

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM_{2.5} 浓度遥感反演 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一(1513)

秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响
..... 李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉(1520)

基于 GAM 模型的西安市 O₃ 浓度影响因素解析 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎(1535)

北京及周边 6 个城市大气 PM_{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征 朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕(1544)

典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析 李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤(1550)

成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析 王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛(1561)

天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖(1573)

涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响 吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正(1582)

典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤(1589)

中国地表水硝酸盐分布及其来源分析 张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦(1594)

中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险 杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇(1607)

小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析 范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟(1619)

浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征 马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖(1629)

三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系 米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴(1636)

骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子 张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军(1648)

拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系 王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁(1657)

基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素
..... 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升(1666)

岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析 赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航(1676)

巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应 李如忠, 王莉, 刘超(1684)

镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复 丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇(1692)

氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用 杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君(1700)

北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性 陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡(1709)

新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用 黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵娴, 冯华军(1716)

Ni 掺杂 Sb-SnO₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶 石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠(1725)

磁性 Fe₃O₄-CuO 非均相活化过碳酸钠降解 A07 徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅(1734)

赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星, 性能和机制 史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟(1743)

工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响 张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜(1752)

污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性 陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇(1761)

改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性 毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆(1770)

A²/O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性 刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康(1779)

基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制 杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮(1787)

HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响 王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪(1794)

低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征 朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(1801)

不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征 程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良(1808)

投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响 杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪(1816)

中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险
..... 李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新(1825)

基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染 胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜(1838)

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 姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然(1847)

桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波(1855)

重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素 王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜(1864)

棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用 刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛(1871)

连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量 薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠(1880)

纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响 邓继宝, 张春来, 徐卫红(1888)

矿业废弃地复垦土壤-作物晒吸收特征及其对重金属拮抗效应 尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文(1904)

不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高(1914)

化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响 朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳(1921)

紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应 熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明(1930)

浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径 吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰(1941)

极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素 孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国(1950)

红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应 吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽(1960)

稻田土壤 N₂O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制 郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅(1968)

京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估 陈盼, 施晓清(1976)

中国城市工业化发展与 PM_{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波(1987)

《环境科学》征订启事(1618) 《环境科学》征稿简则(1635) 信息(1724, 1769, 1800)

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

姚成^{1,2}, 倪进治^{2,3*}, 刘瑞^{1,2}, 杨柳明^{1,2}, 陈卫锋^{2,3}, 魏然^{1,3}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007; 3. 福建师范大学福建省植物生理生态重点实验室, 福州 350007)

摘要: 对扬州市6个不同功能区(公园、菜地、文教区、居民区、加油站和工业区)共59个表层土壤样品(0~10 cm)中15种美国环境保护署优控的多环芳烃(PAHs)的含量和来源进行了分析,并利用苯并[a]芘(BaP)毒性当量浓度(TEQ_{BaP})评价了土壤中PAHs的生态风险.结果表明,扬州市土壤中 $\sum 15\text{PAHs}$ 总量范围为21~36 118 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,中值为295 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,PAHs组成中以4~6环为主.不同功能区 $\sum 15\text{PAHs}$ 总量平均值高低顺序为工业区>加油站>文教区>菜地>居民区>公园.相关性分析表明,整个扬州市土壤中 $\sum 15\text{PAHs}$ 总量与土壤总有机碳(TOC) ($P < 0.05$)和黑碳(BC) ($P < 0.01$)含量都呈显著性正相关,但除了加油站土壤中 $\sum 15\text{PAHs}$ 总量与BC含量呈显著性正相关($P < 0.01$)外,不同功能区土壤中 $\sum 15\text{PAHs}$ 总量与TOC、BC含量都无显著相关性.特征比值法结果表明,不同功能区土壤中PAHs来源虽有些差异,但都主要来源于石油泄漏以及石油、煤和生物质等的燃烧.扬州市土壤中15种PAHs总TEQ_{BaP}值的范围是2~4 448 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.以荷兰土壤环境标准中的10种PAHs总TEQ_{BaP}值33 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为标准,扬州市有45.8%的土样超标,各功能区点位超标率高低顺序为工业区(70%)>加油站(60%)>文教区(55.6%)>菜地(50.0%)>居民区(30%)>公园(10%).因此,扬州市不同功能区中都有部分表层土壤存在潜在的生态风险,工业区和加油站风险相对较高,而居民区和公园风险相对较低.

关键词: 多环芳烃(PAHs); 功能区; 土壤; 来源; 生态风险

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1847-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201909065

Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China

YAO Cheng^{1,2}, NI Jin-zhi^{2,3*}, LIU Rui^{1,2}, YANG Liu-ming^{1,2}, CHEN Wei-feng^{2,3}, WEI Ran^{1,3}

