

目次

2013~2020年天津市PM_{2.5}-O₃污染变化趋势和影响因素分析 肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)

2015~2020年济南市O₃污染趋势及敏感性变化分析 孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)

南京市南部地区O₃污染特征、生成敏感性及传输影响分析 郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)

天津市“十三五”期间O₃污染特征和驱动因子 李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)

基于随机森林的南京市PM_{2.5}和O₃对减排的响应 尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)

基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化 吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓桐, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)

污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响 钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)

2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析 郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)

滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源 孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)

重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价 谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 朱丹尼, 王志恒 (4304)

衡水市桃城区浅层地下水咸化成因 何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)

吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价 白凡, 周金龙, 周殿竹, 韩双宝, 孙英 (4325)

金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性 丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇斌, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)

白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征 程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)

基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制 朱奕, 叶建锋, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)

甾体激素在污水处理厂中的赋存特征和行为归趋 刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)

博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价 郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)

太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价 吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)

雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价 郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)

基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析 段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)

锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价 余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)

老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价 王莹, 董爱俊, 杨建锋, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)

畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估 丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)

地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究 简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)

微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响 马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)

施加Fe₃O₄/桑树杆生物炭对土壤酶形态和水稻砷含量的影响 阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)

生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制 张丽, 李如霞, 何玉玺, 姚彦坡, 林大松 (4479)

不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响 李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)

椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响 侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)

生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响 冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)

改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应 陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)

改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响 由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)

化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险 赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)

污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失 张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)

化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响 谢军, 王子芳, 王莹燕, 熊子怡, 高明 (4565)

黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测 刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)

微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响 刘月, 杨树青, 张万锋, 姜帅 (4585)

高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析 姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)

土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响 李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)

中国省域碳达峰路径与政策 苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)

基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制 钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 郭娜, 封强, 傅泽强 (4637)

不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析 刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘铮, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)

中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估 陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)

陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟 古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)

气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响 李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)

降水改变下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸 王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)

水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响 秦纪法, 张佳彭, 桑奕, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)

中国省域土壤重金属空间分布特征及分区管控对策 石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)

壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议 洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)

微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展 张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圃, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)

生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展 周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)

铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展 魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)

畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术分析 安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)

《环境科学》征订启事(4230) 《环境科学》征稿简则(4303) 信息(4506, 4678, 4741)

太原市耕地土壤 PAHs 的含量、分布、源解析与风险评价

吴张伟, 段永红*, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红

(山西农业大学资源环境学院, 太谷 030801)

摘要: 为研究太原市耕地土壤中多环芳烃(PAHs)的含量、空间分布特征、来源与健康风险,采集了太原市22个耕地土壤样本,通过GC-MS分析土壤中PAHs的含量,使用诊断比率法与正定矩阵因子分解(PMF)模型分析土壤PAHs的来源,使用增量终生致癌风险模型分析土壤的健康风险.结果表明,太原市耕地土壤(干重)中 \sum_{21} PAHs和 \sum_{16} PAHs含量平均值分别为 $934.6 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $787.7 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,土壤中PAHs含量低于GB 15168-2018规定的农用地土壤污染风险筛选值.工业区、丘陵区和污灌区分别有约60%、13%和33%的样点的PAHs含量超过了 $1000 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$.空间分布显示耕地土壤PAHs含量高的区域集中在工业区;诊断比率显示煤炭和生物质燃烧与交通排放是太原市耕地土壤中PAHs污染的主要来源;PMF模型模拟结果表明,耕地土壤中PAHs的来源和贡献率为煤炭和生物质燃烧源(59%)、交通源(22%)和炼焦源(19%).风险评价结果表明太原市耕地土壤普遍具有高致癌风险,应当引起人们的关注.

关键词: 耕地; 多环芳烃(PAHs); 太原市; 源解析; 风险评价

中图分类号: X53; X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4387-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202206286

Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan

WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong*, LIU Li-wen, XU Li-shuai, CHEN Xiang-ling, YAO Xu-hong

(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons) accumulated in arable soils have significant impacts on farmland quality and human health, which has attracted wide attention from scientists and the public. A total of 22 arable soil samples were collected from Taiyuan, an old industrial city, including three districts (industrial zones, hilly areas, and sewage irrigation area), and the contents of 21 PAHs were detected using the GC-MS method. The sources of PAHs in soils were analyzed using the diagnostic ratios (DRs) method and positive matrix factorization (PMF) model, and the soil health risks were analyzed using the incremental lifetime cancer risk (ILCR) model. The results indicated that the average concentrations of \sum_{21} PAHs and \sum_{16} PAHs in arable soils of Taiyuan were $934.6 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ and $787.7 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively, which were lower than the soil pollution risk screening value of agricultural land stipulated in GB 15168-2018. 3-5 rings PAHs were the dominant components, accounting for ~90% of the \sum_{21} PAHs. Approximately 60% of sites in industrial zones, 13% in hilly areas, and 33% in the sewage irrigation area had high PAHs contents larger than $1000 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. The spatial distribution of PAHs showed that more severe PAHs pollution in the soil occurred in industrial areas than that in the other two districts. The DRs suggested that the combustion of coals, bio-masses, and traffic emissions were the dominant sources for PAHs pollution in arable soils in Taiyuan. The simulation results of the PMF model indicated that the sources and contribution rates of PAHs in cultivated soils were coal and biomass burning sources (59%), traffic sources (22%), and coking sources (19%). The risk assessment confirmed that the arable soils in Taiyuan had high potential carcinogenic risks; thus, more attention should be paid to the PAHs pollutions in arable soils.

Key words: arable soils; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); Taiyuan; source analysis; risk assessment

土壤是人类赖以生存的重要自然资源,在保障国家农业可持续发展和生态文明建设中具有重要意义^[1,2].2006年,刘占锋等^[3]指出当前中国农田土壤存在严重退化,环境质量不断下降.2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示部分地区土壤存在严重污染^[4].PAHs是一类在土壤中广泛存在的持久性有机污染物,已对生态系统和人类健康造成了巨大威胁^[5-8].PAHs主要是有机物不完全燃烧的产物^[9,10].多年来,煤炭燃烧、汽车尾气排放、工业生产和生物质燃烧等人类活动产生了大量PAHs并造成了大气的严重污染^[11,12].排放到大气环境中的PAHs主要通过大气干湿沉降进入土壤,土壤因富含有机质而成为PAHs的重要储库^[13-15].相比于农村,城市土壤会受到更多的PAHs污染,有

研究表明土壤PAHs含量在城市-城郊-乡村间呈梯度分布^[16-18].近年来有国内外学者对耕地土壤PAHs做了研究,如:北京市耕地土壤中 \sum_{16} PAHs含量范围在 $7.19 \sim 1812 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[19]、上海市交通沿线旁农田土壤 \sum_{16} PAHs含量范围在 $23.16 \sim 21250 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[20]、南京市工业区耕地土壤 \sum_{16} PAHs含量范围在 $312.2 \sim 27581 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[21]、沈阳东部耕地土壤 \sum_{16} PAHs含量范围在 $36.18 \sim$

收稿日期: 2022-06-25; 修订日期: 2022-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271507); 山西省自然科学基金项目(202103021224138)

作者简介: 吴张伟(1998~),男,硕士研究生,主要研究方向为有机污染物的检测与分析,E-mail: WuZhangwei0728@163.com

* 通信作者, E-mail: yhduanpk@163.com

7 196 ng·g⁻¹[22]和天津市农业土壤 \sum_{16} PAHs 含量范围在 228.6 ~ 14 722 ng·g⁻¹[23]等,以上城市人类活动密集,其部分耕地土壤中 \sum_{16} PAHs 含量远高于 Maliszewska 等[24]建议的1 000 ng·g⁻¹的重度污染水平。

