

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究	王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)
北京城区 PM _{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析	陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)
北京地区冬春 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系	赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)
北京市 PM _{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析	王艳慧,肖瑶 (428)
杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征	谢小芳,孙在,杨文俊 (436)
春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征	王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽峰,杨洋 (442)
南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征	吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳琳 (451)
忻州市环境空气 PM ₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析	史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)
广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征	青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)
燃煤电厂锅炉 PM _{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析	史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)
中国南海大气降水化学特征	肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)
临安本底站酸雨长期观测特征分析	李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)
北京城区大气氮湿沉降特征研究	贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)
烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势	贾龙,徐永福 (495)
祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征	董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)
生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究	羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)
生物滴滤塔处理苯酚气体研究	何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶纪宏,罗雨薇,魏在山 (520)
国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究	楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)
翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响	赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合峰 (533)
CuBr ₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究	胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)
浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究	张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)
基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例	贾海峰,郭羽 (555)
北京平原区第四系地下水污染风险评价	郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)
不同季节辽河口营养盐的河口混合行为	张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)
太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征	马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)
亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价	陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)
潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究	白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)
凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响	周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国峰 (597)
不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响	田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)
溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用	李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)
四环素光催化降解特性与选择性研究	宋晨怡,尹大强 (619)
微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究	符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)
市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全	杨赛,周启星,华涛 (633)
膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究	李彬,王志刚,安莹,吴志超 (643)
臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究	刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)
厌氧生物法处理果胶废水的研究	陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)
氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究	赵兴兴,于水利,王哲 (663)
平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能	胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)
基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征	王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)
广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价	郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳钊 (684)
中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究	张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)
废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价	周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)
深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究	章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)
洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策	谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)
施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响	曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)
螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征	尹雪,陈家军,吕策 (733)
<i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 的锰氧化特性研究	周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)
$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响	陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)
杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究	龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)
鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究	赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)
黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究	朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)
3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究	王艳,马泽民,吴石金 (770)
新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价	李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)
黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫排放动态研究	李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)
农田土壤 N ₂ O 产生的关键微生物过程及减排措施	朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)
《环境科学》征订启事 (691) 《环境科学》征稿简则 (800) 信息 (489,519,591,791)	

深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究

章迪¹, 曹善平¹, 孙建林¹, 曾辉^{1,2*}

(1. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 深圳 518055; 2. 北京大学城市与环境学院生态学系, 北京 100871)

摘要: 以深圳为研究区域, 选择土壤为研究对象, 以多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 为目标物, 采集表层土壤样品 188 个, 调查样品中 PAHs 的赋存状态, 以此为基础, 分析土壤 PAHs 污染水平与城市化进程的关系, 并初步评估深圳土壤中 PAHs 的生态风险。结果表明, 表层土壤中的 28 种 PAHs ($\sum_{28} \text{PAHs}$)、16 种美国环保署优控 PAHs ($\sum_{16} \text{PAHs}$) 和 7 种致癌 PAHs ($\sum_7 \text{CarPAHs}$) 的含量范围分别为 $5 \sim 7\,939 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $2 \sim 6\,745 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和未检出 $\sim 3\,786 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。8 种土地利用类型中 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 平均含量由高到低依次为: 交通用地、商业用地、工业用地、农业用地、居住用地、城市绿地、果园和林地。来源分析表明, 化石燃料的燃烧是建设用地和非建设用地样品 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 的主要来源, 贡献率分别为 75.1% 和 68.2%。研究还发现高分子量 PAHs 浓度和城市化水平呈显著正相关关系, 深圳市土壤中 PAHs 生态风险总体处于较低水平。

关键词: 表层土壤; PAHs; 城市化; 生态风险; 深圳市

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0711-08

Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China

ZHANG Di¹, CAO Shan-ping¹, SUN Jian-lin¹, ZENG Hui^{1,2}

(1. School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China; 2. Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: 188 surface soil samples were collected in Shenzhen of China to determine the occurrence and spatial differentiation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), based on which we studied the correlation between PAHs concentrations and urbanization levels, as well as the PAHs ecological risk. The total concentrations of 28 PAHs ($\sum_{28} \text{PAHs}$), 16 EPA PAHs ($\sum_{16} \text{PAHs}$) and 7 carcinogenic PAHs ($\sum_7 \text{CarPAHs}$) ranged from 5 to 7 939 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 2 to 6 745 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ and not detected to 3 786 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. 8 kinds of land use types according to $\sum_{16} \text{PAHs}$ average levels in descending order were: transportation lands, commercial lands, industrial lands, agricultural lands, residential lands, urban green space, orchards and woodland. And $\sum_{16} \text{PAHs}$ of construction and non-construction lands samples were mainly derived from combustion of various fossil fuels with contribution of 75.1% and 68.2%, respectively. Significant positive correlation was also found between PAHs concentrations of high molecular weight and urbanization levels. And PAHs pollution in the top soils of Shenzhen was at a low-end level of the world.

