

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第11期

Vol.33 No.11

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀与长三角区域大气 NO ₂ 污染特征	王英, 李令军, 刘阳 (3685)
2008~2011 年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析	杨俊益, 辛金元, 吉东生, 朱彬 (3693)
沧州市大气污染特征观测研究	王永宏, 胡波, 王跃思, 刘伟, 张武 (3705)
华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源	李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹 (3712)
广州市交通主干道空气中苯系物的测量	叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 凌六一, 郑尼娜, 刘文彬, 黄祖照 (3718)
基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究	黄成, 刘娟, 陈长虹, 张健, 刘登国, 朱景瑜, 黄伟明, 巢渊 (3725)
柴油轿车燃用煤基 F-T 合成油的排放特性	胡志远, 程亮, 谭丕强, 楼狄明 (3733)
九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征	余小青, 杨军, 刘乐冕, 田原, 余正, 王昌付 (3739)
南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价	舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 吴艳鹏, 李爱华 (3748)
天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究	李兆富, 刘红玉, 李恒鹏 (3753)
北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究	李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 刘泽权, 单保庆 (3760)
云阳宗海库的分布与来源	张玉玺, 向小平, 张英, 陈玺, 刘景涛, 王金翠, 张媛静, 孙继朝 (3768)
南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究	孙傅, 沙婧, 刘彦华 (3778)
三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究	张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春宵 (3787)
江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究	单保庆, 李楠, 唐文忠 (3797)
人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果	汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 魏宏斌, 王为东 (3804)
潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响	魏泽军, 谢建平, 黄玉明 (3812)
人工湿地处理含盐生活污水的特性研究	高峰, 杨朝晖, 李晨, 金卫红, 邓一兵 (3820)
催化湿式氧化法降解水中的 β -萘酚	刘杰, 于超英, 赵培庆, 陈革新 (3826)
ZVI/EDDS/Air 体系降解水中 2,4-二氯酚的研究	孙倩, 周海燕, 曹梦华, 吴琳娜, 王琳玲, 陈静, 陆晓华 (3833)
微波改性 MWNTs/TiO ₂ 复合材料对 1,2,3-三氯苯的光催化降解研究	施周, 张茜, 张伟, 徐舜开, 张骅 (3840)
腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究	丁文川, 田秀美, 王定勇, 曾晓岚, 徐茜, 陈健康, 艾小雨 (3847)
臭氧氧化-活性污泥法处理含 PVA 工业废水的试验研究	邢晓琼, 黄程兰, 刘敏, 陈滢 (3854)
复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究	徐少娟, 孙培德, 郑雄柳, 董毅 (3859)
进水比例对水解反应器出水水质的影响研究	梁康强, 熊娅, 戚茂荣, 林秀军, 朱民, 宋英豪 (3868)
厌氧-好氧联合型生物反应器填埋场渗滤液水质水量变化规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬, 陈馨 (3873)
我国城市污水处理回用调查研究	郭宇杰, 王学超, 周振民 (3881)
快雌醇和壬基酚在土壤中的吸附-解吸特征	姜鲁, 王继华, 李建忠, 辛佳, 李森, 刘翔 (3885)
黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探	马昕昕, 许明祥, 杨凯 (3893)
半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应	卫伟, 温智, 陈利顶, 陈瑾, 吴东平 (3901)
广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素	孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 黄保健 (3905)
酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究	王楠, 易筱筠, 党志, 刘云 (3916)
淋洗条件下砂土和粉土盐运移过程的监测研究	付腾飞, 贾永刚, 郭磊, 刘晓磊 (3922)
空气注射修复苯污染地下水模拟研究	樊艳玲, 姜林, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋 (3927)
不同终点检测 5 种双酚 A 类化合物对 MCF-7 的细胞毒性	张帅帅, 刘堰, 刘树深, 朱祥伟 (3935)
上海世博园后滩湿地桤木类群落特征及其对环境因子的响应	陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 王聪, 张饮江 (3941)
耐盐石油烃降解菌的筛选鉴定及其特性研究	吴涛, 谢文军, 依艳丽, 李小彬, 王君, 胡相明 (3949)
高效降酚菌株 <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究	陈晓华, 魏刚, 刘思远, 孙江曼, 王芳芳, 李昊源, 刘宇军 (3956)
四溴双酚 A 好氧降解菌的筛选及其降解特性研究	钱艳园, 刘莉莉, 于晓娟, 丁丛, 王志平, 施玉衡, 李晨君 (3962)
长期施用有机和无机肥对黑土 <i>nirS</i> 型反硝化菌种群结构和丰度的影响	尹昌, 范分良, 李兆君, 宋阿琳, 朱平, 彭畅, 梁永超 (3967)
三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究	何龙, 邱兆富, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟 (3976)
多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因素研究	肖文丹, 杨肖娥, 李廷强 (3983)
硫化物对垃圾焚烧污泥焚烧飞灰高温过程中重金属挥发的影响	刘敬勇, 孙永裕 (3990)
关于医疗垃圾飞灰中二噁英在惰性气氛下的低温热脱附研究	纪莎莎, 李晓东, 徐旭, 陈彤 (3999)
第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文	
稻田气溶胶 NH ₃ 和气体 NO _x 排放在线测定研究	龚巍巍, 栾胜基 (4006)
一种可同时检测挥发性氯代烷烃和氯代烯烃的电子鼻的研制	文晓刚, 刘锐, 蔡强, 万梅, 汤灵容, 陈吕军 (4012)
基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究	孙少艾, 李洋, 周轶, 王海蛟, 孙英 (4018)
涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别	丁晓雯, 沈珍瑶 (4025)
人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析	曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 仲海涛 (4033)
基于 RT-qPCR 选择性检测水中活性病原菌	林怡雯, 李丹, 吴舒旭, 何苗, 杨天 (4040)
消毒副产物生成的温度影响和动力学模型	张小璐, 杨宏伟, 王小仵, 付静, 解跃峰 (4046)
一种厌氧微观定量研究新方法	张仲良, 吴静, 蒋剑凯, 姜洁, 李怀志 (4052)
梧桐树叶作为反硝化碳源的研究	熊剑锋, 徐华, 阎宁, 张永明 (4057)
降解嗜盐菌 AD-3 的筛选、降解特性及加氧酶基因的研究	崔长征, 冯天才, 于亚琦, 董斐, 杨昕梅, 冯耀宇, 刘勇弟, 林汉平 (4062)
《环境科学》征订启事 (3711) 《环境科学》征稿简则 (3767) 信息 (3998, 4039, 4045, 4056) 专辑征稿通知 (4051)	