(1. School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. Fujian Provincial Key Laboratory for Plant Eco-physiology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The contents and sources of 15 US EPA priority polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were analyzed in 59 surface soil samples (0-10 cm depth) collected from six functional zones, including cultural and educational area, park, residential area, vegetable garden, gas station, and industrial area, in Yangzhou City. The toxicity equivalent content of benzo[a]pyrene (TEQ_{BaP}) was adopted to assess PAH risks in soils. The results showed that the contents of $\sum 15\text{PAHs}$ in soil samples ranged from 21 to 36 118 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, with a median value of 295 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. The composition of PAHs was dominated by 4-6 ring PAHs. The average contents of $\sum 15\text{PAHs}$ in various functional zones in Yangzhou City was in the order of industrial area > gas station > cultural and educational area > vegetable garden > residential area > park. Correlation analysis showed that the contents of $\sum 15\text{PAHs}$ were significantly positively correlated with the contents of both TOC ($P < 0.05$) and BC ($P < 0.01$) in soil samples from whole Yangzhou City. However, the contents of $\sum 15\text{PAHs}$ had no significant correlations with the contents of both TOC and BC in soil samples within each functional zone except gas station, in which the contents of $\sum 15\text{PAHs}$ had a significant correlation with those of BC ($P < 0.01$). The results of PAH ratios showed that the sources of PAHs in soils of various functional zones were mainly from oil leakage and the combustion of oil, coal, and biomass, although there were some differences among them. The values of $\sum \text{TEQ}_{\text{BaP}}$ of 15 PAHs ranged from 2 to 4 448 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ in the soil samples of Yangzhou City. According to the standard value of 33 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ of $\sum \text{TEQ}_{\text{BaP}}$ for 10 PAHs in the soil environmental standard of Netherland, 45.8% of soil samples exceeded the standard in Yangzhou City. The percentages of soil samples

收稿日期: 2019-09-08; 修订日期: 2019-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671326)

作者简介: 姚成(1994~),男,硕士研究生,主要研究方向为污染土壤环境风险评估和修复, E-mail: 1161033939@qq.com

* 通信作者, E-mail: njz@fjnu.edu.cn

exceeding the standard of various functional zones in Yangzhou City were in the order of industrial area (70%) > gas station (60%) > cultural and educational area (55.6%) > vegetable garden (50.0%) > residential area (30%) > park (10%). Hence, in all the functional zones of Yangzhou City, there were some soil samples with potential ecological risks, which was relatively higher in industrial area and gas station, and relatively lower in residential area and park.

Key words: Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs); functional zone; soil; source; ecological risk

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbon, PAHs) 是具有两个或多个苯环稠合而成的一类化合物,因其具有高疏水性和在环境中不易降解的特性,会产生持久性的污染^[1]. 城市作为人类主要的活动场所,由人类活动如煤和化石燃料的燃烧、汽车尾气的排放等产生的 PAHs,通过干湿沉降等途径进入土壤,所以城市土壤也是 PAHs 重要的储存库^[2].

当前国内外学者对城市土壤中 PAHs 的含量、来源和生态风险都有一些研究,但大多数都是以整个城市较大尺度下的研究^[3-5],而区分城市中不同功能区土壤中 PAHs 的研究较少. 城市不同功能区存在人类活动方式和强度,以及地表覆盖等的差异,其土壤中污染物(如 PAHs、重金属)的含量往往也存在较大不同^[4,6,7]. 此外,土壤中 PAHs 的含量与土壤总有机碳(TOC)和黑碳(BC)的含量有着密切的关系^[8,9],而城市不同功能区土壤中 TOC 和 BC 含量有很大的变异^[10,11]. 因此,对城市不同功能区土壤中 PAHs 污染状况及其与土壤 TOC、BC 之间的关系进行研究,能够更好地反映人类活动对土壤环境质量的影响.

扬州市作为长三角城市群中重要城市,随着城市规模不断扩大,各种土壤污染问题也日益显现. 当前对扬州市土壤污染研究主要集中于城区或沿江地区重金属污染^[12],而对市区土壤中 PAHs 污染特别是对不同功能区土壤中 PAHs 的污染则鲜见报道. 因此,本文以扬州市不同功能区土壤为研究对象,分析了土壤中 15 种美国环保署 (USEPA) 优控的 PAHs 含量及其来源,以及 PAHs 与 BC、TOC 之间的关系,并利用苯并[a]芘 (BaP) 毒性当量浓度 (TEQ_{BaP}) 评价了土壤中 PAHs 的生态风险,以期为更好地了解人类活动对土壤环境质量的影响以及防范土壤污染的生态风险提供基础数据.

1 材料与与方法

1.1 采样点布设与样品采集

样品采集于 2018 年 7 月,在扬州市区内按不同的土地利用类型划分成 6 种不同的功能区:公园、菜地、文教区、居民区、工业区和加油站. 并依据采样点在市区范围内均匀分布的原则来设点采样,采样点分布如图 1 所示.

每个功能区选择 9~10 个代表性的地块,使用

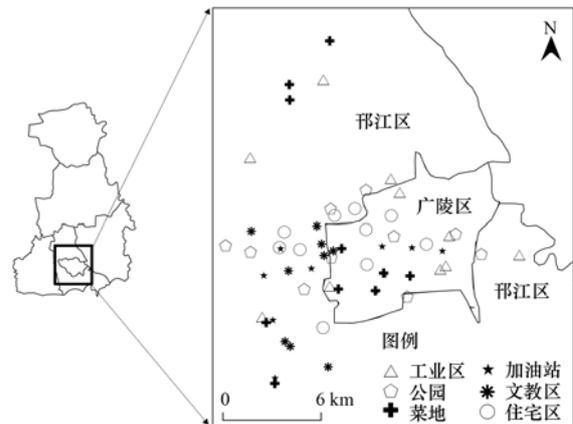


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Schematic map of sampling sites

不锈钢铲按照多点混合法采集 0~10 cm 表层土壤,共采集 59 个土壤样品. 样品带回实验室风干,挑除石子和动植物残体等杂质,过 2 mm 筛. 部分土样冷冻干燥后过 60 目筛,待测 PAHs.

1.2 土壤总有机碳和黑碳的测定

土壤 TOC 采用元素分析仪 (Elementar Vario MAX, Germany) 测定. BC 采取热氧化法测定^[13],称取一定量酸化处理过的土样于坩埚内,放入马弗炉中,在 375℃ 下高温氧化 24 h,用元素分析仪测定土样中残存的有机碳含量,即为土样中 BC 的含量. 土壤中 TOC 和 BC 含量见表 1.