Key words: surface soils; PAHs; urbanization; ecological risk; Shenzhen

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是广泛存在于环境中的有毒有害有机污染物, 其污染及衍生的各种生态环境问题一直是环境科学研究的热点领域^[1~3]。绝大部分环境中的 PAHs 都与人类的生产生活紧密相关^[4], 其在指示人为活动方面有着重要的作用^[5]。土壤汇聚了累积在陆地环境中约 90% 的 PAHs^[6]。作为疏水性有机污染物 (辛醇/水分配系数 $\lg K_{ow}$ 为 3 ~ 8)^[7], PAHs 易于存留在土壤中, 因而土壤是研究 PAHs 环境过程的重要介质。关于不同环境介质中 PAHs 的污染研究已有大量报道, 这些工作主要集中于监测报道或简单的风险评价, 但关于表层土壤 PAHs 浓度与城市化进程的关系、不同土地利用类型生态风险及其空间

布局的研究还不多见。

深圳是中国过去几十年快速城市化进程的典型样本。人口的快速增长和工业活动的高密度聚集, 给深圳的城市环境带来巨大冲击, 各类有机污染物排放及其生态环境效应也成为近期环境保护与管理关注的重点^[8~13]。本研究利用深圳市覆盖不同土地利用方式的 188 个表层土壤样本监测结果, 重点探讨以下 3 个问题: ①深圳市表层土壤 PAHs 的浓度水平及其来源识别; ②深圳市表层土壤 PAHs 的含

收稿日期: 2013-06-18; 修订日期: 2013-08-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41071117)

作者简介: 章迪 (1987 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态规划与生态修复技术, E-mail: zdxzy@sz.pku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zenghui@pku.edu.cn

量与城市化水平的关系;③深圳市表层土壤 PAHs 的生态风险评估。

1 材料与方法

1.1 样品采集

选取深圳市作为研究区域。按照不同的土地利用类型和空间均匀布点的原则,在深圳市范围内共采集表层土壤(0~5 cm)样品 188 个(图 1)。其中,工业用地 24 个、居住用地 34 个、商业用地 22 个、农业用地 8 个、交通用地 24 个、城市绿地 28 个、果园 18 个和林地 30 个。具体方法依据“五点法”采样,在每个采样点划定一个 10 m × 10 m 正方形地块,分别在地块的四角及中心位置各采集一个土样,将 5 个土壤样品在野外充分混合均匀(约 500 g),以该混合样作为该采样点的待测样品。土壤样品置于室内阴凉处,自然风干,将干燥后的土壤样品粉碎、过筛(100 目)后置于棕色玻璃瓶中,在 -4℃ 的冰柜中保存,直至后续分析。

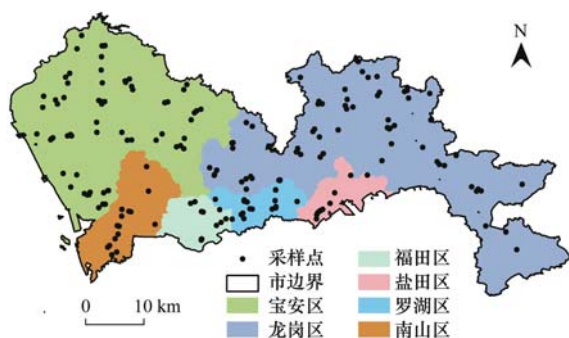


图 1 深圳市表层土壤采样点分布示意

Fig. 1 Map showing the general locality of the sampling sites of surface soils

1.2 试剂与标准品

28 种 PAHs 混合标样(名称、缩写见表 1)购于 Accustandard 公司;回收率指示物(naphthalene-d₈、acenaphthene-d₁₀、phenanthrene-d₁₀、chrysene-d₁₂和 perylene-d₁₂)购于 Cambridge Isotope Laboratories,内标 2-fluorobiphenyl 和 *p*-terphenyl-d₁₄ 购于 Cambridge Isotope Laboratories。硅胶(80~100 目)、氧化铝(100~200 目)在使用前均先用甲醇抽提 24 h,然后用二氯甲烷抽提 24 h。实验所需的正己烷(hexane)、二氯甲烷(dichloromethane)、甲醇(methanol)和丙酮(acetone)在使用前均通过玻璃蒸馏装置进行二次蒸馏。

1.3 样品预处理

取土壤样品 20 g,加入已知量的回收率指示物

后;用 200 mL 正己烷与丙酮(1:1, 体积比)的混合液索氏抽提 48 h,在抽提前加入约 2 g 铜片以除去土壤样品中的元素硫。将抽提液用浓缩仪(Zymark Turbo Vap 500)浓缩至 1 mL 左右,然后用体积比为 2:1 的硅胶氧化铝柱分离纯化。先用 20 mL 正己烷淋洗,不收集;然后用 70 mL 的正己烷和二氯甲烷(7:3, 体积比)混合液淋洗,收集淋洗液。将淋洗液再经过浓缩仪浓缩至 1 mL 左右后,转移至细胞瓶,并在柔和的氮气下,定容至 0.5 mL,加入内标等待上机测定。

1.4 仪器分析

用日本岛津 2010 气相色谱质谱联用仪对土壤样品中的 PAHs 进行定量。气相色谱毛细管柱为 30 m 的 DB-5MS(内径 0.25 mm,涂层 0.25 μm; J&W Scientific, Folsom, CA)。载气为氦气,采用不分流进样,进样量设定为 1 μL。色谱柱升温程序是:从 60℃ 起以 5℃·min⁻¹ 升至 200℃,再以 2℃·min⁻¹ 升至 250℃,然后以 20℃·min⁻¹ 升至 290℃并保留 20 min。进样口的温度从 100℃ 起以 200℃·min⁻¹ 升至 280℃,保留 40 min。

