

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展	陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓 (1201)
全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展	孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙 (1214)
湖泊水质参数遥感监测研究进展	王思梦, 秦伯强 (1228)
淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展	赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超 (1244)
长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应	吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋 (1258)
中国土地利用碳排放变化及协调分区	李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯 (1267)
基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析	刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛 (1277)
基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势	佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧 (1287)
浙江省大气颗粒物 PM _{2.5} 化学组分污染特征分析	周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳峰, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静 (1297)
南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源	徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕 (1310)
洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献	闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思 (1319)
江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征	宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜 (1328)
珠三角典型工业区挥发性有机物 (VOCs) 组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性	宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏 (1336)
2000 ~ 2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变	孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧 (1346)
港口自有移动源大气污染物排放清单	徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺 (1357)
基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控	欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙 (1368)
黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估	曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建 (1378)
桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征	余悦, 邢新丽, 程铖, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华 (1387)
广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析	陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成 (1397)
宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价	徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军 (1407)
典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析	王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫 (1416)
牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁 (1429)
石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析	丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞 (1440)
北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析	温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞 (1452)
拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价	单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文 (1465)
南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素	高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔 (1475)
调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素	丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文 (1484)
典型城市内河细菌组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析	谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晓艳, 郑蕾 (1497)
滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算	郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中 (1508)
窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制	曾少毅, 李坤权 (1519)
高比表面疏脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附	闵炳坤, 李坤权 (1528)
不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征	刘晨旭, 白晓慧 (1537)
水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析	杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕 (1542)
增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响	邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章 (1553)
三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化	李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源 (1562)
鄱阳湖平原直播稻 CH ₄ 通量及其与 CO ₂ 通量的综合温室效应	时元智, 崔远来, 时硕, 洪大林, 程婕 (1572)
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	周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君 (1583)
石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估	李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建升 (1593)
南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价	杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清 (1602)
三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析	石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然 (1611)
兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析	康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林 (1620)
粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价	王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨 (1636)
三门峡某铝厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳 (1646)
某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价	王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东 (1657)
化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制	马强, 卫泽斌, 吴启堂 (1668)
再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制	林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞 (1678)
长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评价	刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红 (1686)
稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应	张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚 (1698)
巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性	冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕 (1706)
蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与韭菜修复铅镉污染土壤的影响	陈敏妮, 袁小奇, 张金峰, 何川黔, 高波 (1714)
地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议	王锐, 李瑜, 余京, 周蛟, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (1727)
张家口市北新屯地区蔬菜种植区锆元素富集特征及成因分析	安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原 (1735)
三峡库区消落带落叶杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化	谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓 (1748)
黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响	张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平 (1758)
化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响	王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明 (1768)
鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化	张丹, 彭双, 王丹青, 王一鸣, 林先贵 (1780)
牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响	张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林 (1792)
《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)	

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

周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 为研究城郊地区不同土地利用类型土壤多环芳烃 (PAHs) 的纵向污染特征, 对南京市郊菜地、林地、居民点、城镇用地、水田和工业区这 6 个不同土地利用类型土壤各 1 剖面 (0~100 cm) 的 15 种优控 PAHs 进行研究, 分析了 PAHs 的纵向分布和组成特征、影响因素和来源。结果表明, 6 个采样点剖面 $\sum_{15}$ PAHs 含量分别为: 菜地 $69.3 \sim 299.2 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、林地 $20.8 \sim 128.3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、居民点 $30.7 \sim 142.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、城镇用地 $185.6 \sim 1728.7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、水田 $208.3 \sim 693.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和工业区 $165.6 \sim 739.2 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。居民点和林地没有污染, 菜地污染水平较轻, 水田和工业区污染水平中等, 城镇用地污染较严重。除居民点和城镇用地以外的采样点土壤 PAHs 集中分布在表层或次表层, 但在深层仍有检出, 且各采样点各深度大多以高环 PAHs 为主。PAHs 的分子特性及成分含量、土壤的理化性质和土地利用方式均会影响 PAHs 在土壤中的纵向分布与迁移。PMF 源解析表明人类活动产生的焦炭源、交通源和煤炭燃烧源是该研究区 PAHs 的主要来源。

关键词: 城郊; 土地利用类型; 多环芳烃 (PAHs); 纵向污染; 源解析

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1583-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202204071

Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types

ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, ZHU Chang-da, PAN Jian-jun*

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In order to study the vertical pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils of different land use types in suburban areas of Nanjing, 15 types of controlled PAHs were studied in each section (0-100 cm) of soils from six different land use types, including a vegetable field, forestland, residential area, urban land, paddy field, and industrial area. The vertical distribution and composition characteristics, influencing factors, and sources of PAHs were analyzed. The results showed that: the total concentrations of $\sum_{15}$ PAHs in the six sampling site profiles were as follows: vegetable field ($69.3 \sim 299.2 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), forestland ($20.8 \sim 128.3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), residential area ($30.7 \sim 142.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), urban land ($185.6 \sim 1728.7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), paddy field ($208.3 \sim 693.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), and industrial area ($165.6 \sim 739.2 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). There was no pollution in the residential area or forestland and a light pollution level in the vegetable field, medium pollution level in the paddy field and industrial area, and more serious pollution in the urban land. Soil PAHs were mainly distributed in the surface or subsurface layer, except in the residential area and urban land; however, they were still detected in the deep layers, and high-molecular-weight PAHs were dominant in most depths and sampling sites. The vertical distribution and migration of PAHs in soils were affected by molecular characteristics and component concentrations of PAHs, soil physical and chemical properties, and land use types. PMF source analysis indicated that coke sources, traffic sources, and coal combustion sources from human activities were the main sources of PAHs in this study region.

Key words: suburban; land use types; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); vertical pollution; source analysis

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是一类普遍存在的持久性有机污染物^[1]。PAHs 通过各种人为活动和自然来源排放到环境中, 其中, 以人为排放为主, 包括交通尾气排放、木材及煤炭燃烧和焦炭工业排放等^[2]。通过干湿沉降和水文径流等途径汇聚到土壤中的 PAHs 因具有持久性和高度稳定性等特点在土壤中滞留较长的时间^[3], 由于其复杂的环境行为, PAHs 会向下迁移甚至污染地下水^[4,5], 因此, 研究 PAHs 在土壤中的纵向污染特征及迁移机制对保护土壤-地下水生态系统有着重要的意义。

