

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发	张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟	彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM ₁₀ 中元素浓度特征和来源分析	占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM _{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源	叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析	范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源	刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布	李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征	唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价	张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究	李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素	张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征	杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估	张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响	何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响	肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系	滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析	李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律	蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响	王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V)	周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除	蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响	于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 渭思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响	刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力	马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制	信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复	黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化	高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析	张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响	耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落	杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响	王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响	刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性	牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素	杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO ₂ 、CH ₄ 排放通量的短期影响	李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价	周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征	代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响	蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 郭磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果	段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对神污染土壤固化稳定化效果的影响	杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征	叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性	王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险	印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁凌刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响	陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响	李标, 孔晓英, 李连华, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述	陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则 (4462) 《环境科学》征订启事 (4672) 信息 (4647, 4705, 4789)	

西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价

周燕¹, 卢新卫^{1,2*}

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119; 2. 地理学国家级实验教学示范中心(陕西师范大学), 西安 710119)

摘要: 应用高效液相色谱仪测定了西安市 17 个公园土壤样品中 16 种优先控制多环芳烃(PAHs)的含量,并分析了 PAHs 的组成、污染水平、来源、生态与健康风险。结果表明:样品中 $\sum$ PAHs 含量在 $0.362 \sim 1.336 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.591 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,其中 7 种致癌多环芳烃($\sum_7$ CPAHs)的含量范围为 $0.051 \sim 0.528 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,均值为 $0.181 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。与国内其它城市表层土壤比较发现西安市公园土壤均受到 PAHs 污染但程度较轻,PAHs 主要由 2~3 环的低环 PAHs 构成。源解析结果表明,公园土壤中 PAHs 主要来自于石油燃烧,个别样点来源比较复杂多样,为石油泄漏、石油燃烧、煤和生物质等不完全燃烧的混合源。效应区间低值(ERL)法和效应区间中值(ERM)法评价结果表明,公园土壤存在 PAHs 污染,但潜在生态风险性较低。终生癌症风险增量(ILCRs)模型评价结果显示,儿童和成人的健康风险都在可允许的范围内,对儿童的健康威胁高于成人,3 种暴露途径中皮肤接触土壤 PAHs 是导致高风险的最主要暴露途径,ILCRs_{皮肤接触} 分别占其 3 种暴露途径的总风险(CR)的 63.98% (成人)和 55.49% (儿童);其次是误食土壤 PAHs 暴露途径,分别占 CR 的 36.02% (成人)和 44.51% (儿童)。

关键词: 多环芳烃; 污染; 来源; 风险评价; 公园土壤; 西安

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4800-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703009

Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China

ZHOU Yan¹, LU Xin-wei^{1,2*}

(1. College of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Geography (Shaanxi Normal University), Xi'an 710119, China)

Abstract: A total of seventeen surface soil samples were collected from urban parks in Xi'an city. The concentration of sixteen priority polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were analyzed by high performance liquid chromatography (HPLC). In addition, the composition, source, pollution level and a risk assessment of PAHs in surface soil of park were evaluated. The results showed that the total concentrations of sixteen PAHs ranged from 0.362 to $1.336 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, with a mean value of $0.591 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. The concentration of seven carcinogenic PAHs ($\sum_7$ CPAHs) ranged from 0.051 to $0.528 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, with a mean value of $0.181 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. Compared to the $\sum$ PAHs levels of other cities of China, the $\sum$ PAHs in park surface soils in Xi'an are relatively low. PAHs in the soil samples were dominated by low molecular weight PAHs with 2 and 3 rings. The results of source analysis showed that the PAHs in park surface soil mainly originated from the combustion of fossil fuels, however, the source of PAHs in some samples is complex and from mixed sources, such as oil spills, oil burning, and incomplete combustion of coal and biomass. The ecological risks of PAHs in the surface soil were evaluated according to the soil quality guidelines to be ERL (effects range low) and ERM (effects range median), and these results showed that all samples, in general, were polluted. However, the potential ecological risks of PAHs were at a low level. The incremental life cancer risk (ILCR) assessment indicated that health risks for children and adults were both in a permissible range, however, the risks for children exposed to the soil were considerably higher than for adults. Dermal contact was the main exposure pathway that resulted in the relatively higher risk, followed by ingestion.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons; pollution; source; risk assessment; park soil; Xi'an

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbon, PAHs)指两个或两个以上苯环组成的一类持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs),由于其“三致”(致癌、致畸、致突变)效应在环境保护领域备受关注。其中 16 种 PAHs 已被美国环保署(EPA)列入优先控制的污染物名单^[1,2]。PAHs 在环境中的含量虽然微量但分布广泛,是环境中普遍存在的典型有毒有机污染物。PAHs 可以经植物叶

片进入植物体内或通过大气沉降进入土壤,再经植物根吸收在植物体内迁移、代谢和积累,进而通过食物链危及人类健康^[3~5]。化石燃料燃烧、机动车尾气排放、垃圾焚烧、精炼油、焦炭和沥青生产等

收稿日期: 2017-03-01; 修订日期: 2017-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271510)

作者简介: 周燕(1993~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境污染与修复, E-mail: 674317006@qq.com

* 通信作者, E-mail: luxinwei@snnu.edu.cn

人类生产活动都会产生 PAHs。土壤作为一种重要的环境介质,是 PAHs 在自然环境中的储库和中转站,承担着 90% 以上的多环芳烃环境负荷,由土壤进入人体的多环芳烃数量要高于大气和水等其它环境介质^[6]。