1.5 质量保证与质量控制

样品预处理过程中,每 12 个样品增加一个空白、基质空白和空白加标等质量保证与控制实验。目标物的含量采用内标法进行定量。所有样品中 5 种回收率数据分别为:naphthalene-d₈ 40% ± 16%; acenaphthene-d₁₀ 55% ± 18%; phenanthrene-d₁₀ 73% ± 22%; chrysene-d₁₂ 73% ± 16%; 和 perylene-d₁₂ 96% ± 25%。报告检测限设定为标准曲线的最低浓度。方法空白样品中有少量目标物检出,本研究报道的 PAHs 含量以干重为标准,数据未经回收率校正。

2 结果与讨论

2.1 土壤 PAHs 浓度

深圳市表层土壤样本中各 PAHs 含量如表 1 所示,28 种 PAHs 总含量在 5~7 939 ng·g⁻¹ 之间,平均值为 417 ng·g⁻¹;16 种美国环境保护署优控 PAHs 总含量在 2~6 745 ng·g⁻¹ 之间,平均值为 290 ng·g⁻¹,约占 $\sum_{28}$ PAHs 总量的 70%;7 种致癌 PAHs 总含量在未检出~3 786 ng·g⁻¹ 之间,平均值为 143 ng·g⁻¹,约占 $\sum_{16}$ PAHs 总量的 50%。4 环和 2 环 PAHs 是 $\sum_{28}$ PAHs 的主要成分,分别约占其总量的 31% 和 23%。所有组分中 BbF 含量最高,约占

表 1 深圳市表层土壤 PAHs 含量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 1 Concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from Shenzhen/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$							
化合物	英文名	英文缩写 ¹⁾	最小值	最大值	中值	平均值	CV/%
萘	naphthalene	NAP ^a	ND ²⁾	90	5	10	139
2-甲基萘	2-methylnaphthalene	2-MNAP	ND	411	9	22	192
1-甲基萘	1-methylnaphthalene	1-MNAP	ND	237	51	13	194
联苯	biphenyl	BP	ND	50	2	4	160
2,6-二甲基萘	2,6-dimethylnaphthalene	2,6-DNAP	ND	532	8	27	222
苊烯	acenaphthylene	AC ^a	ND	22	1	2	175
苊	acenaphthene	ACE ^a	ND	11	1	1	132
2,3,5-三甲基萘	2,3,5-trinaphthylene	2,3,5-TNAP	ND	149	4	11	183
苊	fluorene	FL ^a	ND	62	3	6	159
菲	phenanthrene	PHE ^a	0.3	566	9	27	232
蒽	anthracene	ANT ^a	ND	87	2	5	205
2-甲基菲	2-methylphenanthrene	2-MPHE	ND	88	3	7	185
1-甲基菲	1-methylphenanthrene	1-MPHE	ND	47	2	4	171
2,6-二甲基菲	2,6-dimethylphenanthrene	2,6-DMPHE	ND	11	0.3	1	202
荧蒽	fluoranthene	FLU ^a	0.2	982	7	34	300
芘	pyrene	PYR ^a	0.2	626	5	27	284
11-氢苯并[b]苊	11H-benzo[b]fluorene	11-BbF	ND	202	1	6	413
苯并[a]蒽	benzo[a]anthracene	BaA ^{ab}	ND	470	2	15	351
䓛	chrysene	CHR ^{ab}	ND	633	6	31	252
苯并[b]荧蒽	benzo[b]fluoranthene	BbF ^{ab}	ND	1105	8	40	288
苯并[k]荧蒽	benzo[k]fluoranthene	BkF ^{ab}	ND	347	3	12	302
苯并[e]芘	benzo[e]pyrene	BeP	ND	571	5	27	243
苯并[a]芘	benzo[a]pyrene	BaP ^{ab}	ND	445	2	15	302
花	perylene	PER	ND	131	1	5	261
9,10-二苯基蒽	9,10-diphenylanthracene	9,10-DPHA	ND	21	ND	0.3	619
茚并[1,2,3-cd]芘	indeno[1,2,3-cd]pyrene	IcdP ^{ab}	ND	564	4	24	270
二苯并[a,h]蒽	dibenzo[a,h]anthracene	DahA ^{ab}	ND	222	1	7	333
苯并[g,h,i]花	benzo[g,h,i]perylene	BghiP ^a	ND	664	6	35	236

1) 上标“a”标记 16 种美国环保署优控 PAHs, 上标“b”标记 7 种致癌 PAHs; 2) “ND”表示“未检出”

$\sum_{28}$ PAHs 总量的 9.5%, 其次依次为 BghiP (8.4%)、FLU (8.1%)、CHR (7.4%)、PHE (6.5%)、PYR (6.4%) 等。

变异系数 (coefficient of variation, CV) 的大小可以表征土壤中 PAHs 含量的空间差异^[14]。由表 1 可知各目标物均显示出较强的空间变异性 ($CV > 100\%$), 且高分子量 PAHs (包括 4、5、6 环) 的 CV 普遍高于低分子量 PAHs (包括 2 环和 3 环)。这表明深圳市土壤中的 PAHs 含量受各种局部人为和自然因素的组合影响, 空间分异明显, 显示出典型的城市化地区土壤 PAHs 污染特征。