土壤有机质、粒径组分和酸碱性等理化性质会影响 PAHs 在土壤中的扩散、迁移、氧化还原、吸附和降解等过程^[6]。有机质对 PAHs 的吸附结合作

用会抑制 PAHs 的纵向迁移, 同时, 有机质的含量差异会部分造成 PAHs 在不同粒径组分中的优次分布^[7-9]。但也有研究表明, 有机质分布不均匀且组成与性质复杂, 土壤 PAHs 含量处于较低水平或新的 PAHs 不断输入等因素, 会对两者之间的相关性产生影响^[10,11]。土壤酸碱性会影响不同环数 PAHs 的纵向迁移。有研究表明, 酸性条件有利于高环 PAHs 纵向迁移, 而碱性条件有利于低环 PAHs 纵向迁移^[12]; 也有研究发现酸性条件下低环 PAHs 更易随水向下迁移, 而对高环 PAHs 的迁移影响较小^[13]。

收稿日期: 2022-04-07; 修订日期: 2022-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971057, 41771247)

作者简介: 周芷嫣 (1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤多环芳烃污染, E-mail: 2069641493@qq.com

* 通信作者, E-mail: jpan@njau.edu.cn

目前对南京市土壤 PAHs 的研究主要集中在城市林业土壤、绿地或农村耕地等单一地类中^[14~16],不能完全反映某一区域整体内不同土地利用类型 PAHs 污染的差异性,且对于拥有小加工和制造工厂的城郊地区的 PAHs 分布特征的研究还鲜有报道.城郊土地利用类型复杂,具有很强的开放性,受城市化、工业污染物质、化肥农药和污水灌溉的多重影响,污染物质容易在土壤中累积^[17].不同利用类型土壤 PAHs 的分布有所差异,说明土壤 PAHs 污染调查受到了实地取样点的局限,根据不同土地利用类型进行研究能更进一步地了解某一区域土壤中 PAHs 的污染状况.本文以南京城市边缘某典型城乡一体化地区为研究对象,分析 15 种优控 PAHs 在不同土地利用类型土壤剖面中的纵向分布和组成特征、影响因素和来源,以期为其他城郊区域土壤 PAHs 污染管理与控制提供一定的借鉴.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省南京市江宁区,总面积约为 40 km²,属于北亚热带季风气候,年均气温为 15.6℃,平均无霜期为 224 d,年均降雨量为 1 072.9 mm.研究区海拔高度在 6~40 m 之间,地势较低的平原或低洼地被开垦为水田和菜地,部分岗

地伴有林地分布,居民点主要分布于地势较高的微高地,城镇用地和集中在城镇以西的工业区分布于岗地区域.

1.2 样品采集

2021 年 5 月在该地区具有典型性、代表性的菜地、林地、居民点、城镇用地、水田和工业区这 6 个不同土地利用类型土壤各采集 1 个土壤剖面,剖面深度在 0~5、5~10、10~20、20~30、30~40、40~60 和 60~100 cm,共计 42 个样品.将土样密封保存后运回实验室,剔除杂质后研磨过 60 目筛并标注样品编号及剖面名称,于 -4℃ 下在棕色玻璃瓶中冷藏保存.研究区概况和用 GPS 记录的所有采样点地理坐标见图 1,记录的采样点周边环境见表 1.

1.3 样品分析及质量控制

为保证实验数据的准确性,委托中国科学院南京土壤研究所进行 15 种优控 PAHs 的测定[萘烯(Acy)因故未测定],分别是萘(Nap)、二氢萘(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、䓛(Chry)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[a,h]蒽(DahA)、茚并[1,2,3-cd]芘(IndP)和苯并[g,h,i]芘(BghiP).PAHs 含量的测定方法参考文献[18].

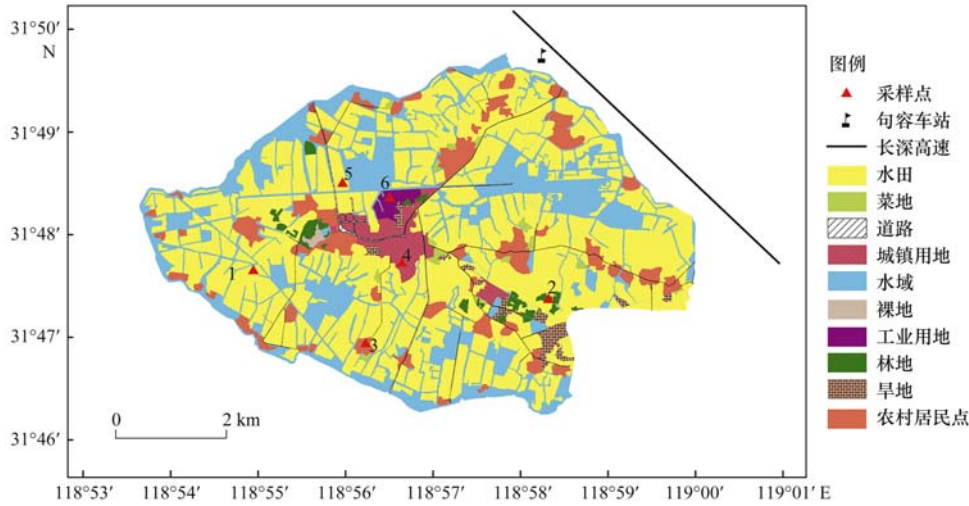


图 1 研究区概况及采样点分布示意

Fig. 1 Location and sampling sites of the study region

表 1 采样点信息

Table 1 Details of the sampling sites

样点编号	剖面名称	周边环境
1	菜地	周围有农村居民点分布,距灌溉水源近,东侧有乡道
2	林地	位于研究区东侧,天然林,以马尾松、杉木为主,北侧有乡道
3	居民点	农间小路交错,周围有水田分布
4	城镇用地	交通发达,商户多,有机械制造、冶钢处理等企业分布,路边有施工建筑
5	水田	灌溉水源位于工业区附近
6	工业区	交通发达,化工企业云集

称取 5 g 土壤样品,置于 150 mL 三角瓶中,加入 15 mL 二氯甲烷,浸泡 12 h 后超声振荡 20 min 且水温不超过 20℃,将无水硫酸钠放置在漏斗的棉片上,将提取液过滤.重复超声振荡步骤 3 次,合并提取液,使用旋转蒸发器浓缩至近干.用正己烷湿法装柱,装入脱脂棉、无水硫酸钠 1 cm、硅胶 12 cm、无水硫酸钠 1 cm,用正己烷冲洗净化柱,在溶液流干前将提取液加入柱内,用 8 mL 洗脱液(正己烷:二氯甲烷=1:1)进行洗脱,重复 4 次,洗脱液接收于 20 mL 鸡心瓶中,旋转蒸发至近干,加入约 1 mL 乙腈,充分润洗转移至进样瓶中,于 -4℃ 冰箱中避光、密封保存.使用配备有荧光检测器的高效液相色谱仪分离检测(HPLC/MV-FLD),流动相 A:超纯水,流动相 B:色谱纯乙腈.柱温箱温度设置为 35℃,将泵的流速设置为 1 mL·min⁻¹,使用自动进样器进样,进样体积为 20 μL.