太原位于山西中部,是中国重要的矿产、能源城市和重工业基地之一[25]。《太原市 2020 年国民经济和社会发展统计公报》显示[26],2020 年太原市规模以上工业企业二次能源生产折合标准煤4 220 万 t,其消耗主要用于钢铁、炼焦和化工等行业,大量的能源消耗造成了严重的环境问题。目前对太原市土壤 PAHs 的研究主要集中在市区[27,28],尚未有学者针对不同类型的农田土壤进行分析。农田土壤能够反映污染物历史的积累状况且与农业生态文明发展息息相关。太原市是典型的能源型工业城市,对太原市不同类型农田土壤 PAHs 的研究可以为其他工业城市农田土壤 PAHs 的研究提供参考。为研究太原市当前农田土壤 PAHs 的污染水平,本文对太原市工业区、丘陵区 and 污灌区的农田土壤分别采样,分析太原市农田土壤 PAHs 的空间分布特征和污染来源,并对农田土壤的健康风险进行评估,以期为环境治理和可持续发展提供借鉴。

1 材料与方 法

1.1 样品采集、分析与质量控制

2021 年 7 月,在太原市采集了 22 个农田土壤样品,每个样品由采样点周围 50 m 范围内采集的 5 个等量的子样混合而成,采样时去除土壤上层杂物,随后使用不锈钢土钻采集表层土壤(0 ~ 10 cm),每个样品混合均匀后采用四分法取适量土壤放入单独的聚乙烯塑料袋中;返回实验室后,去除土壤中的枯枝落叶、细小砖块、煤块和石灰等杂质,土壤在室温下风干后研磨,过 70 目筛后置于干净的棕色广口玻璃瓶中,随后密封储存在 4℃ 的冰箱。样品提取使用微波萃取仪(ETHOS ONE,意大利 Milestone 公司),净化使用氧化铝-硅胶层析柱,样品前处理后转移至 2 mL 琥珀色样品瓶,然后置于 4℃ 冰箱中储存待测。使用 GC-MS(ISQ 单四极杆气质联用仪,美国 Thermo 公司)对 21 种 PAHs 进行检测。土壤酸碱度采用电位计法(水土比 2.5:1),使用 pHs-3B 型 pH 计测定;土壤有机质使用重铬酸钾容量法-外加热法测定[29]。

样品分析、质量控制和质量保障的方法参考文献[30]。本研究中所用的试剂为色谱纯试剂,实验所用玻璃器具均在超声清洗器中用洗涤剂加热清洗

2 h 以上,然后再用自来水和蒸馏水冲洗干净,在使用前置于高温烘箱中加热至 450℃ 烘烤 6 h 以上。本实验通过程序空白、加标空白、基质加标回收率和平行样品等的测定进行质量控制,在程序空白中未检测到干扰。本研究中所有样品均测定平行来检验方法的重现性,随机抽取 20% 的样品加入含有 2-Fluorobiphenyl 与 *p*-terphenyl-D14 的混合溶液作为回收率指示物,其回收率测定结果分别为 72% ~ 98% 和 89% ~ 115%。每批样品在前处理时都带有 3 个实验空白,其处理流程和正式样品完全相同,浓度都显著低于正式样品。每次测样前确认仪器的响应值与检出下限,实验前进行基质加标回收率测试,多环芳烃的加标回收率为 68% (Ace) ~ 121% (Nap),检出限在 0.16 ~ 0.85 ng·mL⁻¹。重复样品之间的浓度变异系数小于 14%,数据质量可靠。

1.2 源解析模型

诊断比率法是一种定性的源解析方法,它通过对单个 PAHs 相对含量的比较来确定污染的来源,已被广泛运用于 PAHs 的源解析[31~35]。本研究选用 Fla/(Fla + Pyr)、BaA/(BaA + Chry) 和 InP/(InP + BghiP) 3 种诊断比率判断太原市耕地土壤中 PAHs 的来源。

诊断比率法可以提供对 PAHs 来源的定性估计,而正定矩阵因子分解(positive matrix factorization, PMF)模型则可以定量地识别特定的来源,被广泛地应用于源解析[36,37]。由于样本较少,使用 PMF 模型对不同区域耕地 PAHs 来源分别研究难以有效地解释土壤 PAHs 可能的来源,故将来自 3 个区域的 22 个样本作为一个整体进行分析。不确定性含量的计算参考文献[38,39],如公式(1)~(3)所示,当 $C_{ij} > u$ 时,采用公式(1);当 $C_{MDL} < C_{ij} < u$ 时,采用公式(2);当 $C_{ij} < C_{MDL}$ 时,采用公式(3)。

$$UNC_{ij} = \sqrt{(C_{MDL})^2 + (EF \times C_{ij})^2 + (u)^2} \quad (1)$$

$$UNC_{ij} = \sqrt{(MDL)^2 + (EF \times C_{ij})^2} \quad (2)$$

$$UNC_{ij} = (5/6) \times C_{MDL} \quad (3)$$

式中, C_{MDL} 为每种 PAH 的方法检出限; EF (error fraction) 为误差分数,是对应物种的相对不确定度,一般取 5% ~ 20%; C_{ij} 为第 i 个样品的第 j 种物质的含量; u 为一种特定污染物质的所有样品的绝对中位差,它表示该物质的含量相对于其人为背景的分散度。

模型运行前,检查所有物质的信噪比均大于 3,且没有异常值的出现。PMF 分析在默认稳健模式下运行,选择 3 ~ 7 个因素,通过 Bootstrap 和 BS-DISP 方法检验,当设定因子数为 3 时,模型模拟结果较

好,选择最小的 Q 值所得的运行结果为基准运行的最终结果. 在因子数为 3 时,使用 Fpeak 模式以减少部分因子的共线性源,得到源解析最佳的各因子的贡献率^[40],随后再次使用 Bootstrap 方法来检测 Fpeak 运行的不确定性和稳定性,所有引导程序因子(bootstrapped factors)都与所判定因子达到 90% 符合.

1.3 健康风险评价

国内外学者们常用毒性当量因子(TEFs)来评估土壤中 PAHs 的致癌风险^[7,8].

$$TEQ_{BaP} = C_i \times TEF_i \quad (4)$$

$$\sum BaP_{eq} = \sum TEQ_{BaP} \quad (5)$$

式中, TEQ_{BaP} 为 BaP 的毒性当量浓度, C_i 为目标 PAHs 含量, TEF_i 为毒性当量因子^[41].

暴露于 PAHs 污染土壤的增量终生致癌风险(incremental lifetime cancer risk, ILCR)通过特定的方法来计算. 一般来说,人类接触土壤中 PAHs 的主要途径有 3 种,包括误食土壤(摄入)、皮肤接触和呼吸^[10,18],3 种暴露途径的健康风险计算分别使用公式(6)~(8)^[42],总的 ILCR 值是三者之和,见公式(9).

$$ILCR_{\text{摄入}} = \left(C_{PAHs} \times CSF_{\text{摄入}} \times \sqrt[3]{\frac{BW}{70}} \times IngR_{\text{摄入}} \times EF \times ED \times CF \right) / (BW \times AT) \quad (6)$$

$$ILCR_{\text{皮肤接触}} = \left(C_{PAHs} \times CSF_{\text{皮肤接触}} \times \sqrt[3]{\frac{BW}{70}} \times SA \times AF_{\text{土壤}} \times ABS \times EF \times ED \times CF \right) / (BW \times AT) \quad (7)$$

$$ILCR_{\text{呼吸}} = \left(C_{PAHs} \times CSF_{\text{呼吸}} \times \sqrt[3]{\frac{BW}{70}} \times SA \times IngR_{\text{呼吸}} \times EF \times ED \right) / (BW \times AT \times PEF) \quad (8)$$

$$ILCR_{\text{总和}} = ILCR_{\text{摄入}} + ILCR_{\text{皮肤接触}} + ILCR_{\text{呼吸}} \quad (9)$$