城市作为人类的主要聚集地,大量的工业生产、繁忙的交通运输和人类活动使得城市土壤 PAHs 污染愈发严重。目前国外学者针对土壤中 PAHs 的污染、来源、风险评价等进行了大量的研究,如斯洛伐克的伯拉第斯拉瓦^[7]、印度的 Dhanbad^[8]、加纳的库马西^[9]、丹麦的埃斯比约^[10]、西班牙塔拉戈纳^[11]、伊朗的伊斯法罕^[12]、印尼的加里曼丹^[13]、土耳其的科喀艾里^[14]和德国^[15]等城市地区。国内很多城市也开展了土壤 PAHs 污染研究,例如北京^[16]、上海^[17]、长春^[18]、天津^[19,20]、珠江三角洲^[21]、沈阳^[22]、深圳^[23]、南京^[24]、兰州^[25]等。

西安为我国西北地区最大城市,是国家重要的高新技术、科教、旅游和工业基地。目前,西安市的机动车辆数量已由 2003 年 52 万辆增加到 2013 年的 186 万辆,同时燃煤在冬季取暖中占重要比重,说明西安市存在潜在的 PAHs 污染源^[26]。公园作为城市居民休憩、锻炼、娱乐的重要场所,人们在游玩过程中不可避免地会接触到土壤,尤其是儿童。土壤中 PAHs 会通过手口误食、呼吸吸入和皮肤接触等途径被人体摄入从而威胁身体健康^[27],所以公园

土壤环境质量状况直接影响到游客及居民的健康。现有研究中针对休闲娱乐场所各介质中 PAHs 污染很少涉及,主要集中在不同类型城市绿地 PAHs 污染^[28~30],以及不同公园同类植物中的 PAHs 污染特征^[31]。对西安市 PAHs 污染研究也有相应工作开展,例如对西安市地表灰尘 PAHs 污染研究^[26],但针对西安市城市休闲娱乐场所土壤 PAHs 污染研究未见报道。本文主要研究西安市公园土壤中 PAHs 的含量、来源及生态健康风险评价,以期为当地环境保护与管理 and 居民健康防护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

在实际调研的基础上,选择西安市 17 个公园(如图 1)进行土壤 PAHs 污染的研究。根据公园面积大小,布设 5~10 个样点,每个样点采用对角线采样法采集 0~20 cm 的表土混合均匀,最后每个公园的多个样点采用四分缩分法把多个样点进行混合后带回一个约 1 kg 的混合土样,共 17 个样品。样点编号如下:灞桥生态湿地公园(P1)、唐城墙遗址公园(P2)、丰庆公园(P3)、城市运动公园(P4)、西安植物园(P5)、大明宫国家遗址公园(P6)、兴庆宫公园(P7)、文景山公园(P8)、环南公园(P9)、文景公园(P10)、劳动公园(P11)、曲江池遗址公园(P12)、莲湖公园(P13)、长乐公园(P14)、革命公

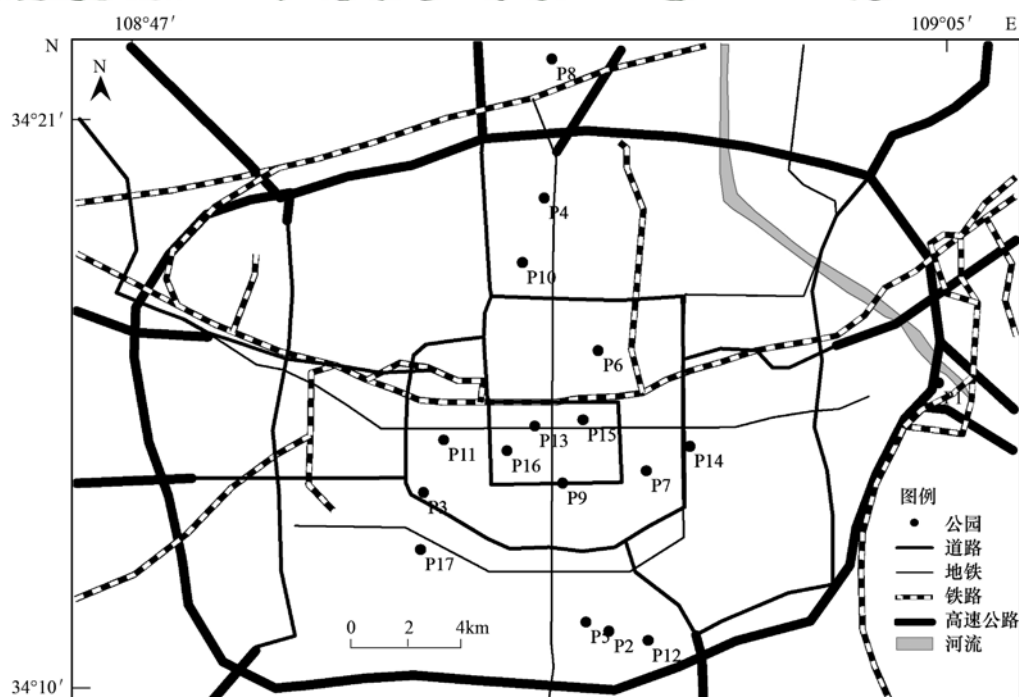


图 1 西安市主要公园采样点示意

Fig. 1 Sampling sites from parks in Xi'an City

园(P15)、儿童公园(P16)、新纪元公园(P17). 所有样品在室内进行自然风干,破碎初过 20 目筛,去除草根、石头、动植物残体等杂质. 然后再研磨至全部土壤过 80 目筛. 将处理好的土样装在棕色玻璃瓶中于 -4°C 下冷藏待分析.

1.2 仪器与试剂

美国戴安 ultimate3000 型高效液相色谱仪,配备二极管阵列检测器(DAD);上海亚荣生化仪器厂 RE-52A 型旋转蒸发仪;杭州汇尔仪器设备有限公司的 SCT-6 型索氏提取器,提取样品上限为 5 g; Supelcosil LC-PAH 多环芳烃专用色谱柱(250 mm $\times$ 4.6 mm, 5 μm);玻璃层析柱(1 cm $\times$ 30 cm);真空泵;100 mL 旋转蒸发瓶;1 mL 注射器;0.22 μm 英国津隆原产有机系滤头;高纯蒸馏水;超纯水.