1.3 土壤中 PAHs 的提取和测定

称取 5.0 g 土壤样品于 40 mL 带聚四氟乙烯衬垫盖的玻璃瓶中,加入等量的无水硫酸钠,再加入 15 mL 二氯甲烷,静置过夜. 置于超声波清洗槽 (40 kHz, 200 W) 中超声 2 h,超声结束后,以 2500 r·min⁻¹ 离心 20 min,将上清液转移至圆底烧瓶中,旋转蒸发浓缩至 2 mL,加入 2 mL 乙腈,再次浓缩至约 1 mL,重复 2 次,过 C₁₈ 小柱后待测.

PAHs 的测定采用美国 Waters 公司的超高效液相色谱仪 (UPLC),荧光检测器. 色谱柱为 BEH Shield RP18 (2.1 mm × 150 mm, 1.7 μm),柱温为 45℃,流动相为乙腈和水,进行梯度洗脱,流速为 0.4 mL·min⁻¹,详见倪进治等^[14]的研究. 本实验分析了 15 种 USEPA 优控的 PAHs: 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)、

表 1 供试土壤有机碳 (TOC) 和黑炭 (BC) 的含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ Table 1 Contents of TOC and BC in the tested soils/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

功能区 (样品数)	测定项目	样品号									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
文教区(9)	TOC	5.11	12.99	13.38	5.14	14.00	21.00	10.86	5.81	9.83	
	BC	0.82	3.23	1.94	2.99	5.13	4.70	2.33	3.17	1.89	
公园(10)	TOC	2.95	5.97	4.76	42.72	7.21	8.95	8.53	4.27	1.94	2.99
	BC	0.75	0.59	1.23	1.09	1.03	0.99	0.97	1.08	0.64	0.72
居民区(10)	TOC	12.47	4.51	8.43	16.10	11.33	2.58	5.88	10.19	4.87	1.37
	BC	1.54	0.63	2.39	0.57	0.68	1.05	0.56	1.54	0.74	0.42
菜地(10)	TOC	6.76	8.24	13.26	3.87	13.38	13.86	15.88	14.96	12.58	8.97
	BC	1.37	2.02	3.21	0.60	1.01	1.63	1.00	1.17	0.90	1.20
加油站(10)	TOC	3.96	16.56	12.99	18.17	1.38	1.90	24.79	6.20	16.05	12.28
	BC	0.47	3.62	1.34	1.68	0.55	0.43	1.41	1.95	2.39	1.60
工业区(10)	TOC	10.98	54.18	13.02	10.09	23.07	10.94	4.82	31.90	12.98	4.12
	BC	1.83	3.62	2.28	2.04	5.88	0.90	1.49	4.39	2.51	2.15

二苯并[a,h]蒽(DahA)、苯并[g,h,i]芘(BghiP)和茚并[1,2,3-cd]芘(InP). 萘的荧光效应较弱,本实验没有测定.

1.4 质量控制

通过向土样中添加 PAHs 混标(EPA610),使土样中 PAHs 单体化合物含量均为 $800 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,同时做不加标的土样作为对照,4 个平行,按照 1.3 节中的方法进行提取和测定. 15 种 PAHs 平均回收率范围为 $81\% \pm 2\% \sim 112\% \pm 4\%$.

1.5 数据分析与处理方法

实验数据分析和作图采取 Origin 2017、SPSS 22.0 和 Arcgis 10.0 等软件.

2 结果与讨论

2.1 不同功能区表层土壤中 PAHs 污染特征

2.1.1 不同功能区表层土壤中 PAHs 含量

不同功能区表层土壤中 15 种 PAHs 含量见表 2. 从 $\sum 15\text{PAHs}$ 总量来看,不同功能区表层土壤中 PAHs 含量差异较大, $\sum 15\text{PAHs}$ 总量平均值的大小顺序为工业区 > 加油站 > 文教区 > 菜地 > 居民区 > 公园. 工业区 $\sum 15\text{PAHs}$ 总量范围为 21 ~ 36 118 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 5 817 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 公园 $\sum 15\text{PAHs}$ 总量范围为 24 ~ 354 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 166 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 7 种致癌性 PAHs 平均含量的大小顺序为工业区 > 文教区 > 加油站 > 菜地 > 居民区 > 公园,其中工业区平均含量为 2 989 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,公园平均含量为 76 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 对比扬州市区不同功能区表层土壤中 $\sum 15\text{PAHs}$ 含量与文献[5,15]中报道的结果发现,不同城市不同功能区表层土壤 PAHs 总量的高低具有相似的趋势,工业区和加油站 PAHs 含量

显著高于文教区、居民区和公园等功能区. 工业区来往的大型货运车辆较多,其停靠启动都会排放出大量尾气,其中的大部分 PAHs 最终会进入附近的土壤中;同时工业区内企业生产活动多使用化石燃料,工业废气及废油的排放也都会造成土壤中 PAHs 的积累. 加油站是市内机动车主要油气补给地,由于大量机动车停靠,以及加油站部分汽油的泄漏都会造成土壤 PAHs 含量的增加^[15]. 在本研究中,部分菜地和文教区土壤中 $\sum 15\text{PAHs}$ 含量也相对较高,这是由于部分菜地位于市区主干道路旁边,机动车流量较大,排放的尾气中 PAHs 主要进入附近的土壤中,导致土壤中 PAHs 含量较高. 而文教区中选取的部分学校,采样点在道路两旁的绿化带上,土壤中 PAHs 含量相对较高可能与校园内机动车辆来往频繁所排放的尾气有关.