基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究

孙少艾¹, 李洋¹, 周轶¹, 王海蛟², 孙英^{2*}

(1. 中国农业大学理学院, 北京 100193; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 环境科学与工程系, 北京 100193)

摘要: 垃圾焚烧是大气 PAHs 污染的重要来源, 为监测垃圾焚烧过程产生的 PAHs, 利用被动采样技术对垃圾焚烧厂及周边大气中的多环芳烃(PAHs)进行了定量分析. 结果表明, PAHs 总量为 146.29 ~ 396.30 ng·d⁻¹, 其中气相中 PAHs 为 128.03 ~ 377.05 ng·d⁻¹, 颗粒相中 PAHs 为 10.698 ~ 19.251 ng·d⁻¹. 气相中 PAHs 组成以菲、荧蒽、芴等低环化合物为主, 菲的含量高达 55.1%. 选定松针作为被动植物样品, 测得松针中 PAHs 的浓度为 651.88 ~ 1 044.43 ng·g⁻¹; 考察土壤中 PAHs 的分布特征, 测得土壤中 PAHs 浓度为 35.04 ~ 998.89 ng·g⁻¹. 被动采样和松针、土壤中所含的 PAHs 分布特征相似, 说明被动采样能反映 PAHs 在环境中的真实积累情况. 此外, 通过比较主动采样与被动采样结果, 表明两者对大气中 PAHs 的富集能达到基本一致的效果.

关键词: 分布; 大气; 多环芳烃; 被动采样; 垃圾焚烧

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)11-4018-07

Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling

SUN Shao-ai¹, LI Yang¹, ZHOU Yi¹, WANG Hai-jiao², SUN Ying²

(1. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Waste incineration is the main source of PAHs pollution of the atmosphere. In order to monitor the PAHs produced during the process of incineration, methods of quantitatively analysis for the PAHs of the atmosphere around the refuse incineration plant has been used on the basis of passive sampling technology. The result shows that the quantum of PAHs ranged 146.29-396.30 ng·d⁻¹, among which gaseous phase ranged 128.03-377.05 ng·d⁻¹, particulate phase ranged 10.698-19.251 ng·d⁻¹. Low ring compounds like phenanthrene, fluoranthene, fluorene make up the most of PAHs of gaseous phase in the atmosphere, in which phenanthrene reaches up to 55.1%. Pine needles are picked as passive plant samples, and the result shows that the concentration of PAHs in pine needles ranged 651.88-1 044.43 ng·g⁻¹. The distribution characteristics of PAHs in the soil reveals that the concentration of PAHs in the soil ranged 35.04-998.89 ng·g⁻¹. The PAHs distributions in passive sampling, pines and soil are extremely similar, which indicates that the passive samplings can reflect the real PAHs accumulation conditions in the environment. Besides, the results of passive sampling were compared with active sampling, and both accumulation abilities work almost the same.

Key words: distribution; atmosphere; polycyclic aromatic hydrocarbons; passive sampling; waste incineration

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是广泛存在于环境中的一大类有机污染物, 由两个及两个以上苯环连接在一起构成, 呈半挥发性, 具有致癌、致畸、致突变和生物累积效应^[1,2], 大气中的 PAHs 主要来源于各种焚烧源产生的烟气和交通尾气的排放^[3]. 垃圾焚烧是产生 PAHs 的一个主要来源, 据不完全统计, 全球每年向大气中排放的 PAHs 中, 垃圾焚烧排放的 PAHs [以苯并(a)芘计] 达 1 350 t·a⁻¹^[4], 仅次于锅炉燃煤排放 PAHs. 目前, 国内外对于大气中 PAHs 的含量水平已给予较多的关注^[5~10], 但对垃圾焚烧过程 PAHs 生成与排放的研究还相对较少, 缺乏全面的研究统计数据.

大气中多环芳烃的采集方式按照动力系统的有

无可以分为主动采样和被动采样两种方式^[11]. 主动采样技术是通过外加动力装置 (如泵) 主动地将空气吸入到采样器中, 被动大气采样技术是在自然状态下, 依靠采样介质的吸附作用自由吸收富集空气中的污染物, 是近年来发展起来的新型替代采样技术^[12,13]. 传统的主动采样技术仅能反映采样时刻的污染水平, 易受环境与人为因素的干扰, 且采样器耗费的成本高、技术条件要求苛刻, 难以满足当前对大气 POPs (persistent organic pollutants) 区域高密

收稿日期: 2012-02-14; 修订日期: 2012-05-10

作者简介: 孙少艾 (1991 ~), 女, 主要研究方向为环境化学, E-mail: sunnyshaoai@cau.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: sunying@cau.edu.cn

度监测的需求. 植物、土壤等作为大气 PAHs 天然的被动采样介质^[14], 可以反映污染物在环境中真实的累积水平, 但不同植物、不同土壤类型对 PAHs 吸附的总量和速率差异、污染物在自然条件下的消解等限制了此类被动采样方法的广泛应用. 而大气被动采样技术既能反映污染物在环境中长期、稳定、真实的累积效应, 又能对采样器进行遮光处理以避免污染物的分解, 并且具有成本低、易操作、对采样条件要求低等优点, 近年来在大气 POPs 空间分布研究领域获得广泛应用^[15]. 本研究分析了北京市某垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 的浓度和组成特征, 对比考察了被动采样与植物采样、土壤中 PAHs 的分布特征, 探讨了大气中 PAHs 浓度随高度变化的规律, 并将被动采样结果与传统的主动采样进行对比, 初步验证了被动采样技术的可靠性, 对被动采样技术在环境监测中的应用有重要的指导意义.