式中, ILCR 为超过百万分之一的预期病例数, ILCR 小于 10^{-6} 、在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间和大于 10^{-4} 分别表示致癌性的可忽略风险、潜在风险和高风险^[43]; C_{PAHs} 为土壤总 BaP 毒性当量浓度, $CSF_{\text{摄入}}$ 为误食致癌斜率因子 [$7.3 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], BW 为平均体重 (kg), $IngR_{\text{摄入}}$ 为土壤摄取速率 ($\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$), EF 为暴露频率 ($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$), ED 为暴露持续时间, CF 为转换因子 ($10^{-6} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), AT 为人均寿命 (d); $CSF_{\text{皮肤接触}}$ 为皮肤接触致癌斜率因子 [$25.0 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], SA 为皮肤面积 (cm^2), $AF_{\text{土壤}}$ 为皮肤粘附因子

($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$), ABS 为皮肤吸收因子; $CSF_{\text{呼吸}}$ 为呼吸导致的致癌斜率因子 ($3.9 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), $IngR_{\text{呼吸}}$ 为呼吸速率 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$), PEF 为颗粒排放因子 ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$); 公式中各物理量参考值见文献^[18].

2 结果与讨论

2.1 土壤 PAHs 的含量

22 个样点中 21 种 PAHs 总含量范围、总含量平均值与各区域含量等信息如表 1 所示,太原市耕地土壤中 \sum_{21} PAHs 含量范围在 $152.4 \sim 3294 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 均值为 $934.6 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$; \sum_{16} PAHs 含量范围在 $118.1 \sim 2900 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 均值为 $787.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 其 BaP 含量平均值低于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15168-2018)^[44] 中的土壤污染风险筛选值.

太原市耕地土壤中 7 种致癌 PAHs 占 \sum_{16} PAHs 的比例约为 41%. 21 种 PAHs 中几种优势 PAHs 含量平均值由高到低依次为: Fla、Ant、BbF、Phe、Pyr、BeP、Chry、BaA、BaP、Ret 和 BghiP, 这 11 种 PAHs 的含量平均值约占 \sum_{21} PAHs 总含量的 83%. PAHs 组成以 3、4 和 5 环为主, 其含量平均值分别约占 \sum_{21} PAHs 总含量的 30%、31% 和 29%. 根据土壤 PAHs 污染程度评价标准^[24], 研究区域达轻、中和重度污染水平的样点分别占总样点数的 45%、14% 和 27%.

太原市 3 个区域(工业区、丘陵区 and 污灌区)农田土壤均属于石灰性褐土, 其 pH 值在 $7.39 \sim 8.19$ 之间, 耕作方式均为连作, 采样期间, 除样点 P14 所属田块种植水稻外, 其余样点所属田块均种植玉米, 熟制为一年一熟. 按华北地区土壤有机质分级标准^[29], 22 个样点土壤有机质含量平均值为 $(35.1 \pm 25.9) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 约 81% 的样点属于高肥力地(有机质含量 $> 15.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). 3 个区域土壤有机质含量的单因素方差分析与多重比较的结果表明, 3 个区域土壤有机质含量无显著差异, 22 个样点土壤有机质含量与 \sum_{21} PAHs 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$).

2.2 土壤 PAHs 的空间分布与组成

空间分布有助于了解 PAHs 的空间差异并确定污染物的来源. 太原市耕地土壤中 PAHs 的空间分布如图 1 所示, 22 个样点中, 工业区 (P1 ~ P5)、丘陵区 (P6 ~ P13) 和污灌区 (P14 ~ P22) 分别有 5、8 和 9 个采样点. PAHs 含量最高的是位于工业区的 1 号点, 含量次高点是位于丘陵区的 7 号点, 含量最低

表 1 太原市耕地土壤 21 种 PAHs 的统计性描述¹⁾/ng·g⁻¹Table 1 Statistical description of 21 PAHs of arable soils in Taiyuan/ng·g⁻¹

序号	PAHs	环数	总含量 范围	总含量 平均值	工业区 含量范围	工业区 平均值	丘陵区 含量范围	丘陵区 平均值	污灌区 含量范围	污灌区 平均值
1	萘(Naphthalene, Nap)	2	2.00 ~ 103.7	16.81	9.75 ~ 19.25	16.50	2.00 ~ 103.7	18.69	2.98 ~ 44.76	15.32
2	苊烯(Acenaphthylene, Acy)	3	0.87 ~ 25.89	6.65	4.92 ~ 20.22	8.60	0.87 ~ 25.89	5.88	1.63 ~ 17.81	6.24
3	二氢苊(Acenaphthene, Ace)	3	0.06 ~ 8.17	2.14	1.90 ~ 5.06	3.34	0.06 ~ 1.74	0.81	0.16 ~ 8.17	2.65
4	芴(Fluorene, Flu)	3	0.27 ~ 79.98	12.79	5.87 ~ 24.40	12.34	0.27 ~ 79.98	15.36	1.99 ~ 36.54	10.75
5	菲(Phenanthrene, Phe)	3	10.48 ~ 404.8	88.30	68.84 ~ 239.9	121.7	10.48 ~ 404.8	89.37	25.02 ~ 152.2	68.75
6	蒽(Anthracene, Ant)	3	10.74 ~ 535.5	106.7	91.06 ~ 317.3	161.1	10.74 ~ 535.5	107.8	25.65 ~ 160.1	75.61
7	葱烯(Retene, Ret)	3	15.19 ~ 144.0	44.94	23.61 ~ 136.0	56.27	15.19 ~ 71.29	32.98	18.24 ~ 144.0	49.27
8	荧蒽(Fluoranthene, Fla)	4	19.32 ~ 487.9	115.3	103.8 ~ 487.9	231.3	19.32 ~ 109.3	60.12	28.39 ~ 293.3	99.90
9	芘(Pyrene, Pyr)	4	11.35 ~ 307.0	69.96	67.99 ~ 307.0	151.0	11.35 ~ 73.15	35.17	15.29 ~ 171.0	55.85
10	苯并[a]蒽[Benzo(a)anthracene, BaA]	4	7.70 ~ 233.9	51.22	58.32 ~ 233.9	113.2	7.80 ~ 66.81	25.34	7.70 ~ 130.7	39.77
11	䟽(Chrysene, Chry)	4	7.89 ~ 228.3	60.84	45.56 ~ 228.3	113.6	7.89 ~ 154.9	41.93	11.85 ~ 131.1	48.37
12	苯并[b]荧蒽[Benzo(b)fluoranthene, BbF]	5	17.32 ~ 380.1	98.80	79.88 ~ 380.1	186.9	17.32 ~ 142.3	58.25	22.24 ~ 265.5	85.91
13	苯并[k]荧蒽[Benzo(k)fluoranthene, BkF]	5	4.22 ~ 121.8	25.12	27.06 ~ 121.8	59.93	4.22 ~ 25.35	10.58	4.34 ~ 60.34	18.70
14	环戊烯芘[Cyclopenta(cd)pyrene, Cpp]	5	ND ~ 82.35	19.26	0.28 ~ 39.89	8.23	ND ~ 68.24	20.66	0.32 ~ 82.35	24.14
15	苯并[a]芘[Benzo(a)pyrene, BaP]	5	7.81 ~ 244.4	49.08	53.54 ~ 244.4	119.3	7.81 ~ 44.84	19.79	8.68 ~ 124.9	36.12
16	苯并[e]芘[Benzo(e)pyrene, BeP]	5	10.68 ~ 283.9	67.03	65.37 ~ 283.9	140.1	10.68 ~ 134.0	40.15	14.09 ~ 126.4	50.33
17	芘(Perylene, Per)	5	1.18 ~ 40.93	8.28	11.25 ~ 40.93	20.41	1.18 ~ 5.64	2.97	1.61 ~ 20.42	6.27
18	二苯并[a,h]蒽[Dibenzo(a,h)anthracene, DahA]	5	1.63 ~ 27.43	7.56	6.78 ~ 27.43	15.20	1.69 ~ 11.03	4.47	1.63 ~ 18.96	6.06
19	茚并[1,2,3-cd]芘[Indeno(1,2,3-cd)pyrene, InP]	6	ND ~ 133.6	30.64	1.37 ~ 133.6	60.28	8.00 ~ 34.09	18.24	ND ~ 98.52	25.20
20	苯并[ghi]芘(二苯并[a,h]芘)[Benzo(ghi)perylene, BghiP]	6	0.26 ~ 241.9	45.77	52.5 ~ 241.9	114.0	7.36 ~ 62.01	21.22	0.26 ~ 92.02	29.70
21	晕苯(Coronene, Cor)	7	ND ~ 25.95	7.43	5.40 ~ 25.95	13.32	2.12 ~ 12.05	5.44	ND ~ 20.18	5.92
22	\sum_7 PAHs		55.65 ~ 1237	323.3	316.1 ~ 1237	668.4	55.65 ~ 479.3	178.6	67.60 ~ 830.0	260.2
23	\sum_{16} PAHs		118.1 ~ 2900	787.7	724.4 ~ 2900	1488	118.1 ~ 1875	533.0	178.4 ~ 1770	624.9
24	\sum_{21} PAHs		152.4 ~ 3294	934.6	836.4 ~ 3294	1727	152.4 ~ 2111	635.2	232.2 ~ 2163	760.8