2.1.2 不同功能区表层土壤中 PAHs 组成特征

图 2 为不同功能区表层土壤中 PAHs 的组成特征. 总体来看,不同功能区表层土壤中 PAHs 组成以 4 ~ 6 环 PAHs 为主^[18],占 15 种 PAHs 总量的 85.6% ~ 90.4%,其中又以 4 环 PAHs 占比最高;2 ~ 3 环 PAHs 占比则相对较少,为 PAHs 总量的 9.6% ~ 14.4%,其中 2 环 PAHs 占比最低. 2 ~ 3 环 PAHs 比较容易挥发和降解,距排放源较远的土样中含量通常会较低. 加油站和工业区中 Nap 和 Ace 的检出率都分别为 60% 和 10%,其它功能区的所有样品中都未检出 Ace;居民区、文教区和菜地中 Nap 的检出率分别为 20%、30% 和 40%,而公园所有样品中都未检出 Nap. 此外,加油站和工业区中 6 环 PAHs 占比相对较高,分别为 23.5% 和 24.2%,公园和居民区中 6 环 PAHs 占比相对较低,分别为 11.1% 和 13.8%. 不同功能区表层土壤中 PAHs 组成特征的

表 2 不同功能区表层土壤中 PAHs 含量和 BaP 毒性当量浓度¹⁾/μg·kg⁻¹Table 2 Contents and TEQ_{BaP} of PAHs in surface soil of various functional zones/μg·kg⁻¹

项目	文教区		公园		居民区		菜地		加油站		工业区		TEF ²⁾
	浓度范围	平均值	浓度范围	平均值	浓度范围	平均值	浓度范围	平均值	浓度范围	平均值	浓度范围	平均值	
Nap	n. d. ~13	3	n. d.	n. d.	n. d. ~10	2	n. d. ~35	8	n. d. ~40	14	n. d. ~413	57	0.001
Ace	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d. ~12	1	n. d. ~59	6	0.001
Flu	n. d. ~5	2	n. d. ~4	1	n. d. ~7	2	n. d. ~12	3	n. d. ~19	4	n. d. ~550	63	0.001
Phe	14 ~147	51	5 ~54	18	8 ~105	37	12 ~77	38	6 ~246	62	6 ~4 367	549	0.001
Ant	1 ~16	5	1 ~7	3	1 ~11	4	1 ~9	4	n. d. ~37	7	n. d. ~425	52	0.01
Fla	20 ~304	101	8 ~67	34	10 ~191	61	17 ~153	72	10 ~481	117	5 ~5 202	824	0.001
Pyr	11 ~275	85	3 ~48	23	4 ~148	41	12 ~134	56	3 ~397	82	4 ~3 654	547	0.001
BaA	9 ~141	46	1 ~23	13	n. d. ~67	25	9 ~76	32	5 ~204	66	2 ~2 312	510	0.1
Chry	4 ~218	56	n. d. ~34	13	n. d. ~102	23	3 ~96	34	n. d. ~249	50	n. d. ~2 810	417	0.01
BbF	11 ~242	68	2 ~44	19	n. d. ~125	32	9 ~116	46	2 ~218	76	2 ~3 915	736	0.1
BkF	4 ~88	27	1 ~18	8	1 ~43	12	3 ~39	16	n. d. ~109	28	n. d. ~1 163	184	0.1
BaP	6 ~190	55	1 ~27	13	1 ~90	25	7 ~83	33	1 ~235	60	2 ~2 335	349	1
DahA	2 ~52	15	0 ~6	3	n. d. ~26	6	n. d. ~22	7	n. d. ~70	19	n. d. ~938	119	1
BghiP	7 ~285	79	n. d. ~59	12	n. d. ~104	26	n. d. ~126	45	n. d. ~392	108	0 ~4 539	731	0.01
InP	n. d. ~156	39	n. d. ~35	6	n. d. ~64	18	n. d. ~129	33	n. d. ~237	71	n. d. ~3 843	674	0.1
∑ 15PAHs	102 ~2 096	632	24 ~354	166	62 ~1 078	313	75 ~969	427	32 ~2 946	764	21 ~36 118	5 817	
7 Car PAHs ³⁾	45 ~1 065	307	6 ~156	76	7 ~517	141	31 ~486	201	7 ~1 323	269	6 ~16 909	2 989	
15PAHs ∑ TEQ _{BaP}	12 ~308	89	2 ~43	20	2 ~149	40	9 ~136	54	2 ~390	105	3 ~4 448	692	
荷兰 10PAHs ∑ TEQ _{BaP} ⁴⁾	9 ~232	67	2 ~34	16	2 ~110	31	8 ~102	43	1 ~297	78	3 ~3 114	499	

1) n. d. 表示未检测出; 2) 毒性当量因子 TEF 引自文献[16]; 3) Car 表示致癌性 PAHs; 4) 荷兰 10PAHs 目标值引自文献[17]

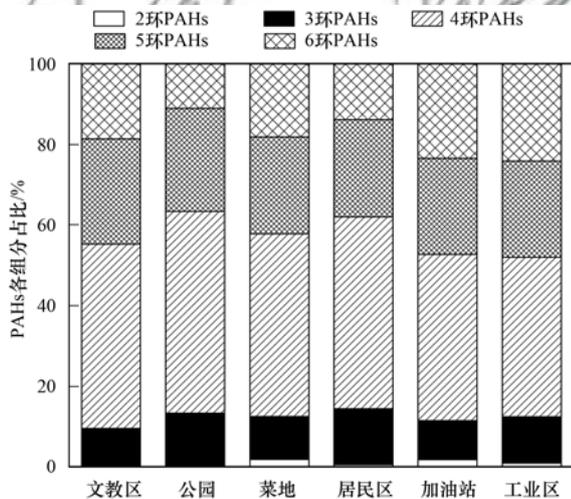


图 2 不同功能区表层土壤 PAHs 组成特征

Fig. 2 Compositional characters of PAHs in the surface soil of various functional zones