正己烷、二氯甲烷为分析纯试剂,乙腈为色谱纯试剂. 层析硅胶(100 目)使用前在 130°C 下活化 16 h,无水硫酸钠(分析纯,天津市化学试剂厂)使用前在 450°C 下用马弗炉灼烧 6 h. 用甲醇溶解的 200 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 16 种 PAHs 混合标液 1 mL,使用时用色谱纯乙腈配置成贮备溶液并稀释成标准梯度.

1.3 样品分析

分析物质为美国环保署列出的 16 种优先控制 PAHs: 萘(NaP)、苊烯(Acy)、苊(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、䓛(Chy)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[a,h]蒽(DBaA)、苯并[g,h,i]芘(BghiP)和茚并[1,2,3-cd]芘(IcdP).

样品提取与净化:称取 4 g(精确至 0.001 g)土样用滤纸包裹,加入体积比为 1:1 的二氯甲烷-正己烷混合溶液 40 mL,索氏提取器中 60°C 下水浴提取

24 h. 将提取液转移至旋转蒸发瓶后加入 0.3 g 硅胶旋转至蒸干. 过用 4 g 硅胶、提取物质和 0.3 g 无水硫酸钠自下往上填充的硅胶层析柱,先用 30 mL 正己烷润洗柱子,再加入 40 mL 体积比为 1:1 的二氯甲烷-正己烷混合液淋洗芳烃,收集淋洗液浓缩至 1 mL,再加入 3 mL 乙腈浓缩至 1 mL 完成溶剂代换,最后将浓缩液转移至小棕色玻璃瓶中待测.

仪器相关参数设置如下:柱温箱温度 35°C ,流动相 B:乙腈;流动相 C:水. 梯度洗脱程序为:0 ~ 40 min, B 由 40% 增加至 100%; 40 ~ 55 min, B 100%; 55 ~ 57 min, B 由 100% 降低为 40%; 57 ~ 70 min, B 40%. 流速为 $1\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,进样量为 20 μL . 吸收波长为 254 nm,采用保留时间进行定性(SD 小于 1%),外标法进行定量.

1.4 质量控制与保证

实验过程中设置空白样、平行样、空白加标回收以及样品加标回收. 各单体 PAHs 的标准回归方程回归系数 R^2 均大于 0.999. 取 3 倍噪声的仪器信号所对应的分析物质量浓度作为方法检出限,16 种 PAHs 单体的检出限范围为 0.003 ~ 0.010 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 实验分析得到空白加标回收率范围为 81% ~ 106%,均值为 91.2%,样品加标回收率范围为 70% ~ 120%,均值为 85.1%. 平行样实验结果显示相对误差都在 15% 以内,表明此方法可信度较高.

1.5 土壤 PAHs 健康风险评估方法

终生癌症风险增量(incremental lifetime cancer risk, ILCRs)模型广泛被应用于环境介质中 PAHs 的健康风险评估. 因此,本文采用 ILCRs 模型评估成人和儿童经手-口误食、呼吸吸入和皮肤接触暴露土壤 PAHs 所致的健康风险. 其中经过误食、呼吸和皮肤接触 3 种途径 PAHs 摄入量的计算公式如下^[32~34].

$$\text{ILCR}_{\text{摄食}} = \frac{\text{CS} \times \text{CSF}_{\text{摄食}} \times \sqrt[3]{\text{BW}/70} \times \text{IR}_{\text{摄食}} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT} \times 10^6} \quad (1)$$

$$\text{ILCR}_{\text{呼吸}} = \frac{\text{CS} \times \text{CSF}_{\text{呼吸}} \times \sqrt[3]{\text{BW}/70} \times \text{IR}_{\text{呼吸}} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT} \times \text{PEF}} \quad (2)$$

$$\text{ILCR}_{\text{皮肤接触}} = \frac{\text{CS} \times \text{CSF}_{\text{皮肤接触}} \times \sqrt[3]{\text{BW}/70} \times \text{SA} \times \text{AF} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT} \times 10^6} \quad (3)$$

$$\text{CS} = \sum (\text{PAH}_i \times \text{TEF}_i) \quad (4)$$

$$\text{CR} = \sum (\text{ILCR}_{\text{摄食}} + \text{ILCR}_{\text{呼吸}} + \text{ILCR}_{\text{皮肤接触}}) \quad (5)$$

式中,CS 为各样点土壤 PAHs 单体的毒性当量浓度($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$);TEF 是 PAHs 单体相当于 BaP 的毒性系数;CSF 是 PAHs 的致癌斜率因子($\text{kg}\cdot\text{d})\cdot\text{mg}^{-1}$,基于 BaP 致癌能力确定,CSF_{摄食}、CSF_{呼吸}和 CSF_{皮肤接触}

分别为 7.3、3.85 和 25 ($\text{kg}\cdot\text{d})\cdot\text{mg}^{-1}$;CR 是上述 3 种暴露途径的总和. CR 的致癌风险等级划分标准为:CR $< 10^{-6}$ 表示可以接受的安全范围, $10^{-6} < \text{CR} < 10^{-4}$ 表示存在人体可耐受的潜在风险, CR $> 10^{-4}$

表示有较大的潜在风险. 其他相关参数及取值来自文献[32,33].