1) ND 为未检出

的为位于丘陵区的 6 号点,其 \sum_{16} PAHs 含量分别为 2900 ng·g⁻¹、1875 ng·g⁻¹ 和 118.1 ng·g⁻¹. \sum_{16} PAHs 的含量分布具有强烈的空间异质性,工业区 P1 ~ P5 位于太原市北部,土壤 PAHs 含量较高,均达到了中度污染水平(600 ng·g⁻¹)以上,且约 60% 的样点超过了重度污染水平(1000 ng·g⁻¹),可能是这些采样点周围分布有太原钢铁厂、新华化工厂和太原市第二热电厂等企业,历史上长期遭受企业排污的强烈影响,土壤受到严重污染. P6 ~ P13 位于太原盆地东西两侧市郊的丘陵区,因远离繁忙的交通和密集的人类活动,土壤 PAHs 含量较低,仅约 13% 的样点超过了重度污染水平. P14 ~ P22 位于太原市南端的污灌区,约 33% 的样点处于重度污染水平.

图 2 显示了工业区、丘陵区 and 污灌区在 PAHs 单体组成上的差异,不同区域的单体 PAHs 在含量上差异较大. \sum_{16} PAHs 含量平均值在工业区为 1488 ng·g⁻¹,在丘陵区为 533.0 ng·g⁻¹,在污灌区为 624.9 ng·g⁻¹,工业区的污染水平约为丘陵区 and 污灌区的 2 ~ 3 倍. 3 个区域优势单体 PAHs 种类相似,工业区 21 种 PAHs 的优势 PAHs 为 Fla、BbF、Ant 和 Pyr [图 2(a)],其含量平均值分别约占 \sum_{21} PAHs 总含量的 13%、11%、9% 和 9%;丘陵区的优势 PAHs 及其占比依次为 Ant (17%)、Phe (14%)、Fla(9%) 和 BbF(9%) [图 2(b)];而污灌区的优势 PAHs 及其占比依次为 Fla(13%)、BbF (11%)、Ant(10%) 和 Phe(9%) [图 2(c)]. Fla 是焦化生产的指示物^[22], BbF 和 Pyr 是生物质和煤炭

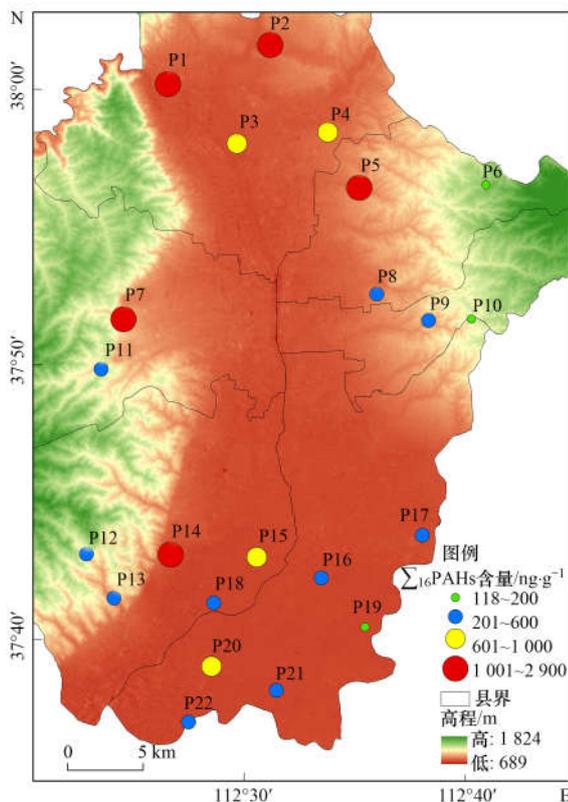


图1 太原市耕地土壤 PAHs 的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of PAHs in arable soils of Taiyuan

燃烧过程中排放的主要 PAHs^[31,32], Ant 主要来自生物质燃烧与炼焦源^[22], Phe 可作为焦炭生产和燃煤源的指示物^[22], 从主要单体 PAHs 可见太原市耕地土壤 PAHs 的主要来源是煤炭和生物质燃烧源。

太原市工业区耕地土壤 \sum_{16} PAHs 含量平均值为 $1\,488\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 低于黑龙江大庆市工业区周边农田土壤 ($2\,240\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[8] 和伊朗的阿瓦兹大都市 ($1\,733\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[45], 高于上海市交通沿线农田土壤 ($928.2\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[20] 和香港工业区 ($590.0\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[46] 土壤中 PAHs 的含量。太原市丘陵区 and 污灌区土壤 \sum_{16} PAHs 含量平均值分别为 $533.0\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $624.9\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 接近于山东省农田 ($556.3\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[47]、北京市农田 ($518.2\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[31] 和天津市农田土壤 ($613.1\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[23], 高于银川平原 ($190.6\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[48]、印度的钦奈市 ($64.0\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[49] 和意大利南部的 Caserta 省 ($29.0\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[50] 土壤中 PAHs 的含量。与国内外同类型的土壤相比, 太原市 3 个区域的土壤均处于中高污染水平。

