了差异,儿童在皮肤接触和误食土壤的暴露途径产生的致癌风

表 6 广州市表层土壤单体 PAHs 的毒性当量含量(TEQ_A)/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 6 TEQ_A of toxic normality of PAHs in surface soil of Guangzhou/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

PAHs	TEQ_A	最大值	最小值	平均值	PAHs	TEQ_A	最大值	最小值	平均值
Nap	0.001	2.32	0.001 5	0.028	BaA	0.1	36.4	0.2	0.99
Acy	0.001	0.23	0.001 5	0.004 8	Chry	0.01	4.5	0.015	0.14
Ace	0.001	0.33	0.001 5	0.012	BbF	0.1	1 060	0.25	16.19
Flu	0.001	0.63	0.002 5	0.036	BkF	0.1	21.9	0.25	1.06
Phe	0.001	0.62	0.002 5	0.036	BaP	1	1 790	2.5	121.19
Ant	0.01	2.8	0.02	0.12	DaA	1	181	2.5	17.17
Fla	0.001	0.68	0.002 5	0.016	BgP	0.01	13.4	0.025	0.20
Pyr	0.001	0.64	0.001 5	0.077	InP	0.1	28.1	0.2	0.86

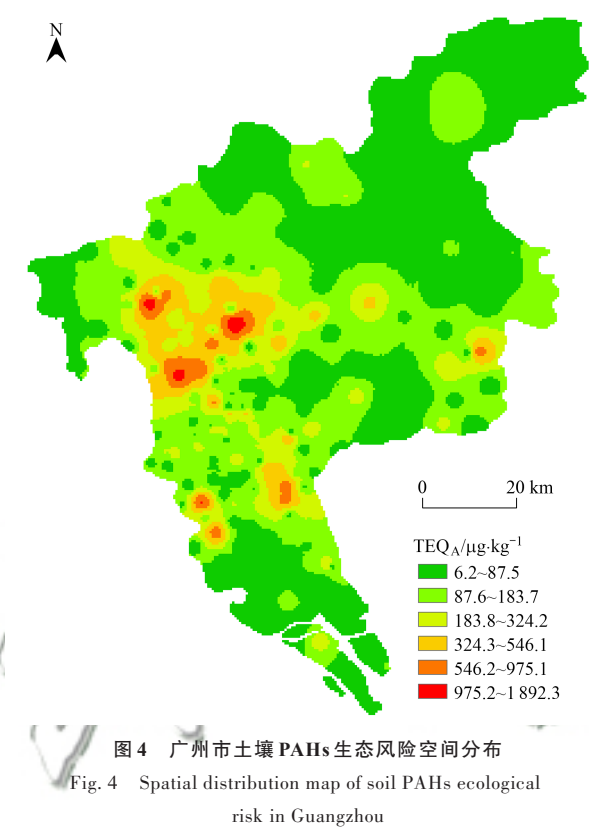


图 4 广州市土壤 PAHs 生态风险空间分布
Fig. 4 Spatial distribution map of soil PAHs ecological risk in Guangzhou

险要高于成人,两类人群呼吸摄入产生的致癌风险几乎可以忽略不计。周燕^[40]对西安市表层土壤采用 ILCRs 模型进行健康风险评估,结果表明西安市部分区域已对人体有较大健康风险,对儿童的健康风险大于成年;管贤贤^[42]利用 ILCRs 模型对兰州市进行健康风险评估,研究结果表明兰州市整体健康风险处于安全临界值下,成人的健康风险水平高于儿童。不同城市土壤对儿童和成人的健康风险出现差异,可能是因为部分居民区的土壤已经被严重污染,需加强对儿童的看护和照看,避免儿童直接或间接接触土壤或其他环境介质中的污染物。