为保证实验数据可靠,在测定过程中,严格遵循质量控制与保证质量的程序,采用空白和平行样实验、基体加标以及校准和重复测定的方法进行质量控制.目标化合物的定量采用外标法实现,空白样品未检测出待测物,加标回收率在 76%~91%,符合质控要求.

1.4 土壤理化性质测定

pH 采用 pH 计测定;有机碳(SOC)采用硫酸-重铬酸钾外加热法测定;土壤黏粒含量(clay)采用粒度仪测定.

1.5 正定矩阵因子分解法(PMF)

PMF 是一种有效的多元因子分析方法,已被广泛用于量化分析排放源对土壤、大气沉积物等环境基质中污染物水平的贡献^[19].本研究采用 EPA PMF 5.0 模型对 $\sum_{15}$ PAHs 进行来源解析判别,其基本公式如下:

$$X = GF + E \quad (1)$$

式中,样品浓度矩阵 X 为 n 个样品 m 种化合物的浓度组成 ($n \times m$); G 为贡献率矩阵 ($n \times p$); F 为源配置矩阵 ($p \times m$); E 为残差矩阵 ($n \times m$).

$$e_{ij} = x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} \quad (2)$$

式中, e_{ij} 、 x_{ij} 、 g_{ik} 和 f_{kj} 分别为残差矩阵、样品浓度矩阵、贡献率矩阵和源配置矩阵, p 为提取的因子数(即来源数).

PMF 模型旨在最小化与残差矩阵和不确定性矩阵 u_{ij} 相关的目标函数 Q ,以求出源贡献.公式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{e_{ij}}{u_{ij}} \right)^2 \quad (3)$$

本研究中,采用的不确定性公式如下:

$$UNC = (5/6) \times MDL \quad x_{ij} \leq MDL$$

$$UNC = \sqrt{(RSD \times x_{ij})^2 + (MDL)^2} \quad x_{ij} > MDL \quad (4)$$

式中,UNC 为不确定性;MDL 为化合物检出限;RSD 为相对标准偏差.

在本研究中:PAHs 单体检出率小于 80% 的不在此模型中使用,若 PAHs 单体浓度低于检出限则替换为 1/2 检出限.

2 结果与讨论

2.1 土壤剖面 PAHs 污染水平

表 2 提供了不同土地利用类型土壤 0~100 cm PAHs 的含量数据.6 个剖面 $\sum_{15}$ PAHs 含量分别为:菜地 69.3~299.2 μg·kg⁻¹、林地 20.8~128.3 μg·kg⁻¹、居民点 30.7~142.1 μg·kg⁻¹、城镇用地 185.6~1 728.7 μg·kg⁻¹、水田 208.3~693.0 μg·kg⁻¹和工业区 165.6~739.2 μg·kg⁻¹.从均值来看,6 个剖面 $\sum_{15}$ PAHs 含量高低依次为:城镇用地 > 工业区 > 水田 > 菜地 > 居民点 > 林地, $\sum_{15}$ PAHs 检出率均高于 70%.Maliszewska-Kordybach^[20] 将土壤中 PAHs 的污染水平定义为未污染土壤 (<200 μg·kg⁻¹)、轻度污染土壤 (200~600 μg·kg⁻¹)、中度污染土壤 (600~1 000 μg·kg⁻¹) 和重度污染土壤 (>1 000 μg·kg⁻¹).根据这一标准,本研究区有 18 个样品(菜地 3 个、城镇用地 4 个、水田 6 个和工业区 5 个)达到轻度污染水平,占比 42.9%,3 个样品(城镇用地、水田和工业区各 1 个)达到中度污染水平,占比 7.2%,1 个样品(城镇用地)达到重度污染水平,占比 2.4%,其余 47.5% 的样品未被 PAHs 污染.综上所述,林地和居民点没有 PAHs 污染,菜地污染水平较轻,水田和工业区污染水平中等,城镇用地污染较严重.

与其他地区相比,研究区居民点 $\sum_{15}$ PAHs 含量略高于南宁市居民点 0~40 cm 剖面土壤 (20.63~97.63 μg·kg⁻¹)^[21],城镇用地 $\sum_{15}$ PAHs 含量低于上海市 0~100 cm 剖面土壤 (91.5~11 098.5 μg·kg⁻¹)^[22],水田 $\sum_{15}$ PAHs 含量略高于中梁山岩溶槽谷耕地 0~110 cm 剖面土壤 (40.40~448.46 μg·kg⁻¹)^[23],工业区 $\sum_{15}$ PAHs 含量低于黄土高原石油开采区 0~50 cm 剖面土壤 (213.16~18 068.80 μg·kg⁻¹)^[24].总体来说,该区域土壤 PAHs 污染处于中等偏低水平.然而,由于 PAHs 可

以从土壤中再挥发到大气介质中,尽管总体上远低于人为排放的通量,但可能会显著增加未受污染区域空气中 PAHs 的浓度^[25],因此,即使 PAHs 污染水平较低,长此以往也会对周边环境造成一定的危害。