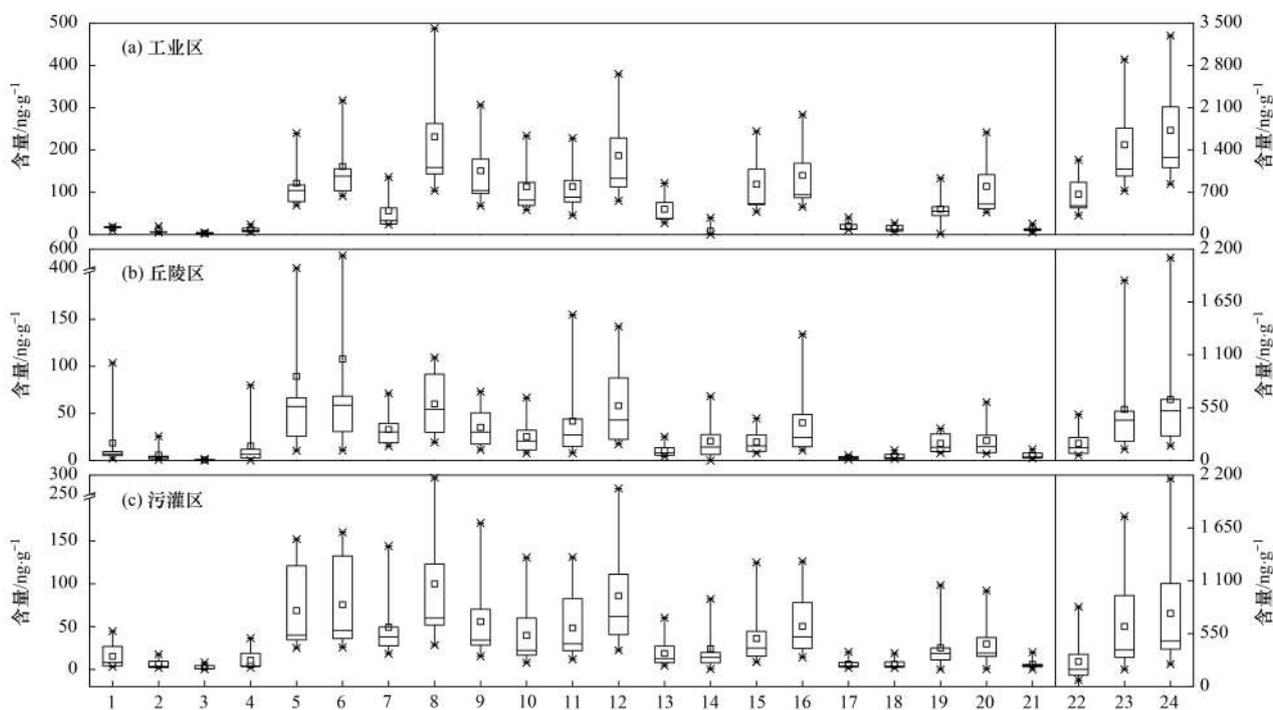
为探讨不同区域 PAHs 含量差异是否显著, 对 3 个区域 \sum_{21} PAHs 和各单体 PAH 含量进行了单因素方差分析与多重比较, 数据经对数转换后符合正态分布并通过了方差齐性检验。方差分析结果表明,

太原市工业区、丘陵区 and 污灌区 \sum_{21} PAHs 含量存在显著差异 ($P < 0.05$); 进一步对其进行多重比较, 结果表明, 工业区和丘陵区、工业区和污灌区之间 \sum_{21} PAHs 含量差异显著, 而丘陵区 and 污灌区之间含量差异不显著。各单体 PAH 的方差分析结果显示, 3 个区域 2 环和 3 环所有的单体 PAHs、6 环的 InP 和 7 环的 Cor 含量差异不显著; 4、5 和 6 环剩余的 PAHs 含量均存在显著差异 ($P < 0.05$), 且其多重比较结果与 \sum_{21} PAHs 的结果一致。由此可见, 2 环和 3 环所有的 PAHs 可能因具有易挥发的化学性质, 更容易在不同区域间迁移扩散, 此外低环 PAHs 在大气迁移过程中容易被光降解, 致使其在 3 个区域土壤中含量差异不显著; 中环和高环的大多数 PAHs 含量在工业区与丘陵区、工业区和污灌区之间差异显著, 可能与工业区受到密集的工业活动的影响有关。

为探讨不同区域 PAHs 环数组成的差异性, 对 3 个区域各环数 PAHs 的总和也进行了单因素方差分析与多重比较, 该结果与上述 \sum_{21} PAHs 和单体 PAHs 的结果基本一致, 3 个区域 2 环和 3 环 PAHs 含量差异不显著; 4 环和 5 环 PAHs 含量仅在工业区与丘陵区、工业区和污灌区之间差异显著; 6 环和 7 环 PAHs 含量差异不显著, 但其方差分析结果的显著性接近于 0.05。

有研究表明在 PAHs 的成分谱中, 以 3 环和 4 环 PAHs 为主时, 该地区多为煤燃烧源; 以 5 环和 6 环 PAHs 为主则主要为石油燃烧源^[10]。太原市 3~4 环 PAHs 平均占比约 61%, 大于平均占比约 37% 的 5~6 环 PAHs, 因此太原市耕地土壤中的 PAHs 主要源于煤炭和生物质燃烧, 这与太原市能耗结构中煤炭占绝对优势的现状相吻合^[26]。

2~7 环 PAHs 在不同功能区中的占比如图 3 所示, 工业区占比 4 环 PAHs > 5 环 PAHs > 3 环 PAHs; 丘陵区占比 3 环 PAHs > 4 环 PAHs > 5 环 PAHs; 污灌区占比 4 环 PAHs > 3 环 PAHs > 5 环 PAHs。工业区受到更多能源消耗的影响, 4 环 PAHs 占比较多; 丘陵区易挥发的 3 环 PAHs 占比更多, 这可能是由于丘陵区 PAHs 在大气传输过程中发生“山区冷捕集”效应, 在温度较低时低环 PAHs 可优先在较高海拔的山地系统富集所致^[51]。太原丘陵区的海拔高度约在 800 m 以上, 而其城区的海拔高度低于 800 m, 此外丘陵区的年平均温度比城区低, 这可能更有利于山区汇聚 3 环 PAHs。工业区 4~6 环 PAHs 含量最高, 可能因为该区消耗更多的化石燃料。



(a) 工业区, (b) 丘陵区, (c) 污灌区; 1. Nap, 2. Acy, 3. Ace, 4. Flu, 5. Phe, 6. Ant, 7. Ret, 8. Fla, 9. Pyr, 10. BaA, 11. Chry, 12. BbF, 13. BkF, 14. Cpp, 15. BaP, 16. BeP, 17. Per, 18. DahA, 19. InP, 20. BghiP, 21. Cor, 22. \sum_7 PAHs, 23. \sum_{16} PAHs, 24. \sum_{21} PAHs

图2 工业区、丘陵区 and 污灌区中 21 种 PAHs 的含量

Fig. 2 Content of the 21 PAHs in industrial zones, hilly areas, and sewage irrigation area

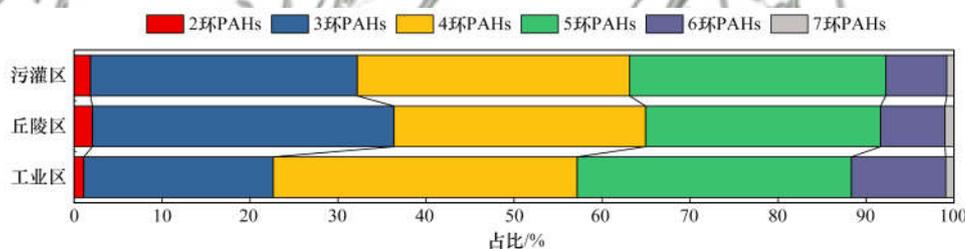


图3 工业区、丘陵区 and 污灌区中 2~7 环 PAHs 的占比

Fig. 3 Portion of 2-7 ring PAHs in industrial zones, hilly areas, and sewage irrigation area

2.3 源解析

为推断 PAHs 的来源并探讨其空间异质性,分析了 3 个不同区域中 22 个土壤样点的诊断比率. 图 4 中, $Fla/(Fla + Pyr)$ 的值均大于 0.50, 表明各样点的 PAHs 与煤、草和木柴的燃烧有关^[31,33]. P7 点 BaA/(BaA + Chry) 的值小于 0.35, 说明该点受到了一定的石油挥发源的影响; 其他样点该比值均大于 0.35, 表明其主要受煤和生物质燃烧源的影响^[32,34]. 丘陵区污染源复杂, $Fla/(Fla + Pyr)$ 值的极差较大, 这可能与空气污染的传输有关. 22 个样点中工业区 $InP/(InP + BghiP)$ 的值大多处于 0.2 ~ 0.5 之间, 表明工业区土壤受到液体化石燃料燃烧的影响; 污灌区样点该比值大多大于 0.5, 表明受到煤炭和生物质燃烧的影响^[32,35]; 丘陵区样点该比值分布在 0.5 左右, 可能与人类活动的影响有关. 可

见, 总体而言煤炭和生物质的燃烧仍是太原市耕地土壤中 PAHs 污染的主要来源, 此外部分土壤还受到交通排放源的影响.