2 结果与讨论

2.1 土壤中 PAHs 含量水平

图2为样品 $\sum$ PAHs 含量,西安市公园表层土壤 $\sum$ PAHs 含量在 $0.362 \sim 1.336 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.591 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,其中强致癌物 BaP 的含量范围为 $0.000 \sim 0.081 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 $0.023 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 污染最高点出现在 P11 (劳动公园 $1.336 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),污染较严重的有 P7 (兴庆宫公园 1.016

$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、P13(莲湖公园 $0.965 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)和 P15(革命公园 $0.956 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),污染重的样点基本上位于市中心且建园时间比较早. 参照文献[6]将土壤 PAHs 污染划分为 4 种水平,即无污染($<0.200 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、轻微污染($0.200 \sim 0.600 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、中等污染($0.600 \sim 1.000 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)和严重污染($>1.000 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). 西安市的公园土壤均受到了 PAHs 污染, P11 劳动公园和 P7 兴庆宫公园属于严重污染, P13 莲湖公园、P15 革命公园、P16 儿童公园和 P17 新纪元公园属于中等污染,其余的 11 个公园都属于轻微污染.

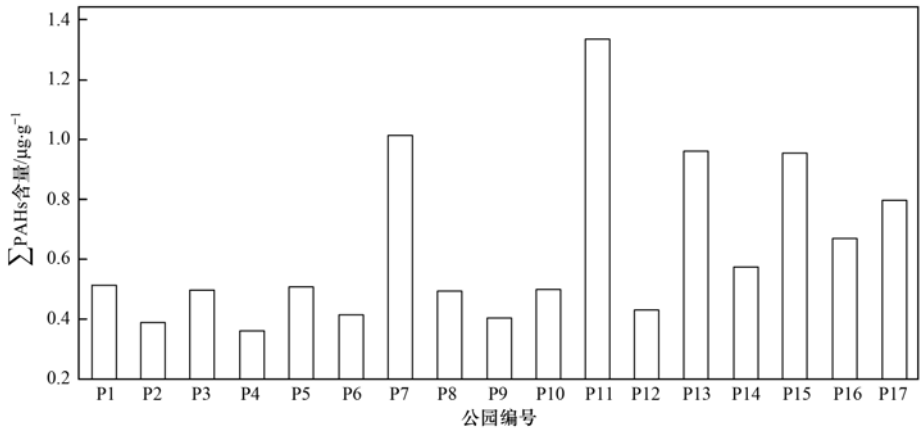


图2 西安市公园土壤中 $\sum$ PAHs 含量
Fig. 2 Content of total PAHs in park surface soil of Xi'an City

表1给出了西安市公园表层土壤中 $\sum$ PAHs 与国内其它城市土壤 $\sum$ PAHs 的对比. 可以看出,西安市公园土壤 PAHs ($0.591 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 含量除了高于深圳市、珠江三角洲、北京市土壤 PAHs 含量外,

表1 国内不同城市土壤 $\sum$ PAHs 含量状况比较

Table 1 Comparison of $\sum$ PAH contents in urban soils from different cities

区域	$\sum$ PAHs 含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	文献
北京	0.175 ~ 10.344	0.509	[16]
上海	0.120 ~ 24.500	2.500	[17]
长春	1.572 ~ 4.390	2.954	[18]
天津	0.142 ~ 1.490	0.765	[19]
珠江三角洲	0.032 ~ 0.792	0.279	[21]
深圳	0.005 ~ 6.745	0.290	[23]
南京	0.059 ~ 18.000	3.330	[24]
兰州	0.082 ~ 10.900	2.360	[25]
北京科教园区	0.194 ~ 6.988	1.637	[28]
上海道路绿地	0.538 ~ 21.900	3.820	[30]
西安市公园	0.362 ~ 1.336	0.591	本研究

均小于其它地区. 与公园周边污染源相对较少、人为活动较弱以及公园中大量的绿色植被会阻挡大气沉降中 PAHs 污染进入土壤有关. 有研究表明^[31], 公园当中的植物叶片是会吸收来自大气沉降的 PAHs 并且富集 PAHs,因此通过大气沉降进入公园土壤中的 PAHs 会大大减少. 虽然西安市公园土壤 PAHs 污染不及其它城市严重,但所有样品均受到了不同程度的污染,个别公园污染达到了严重污染水平,应引起注意和重视.

2.2 土壤中 PAHs 构成特征

所检测到的 PAHs 按环数划分为 2~3 环的低环芳烃,主要包括萘、蒽、芘、苊、菲、蒎; 4 环的高环芳烃主要包括荧蒽、芘、苯并(a)蒽、䓑; 5~6 环的高环芳烃,主要包括苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒽、苯并[g,h,i]花、茚并(1,2,3-cd)芘. 西安市公园土壤多环芳烃(PAHs)的组成结构如图3所示. 低环芳烃(LMW)的含量为 $0.215 \sim 0.525 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,均值为 $0.351 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,高环芳烃(HMW)的含量为 $0.092 \sim 0.823$

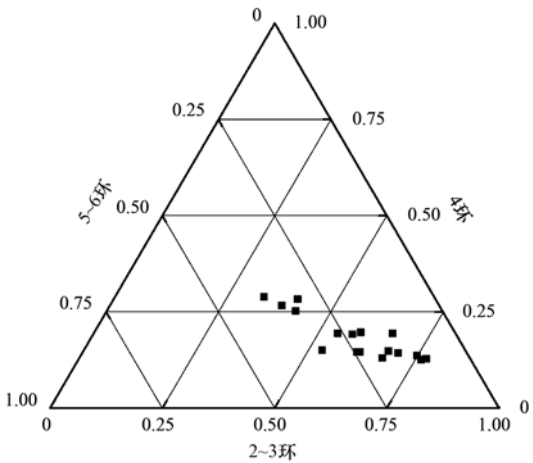


图3 西安市公园土壤中 PAHs 的结构特征

Fig. 3 Structural features of PAHs in park surface soil of Xi'an City

$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,均值为 $0.307\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 17 个公园表层土壤样品中,PAHs 的组成以 2~3 的低环为主. 其中 2~3 环 PAHs 所占比例为 33.30%~77.47% (平均为 58.70%); 4 环 PAHs 的比例为 12.56%~28.89% (平均为 18.56%); 5~6 环的比例为 9.82%~37.81% (平均为 22.73%).