表 2 土壤剖面中 PAHs 含量¹⁾

Table 2 Concentrations of PAHs in soil profiles													
环数	PAHs	菜地		林地		居民点		城镇用地		水田		工业区	
		范围 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	检出率 /%	范围 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	检出率 /%	范围 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	检出率 /%	范围 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	检出率 /%	范围 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	检出率 /%	范围 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	检出率 /%
2	Nap	ND ~ 1.8	43	ND ~ 3.0	57	ND ~ 2.4	57	ND ~ 2.6	29	ND ~ 4.85	43	ND ~ 1.7	14
3	Ace	ND ~ ND	0	ND ~ ND	0	ND ~ ND	0	ND ~ 9.6	29	ND ~ ND	0	ND ~ ND	0
	Flu	0.4 ~ 2.4	100	ND ~ 1.0	86	ND ~ 1.5	86	0.7 ~ 4.0	100	ND ~ 2.8	86	ND ~ 1.9	57
	Phe	18.3 ~ 98.2	100	12.3 ~ 67.4	100	11.9 ~ 56.8	100	50.2 ~ 180.3	100	41.5 ~ 204.7	100	21.4 ~ 174.6	100
	Ant	ND ~ 3.8	86	ND ~ 0.6	71	ND ~ 2.8	86	0.6 ~ 14.7	100	ND ~ 7.7	85	ND ~ 2.7	86
4	Fla	11.0 ~ 66.9	100	3.1 ~ 17.6	100	1.5 ~ 23.9	100	42.4 ~ 328.8	100	14.4 ~ 252.4	100	87.4 ~ 222.1	100
	Pyr	15.8 ~ 33.8	100	0.6 ~ 28.0	100	1.7 ~ 30.2	100	16.1 ~ 225.8	100	18.6 ~ 116.8	100	13.2 ~ 119.6	100
	BaA	4.8 ~ 23.6	100	0.2 ~ 9.1	100	1.3 ~ 10.3	100	5.8 ~ 113.5	100	3.3 ~ 16.4	100	1.9 ~ 22.8	100
	Chry	7.6 ~ 38.4	100	0.4 ~ 14.3	100	1.7 ~ 16.5	100	15.2 ~ 159.6	100	8.8 ~ 30.6	100	5.1 ~ 44.5	100
5	BbF	3.8 ~ 30.2	100	ND ~ 7.4	86	0.4 ~ 11.4	100	5.5 ~ 152.9	100	1.1 ~ 19.3	100	0.58 ~ 38.83	100
	BkF	0.8 ~ 16.2	100	ND ~ 2.8	57	ND ~ 4.6	57	3.3 ~ 78.8	100	ND ~ 7.7	86	ND ~ 17.3	86
	BaP	ND ~ 23.4	71	ND ~ 5.3	57	ND ~ 8.8	57	0.8 ~ 169.2	100	ND ~ 11.7	57	ND ~ 26.4	71
	DahA	ND ~ 4.0	43	ND ~ 1.5	43	ND ~ 2.0	14	ND ~ 45.4	86	ND ~ 4.7	71	ND ~ 8.5	71
6	InP	ND ~ 23.2	86	0.9 ~ 6.6	100	1.0 ~ 12.8	100	3.70 ~ 164.8	100	2.7 ~ 17.3	100	1.9 ~ 40.2	100
	BghiP	0.5 ~ 13.3	100	0.5 ~ 2.9	100	0.5 ~ 5.6	100	1.6 ~ 81.3	100	0.5 ~ 7.9	100	0.6 ~ 19.9	100
$\sum_{15}$ PAHs		69.3 ~ 299.2	100	20.8 ~ 128.3	100	30.7 ~ 142.1	100	185.6 ~ 1728.7	100	208.3 ~ 693.0	100	165.6 ~ 739.2	100
均值		188.0	82	77.4	76	81.6	77	539.3	90	340.1	82	369.7	79

1) ND 表示未检出

2.2 PAHs 纵向分布与组成特征

图 2 为各剖面 0 ~ 100 cm 土壤 $\sum_{15}$ PAHs、低环 PAHs 和高环 PAHs 的纵向分布和组成特征。从中可以看出,菜地和工业区 $\sum_{15}$ PAHs 主要分布在 0 ~ 20 cm 土壤,林地 $\sum_{15}$ PAHs 主要分布在 0 ~ 40 cm 土壤,水田 $\sum_{15}$ PAHs 主要分布在 0 ~ 30 cm 土壤,都在 0 ~ 5 cm 处达到峰值,基本随深度递减。林地 PAHs 能迁移至较深层土壤可能是由于林地的持水能力和渗水能力更佳,有利于将地表水转化为土壤水,水溶性更高的低环 PAHs 由此发生纵向迁移^[26]。水田和菜地可能因为耕作较频繁,导致 PAHs 在犁底层附近出现“逆向富集”的现象^[27]。城镇用地 $\sum_{15}$ PAHs 在 30 ~ 40 cm 处达到峰值,为 1728.7 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,居民点 $\sum_{15}$ PAHs 主要集中在 0 ~ 5 cm 和 40 ~ 100 cm 土壤中,这两个采样点 $\sum_{15}$ PAHs 含量的纵向分布与其余采样点产生差异的原因可能是因为人类建设活动导致的土壤层扰动。总的来说,除居民点和城镇用地以外的其他剖面 PAHs 主要被截留在土壤表层或次表层。

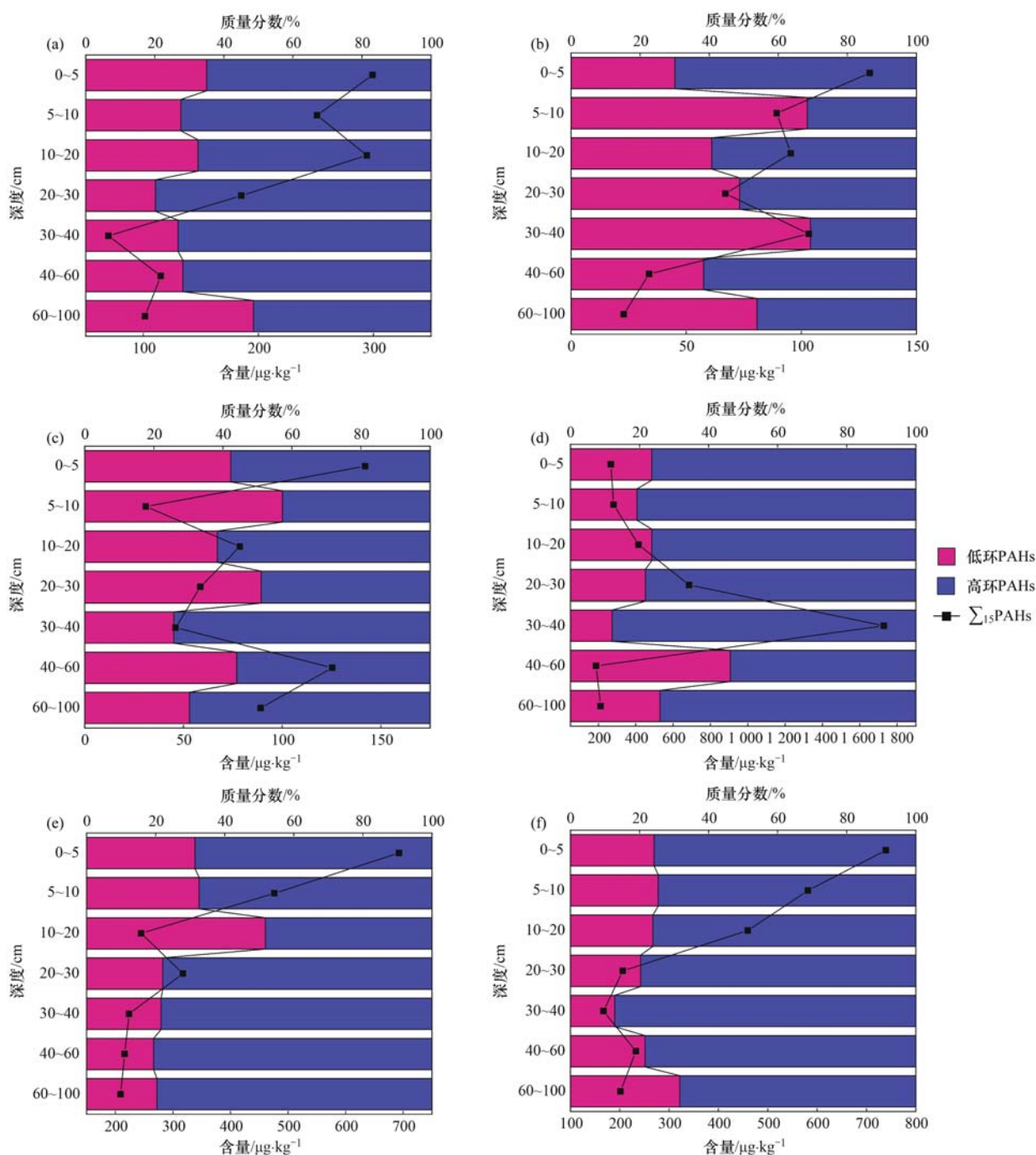
不同土地利用类型土壤 PAHs 纵向分布不仅总量存在差异,组成也略有不同。各剖面不同深度土壤 PAHs 含量总体来说为高环 PAHs > 低环 PAHs。前人的研究认为高环 PAHs 会因与有机质和黏粒吸附结