太原市土壤 PAHs 的 PMF 分析结果如图 5 所示, 共提取 3 个经旋转后的 PMF 因子, 根据因子中各组分含量及其贡献率的高低判断其来源. 因子 1 中 Nap、Flu、Phe 和 Ant 组分含量及其贡献率均较高, Nap 和 Flu 是焦炭和焦油生产过程中排放的主要 PAHs^[31,52], Phe 和 Ant 主要来源于焦炉排放的烟气^[32,53], 以上 PAHs 均被认为是炼焦源的主要指示物; Ret 是生物质燃烧源的指示物^[54], BghiP 常作为交通排放源的指示物^[32], 二者含量最少; 故因子 1 代表炼焦源, 其对土壤中 \sum_{21} PAHs 含量的贡献率约为 19%. 因子 2 中近半数的 PAHs 组分含量及其贡献率均较高, 这些组分中 Phe、Fla 和 Pyr 常被认

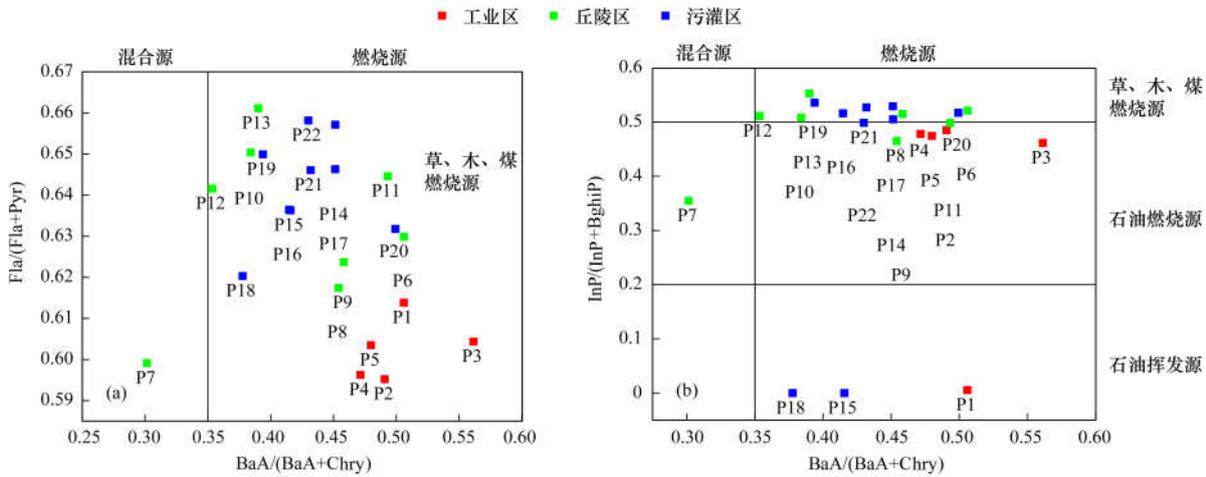
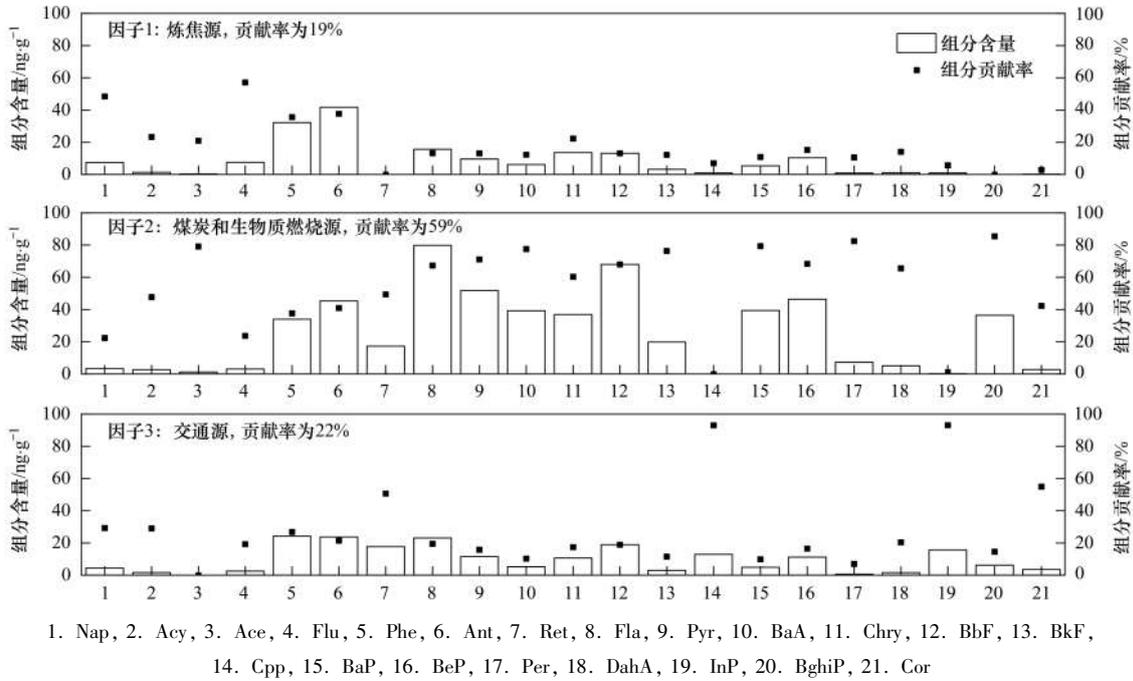


图4 耕地土壤 PAHs 的交叉图
Fig. 4 PAHs cross plots of arable soils



1. Nap, 2. Acy, 3. Ace, 4. Flu, 5. Phe, 6. Ant, 7. Ret, 8. Fla, 9. Pyr, 10. BaA, 11. Chry, 12. BbF, 13. BkF, 14. Cpp, 15. BaP, 16. BeP, 17. Per, 18. DahA, 19. InP, 20. BghiP, 21. Cor

图5 从 PMF 分析中得到的典型污染物的组分含量及其贡献率

Fig. 5 Component content and contribution rate of the typical contaminants from PMF analysis

为是燃煤源的指示物^[22], BkF、BbF 和 Chry 是生物质燃烧或垃圾焚烧源的指示物^[53,54], BaP 主要来自化石燃料燃烧^[55], 故因子 2 可代表煤炭和生物质燃烧源, 其对 PAHs 含量的贡献率约占总量的 59%. 因子 3 中 Phe、Ant、Ret、Fla、Cpp、InP 和 Cor 的组分含量及其贡献率较高, 其中 InP、BghiP 和 Cor 多存在于石油燃烧的废气中, 是交通排放源的重要指示物^[31,32], 故因子 3 指示交通源, 其对土壤 PAHs 的贡献率约为 22%. 可见太原市耕地土壤中 PAHs 的主要来源为煤炭和生物质燃烧(59%), 交通和炼焦源的贡献各约占 20% 左右, 这与太原市曾存在大量的煤炭燃烧和农田秸秆焚烧的历史事实是一致的^[27,28].