差异可能与 PAHs 污染源的不同以及采样点距离污染源的远近有关。

2.1.3 不同功能区表层土壤中 PAHs 与 TOC 的相关性

土壤中 PAHs 含量的高低与多种因素有关,其中土壤有机质被认为是影响 PAHs 土壤环境行为最主要的因素之一^[19]。很多研究都表明土壤中 PAHs 含量与 TOC 含量之间具有显著的相关性^[20~22]。本研究中,整个扬州市区 59 个土样中 ∑ 15PAHs 总量以及 PAHs 各组分含量都与 TOC 含量呈显著

($P < 0.05$) 或极显著性 ($P < 0.01$) 正相关,但不同功能区土样中 ∑ 15PAHs 总量和各组分含量与 TOC 含量之间均无显著相关性(表 3)。Hiller 等^[23]的研究认为,虽然土壤有机碳是影响土壤中 PAHs 含量高低的一个重要因素,但是土壤中 PAHs 分布也与其它因素有关。例如,该区域如果有新的 PAHs 持续输入,会导致土壤有机碳与 PAHs 之间没有达到动态平衡。此外,PAHs 污染的途径、来源以及污染历史情况都会影响 TOC 与 PAHs 之间的相关性^[24]。也有研究表明,含有 PAHs 的烟灰颗粒被排放到大气中后,低分子量 PAHs 更容易从烟灰颗粒中解吸下来,游离于大气中,而当烟灰颗粒沉降到土壤中后,游离于大气中的低分子量 PAHs 更容易与土壤有机碳之间达到动态平衡^[25,26]。此外,土壤有机质组成和性质的复杂性,亦会对 TOC 与 PAHs 之间的相关性产生影响^[27,28]。

2.1.4 不同功能区表层土壤中 PAHs 与 BC 的相关性

土壤 BC 是土壤碳库的重要组成部分,主要是包含木炭(charcoal)和烟灰(soot)等,多来源于化石燃料和生物质的不完全燃烧,与 PAHs 具有一定的同源性^[29]。BC 性质特征较为稳定,多孔隙和较大的比表面积使其对 PAHs 具有很强的吸附性,被认为是土壤中影响疏水性有机污染物生物有效性和最终归宿的最重要组分^[30,31]。本研究结果也体现了这一特征,整个扬州市区 59 个土样中的 BC 含量与

表3 表层土壤中 PAHs 与 TOC、BC 的相关性分析¹⁾

Table 3 Correlations between TOC, BC, and PAHs in surface soil

功能区	项目	\sum 15PAHs	2 环 PAHs	3 环 PAHs	4 环 PAHs	5 环 PAHs	6 环 PAHs
扬州市	TOC	0.325 *	0.372 **	0.318 *	0.323 *	0.322 *	0.322 *
	BC	0.415 **	0.363 **	0.355 **	0.429 **	0.425 **	0.412 **
文教区	TOC	-0.030	0.614	0.023	-0.040	-0.036	-0.040
	BC	-0.070	0.673 *	-0.079	-0.076	-0.049	-0.100
公园	TOC	0.021	—	-0.109	0.018	-0.047	0.203
	BC	0.338	—	0.286	0.277	0.331	0.422
居民区	TOC	0.206	0.267	0.221	0.201	0.178	0.236
	BC	0.483	-0.296	0.541	0.496	0.437	0.486
菜地	TOC	-0.435	0.508	-0.038	-0.488	-0.580	-0.344
	BC	-0.164	-0.330	-0.335	-0.124	-0.063	-0.207
加油站	TOC	0.403	0.650	0.388	0.351	0.400	0.469
	BC	0.783 **	0.440	0.781 **	0.792 **	0.772 **	0.756 *
工业区	TOC	0.318	0.364	0.341	0.313	0.314	0.305
	BC	0.539	0.487	0.475	0.552	0.552	0.533

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$; “—” 表示文章中无相关数据

\sum 15PAHs 总量以及 PAHs 各组分含量之间都呈极显著性正相关 ($P < 0.01$)。但在各功能区中,加油站土样中 \sum 15PAHs 总量以及 3~6 环 PAHs 含量与 BC 含量之间呈显著性 ($P < 0.05$) 或极显著性 ($P < 0.01$) 正相关,文教区土样中 2 环 PAHs 含量与 BC 含量之间呈显著性正相关 ($P < 0.05$),而其它功能区中 BC 含量与 \sum 15PAHs 总量以及 PAHs 各组分含量之间都无显著的相关性(表 3)。前人研究结果^[24,28,32] 与本研究的一致,即在燃烧源附近土壤中 PAHs 与 BC 的相关性趋势表现更为明显,加油站附近汽车启动停车都会带来化石燃料燃烧,因而具有良好的相关性。而其它功能区土壤中 BC 与 PAHs 含量之间无显著的相关性,可能的原因是 PAHs 来源并非只与烟灰和木炭有关,其他有机物在携带 PAHs 方面也起着重要作用^[29]。