比较发现, 本研究土壤中 $\sum_{16}$ PAHs 的含量范围为 $2 \sim 6745 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $290 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 近似于汕头^[15]、珠江三角洲^[16]和黄河三角洲^[17]的污染水平, 除了高于香港^[18]和曼谷^[19]的含量外, 比北京^[20]、天津^[21]、济南^[22]和上海郊区^[23]以及希腊^[24]、韩国^[25]、德岛^[26]、英国城市^[27]和新奥尔良^[28]的土壤 PAHs 含量都要低 (表 2)。可见深圳市表层土壤 $\sum_{16}$ PAHs 浓度在世界范围内处于较低水平。

不同土地利用类型可以清晰地表征城市化地区人为活动特别是社会经济活动的空间分异。本研究对深圳市各土地利用类型样点的 PAHs 含量进行比较发现 (图 2): 8 种土地利用类型中, 交通和商业用地的 $\sum_{28}$ PAHs 含量最高, 其次是工业用地和农业用地, 其他 4 种用地类型 (包括居住用地、果园、林地、绿地)

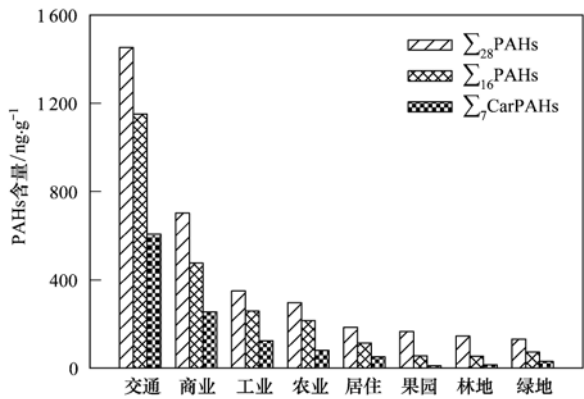


图 2 深圳市不同用地类型土壤中 PAHs 含量

Fig. 2 Concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons from surface soils of different land use types

表 2 不同国家或地区表层土壤中 PAHs 含量比较/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 2 Comparison of PAHs levels from surface soils of different countries or areas/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

研究区域	PAHs 数量	浓度范围	平均值	文献
深圳	16	2 ~ 6 745	290	本研究
香港	16	— ¹⁾	169	[18]
汕头	16	22 ~ 1 257	317	[15]
北京	16	467 ~ 5 470	1 637	[20]
天津	16	69 ~ 5 992	1 148	[21]
济南	16	1 310 ~ 254 080	23 250	[22]
上海郊区	16	204 ~ 6 754	1 173	[23]
珠江三角洲	16	58 ~ 3 077	315	[16]
黄河三角洲	16	181 ~ 2 176	360	[17]
希腊	16	38 ~ 2 244	707	[24]
韩国	16	70 ~ 1 175	394	[25]
德岛(日本)	13	—	611	[26]
曼谷(泰国)	20	12 ~ 380	129	[19]
英国城市	12	—	4 240	[27]
新奥尔良(美国)	16	647 ~ 40 692	3 730	[28]

1) “—”表示文献中没有相关数据

地和城市绿地)的含量均较低,且差异不大.

值得注意的是,城市绿地的 $\sum_{28}$ PAHs 含量虽然较低,但其 $\sum_{16}$ PAHs 和 $\sum_7$ CarPAHs 浓度要高于果园和林地. 由于果园和林地均远离人为活动密集地区,加上采样时已尽可能避开典型的点状污染源(如加油站、垃圾焚烧厂和发电厂等),说明城市绿地已经受到周边人为活动的影响,应引起足够的重视.

2.2 土壤 PAHs 来源识别

运用环数相对丰度和主成分分析/多元线性回归法来推断深圳市表层土壤 $\sum_{16}$ PAHs 的来源. PAHs 的环数相对丰度可以反映来源是热解还是石油类污染. 通常高分子量 PAHs 主要来源于化石燃料高温燃烧,而低分子量 PAHs 则来源于石油类污染或不完全燃烧^[29]. Soclo 等^[30]指出,当低分子量与高分子量 PAHs 含量比值 $R < 1$ 时,表明 PAHs 主要源于燃烧源;当比值 $R > 1$ 时,则表明 PAHs 主要源于油类污染. 本研究 188 个样点的 $\sum_{16}$ PAHs 中, $R < 1$ 的点占总点数的 61.2%, $R > 1$ 的点占总点数的 38.8%. 据此可以初步推测,深圳市土壤中 $\sum_{16}$ PAHs 主要来自化石燃料的燃烧,少量来自石油类污染.