另外,表 2 给出了西安市公园土壤 PAHs 污染描述性统计结果,其中某些样点的个别单体 PAHs 未检测出. 西安市公园土壤中特定燃烧化合物 ($\sum\text{COMB}$ 包括 Fla、Pyr、BaA、Chy、BbF、BkF、BaP、IcdP、BghiP) 的含量范围是 $0.084\sim0.814\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,均值为 $0.270\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,占 $\sum\text{PAHs}$ 含量的比例范围为 19.57%~65.44%,均值为 37.66%.

表 2 西安市公园土壤中 PAHs 的描述性统计结果

Table 2 Descriptive statistic results of PAHs in park surface soil of Xi'an City

PAHs	环数	最小值 $/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	最大值 $/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	均值 $/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	生态风险限值 ^[35]	
					ERL	ERM
Nap	2	0.090	0.318	0.229	0.160	2.100
Acy	3	0.000	0.075	0.014	0.044	0.640
Ace	3	0.000	0.016	0.004	0.016	0.500
Flu	3	0.012	0.036	0.023	0.019	0.540
Phe	3	0.044	0.117	0.074	0.240	1.500
Ant	3	0.000	0.011	0.003	0.085	1.100
Fla	4	0.028	0.125	0.056	0.600	5.100
Pyr	4	0.000	0.064	0.014	0.665	2.600
BaA	4	0.004	0.072	0.017	0.261	1.600
Chy	4	0.017	0.099	0.041	0.384	2.800
BbF	5	0.008	0.136	0.034	0.320	0.880
BkF	5	0.004	0.058	0.024	0.280	1.620
BaP	5	0.000	0.081	0.022	0.430	1.600
DBahA	5	0.009	0.030	0.017	0.063	0.260
BghiP	6	0.012	0.110	0.037	0.430	1.600
IcdP	6	0.007	0.074	0.023	—	—
$\sum\text{PAHs}$		0.362	1.336	0.638	4.022	40.792
$\sum\text{COMB}$		0.084	0.814	0.270		
$\sum_7\text{CPAHs}$		0.051	0.528	0.181		

表明西安市公园土壤 PAHs 有来自高温热解和燃烧过程的可能. 7 种致癌多环芳烃 ($\sum_7\text{CPAHs}$, 包括 BaA、Chy、BbF、BkF、BaP、DBahA 和 IcdP) 的含量范围为 $0.051\sim0.528\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,均值为 $0.181\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,占 $\sum\text{PAHs}$ 含量的比例范围为 13.13%~39.99%,均值为 25.61%,表明西安市公园土壤中的 PAHs 可能对人体健康存在一定的致癌风险.

2.3 土壤中 PAHs 来源分析

有研究表明,LMW/HMW<1 时,PAHs 主要来源于化石燃料的不完全燃烧; LMW/HMW>1 时,

PAHs 主要来源于热解或石油类泄漏^[6]. 根据低环/高环的比值(图 4)可以看出,除 P7 兴庆宫公园、P11 劳动公园、P15 革命公园、P17 新纪元公园这 4 个样点比值小于 1 外,其余样点低环/高环的比值都明显大于 1,表明西安市公园土壤中的 PAHs 污染主要源于石油燃烧或石油类物质的泄漏.

PAHs 特征化合物比值法也是常用的 PAHs 污染源诊断方法^[26,35]. 当 $\text{Icdp}/(\text{Icdp}+\text{BghiP})<0.2$ 、 $\text{BaA}/(\text{BaA}+\text{Chy})<0.2$ 、 $\text{Ant}/(\text{Ant}+\text{Phe})<0.1$ 和 $\text{Fla}/(\text{Pyr}+\text{Fla})<0.4$ 时,为石油类污染; $0.2<\text{Icdp}/(\text{Icdp}+\text{BghiP})<0.5$ 、 $0.2<\text{BaA}/(\text{BaA}+\text{Chy})$

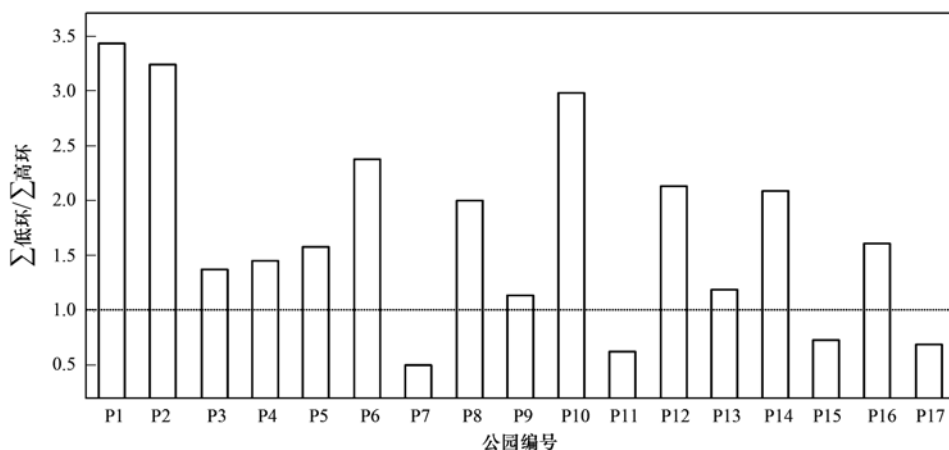


图4 低环/高环比值

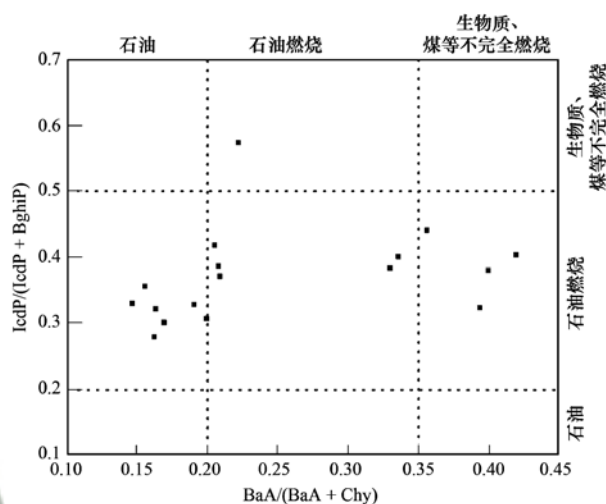
Fig. 4 Ratio of low circle/high circle PAHs