2.2 不同功能区表层土壤中 PAHs 的源解析

同分异构体比值法是判断 PAHs 污染来源的一个重要方法,常用的异构体比值有 Fla/(Fla + Pyr)、BaA/(BaA + Chry)、InP/(InP + BghiP) 和 Ant/(Ant + Phe) 等^[33,34]。当 BaA/(BaA + Chry) 比值 > 0.35 , InP/(InP + BghiP) 比值在 0.5~1 时,PAHs 污染主要来源于生物质和煤炭的燃烧^[35~37]。Han 等^[38] 认为当 Fla/(Fla + Pyr) 比值 < 0.4 时,PAHs 污染主要来源于石油源,当 Fla/(Fla + Pyr) 比值 > 0.5 时,PAHs 污染主要来源于生物质和煤的燃烧。而当 Ant/(Ant + Phe) 比值 > 0.1 和 < 0.1 时,PAHs 主要污染来源分别是燃烧源和石油源^[39,40]。此外也有研究表明当 BaA/(BaA + Chry) 比值 < 0.2 时,PAHs 主

要污染来源为石油源,而当 BaA/(BaA + Chry) 比值处于 0.2~0.35 之间时,PAHs 主要来源于燃烧和石油组成的混合源。而当 InP/(InP + BghiP) 比值在 0.2~0.5 之间时,PAHs 主要污染来源为石油源的燃烧^[33,34]。由图 3 中 Fla/(Fla + Pyr) 和 BaA/(BaA + Chry) 比值结果可知,扬州市 6 个不同功能区土壤中 PAHs 都主要来源于煤和生物质燃烧,而 InP/(InP + BghiP) 和 Ant/(Ant + Phe) 的比值结果表明石油和石油燃烧也是 PAHs 的重要来源,说明扬州市区机动车尾气的排放和化石燃料的使用依然是产生 PAHs 最主要的原因。同时不同功能区之间主要污染来源也存在一定的差异,例如公园受石油源影响较大,而菜地、加油站、工业区、文教区则受石油燃烧源影响较大,煤和生物质燃烧则为居民区主要污染来源。此外各个功能区均发现多种污染来源,这也表明了 PAHs 污染来源的复杂性。

2.3 不同功能区表层土壤 PAHs 生态风险评估

2.3.1 生态安全评价

根据生态环境部 2018 年最新发布执行的《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018) 和《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018),农业用地中 BaP 风险筛选值为 $0.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,建设用地中 8 种 PAHs 风险筛选值见表 4。本研究的 6 个功能区中,根据土地用途,菜地属于农业用地,居民区、公园和文教区属于建设用地第一类用地,加油站和工业区属于建设用地第二类用地。菜地各采样点 BaP 含量范围为 $7 \sim 83 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,远低于筛选值;居民区、公园、文教区、加油站各采样点 Nap、BaA、Chry、

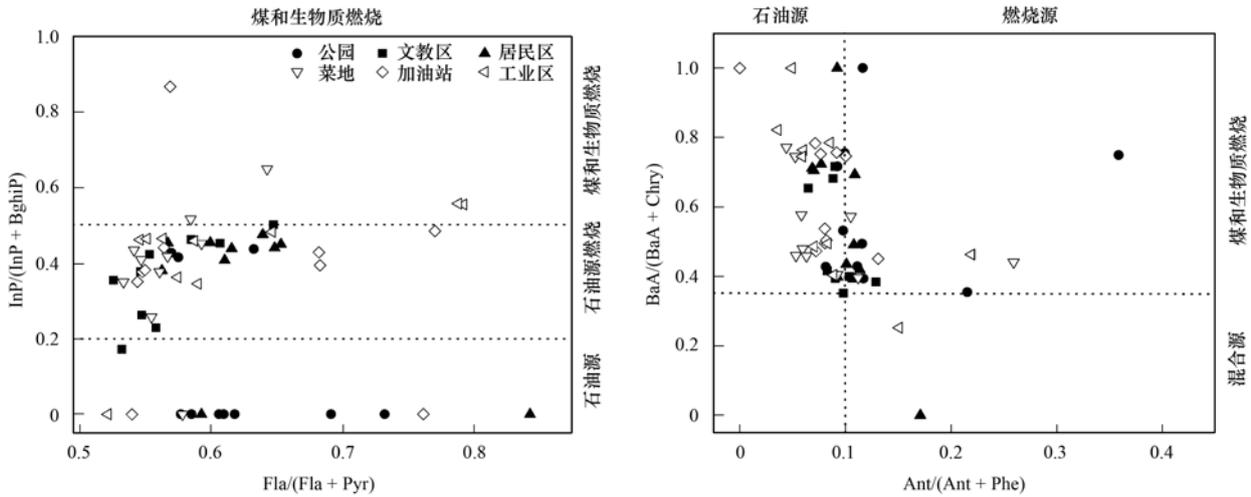


图3 PAHs 比值十字交叉

Fig. 3 Cross plots for PAHs ratios

BbF、BkF、BaP、DahA 和 InP 的含量也都远低于筛选值. 工业区中有一个土样中的 BaP 含量高于筛选值, 为 $2.335 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 具有一定的生态环境风险. 而随着时间的延续, 工业生产的持续进行, 势必会引起土壤中 PAHs 含量的不断增加, 其生态风险也不容忽视.