1 材料与方法

1.1 样品采集

1.1.1 被动采样

在垃圾焚烧厂周边不同功能区域内设置了 8 个样品采集点, 采样点的分布如图 1, 每个采样点至少放置两个采样器平行采样. 采样器为实验室自制的被动采样器, 利用玻璃纤维滤膜 (glass fiber filter, GFF; $\Phi 90$ mm; 400℃焙烧 4 h) 采集大气总悬浮颗

粒物, 聚氨酯泡沫 (polyurethane foam, PUF; $\Phi 60$ mm $\times$ 76 mm; 丙酮和正己烷分别抽提 24 h) 采集气相中的多环芳烃^[16]. 采样季节为冬季, 时间为 90 d. 有关采样点的具体信息见表 1, 采样期间的相关气象数据见表 2.

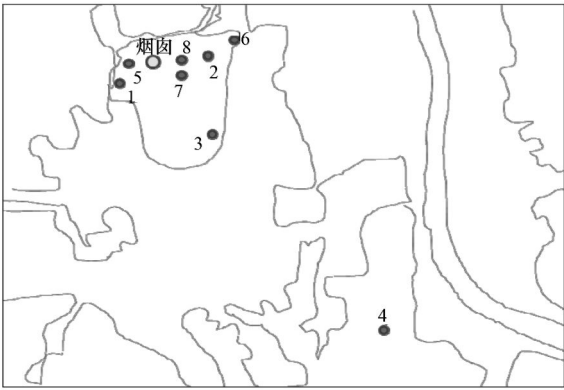


图 1 研究区及采样点分布示意

Fig. 1 Study area and sampling sites

表 1 采样点信息

Table 1 Sampling sites information

样点编号	烟囱距离/m	方位/(°)	所属功能区域
1	231. 82	227. 04	办公区
2	512. 26	91. 282	建筑区
3	723. 14	150. 92	工作区
4	3 028. 3	134. 89	居民区
5	136. 35	221. 07	交通要道
6	678. 53	79. 566	医疗焚烧
7	434. 18	104. 70	工作区
8	363. 21	97. 541	工作区

表 2 采样期间相关气象数据¹⁾

Table 2 Relevant meteorological data during the sampling period

最高气温 /℃	最低气温 /℃	最高风速 /m·s ⁻¹	主导风向	平均湿度/%	最高气压 /kPa	最低气压 /kPa
5. 8	-9. 1	10. 8	西北	36. 5	103. 2	83. 2

1) 本气象数据是垃圾焚烧厂气象环境监测站所提供, 所有数据均取的是 90 d 的平均值

1.1.2 主动采样

本实验在 3 号点和 4 号点附近设置了主动采样点. 采样器为双气路大气采样器 (TH-110B 型大气

采样器, 武汉天虹智能仪表厂), 采样流量为 2 L·min⁻¹, 采样时间为 24 h (冬季), 共富集空气体积 2. 88 m³. 主动采样期间的气象数据见表 3.

表 3 采样期间相关气象数据

Table 3 Relevant meteorological data during the sampling period

最高气温 /℃	最低气温 /℃	最高风速 /m·s ⁻¹	主导风向	平均湿度/%	最高气压 /kPa	最低气压 /kPa
8. 8	-1	15. 6	西北	59. 9%	102. 3	100. 6

1.1.3 植物、土壤采样

实验选择松针作为被动植物样品测定 PAHs 的浓度水平, 并检测了垃圾焚烧厂区内土壤中 PAHs 的污染状况. 松针的采样位置为 1 号点和 6 号点,

采取裸露在外部空气中的松针; 土壤的采样点为 1、3、6 和 7 号点, 采取地表面积 30 cm $\times$ 30 cm, 深度约 5 cm 左右土壤.

1.2 样品预处理

采样后的 PUF 用丙酮和正己烷(分析纯,重蒸处理)的混合溶液(1:1,体积比)200 mL 索氏提取 12 h. GFF 称重后剪碎,以滤纸包裹,用丙酮和二氯甲烷(分析纯,重蒸处理)的混合溶液(1:1,体积比)200 mL 索氏提取 24 h,索氏提取器约每 15 min 回流一次. 提取液浓缩并经溶剂替换后,过硅胶层析柱(Φ 1 cm $\times$ 40 cm)纯化分离. 层析用硅胶在 450℃ 活化 4 h,冷却后去活,用正己烷(色谱纯)浸泡,湿法装柱. 淋洗液为正己烷和二氯甲烷(色谱纯; 1:1,体积比),体积为 50 mL,流速控制在 2 mL $\cdot$ min $^{-1}$ 左右. 洗脱液氮吹至干,用正己烷(色谱纯)定容至 1 mL.

松针、土壤样品的预处理方法与 GFF 相同.

1.3 仪器分析条件

本实验使用 Agilent GC6890/5973 MSD 测定 PAHs. 仪器设置条件为:色谱柱:DB5-MS, 30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m 毛细管色谱柱;升温程序:初始温度 50℃,保持 2 min,以 20℃ $\cdot$ min $^{-1}$ 程序升温至 200℃,保持 2 min,再以 6℃ $\cdot$ min $^{-1}$ 升温至 240℃,保持 2 min,最后以 3℃ $\cdot$ min $^{-1}$ 程序升温至 290℃,保持 5 min;进样量 1 μ L,不分流进样;载气为高纯 He,流速 1 mL $\cdot$ min $^{-1}$;注射器温度:250℃,界面温度:280℃;电离方式:EI:70 eV;离子源温度:230℃;电流:150 μ A;检测器电压:350 V;扫描模式:SIM;溶剂切除:7 min;质谱图库为美国国家标准研究所提供的 NIST 98 Chemical Structures.