<0.35 和 $0.4 < \text{Fla}/(\text{Pyr} + \text{Fla}) < 0.5$, 为石油产品的不完全燃烧; $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe}) > 0.1$, 代表混合燃烧源; $\text{Icdp}/(\text{Icdp} + \text{BghiP}) > 0.5$ 、 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chy}) > 0.35$ 和时 $\text{Fla}/(\text{Pyr} + \text{Fla}) > 0.5$, 主要来源于木材、煤炭和其他生物质的不完全燃烧。

西安市公园土壤中 $\text{Fla}/(\text{Pyr} + \text{Fla})$ 的均值为 0.463, 表明西安市公园土壤中 PAHs 污染主要来源于石油燃烧。图 5 为西安市公园土壤中 $\text{BaA}/(\text{Chy} + \text{BaA})$ 和 $\text{IcdP}/(\text{IcdP} + \text{BghiP})$ 比值, $\text{BaA}/(\text{Chy} + \text{BaA})$ 的比值范围为 0.151 ~ 0.422, 均值为 0.251; $\text{IcdP}/(\text{IcdP} + \text{BghiP})$ 的比值范围为 0.282 ~ 0.571, 均值为 0.362, 都表明西安市公园土壤中 PAHs 来源主要为石油燃烧污染源。从图 5 看出, $\text{IcdP}/(\text{IcdP} + \text{BghiP})$ 比值绝大多数介于 0.2 ~ 0.5 之间 (除 P1 外), $\text{BaA}/(\text{Chy} + \text{BaA})$ 比值小于 0.2 的样点有 7 个, 介于 0.2 ~ 0.35 之间的样点有 6 个, 大于 0.35 的样点有 4 个。表明西安市公园土壤中 PAHs 的主要来源于石油燃烧, 个别样点来源比较复杂多样, 为石油泄漏、石油燃烧、煤和生物质等不完全燃烧的混合源。位于主城区内的公园, 如革命公园 (P15) 和劳动公园 (P11), 由于受公园周边的商业、交通及居民日常生活等人为活动影响, 公园土壤中 PAHs 来源较为复杂。而远离主城区的公园, 如文景山公园 (P8), 除交通活动影响外, 公园周边其他人为活动较少, 公园土壤中 PAHs 的来源以石油燃烧为主, 比如汽油、柴油型交通工具污染源对其影响。西安市公园土壤 PAHs 含量虽然低于其他城市土壤, 但其来源既有一定的内生源, 又有一定的外源性输入, 来源较为复杂。

2.4 土壤中 PAHs 生态与健康风险评价

本文采用效应区间低值 (effects range low,

图5 西安市公园土壤中 $\text{BaA}/(\text{Chy} + \text{BaA})$ 和 $\text{IcdP}/(\text{IcdP} + \text{BghiP})$ 比值Fig. 5 Ratios of $\text{BaA}/(\text{Chy} + \text{BaA})$ and $\text{IcdP}/(\text{IcdP} + \text{BghiP})$ in park surface soil of Xi'an City

ERL) 法和效应区间中值 (effects range median, ERM) 法对西安市公园表层土壤中的多环芳烃进行生态风险评价。通过对数据分析得到除 Nap、Acy、Ace 和 Flu 这 4 种 PAHs 的最大含量超过或等于 ERL 限值外, 其余 12 种单体 PAHs 的最大含量均小于 ERL 限值; 以及除了 Nap 和 Flu 两种 PAHs 的均值大于 ERL 限值外, 其余 14 种单体 PAHs 的均值均小于 ERL 限值, 表明有个别单体 PAHs 会对生态环境造成潜在的危害性。从 $\sum \text{PAHs}$ 含量看, 17 个样点的含量均小于 $\sum \text{PAHs}$ 的 ERL 限值, 表明 17 个公园的 PAHs 污染对生态环境风险很小。其中 Nap 的生态风险标志水平最高, 平均值为 $0.229 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 其次为 Flu, 平均值为 $0.023 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 这两种单体 PAHs 均值都超过了 ERL 限值, 仅次于 Flu 的 Acy

均值虽然没有超过 ERL 限值,但是个别点的含量超过了 ERL 限值,说明对环境存在一定的风险,但都未超过 ERM 值. 其余单体 PAHs 的平均含量虽未超过土壤生态风险标志水平 ERL 值,但均被不同程度检出,应当引起重视. 各种单体 PAHs 的平均含量和最大值都远远低于 ERM,说明西安市公园土壤 PAHs 污染潜在生态风险性较低.

通过公式(1)~(5)计算得到西安市公园土壤中针对儿童和成人经过 3 种暴露途径的 PAHs 的 ILCRs 和 CR 见表 3. 从中可知,无论是针对成人还是儿童,3 种暴露途径下 ILCRs 和 CR 的平均值和最

大值均小于 10^{-6} ,表明公园土壤中 PAHs 对成人和儿童的致癌风险均在可以接受的安全范围内. 3 种暴露途径下,皮肤接触是土壤 PAHs 最主要的暴露途径,ILCRs_{皮肤接触} 分别占其 CR 的 63.98% (成人)和 55.49% (儿童);其次是误食土壤 PAHs 暴露途径,ILCRs_{摄食} 分别占 CR 的 44.51% (儿童)和 36.02% (成人);而吸入土壤 PAHs 暴露途径占比最小,低于其他 2 种途径 4~5 个数量级不足 0.01%,因此可忽略不计. 从整体的 CR 值来看,公园土壤对儿童健康的威胁风险略大于成人. 所以在游玩的时候家长应避免让孩子直接接触土壤或其它介质的污染物.