表4 建设用地土壤污染风险筛选值

Table 4 Risk intervention values for soil contamination of development land

PAHs / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	用地分类	
	第一类	第二类
Nap	25	70
BaA	5.5	15
Chry	490	1 293
BbF	5.5	15
BkF	55	151
BaP	0.55	1.5
DahA	0.55	1.5
InP	5.5	15

2.3.2 致癌风险评估

在 USEPA 优控的 16 种 PAHs 中, BaA、Chry、BbF、BkF、BaP、DahA 和 InP 等 7 种致癌性 PAHs 更受关注, 其中 BaP 又以其强致癌性成为 PAHs 致癌风险研究中的代表性化合物^[16]. 当前对 PAHs 致癌风险评估都是以 BaP 毒性当量浓度作为参考, 其计算公式如下:

$$TEQ_{BaP} = \sum (\text{组分 } i \text{ 的浓度} \times \text{组分 } i \text{ 的毒性当量因子})$$

本研究使用 Tsai 等^[16] 提出的毒性当量因子 (TEF) 来计算各单体 BaP_{eq} , 再计算出每个土样的总 TEQ_{BaP} 值, 结果见表 2. 不同功能区总 TEQ_{BaP} 值的范围存在较大差距, 并且各功能区内部土样之间的总 TEQ_{BaP} 值变异也较大. 总 TEQ_{BaP} 的最高值出现在工

业区内, 最低值则位于加油站区域内. 从平均值来看, 各功能区总 TEQ_{BaP} 值高低顺序为工业区 > 加油站 > 文教区 > 菜地 > 居民区 > 公园. 根据林纪旺等^[41] 研究中的荷兰土壤标准 TEQ_{BaP} 参考值 $33 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 扬州市 59 个采样点中, 总 TEQ_{BaP} 值的点位超标率达到了 45.8%, 各功能区点位超标率高低顺序为工业区 (70%) > 加油站 (60%) > 文教区 (55.6%) > 菜地 (50.0%) > 居民区 (30%) > 公园 (10%). 因此, 扬州市不同功能区都有部分表层土壤中的 PAHs 存在潜在的致癌风险, 工业区和加油站风险相对较高, 而居民区和公园风险相对较低.

3 结论

(1) 扬州市 59 个表层土样中 $\sum 15\text{PAHs}$ 总量的范围为 $21 \sim 36118 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 中值为 $295 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 不同功能区土壤中 $\sum 15\text{PAHs}$ 总量的大小顺序为工业区 > 加油站 > 文教区 > 菜地 > 居民区 > 公园.

(2) 不同功能区土壤中 PAHs 都以高环 PAHs 为主. 从整个扬州市来看, 土壤中 PAHs 总量与 TOC ($P < 0.05$)、BC ($P < 0.01$) 都呈显著性正相关, 但不同功能区内除加油站土壤中 PAHs 总量与 BC 呈显著性正相关外, 其他功能区 PAHs 总量与 TOC、BC 都无显著的相关性.

(3) 不同功能区土壤中 PAHs 主要来源于石油以及石油、煤和生物质等的燃烧. 公园受石油源影响较大, 而菜地、加油站、工业区、文教区则受石油燃烧源影响较大, 煤和生物质燃烧则为居民区主要污染来源.

(4) 不同功能区土壤中总 TEQ_{BaP} 平均值的大小顺序为工业区 > 加油站 > 文教区 > 菜地 > 居民区 >

公园;按照荷兰土壤环境标准,10种PAHs总TEQ_{BaP}值的超标率分别为工业区70%、加油站60%、文教区55.6%、菜地50.0%、居民区30%和公园10%,部分土样存在一定的生态和致癌风险。

参考文献:

- [1] Uytendaele M, Breugelmans P, Janssen M, *et al.* Distribution of the *Mycobacterium* community and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) among different size fractions of a long-term PAH-contaminated soil [J]. *Environmental Microbiology*, 2006, **8**(5): 836-847.
- [2] Haritash A K, Kaushik C P. Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): a review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **169**(1-3): 1-15.
- [3] 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.
- [4] Wang L J, Zhang S W, Wang L, *et al.* Concentration and risk evaluation of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soil in the typical semi-arid city of Xi'an in Northwest China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(4): 607.
- [5] Gereslassie T, Workneh A, Liu X N, *et al.* Occurrence and ecological and human health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Wuhan, Central China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(12): 2751.
- [6] Li X Y, Liu L J, Wang Y G, *et al.* Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China [J]. *Geoderma*, 2013, **192**: 50-58.
- [7] Zhang X, Zhang K, Lv W L, *et al.* Characteristics and risk assessments of heavy metals in fine and coarse particles in an industrial area of central China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **179**: 1-8.
- [8] 华德武,汪青,徐红,等. 芜湖市交通区表层土壤多环芳烃与黑碳研究[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(6): 2253-2263.
Hua D W, Wang Q, Xu H, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons and black carbon in surface soil from traffic areas in Wuhu, China [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(6): 2253-2263.
- [9] Bandowe B A M, Wei C, Han Y M, *et al.* Polycyclic aromatic compounds (PAHs, oxygenated PAHs, nitrated PAHs and azaarenes) in soils from China and their relationship with geographic location, land use and soil carbon fractions [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **690**: 1268-1276.
- [10] 何跃,张甘霖. 城市土壤有机碳和黑碳的含量特征与来源分析[J]. *土壤学报*, 2006, **43**(2): 177-182.
He Y, Zhang G L. Concentration and sources of organic carbon and black carbon of urban soils in Nanjing [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, **43**(2): 177-182.
- [11] 张智博,殷山红,刘涛,等. 聊城市城区不同功能区土壤黑碳含量与来源分析[J]. *土壤通报*, 2019, **50**(2): 444-448.
Zhang Z B, Yin S H, Liu T, *et al.* Distribution and source analysis of soil black carbon in the urban area of Liaocheng [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, **50**(2): 444-448.
- [12] 刘文婷,王子波,陈满荣. 扬州城区道路两侧土壤重金属污染检测与评价[J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2011, **14**(4): 78-82.
Liu W T, Wang Z B, Chen M R. Detection and evaluation of heavy metal contamination of roadsides soil in Yangzhou city [J]. *Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition)*, 2011, **14**(4): 78-82.
- [13] Gustafsson Ö, Haghseta F, Chan C, *et al.* Quantification of the dilute sedimentary soot phase: implications for PAH speciation and bioavailability [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **31**(1): 203-209.
- [14] 倪进治,王军,李小燕,等. 超高效液相色谱荧光检测器测定土壤中多环芳烃[J]. *分析实验室*, 2010, **29**(5): 25-28.
Ni J Z, Wang J, Li X Y, *et al.* Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil by ultra performance liquid chromatography with a fluorescence detector [J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2010, **29**(5): 25-28.
- [15] 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.
- [16] Tsai P J, Shih T S, Chen H L, *et al.* Assessing and predicting the exposures of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and their carcinogenic potencies from vehicle engine exhausts to highway toll station workers [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(2): 333-343.
- [17] VROM. Environmental quality objectives in the Netherlands: a review of environmental quality objectives and their policy framework in the Netherlands [M]. The Hague: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, 1994.
- [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] Chiou C T, McGroddy S E, Kile D E. Partition characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons on soils and sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32**(2): 264-269.
- [20] Xiao R, Bai J H, Wang J J, *et al.* Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in wetland soils under different land uses in a coastal estuary: toxic levels, sources and relationships with soil organic matter and water-stable aggregates [J]. *Chemosphere*, 2014, **110**: 8-16.
- [21] Simpson C D, Mosi A A, Cullen W R, *et al.* Composition and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon contamination in surficial marine sediments from Kitimat Harbor, Canada [J]. *Science of the Total Environment*, 1996, **181**(3): 265-278.
- [22] 吴义国,方冰芯,李玉成,等. 杭埠-丰乐河表层沉积物中多环芳烃的污染特征、来源分析及生态风险评价[J]. *环境化学*, 2017, **36**(2): 420-429.
Wu Y G, Fang B X, Li Y C, *et al.* Occurrence of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from Hangbu-Fengle River: pollution characteristics, potential source and risk assessment [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(2): 420-429.
- [23] Hiller E, Lachkú L, Jurkovič L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils from kindergartens and playgrounds in Bratislava, the capital city of Slovakia [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(11): 7147-7156.
- [24] Nam J J, Thomas G O, Jaward F M, *et al.* PAHs in background soils from Western Europe: influence of atmospheric deposition and soil organic matter [J]. *Chemosphere*, 2008, **70**(9): 1596-