1.4 方法回收率

取 8 份空白 PUF,向其中 3 份加入 PAHs 混标

100 ng,另外 3 份加入 PAHs 混标 500 ng,最后两份作为空白样品,根据空白和加标样品的测定数据计算方法回收率,测得 16 种 PAHs 在 PUF 中的平均回收率在 61.52% ~ 114.6% 之间. 用同样的方法测得 16 种 PAHs 在 GFF 中的平均回收率在 62.00% ~ 115.4% 之间.

2 结果与讨论

本实验主要采集的 PAHs 系列化合物为美国国家环保局优先控制的 16 种多环芳烃:萘(NAP)、蒽(ACY)、芘(ACE)、芴(FLO)、菲(PHE)、蒽(ANT)、荧蒽(FLA)、芘(PYR)、苯并(a)蒽(BaA)、䓛(CHR)、苯并(b)荧蒽(BbF)、苯并(k)荧蒽(BkF)、苯并(a)芘(BaP)、茚并(1,2,3-cd)芘(IcdP)、二苯并(a,h)蒽(DahA)、苯并(g,h,i)芘(BghiP).

2.1 被动采样 PAHs 的分布特征

2.1.1 PAHs 的浓度水平

表 4 是 1 ~ 7 号点的 PUF 样品数据处理结果(由于测得萘的结果通常不可靠,故其中数据未包括萘),表中数据表示采样期间内大气中多环芳烃每天的平均含量(ng $\cdot$ d $^{-1}$). 通过 8 个样品采集点的 $\sum$ PAHs 的浓度数据可以得出,垃圾焚烧厂园区内和周边区域 3 km 内大气气相中多环芳烃的浓度在 128.03 ~ 377.05 ng $\cdot$ d $^{-1}$ 范围内,其中以工作区附近浓度达到最高,交通要道附近浓度最低. 大气中 PAHs 总量为 146.29 ~ 396.30 ng $\cdot$ d $^{-1}$. 与近年来国内外大气 PAHs 浓度水平报道^[17] 相比较,垃圾焚烧

表 4 15 种 PAHs 的浓度分布(PUF)¹⁾/ ng $\cdot$ d $^{-1}$

Table 4 Concentration of 15 PAHs(PUF)/ ng $\cdot$ d $^{-1}$

PAH	采样点						
	1	2	3	4	5	6	7
ACY	1.112 $\pm$ 0.30	0.367 0 $\pm$ 0.37	0.880 3 $\pm$ 0.61	1.507 $\pm$ 0.69	0.685 5 $\pm$ 0.69	1.011 $\pm$ 1.01	0.7450 $\pm$ 0.59
ACE	1.842 $\pm$ 0.36	0.663 0 $\pm$ 0.66	1.113 $\pm$ 0.73	1.347 $\pm$ 0.39	0.372 4 $\pm$ 0.37	0.898 6 $\pm$ 0.90	0.383 8 $\pm$ 0.38
FLO	28.83 $\pm$ 9.72	21.42 $\pm$ 6.99	29.51 $\pm$ 2.48	36.78 $\pm$ 8.16	16.78 $\pm$ 14.45	22.57 $\pm$ 20.32	29.99 $\pm$ 12.47
PHE	75.09 $\pm$ 33.72	110.2 $\pm$ 3.98	143.8 $\pm$ 19.68	135.1 $\pm$ 31.35	76.57 $\pm$ 67.48	112.2 $\pm$ 101.6	190.0 $\pm$ 56.86
ANT	1.910 $\pm$ 0.37	1.880 $\pm$ 0.39	2.100 $\pm$ 0.52	2.350 $\pm$ 0.36	1.090 $\pm$ 1.09	1.140 $\pm$ 1.14	3.420 $\pm$ 1.68
FLA	15.56 $\pm$ 7.21	25.97 $\pm$ 0.11	33.86 $\pm$ 10.47	27.44 $\pm$ 6.89	14.48 $\pm$ 13.94	28.09 $\pm$ 25.86	77.62 $\pm$ 29.93
PYR	9.472 $\pm$ 4.37	16.67 $\pm$ 1.25	23.06 $\pm$ 7.04	17.40 $\pm$ 4.24	10.31 $\pm$ 9.98	19.39 $\pm$ 18.25	49.54 $\pm$ 18.65
BaA	0.291 6 $\pm$ 0.18	1.349 $\pm$ 0.15	2.205 $\pm$ 0.71	1.197 $\pm$ 0.03	1.203 $\pm$ 1.19	1.988 $\pm$ 1.87	4.704 $\pm$ 1.76
CHR	0.417 4 $\pm$ 0.29	2.066 $\pm$ 0.38	3.156 $\pm$ 1.27	1.534 $\pm$ 0.15	1.657 $\pm$ 1.63	3.202 $\pm$ 3.03	6.814 $\pm$ 1.98
BbF	0.316 3 $\pm$ 0.26	1.983 $\pm$ 0.25	4.477 $\pm$ 2.48	1.621 $\pm$ 0.04	1.773 $\pm$ 1.77	3.060 $\pm$ 2.71	6.217 $\pm$ 1.83
BkF	0.049 81 $\pm$ 0.08	0.424 8 $\pm$ 0.05	0.829 $\pm$ 0.48	0.295 8 $\pm$ 0.01	0.256 0 $\pm$ 0.26	0.633 5 $\pm$ 0.58	1.440 $\pm$ 0.45
BaP	0.110 9 $\pm$ 0.05	0.454 4 $\pm$ 0.07	1.522 $\pm$ 1.11	0.407 5 $\pm$ 0.09	0.570 8 $\pm$ 0.45	0.542 3 $\pm$ 0.40	0.838 $\pm$ 0.18
IcdP	0.336 1 $\pm$ 0.14	0.979 0 $\pm$ 0.12	1.250 $\pm$ 0.34	0.942 7 $\pm$ 0.15	1.140 $\pm$ 0.95	1.503 $\pm$ 1.20	2.449 $\pm$ 0.74
DahA	0.162 5 $\pm$ 0.00	0.209 5 $\pm$ 0.04	0.405 6 $\pm$ 0.24	0.249 1 $\pm$ 0.01	0.179 7 $\pm$ 0.18	0.292 0 $\pm$ 0.15	0.576 0 $\pm$ 0.16
BghiP	0.311 6 $\pm$ 0.14	0.985 2 $\pm$ 0.08	1.761 $\pm$ 0.8	0.933 7 $\pm$ 0.09	0.968 2 $\pm$ 0.81	1.343 $\pm$ 1.04	2.274 $\pm$ 0.52
PAHs	135.8 $\pm$ 57.21	185.6 $\pm$ 10.11	249.9 $\pm$ 41.32	229.2 $\pm$ 52.36	128.0 $\pm$ 115.2	197.8 $\pm$ 180.1	377.1 $\pm$ 128.2