合和具有疏水性被截留在表层,因此吸附和螯合潜力较低,水溶性相对较高易以溶解态形式发生迁移的低环 PAHs 会在深层有更高的富集率^[28]。本研究结果的差异性可能与各剖面高环 PAHs 质量分数更高有关,说明不同环数 PAHs 的含量差异可能也会影响其纵向迁移。

2.3 PAHs 纵向迁移影响因素分析

土壤中存在着一系列物理、化学和生物化学反应,起着“过滤器”和“净化器”的作用,污染物在其中的环境行为与土壤的理化性质有着显著的关系^[4]。各剖面土壤 SOC 主要集中在 0 ~ 20 cm,范围为 1.83 ~ 18.89 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 范围为 4.97 ~ 8.53,clay 范围为 13.29% ~ 31.86%。不同利用类型土壤 PAHs 与理化性质的相关性分析如图 3 所示。

在本研究中,居民点和城镇用地 PAHs 和土壤理化性质均无显著关系,表明这 2 个样点剖面土壤 PAHs 污染主要是受到人为影响。土壤 SOM 被广泛认为是影响土壤中 PAHs 行为的一个重要变量^[29]。通常根据 SOC 含量估算土壤 SOM 含量。SOC 与菜地、水田和工业区 $\sum_{15}$ PAHs、低环 PAHs 和高环 PAHs 都呈显著或极显著正相关,与林地低环 PAHs 无显著性关系。总体来说,与低环 PAHs 相比,高环 PAHs 与 SOC 的相关性更强,体现了 SOC 对高环 PAHs 的吸附结合作用在土壤 PAHs 滞留中的重要性。这部分解释了大部分剖面 PAHs 含量主要集中



(a) 菜地, (b) 林地, (c) 居民点, (d) 城镇用地, (e) 水田, (f) 工业区

图2 各剖面土壤 PAHs 纵向分布和组成特征

Fig. 2 Vertical distribution and composition characteristics of different rings of PAHs in soil profiles

在表层和次表层的原因。据估算,除水田 0~5 cm 土层 SOM 含量为丰富之外,其余剖面层 SOM 含量基本都为缺乏或严重缺乏,这说明随深度下降高环 PAHs 质量分数居高不下可能与表层或次表层高环 PAHs 超出了 SOC 的吸附容量有关。

clay 与林地 $\sum_{15}$ PAHs 和高环 PAHs, 水田 $\sum_{15}$ PAHs 和低环 PAHs 呈显著或极显著正相关,与其他剖面土壤 PAHs 无显著性关系。一般而言,黏土矿物比表面积大,黏结性较强,对 PAHs 的捕捉能力

较强^[30],但本研究中 PAHs 对 clay 产生的响应不如对 SOC 来得强烈。

pH 与菜地和水田的 $\sum_{15}$ PAHs 和低环 PAHs 呈显著或极显著负相关,并且与工业区低环 PAHs 呈极显著负相关,而与高环 PAHs 无显著性(除菜地),只呈负相关关系。pH 与 PAHs 含量呈负相关关系,其原因可能是,较低 pH 下 SOM-PAH 结合能力较高^[31]。此外,酸性土壤可以显著抑制参与 PAHs 生物降解的微生物的代谢活动^[32]。但是可能由于高