2.3 源解析

2.3.1 特征化合物比值法

各采样点的土壤 PAHs 的几组特征化合物分布状况如图 5。在土壤样品中,44 个土壤样品 $\text{InP}/(\text{InP}+$

表 7 广州市儿童和成人不同暴露途径的 ILCRs 和 CR 值
Table 7 ILCRs and CR values of children and adults in different exposure routes in Guangzhou

暴露途径	暴露人群	
	儿童	成人
皮肤接触	8.73×10^{-6}	6.00×10^{-6}
误食土壤	7.00×10^{-6}	3.78×10^{-6}
呼吸	7.67×10^{-11}	1.71×10^{-10}
总暴露途径	1.57×10^{-5}	9.38×10^{-6}

$\text{BgP}) < 0.2$, 142 个土壤样品 $0.2 \leq \text{InP}/(\text{InP}+\text{BgP}) < 0.5$, 36 个土壤样品 $\text{InP}/(\text{InP}+\text{BgP}) \geq 0.5$; 55 个土壤样品 $\text{BaA}/(\text{BaA}+\text{Chry}) \leq 0.2$, 35 个土壤样品 $0.2 < \text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry}) \leq 0.35$, 132 个土壤样品 $\text{BaA}/(\text{BaA}+\text{Chry}) > 0.35$; 46 个土壤样品 $\text{Ant}/(\text{Ant}+\text{Phe}) < 0.1$, 176 个土壤样品 $\text{Ant}/(\text{Ant}+\text{Phe}) \geq 0.1$; 31 个土壤样品 $\text{Flu}/(\text{Flu}+\text{Pyr}) \leq 0.4$, 18 个土壤样品 $0.4 < \text{Flu}/(\text{Flu}+\text{Pyr}) \leq 0.6$, 173 个土壤样品 $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr}) > 0.6$; 基于特征化合物比值分布结果,说明广州市的 PAHs 来源较为复杂,均为多种来源的混合源,机动车尾气排放、石油燃烧、石油挥发和煤炭、生物质燃烧等来源综合作用于广州市各功能区土壤。杜芳芳等^[29]用比值法分析上海市表层土壤的污染来源,判断 PAHs 的主要污染源为石油燃烧、煤和生物质的燃烧;姚成等^[43]用比值法分析扬州市表层土壤的污染来源,判断 PAHs 主要来源为煤和生物质燃烧,重要来源为石油和石油燃烧,最主要产生原因为机动车尾气排放和化石燃料燃烧;林纪旺等^[46]用主成分分析法和比值法分析判断泉州市表层土壤的污染来源,发现 PAHs 的主要来源为燃煤和交通混合源,其次为石油泄漏源,分别占 83% 和 17%;广州市与上海市、扬州市和泉州市的 PAHs 主要来源存在差异,其原由可能为不同城市的城市化水平存在差异,工业结构、人口分布及人口密度存在差异。