为进一步判断不同人为活动强度区域 $\sum_{16}$ PAHs 的来源,将 8 种土地利用类型整合为建设用地(包括工业、商业、交通和居住 4 种用地类型)和非建设用地(包括果园、林地、城市绿地和农

业用地 4 种用地类型),对其 $\sum_{16}$ PAHs 数据进行主成分分析. 主成分提取方法设定特征根(eigenvalues) > 0.9 , 旋转方法选择最大方差法(varimax),最终旋转的迭代次数收敛在 3 次. 结果显示建设用地和非建设用地样品均可提取 2 个主成分(见表 3),累计方差分别为 88.8% 和 85.7%. 2 类区域的主成分 1 均主要加权在 9 种高分子量 PAHs (PYR、BaA、CHR、BbF、BkF、BaP、IcdP、DahA 和 BghiP)上. 以往的研究表明,汽油不完全燃

表 3 利用最大方差法得到的表层土壤中 PAHs 的主成份因子载荷矩阵

Table 3 Rotated component matrix of PAHs in surface soils by a varimax with kaiser normalization

化合物	建设用地		非建设用地	
	主成分 1	主成分 2	主成分 1	主成分 2
NAP	-0.016	0.883	0.159	0.807
AC	0.499	0.824	0.027	0.940
ACE	0.299	0.855	0.275	0.918
FL	0.494	0.791	-0.040	0.912
PHE	0.918¹⁾	0.328	0.730	0.597
ANT	0.827	0.388	0.481	0.458
FLU	0.958	0.232	0.894	0.278
PYR	0.849	0.357	0.885	0.235
BaA	0.866	0.308	0.959	0.142
CHR	0.850	0.413	0.938	0.241
BbF	0.944	0.211	0.961	0.143
BkF	0.945	0.211	0.938	0.174
BaP	0.964	0.160	0.930	0.063
IcdP	0.932	0.227	0.953	0.080
DahA	0.887	0.232	0.948	0.010
BghiP	0.896	0.287	0.962	0.071
累积方差/%	65.0	88.8	60.3	85.7

1) 表中的黑体字表示对于不同的化合物因子得分 > 0.8 的主成分

烧会释放出 BbF、BkF、CHR、BghiP 等物质^[31]; IcdP 是柴油动力燃烧过程的重要指示物^[32]; BaA、BaP、BkF 是天然气燃烧和家庭烹饪的重要指示物^[33]. 因此可将主成分 1 定义为化石燃料(包括汽油、柴油、天然气、煤等)的燃烧. 2 类区域的主成分 2 均主要加权于 NAP、AC、ACE 和 FL 这 4 种低分子量 PAHs, 可归为石油或油类源^[29, 30, 34].
分别以上述标准化主成分得分变量和标准化后

的 $\sum_{16}$ PAHs 总含量作为自变量和因变量, 进行多元线性回归分析, 从而得到可以反映各主成分因子的标准化回归系数和各主要源的相对贡献率. 由表 4 可知, 建设用地和非建设用地样品中的 $\sum_{16}$ PAHs 均主要来源于各种化石燃料的燃烧(贡献率分别为 75.1% 和 68.2%), 其次来源于石油或油类物质的渗漏、挥发等过程, 这与前面环数相对丰度分析结论相符.

表 4 $\sum_{16}$ PAHs 总含量与主成分因子得分变量多元线性回归结果
Table 4 Multiple linear regression of principle component scores against $\sum_{16}$ PAHs

参数	建设用地		非建设用地	
	化石燃料燃烧	石油或油类源	化石燃料燃烧	石油或油类源
标准回归系数	0.948	0.315	0.904	0.421
贡献率/%	75.1	24.9	68.2	31.8

分析深圳市不同土地利用类型的社会经济活动特点可知: 交通用地的 PAHs 主要来自汽车尾气排放; 商业用地的 PAHs 则受到交通污染和高密度餐饮、小型供热锅炉燃烧等综合过程的影响; 工业用地的 PAHs 来源除少量交通污染外, 还包括各种有机原材料在运输和使用过程中的废液、废气排放等; 农业用地中造成土壤 PAHs 污染的行为包括施肥、污水灌溉等, 此外局部地区的生物质和垃圾焚烧也是不容忽视的因素. 相对而言, 其他四类用地受上述主要过程影响比较小, 其 PAHs 含量可能更多的与大气干湿沉降、植被的新陈代谢等有关.

2.3 城市化水平与 PAHs 的关系

分析不同城市化水平区域土壤 PAHs 污染, 可以更好地揭示人为活动空间分异对 PAHs. 非农建设用地的密度反映了城市化水平的空间分异, 也可以表征人为活动强度的空间分异^[35, 36]. 运用 ArcGIS 中的邻域统计分析功能(neighborhood statistics), 把深圳市的建设用地(包括工业、商业、交通和居住四种用地类型)按照 10% 的密度间隔分成 10 个城市化梯度, 梯度 1、2、……、10 分别对应 0~10%、10%~20%、……、90%~100% 的建设用地密度区域. 本研究由于样点布设比较均匀, 各梯度上所含样点数量为 10~38 个不等, 可以进行 PAHs 污染浓度与城市化梯度之间的相关分析.

运用 Pearson 相关分析发现, $\sum_{28}$ PAHs 的中值浓度与城市化梯度之间的关系不明显, $\sum_{16}$ PAHs、 $\sum_7$ CarPAHs 的中值浓度与城市化梯度分别在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上呈现出显著的正相关关系.

2 环、3 环 PAHs 的中值浓度与城市化梯度关系不明显, 而 4 环、5 环、6 环 PAHs 的中值浓度均在 $P < 0.01$ 水平上与城市化梯度有着显著的正相关性. PAHs 中值浓度与城市化梯度的线性关系拟合见图 3. 这表明城市化地区表层土壤 PAHs 中有一部分可以归纳为局部人为原因, 还有一部分则可能有更为复杂的形成机制; 局部人为活动分析难以全面清楚地解释其浓度的空间分异. 考虑到 $\sum_{16}$ PAHs (包含 $\sum_7$ CarPAHs) 是被诸多研究证明具有重要生态风险的有机污染物, 其与人为活动的这种显著相关关系无疑提醒我们, 高水平城市化地区应当成为今后土壤 PAHs 污染生态风险管理的核心区域.