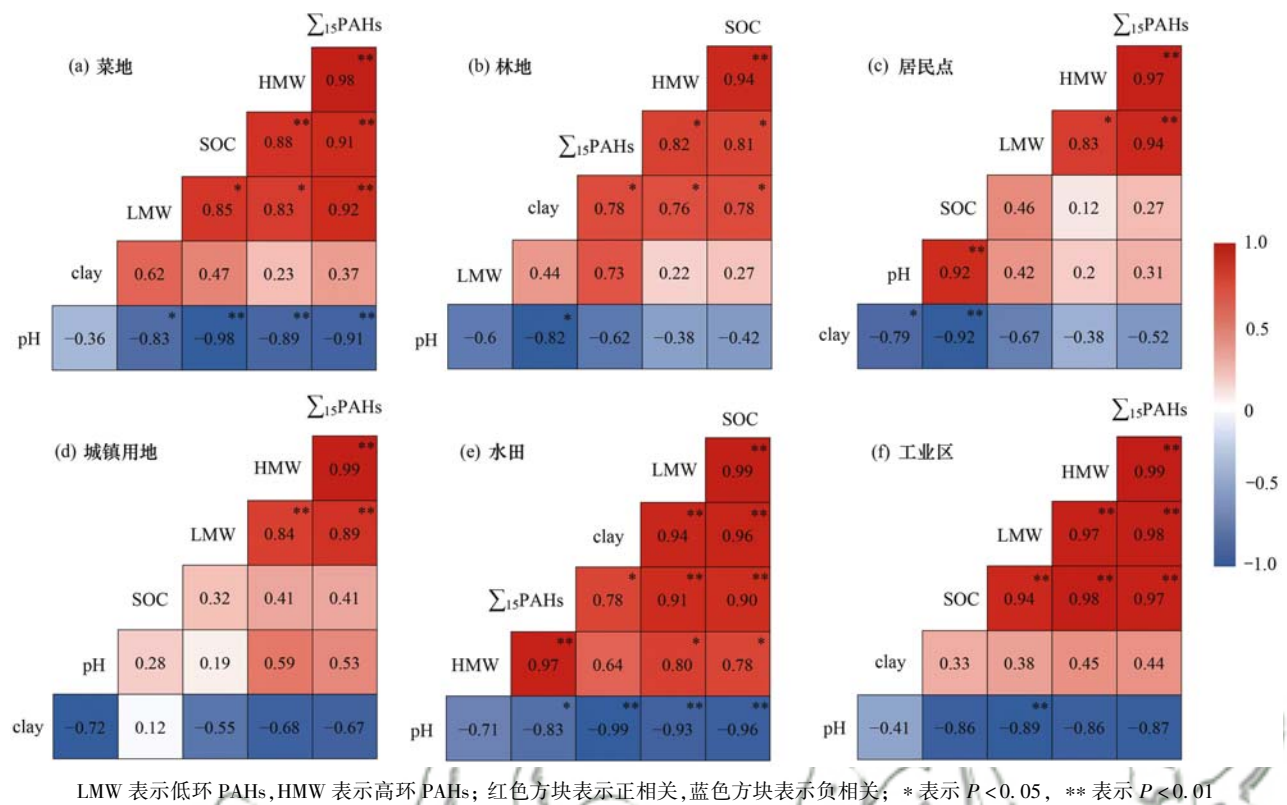


图3 土壤PAHs与理化性质的相关性分析

Fig. 3 Pearson's correlation coefficients of soil PAHs and physicochemical properties

环 PAHs 主要与在酸中溶解度较低、性质较稳定的胡敏素结合在一起, 导致其对 pH 的响应不明显^[13].

为了更好地说明各剖面土壤 PAHs 主要的理化影响因子, 利用 SPSS 25 软件对各剖面 $\sum_{15}\text{PAHs}$ 和理化参数进行逐步回归分析, 建立最优多元线性回归方程, 结果见表 3 (居民点和城镇用地因模型无统计学意义而未被纳入表格). 从分析结果

看, 各模型判定系数 R^2 较高, 显著性均 < 0.05 , 呈显著或极显著线性相关关系. 菜地 PAHs 含量主要受 pH 影响, 其次是 SOC; 林地 PAHs 含量受 SOC 影响; 水田和工业区 PAHs 含量主要受 SOC 影响, 其次是 pH 和 clay. 除菜地 PAHs 含量主要受 pH 影响外, 林地、水田和工业区 PAHs 含量都主要受 SOC 影响, 说明 SOC 是 PAHs 纵向分布的主要理化影响因子.

表 3 不同土地利用类型土壤回归模型¹⁾

Table 3 Soil regression models for different land use types

采样点	模型编号	R	R ²	显著性	方程
菜地	1	0.909a	0.826	0.005	$y = 0.909x_1 + 0.912x_2$
	2	0.912b	0.833	0.028	
林地	1	0.814c	0.662	0.026	$y = 0.814x_2$
水田	1	0.901c	0.812	0.006	$y = 0.901x_2 + 0.950x_3 + 0.976x_1$
	2	0.950d	0.902	0.010	
	3	0.976e	0.953	0.017	
工业区	1	0.972c	0.945	0.000	$y = 0.972x_2 + 0.979x_3 + 0.980x_1$
	2	0.979d	0.958	0.002	
	3	0.980e	0.960	0.013	

1) a 表示预测变量 pH; b 表示预测变量 SOC 和 pH; c 表示预测变量 SOC; d 表示预测变量 clay 和 SOC; e 表示预测变量 clay、SOC 和 pH; y 表示 $\sum_{15}\text{PAHs}$ 含量; x_1 、 x_2 和 x_3 分别表示 pH、SOC 和 clay

2.4 PAHs 来源解析

以 EPA PMF 5.0 为平台, 首先根据 S/N 或样品浓度将 15 种 PAHs 分为“强、弱、差”三类, “差”被排除在 PMF 模型之外. 因子数从 2 ~ 5 进行测试, 每

个基本模型运行 20 次. 通过综合 Q_{robust} 和 Q_{true} 值、Bootstrap 结果和因子组成的实际现实意义确定最佳因子数为 3. 残差分析结果显示大部分样本残差在 -3 ~ 3 之间且服从正态分布, PAHs 的观测浓度和

模型浓度之间的相关性 R^2 都在 0.9 以上,可以看出模型的拟合性较好. PMF 模型运行结果如图 4 所示.