2.3.2 PMF 模型

采用 PMF 5.0 模型对数据进行源成分分析,根据 S/N(信噪比)的值对数据进行筛选后,将 16 种 PAHs

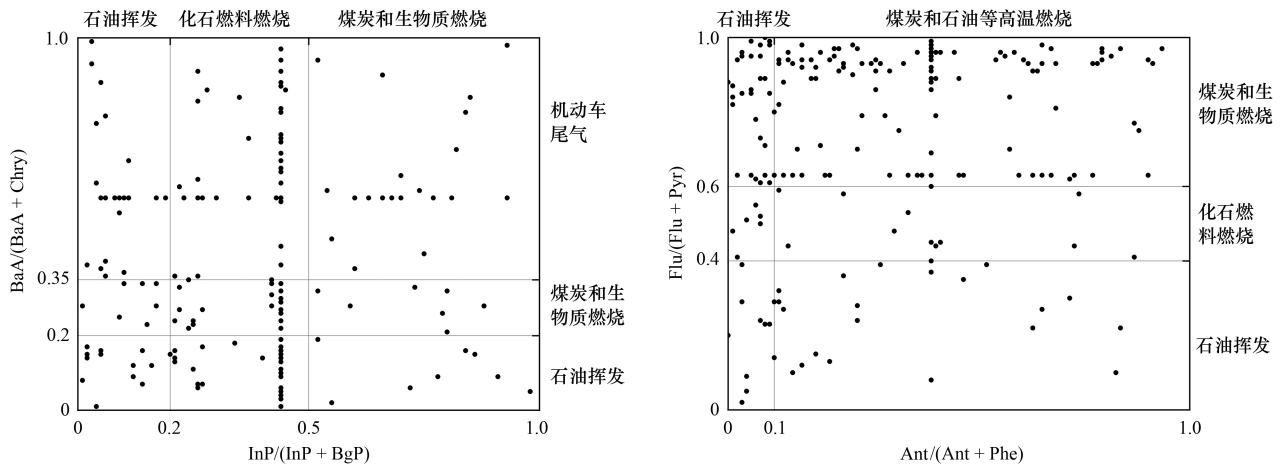


图5 广州市PAHs特征化合物比值

Fig. 5 Characteristic compound ratio of PAHs in Guangzhou

单体都设置为 strong, 将 $\sum 16\text{PAHs}$ 设置为 weak, 选择 3~6 个因子运行 50 次, 模型最优因子为 4. 运行结果如图 6. 因子 1 的主要特征污染物为 BaP (92.7%), BaP 主要来自于化学燃料燃烧^[47], 所以因子 1 可以判断为煤炭源; 因子 2 的主要特征污染物为 BbF (89.1%), BbF 被认为是柴油机排放的标志物^[42], 所以因子 2 可以认为是柴油源; 因子 3 的贡献成分比较丰富, 可以认为是混合源, Nap 可作为石油挥发来源的一个标志物, DaA、InP 和 Acy 是汽车尾气排放的示踪剂^[48], Chry 是生物质燃烧的指示物^[49], 所以因子 3 可认为是代表交通排放、生物质燃烧和石化产品挥发的混合源; 因子 4 的主要特征物为 Flu 和 Phe, Flu 和 Phe 主要源于焦炭炉^[50], Flu 可以作为焦炭排放的指

示物^[49], 所以因子 4 可以代表炼焦源.

广州市表层土壤中各 PAHs 来源的贡献率可以通过 PMF 模型数据进行处理后得到, 如图 7. 各来源对总 PAHs 含量的贡献率由高到低依次为: 煤炭源 (37.1%) > 柴油源 (32.0%) > 炼焦源 (17.3%) > 交通排放、生物质燃烧和石化产品挥发的混合源 (13.6%), PMF 模型得到的结果与特征化合物比值法结果基本一致, 符合广州重点发展交通运输设备、石油化工、精细化工等工业的现状. 前人也对不同城市表层土壤的 PAHs 污染源展开了大量工作: Li 等^[51]用 PMF 模型分别对不同年份的北京市表层土壤进行源解析, 发现由于人类活动影响导致了北京市 PAHs 源成分的明显变化, 发现 PAHs 的主要来源为: 煤炭燃烧、车辆排放、焦化和生物质燃烧; 周芷嫣等^[52]用 PMF 模型分析判断了南京市不同土地利用类型的表层土壤的污染来源, 发现 PAHs 的主要来源为焦炭源、交通源和煤炭燃烧源; 曲文彦等^[53]用 PMF 模型对山西省土壤 PAHs 进行研究, 结果表明山西省土壤 PAHs 主要来自燃烧源和交通源. 不同城市表层土壤的 PAHs 污染来源存在一定差异, 其原因可能是各