2.4 风险评价

美国环保署将致癌物的可接受风险范围设定为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$, 低于 10^{-6} 的风险不需要采取进一步行动, 而高于 10^{-4} 的风险被认为需要采取额外行动来减少接触和由此产生的风险^[43]. 为了定量评估生活在研究区域的人群接触 PAHs 的风险, 为不同年龄和性别群体建立了通过摄入、皮肤接触和吸入的各种接触情景, 将人群分为青年男、青年女、成年男和成年女 4 组. 3 个区域 4 个人群组 3 种接触途径 16 种 PAHs 累积的致癌风险值如图 6 所示, 可见研究区域土壤中 PAHs 总的 ILCR 的取值在 $8.69 \times 10^{-5} \sim 2.61 \times 10^{-3}$ 之间, 其中 P1、P2 和 P20 3 个采样点具有显著的高致癌风险, 约占总样本量的

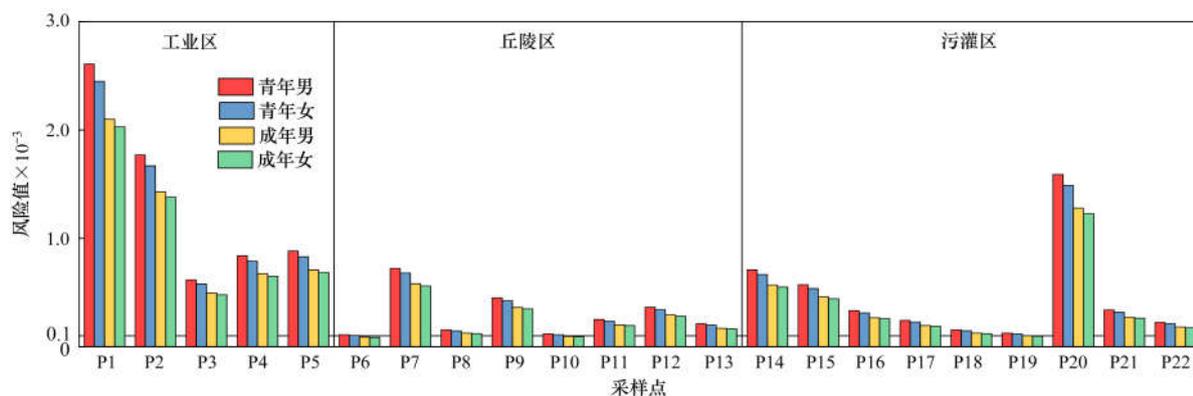


图6 PAHs的癌症风险评价

Fig. 6 Cancer risk assessment for PAHs

14%。在两个年龄组中,青年组致癌风险最高,其次是成年组,青年组的致癌风险值均大于 10^{-4} ,成年组86%的样本致癌风险值大于 10^{-4} 。无论是青年组还是成年组,男性的致癌风险均高于女性。工业区、污灌区和丘陵区的平均癌症风险值由高到低依次为: 11.84×10^{-4} 、 4.20×10^{-4} 和 2.63×10^{-4} 。由此可见,目前暴露水平下,耕地土壤对在其中活动的人群普遍存在高致癌风险,即使是人类活动较少的丘陵区的耕地也存在一定的致癌风险,太原市耕地土壤普遍存在不容忽视的健康风险。

3 结论

(1)太原市耕地土壤样品中 \sum_{16} PAHs含量平均值为 $787.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,约27%的样品超过了 $1000 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 的重度污染水平,但BaP的含量低于GB 15168-2018农用地土壤污染风险筛选值。

(2)土壤样点依据其空间位置可分为工业区样点、丘陵区样点和污灌区样点3个不同的类型区域,3个区域分别约有60%、13%和33%的样点土壤中PAHs含量超过了重度污染水平($1000 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$),工业区 \sum_{16} PAHs的含量平均值为 $1488 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,约为丘陵区 and 污灌区的2~3倍。

(3)太原市耕地土壤3~4环和5~6环PAHs分别约占 \sum_{21} PAHs的61%和37%,太原市耕地土壤中的PAHs主要源于煤炭和生物质燃烧。工业区土壤中4环PAHs占比最多;丘陵区土壤受冷捕集效应的影响,含有更多的3环PAHs。

(4)诊断比率和PMF模型分析结果一致表明,煤炭和生物质燃烧是太原市耕地土壤中PAHs的主要来源;炼焦源、交通源、煤炭和生物质燃烧源对耕地土壤中PAHs总含量的贡献率分别为19%、22%和59%。

(5)太原市耕地土壤普遍存在不容忽视的健康

风险,其致癌风险依工业区、污灌区和丘陵区的次序而降低,应当引起人们的关注。

参考文献:

- [1] 沈仁芳, 颜晓元, 张甘霖, 等. 新时期中国土壤科学发展现状与战略思考[J]. 土壤学报, 2020, **57**(5): 1051-1059.
Shen R F, Yan X Y, Zhang G L, *et al.* Status quo of and strategic thinking for the development of soil science in China in the new era[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(5): 1051-1059.
- [2] 朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务[J]. 地理学报, 2015, **70**(12): 1859-1869.
Zhu Y G, Li G, Zhang G L, *et al.* Soil security: from Earth's critical zone to ecosystem services[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(12): 1859-1869.
- [3] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报, 2006, **26**(3): 901-913.
Liu Z F, Fu B J, Liu G H, *et al.* Soil quality: concept, indicators and its assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(3): 901-913.
- [4] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(9): 1689-1692.
Chen N C, Zheng Y J, He X F, *et al.* Analysis of the report on the national general survey of soil contamination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(9): 1689-1692.
- [5] 胡文友, 陶婷婷, 田康, 等. 中国农田土壤环境质量管理现状与展望[J]. 土壤学报, 2021, **58**(5): 1094-1109.
Hu W Y, Tao T T, Tian K, *et al.* Status and prospect of farmland soil environmental quality management in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, **58**(5): 1094-1109.
- [6] Sun J T, Pan L L, Tsang D C W, *et al.* Organic contamination and remediation in the agricultural soils of China: a critical review[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **615**: 724-740.
- [7] Tarafdar A, Oh M J, Nguyen-Phuong Q, *et al.* Profiling and potential cancer risk assessment on children exposed to PAHs in playground dust/soil: a comparative study on poured rubber surfaced and classical soil playgrounds in Seoul [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, **42**(6): 1691-1704.
- [8] Li X, Zheng R, Bu Q H, *et al.* Comparison of PAH content, potential risk in vegetation, and bare soil near Daqing oil well and evaluating the effects of soil properties on PAHs [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(24): 25071-25083.