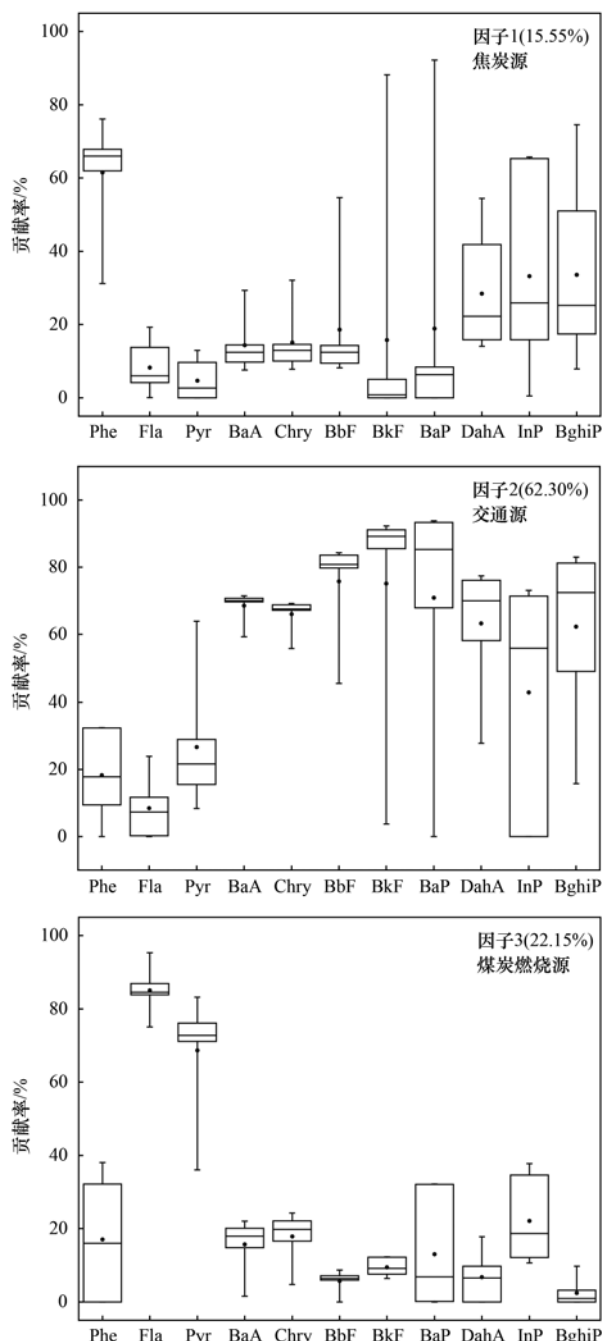


图 4 基于 PMF 模型的土壤 PAHs 源解析

Fig. 4 Source profiles of PAHs in soils obtained with the PMF model

了解 PAHs 的污染源是控制和减少 PAHs 污染的有效方法. 源解析结果表明, 目前该镇的土壤已经受到了自然以外的污染. 不同环数的 PAHs 来自不同的排放源, 2~3 环 PAHs 来源于石油污染, 4 环 PAHs 来源于燃煤排放, 5~6 环 PAHs 来源于机动车尾气排放^[33]. 因子 1 中 Phe 为特征元素, Phe 与煤炭燃烧有关^[34], 同时也是炼焦产物^[35], 因此因子 1 被认为是焦炭源. 因子 2 中 BaA、Chry、BbF、BkF 和

BaP 具有较高的因子载荷, DahA、InP 和 BghiP 所占贡献率也较大, BaA 来自于煤炭燃烧^[36], Chry 是汽油燃烧的特征产物^[37], 同时也存在于煤炭、生物质燃烧所产生的煤烟和焦油烟中^[38], InP、BbF 和 BkF 通常来源于柴油燃烧, 而 DahA、BaP 和 BghiP 通常来源于汽油燃烧^[39], 因此因子 2 被认为是交通源. 因子 3 中以 Fla 和 Pyr 为主, 通常认为 Fla 和 Pyr 与煤炭燃烧有关^[40,41], 因此因子 3 被认为是煤炭燃烧源. 林地和居民点焦炭源贡献率最高, 菜地和城镇用地交通源贡献率最高, 水田和工业区焦炭源和煤炭燃烧源贡献率较高. 综上, 该研究区 PAHs 污染来源主要有焦炭源、交通源和煤炭燃烧源, 其贡献率分别为 15.55%、62.30% 和 22.15%, 这与前人在该区的研究结果类似^[16,42].

研究区是城镇化发展的典型区域, 民用机动车较多, 且多条乡级省级公路交叉穿过, 运输业发达, 机械制造、建筑材料加工、轻纺织、塑料包装和油泵油嘴等化工企业和个体经营商户云集在工业区和城镇用地, 这些工业活动消耗大量燃煤, 排放大量焦油工业废气和交通尾气, 殃及附近的水体及大气, 产生 PAHs 污染. PAHs 通过研究区密布交错的水网转移, 经灌溉引入农业用地, 尤其是距离工业区和城镇用地较近的水田采样点首当其冲受到影响, 形成灌溉污染. 且研究区地形较为平坦, 提供的通风水平促进 PAHs 在大气中扩散, 导致污染源较少的区域也可能通过干湿沉降产生 PAHs 污染. 林地和居民点可能分别因为林木和地势较高对沉降的阻碍作用 PAHs 分布较少.

3 结论

(1) 6 个采样点土壤 PAHs 均被检出, PAHs 含量高低依次为: 城镇用地 > 工业区 > 水田 > 菜地 > 居民点 > 林地. 居民点和林地没有 PAHs 污染, 菜地污染水平较轻, 水田、工业区污染水平中等, 城镇用地污染较严重. 总体来说, 本地区土壤 PAHs 污染处于中等偏低水平.

(2) 除居民点和城镇用地以外的采样点 PAHs 主要累积在表层或次表层土壤中, 且各深度以高环 PAHs 为主. 深层土壤中 PAHs 仍有检出, 这加大了地下水污染的风险.

(3) PAHs 的分子特性及成分含量、土壤的理化性质和土地利用方式均会作为影响因素影响 PAHs 在土壤中的纵向分布与迁移, 当 PAHs 含量超出了上层土壤环境容量或受到翻耕和城镇化等人为扰动时, 即使是疏水性较大的高环 PAHs 依旧会向下迁移.

(4) 人类活动产生的焦炭源、交通源和煤炭燃烧源是各类型土壤 PAHs 的主要来源,这些 PAHs 通过大气沉降或污水灌溉进入土壤,在土壤中形成了“汇”。

参考文献:

- [1] 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.
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.
- [2] Shi R G, Li X H, Yang Y Y, *et al.* Contamination and human health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from Tianjin coastal new region, China[J]. Environmental Pollution, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115938.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 费佳佳,张枝焕,万甜甜,等. 有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3871-3881.
Fei J J, Zhang Z H, Wan T T, *et al.* Effects of organic carbon content on the residue and migration of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil profiles[J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3871-3881.
- [6] 王珂. 纵向迁移过程对土壤剖面中多环芳烃(PAHs)源解析参数的影响[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- [7] 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.
- [8] 巩霏,李华,孙艺嘉,等. 有机质对土壤中多环芳烃纵向迁移的影响[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(7): 1681-1689.
Gong F, Li H, Sun Y J, *et al.* Effect of organic matter on longitudinal migration of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(7): 1681-1689.
- [9] Liao X Y, Ma D, Yan X L, *et al.* Distribution pattern of polycyclic aromatic hydrocarbons in particle-size fractions of coking plant soils from different depth[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2013, **35**(3): 271-282.
- [10] 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.
- [11] 蔡杨,李伟,左雪燕,等. 盐城滨海湿地土壤多环芳烃分布特征及影响因素[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(6): 1249-1259.
Cai Y, Li W, Zuo X Y, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of PAHs in Yancheng coastal wetland soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, **30**(6): 1249-1259.
- [12] 康耘,葛晓立. 土壤 pH 值对土壤多环芳烃纵向迁移影响的模拟实验研究[J]. 岩矿测试, 2010, **29**(2): 123-126.
Kang Y, Ge X L. Simulation experiments on influences of pH level on the vertical migration of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils[J]. Rock and Mineral Analysis, 2010, **29**(2): 123-126.
- [13] 田文杰,王小庆,李冬,等. 模拟酸雨作用下红壤中多环芳烃的释放及纵向迁移特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(10): 1928-1932.
Tian W J, Wang X Q, Li D, *et al.* Release and vertical migration of polycyclic aromatic hydrocarbons in red soil under simulated acid rain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(10): 1928-1932.
- [14] 张俊叶,俞菲,杨靖宇,等. 南京城市林业土壤多环芳烃累积特征及其与黑炭的相关性[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, **42**(2): 75-80.
Zhang J Y, Yu F, Yang J Y, *et al.* Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons and their correlation with black carbon in urban forest soil of Nanjing City, China[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, **42**(2): 75-80.
- [15] 刘晓东,杨靖宇,王林,等. 南京城市绿地土壤对非的吸附特征[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(8): 1563-1568.
Liu X D, Yang J Y, Wang L, *et al.* Sorption of phenanthrene in urban greenland soils of Nanjing, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(8): 1563-1568.
- [16] 卢晓丽,康翔,魏宇宸,等. 城乡结合带农田土壤多环芳烃空间分布特征及来源解析-以南京市周岗镇为例[J]. 土壤通报, 2021, **52**(2): 286-296.
Lu X L, Kang X, Wei Y C, *et al.* Spatial distribution and sources of PAHs in farmland soil of peri-urban areas: a case study of Zhougang, Nanjing[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, **52**(2): 286-296.
- [17] 姚宏,张士超,刘明丽,等. 基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 889-898.
Yao H, Zhang S C, Liu M L, *et al.* Sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons from the urbanization process of topsoil[J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 889-898.
- [18] 葛蔚,程琪琪,柴超,等. 山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1587-1596.
Ge W, Cheng Q Q, Chai C, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils from Shandong[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1587-1596.
- [19] Zhang J, Wu J W, Hua P, *et al.* The influence of land use on source apportionment and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in road-deposited sediment[J]. Environmental Pollution, 2017, **229**, doi: 10.1016/j.envpol.2017.07.019.
- [20] 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.
- [21] 苗迎,孔祥胜,邹胜章,等. 南宁市土壤中 PAHs 的环境地球