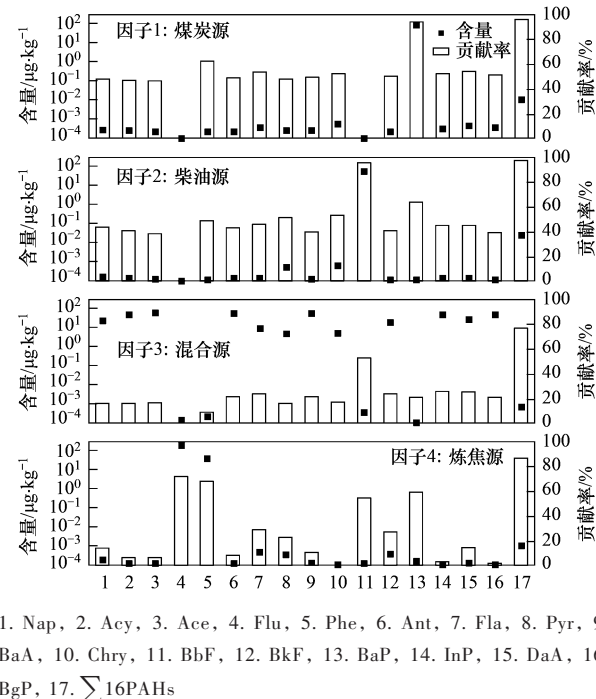


图6 PMF模型结果

Fig. 6 PMF model results

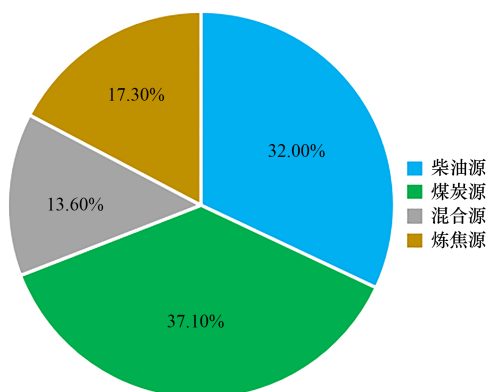


图7 PMF解析出各来源对PAHs的贡献率

Fig. 7 PMF resolves the contribution rate of each source to PAHs

城市的发展存在差异,与该城市产业结构和产业发展水平相关。

3 结论

(1)广州市表层土壤 $\omega(\sum 16\text{PAHs})$ 为38~1115 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为526 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,16种多环芳烃单体均为强变异;PAHs组分以5环PAHs为主,其次为3环PAHs,总体比例呈现5~6环>2~3环>4环的趋势,相比国内其他城市,广州市土壤中PAHs污染处于中等含量水平,土壤PAHs总体污染情况属于轻度污染。

(2)广州市土壤存在潜在生态风险,整体生态风险状况处于可接受状态,但仍需引起关注;对成人和儿童均存在潜在健康风险,儿童的潜在健康风险大于成人,呼吸摄入对人体影响基本可忽略不计。

(3)广州市土壤的PAHs来源较为复杂,主要由柴油源和煤炭源影响,交通排放、石油挥发、生物质燃烧和炼焦源也对整个城市PAHs产生不可忽略的影响,各来源综合作用于广州市各功能区土壤。

参考文献:

- [1] Callén M S, Iturmendi A, López J M. Source apportionment of atmospheric PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons by a PMF receptor model. Assessment of potential risk for human health [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **195**: 167-177.
- [2] 刘月仙,解小凡,杜志伟,等. 不同地区农田土壤多环芳烃污染特征与来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(11): 2539-2547.
- [3] Lia Y X, Xie X F, Du Z W, *et al.* Contamination and sourcing of PAHs in farmlands around different industrial areas [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(11): 2539-2547.
- [4] Qazi F, Shahsavari E, Prawer S, *et al.* Detection and identification of polyaromatic hydrocarbons (PAHs) contamination in soil using intrinsic fluorescence [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **272**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116010.
- [5] Xu Z Y, Wang C H, Li H X, *et al.* Concentration, distribution, source apportionment, and risk assessment of surrounding soil PAHs in industrial and rural areas: A comparative study [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **125**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107513.
- [6] 胡宗达,王明全,李育华,等. 泸沽湖大草海湖滨带表层土壤的多环芳烃污染状况及其生态风险评价[J]. *湿地科学*, 2020, **18**(1): 62-70.
- [7] Hu Z D, Wsng M Q, Li Y H, *et al.* Pollution status and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils in the lakeshore of Dacaoahai of Lugu Lake, Sichuan Province [J]. *Wetland Science*, 2020, **18**(1): 62-70.
- [8] 解小凡,刘月仙,邱慧,等. 黄河三角洲石油化工区农田土壤-玉米体系PAHs的分布特征及风险评价[J]. *生态学报*, 2021, **41**(3): 987-997.
- [9] Xie X F, Liu Y X, Qiu H, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in farmland soil-corn system from oil mining area of Yellow River Delta [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(3): 987-997.
- [10] Zhang P, Chen Y G. Polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in surface soil of China: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **605-606**: 1011-1020.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 章迪,曹善平,孙建林,等. 深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 711-718.
- [14] Zhang D, Cao S P, Sun J L, *et al.* Occurrence and spatial differentiation of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from Shenzhen, China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 711-718.
- [15] Zhang X R, Lu W Q, Xu L Y, *et al.* Environmental risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in farmland soils near highways: A case study of Guangzhou, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, **19**(16), doi: 10.3390/IJERPH191610265.
- [16] 杨秀虹,李适宇,李岚,等. 广州市工业、交通区表层土壤中多环芳烃分布特征初探[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2008, **47**(1): 93-97.
- [17] Yang X H, Li S Y, Li L, *et al.* Preliminary study on the composition characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface of industrial sites and traffic Sites in Guangzhou [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2008, **47**(1): 93-97.
- [18] 黄俊彪. 广州市典型森林土壤多环芳烃分布及其吸附性能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [19] 褚红榜. 广州市垃圾填埋场渗滤液及其周围水体与土壤中的多环芳烃和邻苯二甲酸酯初探[D]. 广州: 广州大学, 2009.
- [20] 黄应平,金蕾,朱灿,等. 三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3808-3819.
- [21] Huang Y P, Jin L, Zhu C, *et al.* Temporal-spatial distribution and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil of Xiangxi bay in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3808-3819.
- [22] HJ 784-2016, 土壤和沉积物多环芳烃的测定 高效液相色谱法[S].
- [23] Long E R, Macdonald D D, Smith S L, *et al.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments [J]. *Environmental Management*, 1995, **19**(1): 81-97.
- [24] 夏子书,王玉玉,钟艳霞,等. 基于GIS和PMF模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5656-5667.
- [25] Xia Z S, Wang Y Y, Zhong Y X, *et al.* Spatial distribution characteristics and source apportionment of soil PAHs in Shizuishan city based on GIS and PMF Model [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5656-5667.
- [26] 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.
- [27] 王宗爽,段小丽,刘平,等. 环境健康风险评价中我国居民暴露参数探讨[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(10): 1164-1170.
- [28] Wang Z S, Duan X L, Liu P, *et al.* Human exposure factors of Chinese people in environmental health risk assessment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(10): 1164-1170.