表 3 成人和儿童不同暴露途径的 ILCRs 和 CR

Table 3 ILCRs and CR for different exposure pathways for adults and children

人群	统计值	ILCRs _{摄食}	ILCRs _{皮肤接触}	ILCRs _{呼吸}	CR
儿童	最大值	3.247×10^{-7}	4.047×10^{-7}	6.295×10^{-12}	7.294×10^{-7}
	最小值	3.925×10^{-8}	4.892×10^{-8}	7.610×10^{-13}	8.817×10^{-8}
	均值	1.425×10^{-7}	1.776×10^{-7}	2.763×10^{-12}	3.201×10^{-7}
成人	最大值	2.535×10^{-7}	4.503×10^{-7}	1.966×10^{-11}	7.038×10^{-7}
	最小值	3.064×10^{-8}	5.443×10^{-8}	2.377×10^{-12}	8.508×10^{-8}
	均值	1.113×10^{-7}	1.976×10^{-7}	8.629×10^{-12}	3.089×10^{-7}

3 结论

(1)西安市 17 个公园土壤 $\sum$ PAHs 含量范围为 $0.362 \sim 1.336 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.591 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,PAHs 的组成主要为 2~3 环的低环 PAHs,平均占 $\sum$ PAHs 含量的 58.70%. 低于多数已报道相关城市土壤 PAHs 含量,污染较轻,但是所有样点均被污染,在游玩时应引起重视.

(2)劳动公园和兴庆宫公园属于严重污染,莲湖公园、革命公园、儿童公园和新纪元公园属于中等污染,其余的 11 个公园都属于轻微污染. 主要表现为在建园时间早、位于市中心且受人为活动影响时间较长的公园污染比较重. 西安市公园土壤中 PAHs 的主要来源于石油燃烧,个别样点来源比较复杂多样,为石油泄漏、石油燃烧、煤和生物质等不完全燃烧的混合源.

(3)西安市 17 个公园土壤 PAHs 污染除在个别点个别单体存在一定风险外,整体潜在生态风险性较低. ILCRs 和 CR 的均值和最大值均小于 10^{-6} ,都在可以接受的安全范围内,表明土壤中 PAHs 对成人和儿童都不存在致癌风险,但对儿童健康的威胁略大于成人. 其中皮肤接触是最主要土壤 PAHs 暴露途径,其次是误食土壤 PAHs,吸入土壤 PAHs 暴露途径占比最小,可忽略不计.

参考文献:

[1] Shi J W, Peng Y, Li W F, *et al.* Characterization and source identification of PM₁₀-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air of Tianjin, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2010, **10**(5): 507-518.

[2] Karaca G. Spatial distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) concentrations in soils from Bursa, Turkey [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2016, **70**(2): 406-417.

[3] 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.

[4] Yang W, Lang Y H, Li G L. Cancer risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the soils from Jiaozhou Bay wetland [J]. *Chemosphere*, 2014, **112**: 289-295.

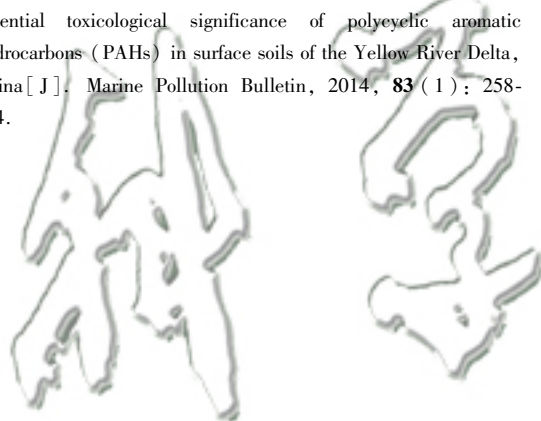
[5] Liang J, Fang H L, Wu L H, *et al.* Characterization, distribution, and source analysis of metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) of atmospheric bulk deposition in Shanghai, China [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2016, **227**(7): 1-14.

[6] 邹正禹,唐海龙,刘阳生. 北京市郊农业土壤中多环芳烃的污染分布和来源 [J]. *环境化学*, 2013, **32**(5): 874-880.

Zou Z Y, Tang H L, Liu Y S. Source and distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Beijing suburbs [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(5): 874-880.