- 化学特征[J]. 安全与环境工程, 2013, **20**(6): 95-101.
- Miao Y, Kong X S, Zou S Z, *et al.* Environmental geochemical characteristics of PAHs in soils in Nanning City[J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, **20**(6): 95-101.
- [22] 吴诗雪. 上海城市土壤柱中 PAHs 空间分异特征及影响因素研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2018.
- [23] 叶凯, 孙玉川, 朱琳跃, 等. 典型岩溶槽谷区不同地表覆被土壤中多环芳烃的运移特征和来源解析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(12): 5127-5136.
- Ye K, Sun Y C, Zhu L Y, *et al.* Migration characteristic and source analysis of PAHs in soils with different surface cover in typical karst trough valley area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(12): 5127-5136.
- [24] Wang D, Ma J, Li H, *et al.* Concentration and potential ecological risk of PAHs in different layers of soil in the petroleum-contaminated areas of the Loess Plateau, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**(8), doi: 10.3390/ijerph15081785.
- [25] 张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 等. 大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 2906-2916.
- Zhang X L, Liu S J, Han M L, *et al.* Comparison of regional transportation and transformation models of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons and research on key influencing factors: take the Beijing-Tianjin-Hebei region as example [J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 2906-2916.
- [26] 温林生, 彭云, 邓文平, 等. 庐山杉木林与黄山松林的土壤层水源涵养能力和土壤侵蚀敏感性探究[J]. 水土保持学报, 2022, **36**(2): 255-260.
- Wen L S, Peng Y, Deng W P, *et al.* Research on water conservation ability and soil erosion sensitivity in Cunninghamia lanceolata and Pinus taiwanensis forest[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, **36**(2): 255-260.
- [27] 陈静, 王学军, 陶澍. 天津地区土壤有机碳和粘粒对 PAHs 纵向分布的影响[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(4): 79-83.
- Chen J, Wang X J, Tao S. The influences of soil total organic carbon and clay contents on PAHs vertical distributions in soils in Tianjin area[J]. Research of Environmental Sciences, 2005, **18**(4): 79-83.
- [28] Banach-Szott M, Debska B, Wisniewska A, *et al.* Changes in the contents of selected polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of various types [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(7): 5059-5069.
- [29] 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.
- [30] Degrendele C, Audy O, Hofman J, *et al.* Diurnal variations of air-soil exchange of semivolatile organic compounds (PAHs, PCBs, OCPs, and PBDEs) in a central European receptor area [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(8): 4278-4288.
- [31] Qu C K, Albanese S, Lima A, *et al.* The occurrence of OCPs, PCBs, and PAHs in the soil, air, and bulk deposition of the Naples metropolitan area, southern Italy: implications for sources and environmental processes [J]. Environment International, 2019, **124**: 89-97.
- [32] Du J Q, Liu J X, Jia T, *et al.* The relationships between soil physicochemical properties, bacterial communities and polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in soils proximal to coking plants[J]. Environmental Pollution, 2022, **298**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.118823.
- [33] 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价[J]. 环境科学, 2022, **43**(12): 5751-5760.
- Yang B C, Xie Q L, Zhen Q, *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.
- [34] 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 等. 大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5272-5281.
- Song N N, Feng J S, Yu Y, *et al.* Comparison of characteristics and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in different environmental media in the urban area of Daqing city [J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5272-5281.
- [35] 邱慧, 刘月仙, 解小凡, 等. 黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3509-3518.
- Qiu H, Liu Y X, Xie X F, *et al.* Distribution characteristics and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in salinized farmland soil from the oil mining area of the Yellow River Delta [J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3509-3518.
- [36] 夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 等. 基于 GIS 和 PMF 模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5656-5667.
- Xia Z S, Wang Y Y, Zhong Y X, *et al.* Spatial distribution characteristics and source apportionment of soil PAHs in Shizuishan City based on GIS and PMF model [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5656-5667.
- [37] 杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 等. 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[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2490-2501.
- Yang F, Luo H X, Zhong Y X, *et al.* Spatial distribution characteristics, source apportionment, and risk assessment of topsoil PAHs in the core area of the Ningdong energy and chemical industry base [J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2490-2501.
- [38] Apiratikul R, Pongpiachan S, Deelaman 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, **43**(8): 2851-2870.
- [39] 彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 等. 地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制[J]. 环境科学, 2022, **43**(7): 3645-3655.
- Peng K X, Li R F, Zhou Y C, *et al.* Spatiotemporal distribution and source apportionment of suspended polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water [J]. Environmental Science, 2022, **43**(7): 3645-3655.
- [40] 吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 等. 津冀辽地区典型湖库沉积物 PAHs 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1791-1800.
- Wu P, Lu Y R, Li H, *et al.* PAHs pollution characteristics and source analysis of typical lake and reservoir sediments in Jin-Ji-Liao area [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1791-1800.
- [41] 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 等. 基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3789-3797.

Wang C L, Zou X Q, Zhao Y F, *et al.* Source apportionment and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water from Yangtze river, China; based on PMF model [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3789-3797.

[42] 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 等. 城郊农田土壤多环芳烃污染

特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5510-5518.

Zhang X X, Lu X L, Wei Y C, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in a suburban farmland soil [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5510-5518.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1, 1.1, 1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:
期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-rui, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)