- [20] 段小丽. 暴露参数的研究方法及其在环境健康风险评估中应用[J]. 新疆农业科学, 2012, **49**(2): 346.
- [21] 杜威宁. 上海淀山湖多环芳烃多介质分布与营养级迁移研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- [22] 杨北辰, 解启来, 郑芊, 等. 新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估[J]. 环境科学, 2022, **43**(12): 5751-5760.
- Yang B C, Xie Q L, Zheng J N, *et al.* Occurrence, source analysis, and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in plants and soils from typical areas of Xinjiang, China [J]. Environmental Science, 2022, **43**(12): 5751-5760.
- [23] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [24] 广州市统计局, 国家统计局广州调查队. 广州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社有限公司, 2020.
- [25] Chi P, Chen W P, Liao X L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of Beijing: Status, sources, distribution and potential risk[J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(3): 802-808.
- [26] 许安, 刘威杰, 胡天鹏, 等. 新疆阿勒泰地区土壤中多环芳烃含量水平及来源解析[J]. 生态与农村环境学报, 2021, **37**(5): 619-626.
- Xu A, Liu W J, Hu T P, *et al.* Pollution characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil of Altay, Xinjiang [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, **37**(5): 619-626.
- [27] 曾超怡, 徐辉, 许岩, 等. 长江重点江段水体中多环芳烃及其衍生物的分布及健康风险[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(12): 4932-4941.
- Zeng C Y, Xu H, Xu Y, *et al.* Distribution and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their derivatives in surface water of the Yangtze River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(12): 4932-4941.
- [28] HJ/T 166-2004. 土壤环境监测技术规范[S].
- [29] 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.
- [30] 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估[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.
- [31] 王春辉. 城市土壤多环芳烃累积的时空变化与风险研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.
- [32] 张道来, 刘娜, 叶青, 等. 青岛市区表层土壤多环芳烃分布特征、来源及潜在风险[J]. 城市环境与城市生态, 2016, **29**(1): 7-12.
- [33] 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.
- [34] 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估[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.
- [35] Jiang Y F, Yves U J, Sun H, *et al.* Distribution, compositional pattern and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of an industrial city, Lanzhou, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, **126**: 154-162.
- [36] 苑金鹏, 王晓利, 周家斌, 等. 济南市表层土壤中PAHs的分布、来源及风险分析[J]. 环境化学, 2015, **34**(1): 166-171.
- Yuan J P, Wang X L, Zhou J B, *et al.* Distribution, source and risk analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in top-soil from Jinan City [J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(1): 166-171.
- [37] 张枝焕, 卢另, 贺光秀, 等. 北京地区表层土壤中多环芳烃的分布特征及污染源分析[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(4): 668-675.
- Zhang Z H, Lu L, He G X, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds in topsoil of Beijing, China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, **20**(4): 668-675.
- [38] 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.
- [39] 姚万程, 苏迎庆, 张恩月, 等. 某钢铁工业区及其周边土壤中多环芳烃污染特征、源解析及风险评估[J]. 环境污染与防治, 2022, **44**(5): 625-630, 638.
- Yao W C, Su Y Q, Zhang E Y, *et al.* Pollution characteristics, source apportionment and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the soil of an iron and steel industrial area and its surroundings [J]. Environmental Pollution & Control, 2022, **44**(5): 625-630, 638.
- [40] 周燕. 西安市不同功能区土壤重金属与多环芳烃污染研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.
- [41] 侯伟, 刘伟, 万志强, 等. 沈阳市不同功能区地表土壤多环芳烃(PAHs)污染特征研究[J]. 气象与环境学报, 2020, **36**(1): 108-112.
- Hou W, Liu W, Wan Z G, *et al.* Study on PAHs pollution characteristics of surface soil in different functional areas in Shenyang [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2020, **36**(1): 108-112.
- [42] 管贤贤. 兰州市主城区表层土壤PAHs污染特征、源解析及风险评估[D]. 兰州: 西北师范大学, 2021.
- [43] 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.
- [44] 张楷悦, 刘增辉, 王颜昊, 等. 黄河三角洲自然保护区土壤PAHs的风险评估和空间特征[J]. 生态环境学报, 2022, **31**(11): 2198-2205.
- Zhang K Y, Liu Z H, Wang Y H, *et al.* Risk assessment and spatial characteristics of PAHs in soils in the Yellow River Delta Nature Reserve [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, **31**(11): 2198-2205.
- [45] 王飞, 赵颖. 太原市污灌区农田土壤中多环芳烃污染特征及生态风险评估[J]. 生态环境学报, 2022, **31**(1): 160-169.
- Wang F, Zhao Y. Pollution characteristics and risk assessment of