1) 平均值 $\pm$ 标准差

厂周边大气中 PAHs 的浓度比一般的市区城市大气中 PAHs 浓度高,主要原因是垃圾成分复杂,含有大量的碳氢化合物,塑料含量也较多,这些垃圾成分的不完全燃烧就会产生多环芳烃,最后随着烟气排放到大气中,进而扩散到周边区域.

图 2 是 8 个样品采集点总 PAHs 的浓度分布情况. 可以看出 7 号点浓度最高,因其位于垃圾焚烧炉的下风向,属工作区,且每天都有较多的车辆进行倾倒垃圾,地面灰尘较多,使得 PUF 采样器除了吸附气相中 PAHs,也吸附了较多的细尘和颗粒物; 3 号点在垃圾焚烧炉东南方向,而采样期间的风向基本是西风或西北风,故 3 号点 PAHs 浓度也较高. 1 号点和 5 号点的浓度水平很低,1 号点由于被动采样器挂在松树上,吸收到的 PAHs 是经过了松针的吸收过滤之后的浓度水平; 5 号点的被动采样器放在了一个简易房的房顶,汽车排放的 PAHs 的贡献显著减小.

2.1.2 PAHs 的健康风险评价

20 世纪 90 年代起,人们提出了用毒性等效因子 (toxicity equivalent factors, TEFs) 来评价多种

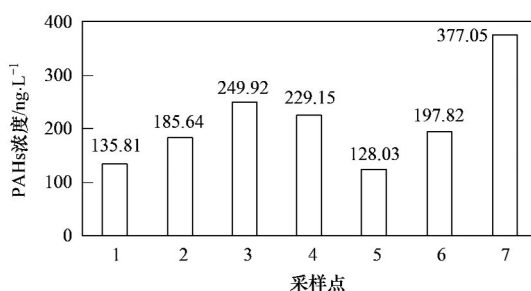


图 2 PAHs 在各采样点的浓度分布

Fig. 2 Concentration of PAHs in different sampling sites

PAHs 对人类健康威胁的辅助作用^[18],并得到了较广泛的认可^[19,20]. 苯并(a)芘等效浓度 (BaP_{eq}) 是通过 TEF 计算的各致癌 PAHs 相对 BaP 致癌毒性的累计值. BaP_{eq} 计算式: $BaP_{eq} = \sum (\text{组分 } i \text{ 的浓度}) \times (\text{组分 } i \text{ 的等效毒性 TEF})$, 式中, i 为具有致癌毒性的 PAHs 物种; TEF 为各物种对应毒性当量因子的文献报道值^[18]; 各组分的体积浓度可由文献[21]中的校准公式进行计算. 按上式计算,得到各采样点的苯并(a)芘等效浓度,结果如表 5.

表 5 PAHs 毒性当量浓度分布/ $ng \cdot m^{-3}$

Table 5 Toxic equivalent concentration of PAHs/ $ng \cdot m^{-3}$

BaP_{eq}	采样点							平均值
	1	2	3	4	5	6	7	
PUF	5.373	13.43	30.24	13.37	12.93	17.36	32.90	17.94
GFF	33.81	28.66	14.37	14.86	22.15	27.73	17.17	22.68
气相 + 颗粒相	39.18	42.09	44.61	28.23	35.08	45.09	50.07	40.62

我国关于 BaP 的大气质量控制标准为 $10 ng \cdot m^{-3}$ ^[22], WHO 公布的标准为 $1 ng \cdot m^{-3}$. 垃圾焚烧厂周边大气气相和颗粒相中 PAHs 的 BaP 等效浓度分别为 $17.94 ng \cdot m^{-3}$ 和 $22.68 ng \cdot m^{-3}$, 这个结果超过了我国关于 BaP 的大气质量控制标准,分别是我国大气质量日均标准 BaP 的 1.79 和 2.27 倍. 因此,垃圾焚烧厂园区和周边大气中 PAHs 已对人体健康构成潜在威胁.

2.2 植物、土壤中 PAHs 的分布特征

2.2.1 PAHs 的浓度水平

实验结果表明,1 号点的松针中 15 种优控 PAHs 总浓度为 $1044.43 ng \cdot g^{-1}$, 医疗垃圾焚烧炉附近的 6 号点 PAHs 的总浓度为 $651.88 ng \cdot g^{-1}$. 杨萍^[23]测得大连地区松针中的 15 种 PAHs 的浓度范围为 $534 \sim 3284 ng \cdot g^{-1}$, 均值为 $1694 ng \cdot g^{-1}$; 刘国卿等^[24]测得珠江三角洲地区松针中 PAHs 的含量为 $313.9 \sim 3043.5 ng \cdot g^{-1}$. 本研究所测的松针中

PAHs 浓度水平与这些研究的结果基本保持一致.