- 1602.
- [25] Bucheli T D, Blum F, Desaulles A, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons, black carbon, and molecular markers in soils of Switzerland[J]. *Chemosphere*, 2004, **56**(11): 1061-1076.
- [26] Vane C H, Kim A W, Beriro D J, *et al.* Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) and polychlorinated biphenyls (PCB) in urban soils of Greater London, UK[J]. *Applied Geochemistry*, 2014, **51**: 303-314.
- [27] Zhang H B, Luo Y M, Wong M H, *et al.* Distributions and concentrations of PAHs in Hong Kong soils[J]. *Environmental Pollution*, 2006, **141**(1): 107-114.
- [28] Zhao L, Hou H, Shanguan Y X, *et al.* Occurrence, sources, and potential human health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils of the coal production area surrounding Xinzhou, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **108**: 120-128.
- [29] Wang Q, Liu M, Yu Y P, *et al.* Black carbon in soils from different land use areas of Shanghai, China: level, sources and relationship with polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Applied Geochemistry*, 2014, **47**: 36-43.
- [30] Xiao B H, Yu Z Q, Huang W L, *et al.* Black carbon and Kerogen in soils and sediments. 2. Their roles in equilibrium sorption of less-polar organic pollutants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(22): 5842-5852.
- [31] Ran Y, Sun K, Yang Y, *et al.* Strong sorption of phenanthrene by condensed organic matter in soils and sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41** (11): 3952-3958.
- [32] Klimkiewicz-Pawlas A, Smreczak B, Ukalska-Jaruga A. The impact of selected soil organic matter fractions on the PAH accumulation in the agricultural soils from areas of different anthropopressure [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(12): 10955-10965.
- [33] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al.* PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**(4): 489-515.
- [34] Zhang Z L, Huang J, Yu G, *et al.* Occurrence of PAHs, PCBs and organochlorine pesticides in the Tonghui River of Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2004, **130**(2): 249-261.
- [35] Wang J, Zhang X F, Ling W T, *et al.* Contamination and health risk assessment of PAHs in soils and crops in industrial areas of the Yangtze River Delta region, China[J]. *Chemosphere*, 2017, **168**: 976-987.
- [36] Waqas M, Khan S, Chao C, *et al.* Quantification of PAHs and health risk via ingestion of vegetable in Khyber Pakhtunkhwa Province, Pakistan [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **497-498**: 448-458.
- [37] 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.
- [38] Han B, Ding X, Bai Z P, *et al.* Source analysis of particulate matter associated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in an industrial city in northeastern China [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, **13**(9): 2597-2604.
- [39] Wu D, Wang Z S, Chen J H, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in atmospheric PM_{2.5} and PM₁₀ at a coal-based industrial city: implication for PAH control at industrial agglomeration regions, China[J]. *Atmospheric Research*, 2014, **149**: 217-229.
- [40] 周燕, 卢新卫. 西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评估[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4800-4808.
- Zhou Y, Lu X W. Assessment of pollution, sources, and risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil from urban parks in Xi'an City, China[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4800-4808.
- [41] 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估[J]. *环境科学*, 2011, **32**(7): 2074-2080.
- Lin J W, 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.

CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of AO7 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)