2.4 PAHs 生态风险评估

通过运算不同土地利用类型土壤中 10 种 PAHs (包括 NAP、PHE、ANT、FLU、BaA、CHR、BkF、BaP、IcdP 和 BghiP, 均属于 16 种美国环境保护署优控 PAHs) 的毒性当量浓度(toxic equivalency quotients, TEQs), 对深圳市全市 PAHs 生态风险做一个总体的评估. 计算公式如下:

$$TEQs = \sum c_i \times TEF_i$$

式中, c_i 表示样本中每一种目标 PAH 的平均浓度, TEF_i 表示该化合物相对于 BaP 的毒性当量转化因子^[37]. 不同类型土壤 10 种 PAHs 的 TEQs 水平列入表 5 中. 所有 188 个样点中的这 10 种 PAHs 的 TEQs 总和(TEQ_{10}) 范围是 $3.58 \times 10^{-3} \sim 598 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $21 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 低于荷兰农业土壤质量标准(荷兰标准)中的 TEQ_{10} ($33 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)^[38]. 本研究中只有 13.8% 的采样点的 TEQ_{10} 超过 33

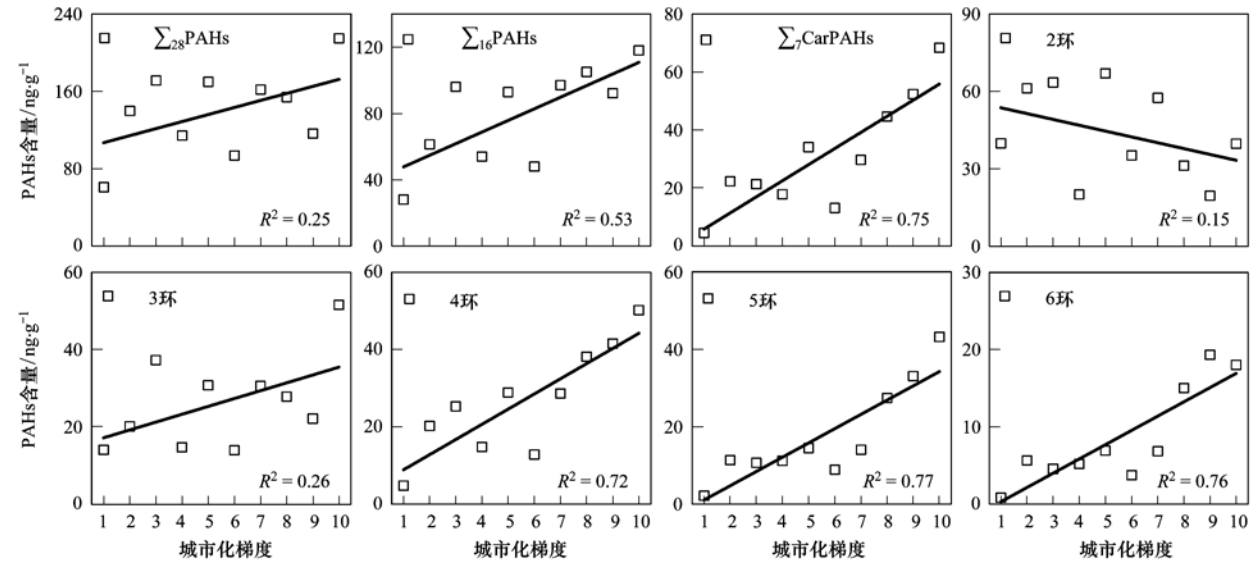


图 3 PAHs 含量与城市化水平的关系

Fig. 3 Relationship between PAHs concentrations and urbanization levels

表 5 不同用地类型土壤 PAHs 的毒性当量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 5 Toxic equivalency quotients (TEQs) of individual PAHs in surface soils from different land use types/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$									
化合物	工业	交通	商业	居住	农业	果园	林地	绿地	荷兰标准 ²⁾
NAP	0.009	0.010	0.018	0.007	0.014	0.013	0.009	0.005	0.015
PHE	0.023	0.097	0.038	0.013	0.026	0.010	0.009	0.010	0.050
ANT	0.029	0.148	0.063	0.027	0.041	0.025	0.020	0.026	0.500
FLU	0.031 ¹⁾	0.146	0.042	0.014	0.031	0.004	0.005	0.008	0.015
BaA	1.001	7.437	1.761	0.466	0.759	0.063	0.080	0.234	2.000
CHR	0.248	1.298	0.572	0.108	0.166	0.030	0.037	0.061	0.200
BkF	1.020	4.779	2.305	0.513	0.709	0.116	0.139	0.300	2.500
BaP	14.103	65.499	23.083	5.364	8.359	0.732	1.343	3.463	25.000
IcdP	2.372	9.852	4.340	0.747	1.550	0.153	0.202	0.494	2.500
BghiP	0.360	1.367	0.671	0.123	0.243	0.024	0.029	0.075	0.200
TEQ ₁₀	19.197	90.634	32.893	7.381	11.899	1.170	1.874	4.674	32.980

1) 表中的黑体字表示高于相应的参考值数据; 2) 参见文献[38]

$\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 由表 5 可知,交通用地的平均 TEQ_{10} (范围是 $1\sim598\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 最高,高于 $33\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 商业用地的平均 TEQ_{10} (范围是 $3\sim153\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 接近于 $33\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 其他 6 种土地类型的 TEQ_{10} 均低于 $33\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$.