对于土壤样品,1、3、6 和 7 号点土壤中 15 种优控 PAHs 总浓度分别为 998.89、35.04、641.81 和 $90.19 ng \cdot g^{-1}$. 参照荷兰 Maliszewska-Kordybaeh^[25]建议的土壤中 PAHs 污染程度分类标准,本研究中垃圾焚烧厂 1 号点和 7 号点区域的土壤属于未污染 PAHs ($<200 ng \cdot g^{-1}$), 1 号点和 6 号点区域的土壤属于中度污染 PAHs ($>600 ng \cdot g^{-1}$). 3 号点和 7 号点属于园区的绿化区,经常有浇水和翻动,因此这两处的土壤处于未被 PAHs 污染的状态; 而 1 号点和 6 号点处于树林中,不常被翻动,且这两点附近都有 PAHs 的排放源,因此土壤中 PAHs 的污染较为严重. 王震^[26]测定了大连地区土壤中的 PAHs,其含量在 $269 \sim 19003 ng \cdot g^{-1}$, 均值为 $3625 ng \cdot g^{-1}$; 汤莉莉^[27]测定了北京市土壤中 PAHs 的含量,得出绿化区和居民区娱乐场所的 PAHs 含量为 $365.8 ng \cdot g^{-1}$. 垃圾焚烧厂土壤中 PAHs 的含

量水平与这些区域的土壤相差不大,说明焚烧厂中土壤所受污染不太严重。

2.2.2 PAHs 在植物、土壤、被动采样中分布特征比较

将 1 号点和 6 号点的被动采样(PUF)、植物采样、土壤中 PAHs 组成情况(按环数)共同绘于图 3、图 4。从中可看出,被动采样和松针、土壤中所含的 PAHs 分布特征非常相似,说明本实验被动采样能反映 PAHs 在环境中的真实积累情况。

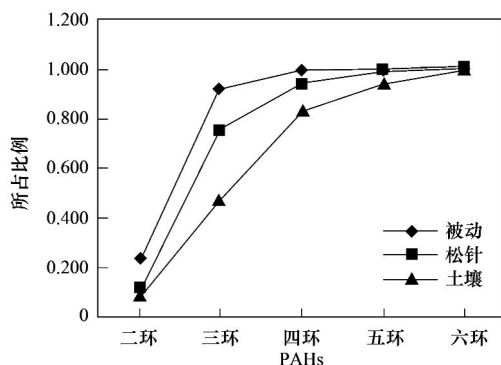


图 3 不同采样方式的比较(1 号点)

Fig. 3 Comparison of different sampling methods(sampling site 1)

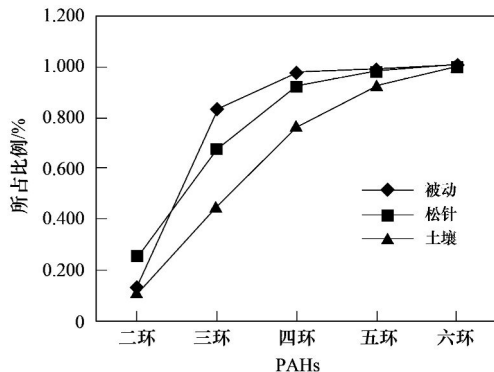


图 4 不同采样方式的比较(6 号点)

Fig. 4 Comparison of different sampling methods(sampling site 6)

PUF 中主要富集的是三环、四环的 PAHs,而对五环、六环这类高环的 PAHs 富集能力较差,这与之前文献报道的相一致。PUF 采集的主要是空气中气相的多环芳烃,而大气中气相的多环芳烃多以低环数为主。考察 15 种 PAHs 在各个采样点含量的平均值,可以得出,垃圾焚烧厂周边大气气相中 PAHs 以菲含量最高,所占比例为 55.1%,荧蒽和芴次之,分别占总 PAHs 的 15.6% 和 11.9%。

松针吸收的 PAHs 主要以三环和四环的为主,其中 6 号点的松针中二环的 PAHs 浓度也较高。说明松针监测的主要是大气中气相的 PAHs,高环数的 PAHs 所占比例较小。相较而言,土壤则更易吸附环

数较高的 PAHs,1 号点土壤中主要以三环和四环 PAHs 为主,各占 $\sum$ PAHs 的 0.40 和 0.35,6 号点的 PAHs 则主要以三环及以上为主。

2.3 被动采样与主动采样

最后,为进一步证实本实验被动采样数据的可靠性,本实验在 3 号点和 4 号点附近设置了主动采样点。计算出被动采样 PAHs 的体积浓度,所得结果与主动采样数据对比如表 6。

表 6 主动采样和被动采样 PAHs 的浓度分布/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 6 Concentration of PAHs in active sampling and passive sampling/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$			
采样介质	采集方式	3 号点	4 号点
PUF	主动	996.6	874.9
	被动	2 433	2 303
GFF	主动	234.9	226.2
	被动	337.8	443.3
$\sum$ PAHs		1 231	1 101
		2 771	2 746
$\sum$ PAHs 比值		2.25	2.49

通过表中被动采样与主动采样的数据比值可看出,两采样点的比值均在 2~3 之间^[15],说明利用本研究的被动采样技术富集大气 PAHs 和主动采样技术能达到基本一致的效果,两者均能反映研究区域内 PAHs 的浓度水平和污染状况。

2.4 样品采集高度

一般情况下,大气中 PAHs 的浓度含量因距地面高度的不同而有所不同,实验设置了距地高度为 35 m 的 7 号采样点和距地高度为 2 m 的 8 号采样点。表 7 的数据表明,大气中总 PAHs 浓度随距地面高度的增加而增大,其中气相 PAHs 随地面高度的增加浓度增大,颗粒相 PAHs 随地面高度的增加浓度减小。分析其原因是垃圾焚烧厂的排放烟囱高度为 80 m,距地面的高度越高,离烟囱排放的烟气越近,则测得的 PAHs 浓度越大。但颗粒相 PAHs 相反,由于受重力的影响,相对分子质量大的 PAHs 或者吸附在颗粒物上的 PAHs 易在排放烟囱附近的区域沉降,故低处的浓度较大,而高处的浓度较小。