- [9] Azzolina N A, Kreitinger J P, Skorobogatov Y, *et al.* Background concentrations of PAHs and metals in surface and subsurface soils collected throughout Manhattan, New York[J]. *Environmental Forensics*, 2016, **17**(4): 294-310.
- [10] Wang C H, Wu S H, Zhou S L, *et al.* Characteristics and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils; a review[J]. *Pedosphere*, 2017, **27**(1): 17-26.
- [11] Cai C Y, Li J Y, Wu D, *et al.* Spatial distribution, emission source and health risk of parent PAHs and derivatives in surface soils from the Yangtze River Delta, eastern China [J]. *Chemosphere*, 2017, **178**: 301-308.
- [12] Liu W J, Wang Y L, Chen Y C, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air, surface soil and wheat grain near a large steel-smelting manufacturer in northern China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, **57**: 93-103.
- [13] 吴萌, 段永红, 何佳璘, 等. 北方地区表层土壤中 PAHs 的含量及来源分析[J]. *山西农业科学*, 2021, **49**(3): 311-317.
- Wu M, Duan Y H, He J L, *et al.* Content and source analysis of PAHs in surface soil of northern China[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2021, **49**(3): 311-317.
- [14] Wang W T, Simonich S L M, Xue M, *et al.* Concentrations, sources and spatial distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Beijing, Tianjin and surrounding areas, north China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(5): 1245-1251.
- [15] Chen Y, Wang Y H, Yu K K, *et al.* Occurrence characteristics and source appointment of polycyclic aromatic hydrocarbons and *n*-alkanes over the past 100 years in southwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **808**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151905.
- [16] Liu S D, Xia X H, Zhai Y W, *et al.* Black carbon (BC) in urban and surrounding rural soils of Beijing, China: spatial distribution and relationship with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)[J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(2): 223-228.
- [17] Wang X L, Zuo Q, Duan Y H, *et al.* Factors affecting spatial variation of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils in North China Plain[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, **31**(10): 2246-2252.
- [18] 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.
- [19] 周洁, 张敬锁, 刘晓霞, 等. 北京市郊农田土壤中多环芳烃污染特征及风险评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, **36**(4): 534-540.
- Zhou J, Zhang J S, Liu X X, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of PAHs in agricultural soil in suburb of Beijing [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, **36**(4): 534-540.
- [20] 张希, 杨静, 刘敏, 等. 上海交通沿线农田土壤中 PAHs 分布特征及源解析[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(2): 741-749.
- Zhang X, Yang J, Liu M, *et al.* Distribution characteristics and source analysis of PAHs in farmland soils along Shanghai traffic artery[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 741-749.
- [21] 葛成军, 俞花美. 南京市典型工业区耕地中多环芳烃源解析[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, **18**(9): 843-848.
- Ge C J, Yu H M. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soil in typical industrial zone in Nanjing city [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(9): 843-848.
- [22] 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.
- [23] Shao X L, Xu Y P, Zhang W, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) pollution in agricultural soil in Tianjin, China[J]. *Soil and Sediment Contamination: an International Journal*, 2015, **24**(3): 343-351.
- [24] 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.
- [25] 张晨强. 加快太原老工业基地现代化问题研究[A]. 见: 现代化的特征与前途——第九期中国现代化研究论坛论文集[C]. 北京: 中国科学院中国现代化研究中心, 2011.
- [26] 太原市统计局, 国家统计局太原调查队. 太原市 2020 年国民经济和社会发展统计公报[N]. *太原日报*, 2021-03-22(03).
- [27] 刘飞, 刘应汉, 王建武, 等. 太原市区土壤中多环芳烃污染特征研究[J]. *地学前缘*, 2008, **15**(5): 155-160.
- Liu F, Liu Y H, Wang J W, *et al.* Pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in the topsoil of Taiyuan city, north China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, **15**(5): 155-160.
- [28] 高鹏. 太原市不同功能区土壤污染特征及健康风险评价[D]. 太原: 山西大学, 2016.
- [29] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [30] Duan Y H, Shen G F, Tao S, *et al.* Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils at a typical coke production base in Shanxi, China [J]. *Chemosphere*, 2015, **127**: 64-69.
- [31] Liu H, Yu X L, Liu Z R, *et al.* Occurrence, characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in arable soils of Beijing, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **159**: 120-126.
- [32] Liu Q Y, Wu Y H, Zhou Y Z, *et al.* A novel method to analyze the spatial distribution and potential sources of pollutant combinations in the soil of Beijing urban parks [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **284**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117191.
- [33] Enell A, Reichenberg F, Ewald G, *et al.* Desorption kinetics studies on PAH-contaminated soil under varying temperatures [J]. *Chemosphere*, 2005, **61**(10): 1529-1538.
- [34] Wang L J, Zhang P Q, Wang L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soil in the semi-arid city of Xi'an, northwest China: composition, distribution, sources, and relationships with soil properties[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2018, **75**(3): 351-366.
- [35] Peng C, 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.
- [36] Qiao P W, Dong N, Yang S C, *et al.* Quantitative analysis of the main sources of pollutants in the soils around key areas based on

- the positive matrix factorization method [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **273**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116518.
- [37] United States Environmental Protection Agency. EPA positive matrix factorization 5.0 fundamentals and user guide[EB/OL]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100IW74.txt>, 2022-03-22.
- [38] Polissar A V, Hopke P K, Poirot R L. Atmospheric aerosol over vermont: chemical composition and sources[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(23): 4604-4621.
- [39] Xie T, Lu F, Wang M E, *et al.* The application of urban anthropogenic background to pollution evaluation and source identification of soil contaminants in Macau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **778**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146263.
- [40] 温玲, 徐建平. EPA PMF5.0 在浦东新区降水源解析中的应用研究[J]. *环境科学与管理*, 2016, **41**(1): 115-118.
Wen L, Xu J P. Application of EPA PMF5.0 in analysis of precipitation in Pudong new area[J]. *Environmental Science and Management*, 2016, **41**(1): 115-118.
- [41] 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 等. 承德市 PM_{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2343-2354.
He B W, Nie S S, Li Y L, *et al.* Seasonal distribution characteristics, source analysis, and health risk evaluation of PAHs in PM_{2.5} in Chengde[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2343-2354.
- [42] Wang C H, Zhou S L, Song J, *et al.* Human health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban soils of Nanjing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 750-757.
- [43] Wang X T, Chen L, Wang X K, *et al.* Occurrence, sources and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban (Pudong) and suburban soils from Shanghai in China[J]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 1224-1232.
- [44] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准[S].
- [45] Mohit A, Keshavarzi B, Moore F. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils of Ahvaz metropolis; contamination, composition, distribution, potential sources, and cancer risk[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal*, 2019, **25**(4): 935-948.
- [46] Chung M K, Hu R, Cheung K C, *et al.* Pollutants in Hong Kong soils: polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Chemosphere*, 2007, **67**(3): 464-473.
- [47] 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.
- [48] 李彤超, 李伟, 袁辰怡, 等. 银川平原及周边地区表层土壤中多环芳烃分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(11): 2136-2142.
Li T C, Li W, Yuan C Y, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils of Yinchuan Plain and surrounding areas [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(11): 2136-2142.
- [49] Rajan S, Rex K R, Pasupuleti M, *et al.* Soil concentrations, compositional profiles, sources and bioavailability of polychlorinated dibenzo dioxins/furans, polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in open municipal dumpsites of Chennai city, India [J]. *Waste Management*, 2021, **131**: 331-340.
- [50] Qi P Z, Qu C K, Albanese S, *et al.* Investigation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Caserta provincial territory, southern Italy: Spatial distribution, source apportionment, and risk assessment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **383**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121158.
- [51] 薛永刚, 龚平, 王小萍, 等. 持久性有机污染物在森林生态系统中的环境行为研究[J]. *地理科学进展*, 2013, **32**(2): 278-287.
Xue Y G, Gong P, Wang X P, *et al.* Environmental behaviors of the persistent organic pollutants in forest ecosystem[J]. *Progress in Geography*, 2013, **32**(2): 278-287.
- [52] Miguel A H, Pereira P A P. Benzo(k)fluoranthene, benzo(ghi)Perylene, and indeno(1,2,3-cd)pyrene: new tracers of automotive emissions in receptor modeling[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1989, **10**(2): 292-295.
- [53] Qu Y J, Gong Y W, Ma J, *et al.* Potential sources, influencing factors, and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface soil of urban parks in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114016.
- [54] Okuda T, Okamoto K, Tanaka S, *et al.* Measurement and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the aerosol in Xi'an, China, by using automated column Chromatography and applying positive matrix factorization (PMF) [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(8): 1909-1914.
- [55] 卜庆伟, 张枝焕, 夏星辉. 分子标志物参数在识别土壤多环芳烃(PAHs)来源中的应用[J]. *土壤通报*, 2008, **39**(5): 1204-1209.
Bu Q W, Zhang Z H, Xia X H. The Application of molecular biomarker parameters as indicators of PAHs source in soils, a review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, **39**(5): 1204-1209.

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvo-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weibei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-yang, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)