- [7] 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.
- [8] Suman S, Sinha A, Tarafdar A. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) concentration levels, pattern, source identification and soil toxicity assessment in urban traffic soil of Dhanbad, India[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **545-546**: 353-360.
- [9] Bortey-Sam N, Ikenaka Y, Nakayama S M M, *et al.* Occurrence, distribution, sources and toxic potential of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface soils from the Kumasi Metropolis, Ghana[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **496**: 471-478.
- [10] Essumang D K, Kowalski K, Sogaard E G. Levels, distribution and source characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in topsoils and roadside soils in Esbjerg, Denmark[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, **86**(4): 438-443.
- [11] Nadal M, Schuhmacher M, Domingo J L. Levels of PAHs in soil and vegetation samples from Tarragona county, Spain [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **132**(1): 1-11.
- [12] Moore F, Akhbarizadeh R, Keshavarzi B, *et al.* Ecotoxicological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soil of Isfahan metropolis, Iran [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**: 207.
- [13] Mizwar A, Priatmadi B J, Abdi C, *et al.* Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contamination in surface soil of coal stockpile sites in South Kalimantan, Indonesia [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, **188**(3): 152.
- [14] Getin B. Investigation of PAHs, PCBs and PCNs in soils around a heavily industrialized area in Kocaeli, Turkey: concentrations, distributions, sources and toxicological effects[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **560-561**: 160-169.
- [15] Aichner B, Bussan B M, Lehnik-Habrink P, *et al.* Regionalized concentrations and fingerprints of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in German forest soils[J]. *Environmental Pollution*, 2015, **203**: 31-39.
- [16] 张枝焕, 卢另, 贺光秀, 等. 北京地区表层土壤中多环芳烃的分布特征及污染源分析[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(4): 668-675.
Zhang Z H, Lu L, He G X, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds in topsoil of Beijing, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, **20**(4): 668-675.
- [17] 杜芳芳, 杨毅, 刘敏, 等. 上海市表层土壤中多环芳烃的分布特征与源解析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(4): 989-995.
Du F F, Yang Y, Liu M, *et al.* Distribution and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils in Shanghai[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(4): 989-995.
- [18] Chen Y N, Zhang J Q, Ma Q Y, *et al.* Human health risk assessment and source diagnosis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the corn and agricultural soils along main roadside in Changchun, China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2016, **22**(3): 706-720.
- [19] 朱媛媛, 田靖, 魏恩琪, 等. 天津市土壤多环芳烃污染特征、源解析和生态风险评价[J]. *环境化学*, 2014, **33**(2): 248-255.
Zhu Y Y, Tian J, Wei E Q, *et al.* Characteristics, sources apportionment and ecological risks assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Tianjin, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(2): 248-255.
- [20] 张枝焕, 陶澍, 沈伟然, 等. 天津地区表层土中芳香烃污染物化学组成及分布特征[J]. *环境科学研究*, 2003, **16**(6): 29-34.
Zhang Z H, Tao S, Sheng W R, *et al.* Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbon in surface soil samples from Tianjin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2003, **16**(6): 29-34.
- [21] 余莉莉, 李军, 刘国卿, 等. 珠江三角洲表层土壤中的多环芳烃[J]. *生态环境*, 2007, **16**(6): 1683-1687.
Yu L L, Li J, Liu G Q, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils of the Pearl River Delta, south China [J]. *Ecology and Environment*, 2007, **16**(6): 1683-1687.
- [22] Hou W, Zhang L, Li Y, *et al.* Distribution and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil from a typical contaminated urban coking sites in Shenyang city[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, **95**(6): 815-821.
- [23] 章迪, 曹善平, 孙建林, 等. 深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 711-718.
Zhang D, Cao S P, Sun J L, *et al.* Occurrence and spatial differentiation of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from Shenzhen, China[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 711-718.
- [24] Wang C H, Wu S H, Zhou S L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from urban to rural areas in Nanjing: concentration, source, spatial distribution, and potential human health risk[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **527-528**: 375-383.
- [25] Jiang Y F, Yves U J, Sun H, *et al.* Distribution, compositional pattern and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of an industrial city, Lanzhou, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **126**: 154-162.
- [26] 王丽, 王利军, 史兴民, 等. 西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1279-1286.
Wang L, Wang L J, Shi X M, *et al.* Distribution characteristics and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface dust of Xi'an City, China[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1279-1286.
- [27] 曹云者, 柳晓娟, 谢云峰, 等. 我国主要地区表层土壤中多环芳烃组成及含量特征分析[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(1): 197-203.
Cao Y Z, Liu X J, Xie Y F, *et al.* Patterns of PAHs concentrations and components in surface soils of main areas in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(1): 197-203.
- [28] 彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 等. 北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 592-598.
Peng C, Wang M E, Ouyang Z Y, *et al.* Characterization and

- potential risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in green space soils of educational areas in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 592-598.
- [29] 江森华, 徐素云, 许辰森, 等. 城市绿地表层土壤中 PAHs 的来源及风险评估——以福州市鼓楼区为例[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2015, **10**(3): 11-16.
- Jiang M H, Xu S Y, Xu C S, *et al.* Sources and risk assessment of PAHs in surface soil from urban green lands: a case of Gulou district, Fuzhou, China[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2015, **10**(3): 11-16.
- [30] 马光军, 梁晶, 方海兰, 等. 上海市主要道路绿地土壤中多环芳烃的分布特征[J]. *土壤*, 2009, **41**(5): 738-743.
- Ma G J, Liang J, Fang H L, *et al.* Distribution characteristics of PAHs in green-belt soils from main roads of Shanghai[J]. *Soils*, 2009, **41**(5): 738-743.
- [31] 汪福旺, 王芳, 杨兴伦, 等. 南京公园松针中多环芳烃的富集特征与源解析[J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 503-508.
- Wang F W, Wang F, Yang X L, *et al.* Enrichment characteristics and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in pine (*Pinus massoniana* Lamb) needles from parks in Nanjing city, China[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(2): 503-508.
- [32] 段海静, 蔡晓强, 陈铁楠, 等. 开封市公园地表灰尘 PAHs 污染与健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(12): 4500-4509.
- Duan H J, Cai X Q, Chen Y N, *et al.* Occurrence and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface dust from parks in Kaifeng, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(12): 4500-4509.
- [33] 陈铁楠, 马建华, 段海静, 等. 河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 711-720.
- Chen Y N, Ma J H, Duan H J, *et al.* Compositions, sources and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface dusts from driving-schools in a city of Henan province, China[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 711-720.
- [34] 周变红, 张承中, 王格慧. 西安城区大气中多环芳烃的季节变化特征及健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(9): 2324-2331.
- Zhou B H, Zhang C Z, Wang G H. Seasonal variation and health risk assessment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the urban area of Xi'an [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(9): 2324-2331.
- [35] Yuan H M, Li T G, Ding X G, *et al.* Distribution, sources and potential toxicological significance of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface soils of the Yellow River Delta, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **83**(1): 258-264.



CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physiochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)