- PAHs in agricultural soil from sewage irrigation area of Taiyuan City, Shanxi Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, **31**(1): 160-169.
- [46] 林纪旺, 倪进治, 杨红玉, 等. 泉州市表层土中多环芳烃的含量、来源及其生态风险评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 2074-2080.
- Lin J Y, Ni J Z, Yang H Y, *et al.* Concentrations, sources and ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the topsoils of Quanzhou city, China[J]. Environmental Science, 2011, **32**(7): 2074-2080.
- [47] 吴张伟, 段永红, 刘立文, 等. 太原市耕地土壤 PAHs 的含量、分布、源解析与风险评价[J]. 环境科学, 2023, **44**(8): 4387-4396.
- Wu Z W, Duan Y H, Liu W L, *et al.* Content, distribution, source analysis, and risk assessment of PAHs in arable soils of Taiyuan[J]. Environmental Science, 2023, **44**(8): 4387-4396.
- [48] Cheng Q Q, Ge W, Chai C, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soil around coal-fired power plants in Shandong, China[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, **28**(1): 53-64.
- [49] Apiratikul R, Pongpianchan S, Deelman W. Spatial distribution, sources and quantitative human health risk assessments of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban and suburban soils of Chile[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2021, **41**(8): 2851-2870.
- [50] 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.
- [51] Li J G, Zheng Y, Luo X L, *et al.* PAH contamination in Beijing's topsoil: a unique indicator of the megacity's evolving energy consumption and overall environmental quality [J]. Scientific Reports, 2016, **6**(1), doi: 10.1038/srep33245.
- [52] 周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 等. 不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2023, **44**(3): 1583-1592.
- Zhou Z Y, Zhang X X, Wang F, *et al.* Vertical pollution characteristics and source analysis of soil PAHs in different land use types[J]. Environmental Science, 2023, **44**(3): 1583-1592.
- [53] 曲文彦, 李渊, 刘晶. 山西省土壤和玉米中多环芳烃的空间分布特征、溯源及健康风险评价[J]. 山西农业科学, 2023, **51**(3): 299-305.
- Qu W Y, Li Y, Liu J. Spatial distribution characteristics, source, and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil and maize in Shanxi province [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, **51**(3): 299-305.



CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i> (617)
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang (626)
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing	CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i> (635)
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (645)
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i> (655)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i> (668)
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i> (678)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou	LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (689)
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM _{2.5} in Zhengzhou	LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i> (700)
Nonlinear Variations in PM _{2.5} Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i> (709)
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model	WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i> (721)
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i> (732)
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Considering Regional Features and Vehicle Type Differences	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i> (744)
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (755)
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i> (768)
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i> (780)
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i> (792)
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i> (802)
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong (813)
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area	JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i> (826)
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i> (837)
Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo (844)
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i> (854)
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate	LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i> (862)
Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ in Aqueous Solution	JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i> (873)
Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon	ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i> (885)
Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water	HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i> (898)
High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China	LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i> (909)
Ecosystem CO ₂ Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary	LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i> (920)
Effects of Biochar Application Two Years Later on N ₂ O and CH ₄ Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China	HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i> (929)
Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil	WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i> (940)
Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis	XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i> (952)
Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province; Taking Puding County as An Example	LI Yue, LUO Hong-fen (961)
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i> (974)
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing (983)
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (992)
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China	YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i> (1004)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> (1015)
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (1026)
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i> (1038)
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i> (1049)
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models	SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i> (1058)
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i> (1069)
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i> (1080)
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i> (1090)
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i> (1098)
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i> (1107)
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (1118)
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i> (1128)
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings	ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i> (1141)
Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (1150)
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community	HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i> (1161)
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review	BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i> (1173)
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i> (1185)
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i> (1196)
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang (1210)
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory	GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li (1222)