由于本研究采取系统采样和监测,样点布设比较均匀,并且 188 个样点的 $\sum_{16}\text{PAHs}$ 数据经对数转换后的频率直方图呈单峰状,近似正态分布,因此可以借助 ArcGIS 平台进行普通 Kriging 插值. 依据 Maliszewska-Kordybach 提出的标准^[39],深圳市全市范围大部分区域的表层土壤尚属于无污染 ($\sum_{16}\text{PAHs}\leq200\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 或轻度污染 ($200\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$

$<\sum_{16}\text{PAHs}\leq600\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) (见图 4),局部中等污染区域 $\sum_{16}\text{PAHs}$ 范围在 $600\sim1\,000\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间. 宝安和龙岗工商业区的污染水平普遍高于其他地带,这主要是以交通和工商业活动为特征的人为活动造成的. 此外,公明、观澜、龙城、坪地以及前海湾、葵涌西海岸等地岛状重度污染区 ($\sum_{16}\text{PAHs}>1\,000\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 应引起足够的重视.

由此可见,深圳市经历了 30 a 的快速城市化和工业化发展,表层土壤 PAHs 污染受人为活动影响较大,但其生态风险在世界范围内仍处在一个相对较低的水平.

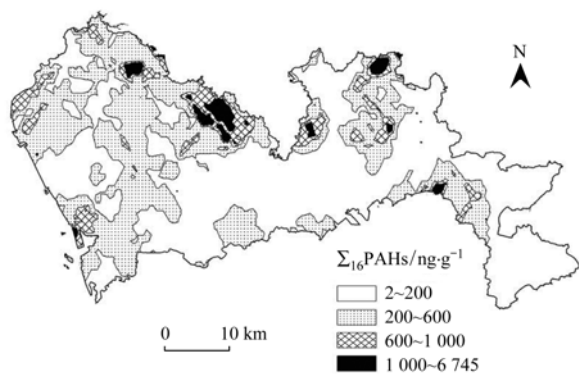


图4 深圳市表层土壤 Σ_{16} PAHs 的 Kriging 插值

Fig. 4 Spatial risk variation of Σ_{16} PAHs in study area

3 结论

(1) 深圳市表层土壤中 16 种美国环境保护署优控 PAHs 含量在 $2 \sim 6745 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 $290 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 约占全部 28 种 PAHs 总量的 70%。建设用地和非建设用地样品的 Σ_{16} PAHs 均主要来源于各种化石燃料的燃烧, 此外石油或油类物质的渗漏、挥发等过程也有较高的贡献率。

(2) 交通和商业用地表层土壤 PAHs 浓度最高, 其次是工业用地和农业用地, 其他用地类型的浓度均较低, 且差异不大。其中城市绿地的 Σ_{16} PAHs 和 Σ_7 CarPAHs 高于园地和林地, 显示出受周边城市化过程影响的苗头, 应引起足够的重视。

(3) 高分子量 PAHs 随着城市化水平的提高生态风险不断增加; 低分子量 PAHs 的来源和分布格局较为复杂。高水平城市化地区应当成为今后土壤 PAHs 污染生态风险管理工作的核心区域。

(4) 若干岛状 PAHs 重污染区主要分布在深圳市宝安和龙岗的工商业区, 但全市表层土壤 PAHs 生态风险仍处于相对较低的水平。

参考文献:

- [1] Wang Y, Tian Z J, Zhu H L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils and vegetation near an e-waste recycling site in South China: concentration, distribution, source, and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **439**: 187-193.
- [2] Ding C, Ni H G, Zeng H. Parent and halogenated polycyclic aromatic hydrocarbons in rice and implications for human health in China [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **168**: 80-86.
- [3] Peng C, Ouyang Z Y, Wang M E, *et al.* Vegetative cover and PAHs accumulation in soils of urban green space [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **161**: 36-42.
- [4] Augusto S, Gonzalez C, Vieira R, *et al.* Evaluating sources of PAHs in urban streams based on land use and biomonitors [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45** (8): 3731-3738.
- [5] Liu L Y, Wang J Z, Wei G L, *et al.* Sediment records of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the continental shelf of China: implications for evolving anthropogenic impacts [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46** (12): 6497-6504.
- [6] He F P, Zhang Z H, Wan Y Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Beijing and Tianjin region: vertical distribution, correlation with TOC and transport mechanism [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21** (5): 675-685.
- [7] Zhao Z Y, Chu Y L, Gu J D. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the Mai Po Inner Deep Bay Ramsar Site in Hong Kong [J]. *Ecotoxicology*, 2012, **21** (6): 1743-1752.
- [8] Chen Q H, Tam N F Y, Shin P K S, *et al.* Ciliate communities in a constructed mangrove wetland for wastewater treatment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, **58** (5): 711-719.
- [9] Wei Q, Wang D, Wei Q, *et al.* Size and resin fractionations of dissolved organic matter and trihalomethane precursors from four typical source waters in China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **141** (1-3): 347-357.
- [10] Cai Q Y, Mo C H, Li Y H, *et al.* Occurrence and assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from vegetable fields of the Pearl River Delta, South China [J]. *Chemosphere*, 2007, **68** (1): 159-168.
- [11] He L Y, Hu M, Zhang Y H, *et al.* Chemical characterization of fine particles from on-road vehicles in the Wutong tunnel in Shenzhen, China [J]. *Chemosphere*, 2006, **62** (10): 1565-1573.
- [12] Mai B X, Chen S J, Luo X J, *et al.* Distribution of Polybrominated Diphenyl ethers in sediments of the Pearl River Delta and adjacent South China Sea [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39** (10): 3521-3527.
- [13] Zhang J, Cai L Z, Yuan D X, *et al.* Distribution and sources of polynuclear aromatic hydrocarbons in mangrove surficial sediments of deep bay, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, **49** (5-6): 479-486.
- [14] 郑一, 王学军, 李本纲, 等. 天津地区表层土壤多环芳烃含量的中尺度空间结构特征 [J]. *环境科学学报*, 2003, **23** (3): 311-316.
- [15] 郝蓉, 彭少麟, 宋艳曦, 等. 汕头经济特区土壤中优控多环芳烃的分布 [J]. *生态环境*, 2004, **13** (3): 323-326.
- [16] Ma X, Ran Y, Gong J, *et al.* Concentrations and inventories of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in watershed soils in the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **145** (1-3): 453-464.
- [17] Xie W J, Chen A P, Li J Y, *et al.* County-scale distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in topsoil of the Yellow River Delta Region [J]. *Journal of Environmental Science and Health-*

- Part A: Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, 2012, **47**(10): 1419-1427.
- [18] 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.
- [19] Wilcke W, Muller S, Kanchanakool N, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in hydromorphic soils of the tropical metropolis Bangkok [J]. Geoderma, 1999, **91**(3-4): 297-309.
- [20] Li X H, Ma L L, Liu X F, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon in urban soil from Beijing, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, **18**(5): 944-950.
- [21] 李静, 吕永龙, 焦文涛, 等. 天津滨海工业区土壤中多环芳烃的污染特征及来源分析[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(10): 2111-2117.
- [22] Dai J, Li S, Zhang Y, *et al.* Distributions, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in topsoil at Ji'nan city, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, **147**(1-3): 317-326.
- [23] 孙小静, 石纯, 许世远, 等. 上海北部郊区土壤多环芳烃含量及来源分析[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(4): 140-144.
- [24] Kipopoulou A M, Manoli E, Samara C. Bioconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables grown in an industrial area [J]. Environmental Pollution, 1999, **106**(3): 369-380.
- [25] Cho J Y, Son J G, Park B J, *et al.* Distribution and pollution sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in reclaimed tidelands and tidelands of the western sea coast of South Korea [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **149**(1-4): 385-393.
- [26] Yang Y, Zhang X X, Korenaga T. Distribution of polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) in the soil of Tokushima, Japan [J]. Water Air and Soil Pollution, 2002, **138**(1-4): 51-60.
- [27] Wild S R, Jones K C. Polynuclear aromatic hydrocarbons in the United Kingdom environment: a preliminary source inventory and budget [J]. Environmental Pollution, 1995, **88**(1): 91-108.
- [28] Mielke H W, Wang G, Gonzales C R, *et al.* PAH and metal mixtures in New Orleans soils and sediments [J]. Science of the Total Environment, 2001, **281**(1-3): 217-227.
- [29] Mai B X, Fu H M, Sheng G Y, *et al.* Chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River Delta, China [J]. Environmental Pollution, 2002, **117**(3): 457-474.
- [30] Soclo H H, Garrigues P, Ewald M. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal marine sediments: case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine (France) areas [J]. Marine Pollution Bulletin, 2000, **40**(5): 387-396.
- [31] Simcik M F, Eisenreich S J, Lioy P J. Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(30): 5071-5079.
- [32] Li C K, Kamens R M. The use of polycyclic aromatic hydrocarbons as source signatures in receptor modeling [J]. Atmospheric Environment. Part A: General Topics, 1993, **27**(4): 523-532.
- [33] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 2. noncatalyst and catalyst-equipped automobiles and heavy-duty diesel trucks [J]. Environmental Science & Technology, 1993, **27**(4): 636-651.
- [34] 廖书林, 郎印海, 王延松. 辽河口湿地土壤多环芳烃的分布及来源研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1094-1100.
- [35] 曾辉, 褚艳铃, 李书娟, 等. 南昌地区建设用地空间扩展的广义转移概率模型建设与应用研究[J]. 地理科学, 2007, **27**(4): 473-479.
- [36] Sun J L, Ni H G, Zeng H. Occurrence of chlorinated and brominated polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments in Shenzhen, South China and its relationship to urbanization [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2011, **13**(10): 2775-2781.
- [37] Ma J, Horii Y C, Cheng J P, *et al.* Chlorinated and parent polycyclic aromatic hydrocarbons in environmental samples from an electronic waste recycling facility and a chemical industrial complex in China [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(3): 643-649.
- [38] 林纪旺, 倪进治, 杨红玉, 等. 泉州市表层土中多环芳烃的含量、来源及其生态风险评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 2074-2080.
- [39] 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.

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of <i>Pleurotus</i> Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhammolipid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行