表 7 不同采集高度 PAHs 的浓度分布

Table 7 Concentration of PAHs in different sampling heights		
采样介质	7 号点	8 号点
PUF	3 682	2 439
GFF	496.7	594.9
$\sum$ PAHs	4 179	3 033

图 5 显示了 PUF 中 15 种 PAHs 在不同高度的组成分布。从中可以看出,一方面,两个采样点的

PAHs 主要组成相似,均以二环和三环的 PAHs 为主,说明被动采样技术验证了 PUF 采集的是大气中气相的 PAHs。另一方面,35 m 处大气气相中 PAHs 比地面浓度高,说明气相中的 PAHs 相对分子质量较低不太容易沉降,易停留在高处。

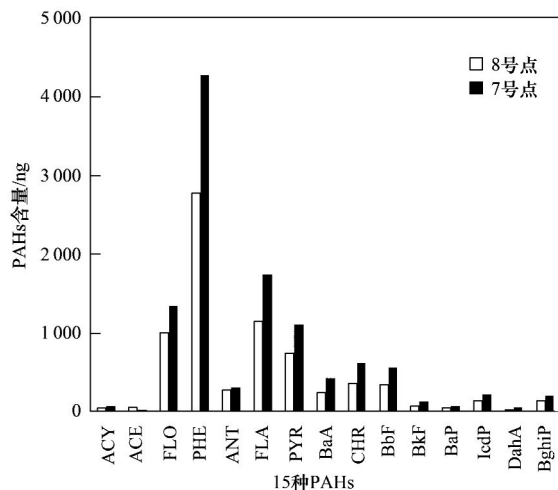


图5 不同采集高度 PAHs 的组成特征(PUF)

Fig. 5 Composition of the pattern of PAHs in different sampling heights (PUF)

GFF 中 PAHs 在不同高度的组成分布如图 6。一方面,表明两个采样点 GFF 中 PAHs 的组成以三环和四环的 PAHs 含量较高,另外五环和六环的 PAHs 的比例比 PUF 显著增大,验证了 GFF 采集的是颗粒相的 PAHs。另一方面,8 号点的 GFF 中茚并[1,2,3-cd]芘及其后的 10 种 PAHs 所占比例明显高于 7 号点,即地面 BbF、BaP、IcdP 和 BghiP 的浓度高于 30 m 高度处。也就是说,大气中颗粒相的 PAHs 易在低处停留,距地面越高,颗粒相的 PAHs 浓度越小。

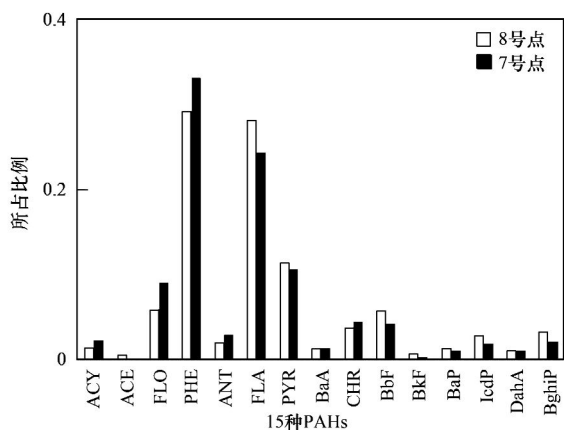


图6 不同采集高度 PAHs 的组成特征(GFF)

Fig. 6 Composition of the pattern of PAHs in different sampling heights (GFF)

3 结论

(1)利用被动采样技术对垃圾焚烧厂及周边 3 km 区域内大气中 PAHs 的浓度水平进行监测,得到大气中 PAHs 总量为 $146.29 \sim 396.30 \text{ ng} \cdot \text{d}^{-1}$,其中气相中 PAHs 为 $128.03 \sim 377.05 \text{ ng} \cdot \text{d}^{-1}$,颗粒相中 PAHs 为 $10.698 \sim 19.251 \text{ ng} \cdot \text{d}^{-1}$ 。大气气相中 PAHs 组成以菲、茚并、芘等低环类为主,其中菲的含量高达 55.1%。

(2)选定松针作为被动植物样品进行大气 PAHs 的监测,测得 1 号点和 6 号点附近松针中 PAHs 的浓度分别为 $1044.43 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $651.88 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。并考察了土壤中 PAHs 的分布特征,土壤中 PAHs 的浓度范围在 $35.04 \sim 998.89 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,所受污染不太严重。被动采样和松针、土壤中所含的 PAHs 比例分布非常相似。

(3)通过比较主动采样与被动采样的结果表明,两者的比值在 2~3 之间,说明利用本被动采样技术富集大气 PAHs 和主动采样技术能达到基本一致的效果。

(4)探讨了采样高度对被动采集 PAHs 的影响,发现大气中总 PAHs 随距地面高度的增加浓度增大,其中气相 PAHs 随地面高度的增加浓度增大,颗粒相 PAHs 随地面高度的增加浓度减小。

参考文献:

- [1] 刘敏,许世远. 长江口潮滩 POPs 环境生物地球化学过程与生态风险[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [2] Neff J M. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the aquatic environment[M]. London: Applied Science Publishers, 1982. 385-409.
- [3] Wheatley L, Levendis Y A, Vouros P. Exploratory study on the combustion and PAH emissions of selected municipal waste plastics[J]. Environmental Science and Technology, 1993, 27 (13): 2885-2893.
- [4] 祁明峰. 燃烧过程中多环芳烃的生成与数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [5] Sawicki E, Elbert W C, Hauser T R, et al. Benzo (a) pyrene content of the air of American communities [J]. American Industrial Hygiene Association Journal, 1960, 21(6): 443-451.
- [6] Buehler S S, Basu I, Hites R A. A comparison of PAH, PCB, and pesticide concentrations in air at two rural sites on Lake Superior[J]. Environmental Science and Technology, 2001, 35 (12): 2417-2422.
- [7] Coleman P J, Lee R G M, Aleoek R E, et al. Observations on PAH, PCB, and PCDD/F trends in U. K. urban air, 1991-1995[J]. Environmental Science and Technology, 1997, 31 (7): 2120-2124.
- [8] Ngabe B, Poissant L. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the air

- in the St. Lawrence Basin (Québec) [J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, **37**(10): 2094-2099.
- [9] 李军, 张干, 祁士华. 广州市大气中多环芳烃分布特征、季节变化及其影响因素[J]. *环境科学*, 2004, **25**(3): 7-13.
- [10] Wang W T, Simonich S L M, Wang W, *et al.* Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations and gas/particle partitioning at background, rural village and urban sites in the North China Plain[J]. *Atmospheric Research*, 2011, **99**(2): 197-206.
- [11] Pozzoli L, Gilardoni S, Perrone M G, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere: monitoring, sources, sinks and fate. I: monitoring and sources [J]. *Journal of Analytical, Environmental, and Cultural Heritage Chemistry*, 2004, **94**(1-2): 17-33.
- [12] 刘向, 张干, 李军, 等. 利用 PUF 大气被动采样技术监测中国城市大气中的多环芳烃[J]. *环境科学*, 2007, **28**(1): 26-31.
- [13] Hamer T, Shoeib M, Diamond M, *et al.* Using passive air samplers to assess urban-rural trends for persistent organic pollutants. 1. Polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides[J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, **38**(17): 4474-4483.
- [14] Hwang H M, Wade T L, Sericano J L. Concentrations and source characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in pine needles from Korea, Mexico, and United States[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(16): 2259-2267.
- [15] Hamer T, Bartkow M, Holoubek I, *et al.* Passive air sampling for persistent organic pollutants: Introductory remarks to the special issue[J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**(2): 361-364.
- [16] US. EPA. Compendium Method TO-13A, Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Ambient Air Using Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS). 1999.
- [17] Peltonen K, Kuljukka T. Air sampling and analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Journal of Chromatography A*, 1995, **710**(1): 93-108.
- [18] Nishet J C T, LaGoy P K. Toxic equivalence factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1992, **16**(3): 290-300.
- [19] Chen S C, Liao C M. Health risk assessment on human exposed to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons pollution sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **366**(1): 112-123.
- [20] Sauvain J J, Duc T V, Guillemin M. Exposure to carcinogenic polycyclic aromatic compounds and health risk assessment for diesel-exhaust exposed workers [J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2003, **76**(6): 443-455.
- [21] 刘书臻. 环渤海西部地区大气中的 PAHs 污染[D]. 北京: 北京大学, 2008.
- [22] GB 3095-1996, 大气环境质量标准[S].
- [23] 杨萍. 东北地区松针中多环芳烃的污染水平与特征[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [24] 刘国卿, 张干, 刘向, 等. 大气中多环芳烃(PAHs)在松针和 SPMD 上的分布[J]. *环境化学*, 2005, **24**(1): 81-85.
- [25] 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.
- [26] 王震. 辽宁地区土壤中多环芳烃的污染特征, 来源及致癌风险[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [27] 汤莉莉. 北京城市土壤中多环芳烃的污染研究[D]. 南京: 南京气象学院, 2004.

CONTENTS

Characteristics of Atmospheric NO ₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations	··· WANG Ying, LI Ling-jun, LIU Yang (3685)
Variation Analysis of Background Atmospheric Pollutants in North China During the Summer of 2008 to 2011	····· YANG Jun-yi, XIN Jin-yuan, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3693)
Characteristics of Atmospheric Pollutants in Cangzhou	····· WANG Yong-hong, HU Bo, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3705)
Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China	····· LI Yue-mei, PAN Yue-peng, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3712)
BTX Monitoring Nearby Main Road Traffic in Guangzhou	····· YE Cong-lei, XIE Pin-hua, QIN Min, <i>et al.</i> (3718)
Dynamic Road Vehicle Emission Inventory Simulation Study Based on Real Time Traffic Information	····· HUANG Cheng, LIU Juan, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (3725)
Emission Characteristics of a Diesel Car Fueled with Coal Based Fischer-Tropsch (F-T) Diesel and Fossil Diesel Blends	····· HU Zhi-yuan, CHENG Liang, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (3733)
Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary	····· YU Xiao-qing, YANG Jun, LIU Le-mian, <i>et al.</i> (3739)
Spatio-Temporal Distribution of TN and TP in Water and Evaluation of Eutrophic State of Lake Nansi	····· SHU Feng-yue, LIU Yu-pei, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (3748)
Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed	····· LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Heng-peng (3753)
Nitrogen and Phosphorus Composition in Urban Runoff from the New Development Area in Beijing	····· LI Li-qing, LÜ Shu-cong, ZHU Ren-xiao, <i>et al.</i> (3760)
Distribution and Sources of Arsenic in Yangzonghai Lake, China	····· ZHANG Yu-xi, XIANG Xiao-ping, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3768)
Occurrence of Fecal Indicator Bacteria in Urban Surface Water: A Case Study in Southern China	····· SUN Fu, SHA Jing, LIU Yan-hua (3778)
Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir	····· ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3787)
Construct of Yangtze-Huai River Rural Areas Ecological Drainage System and Its Retention Effect on Pollutants	····· SHAN Bao-qing, LI Nan, TANG Wen-zhong (3797)
Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems	····· WANG Zhong-qiong, ZHANG Rong-bin, CHEN Qing-hua, <i>et al.</i> (3804)
Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphor in Wastewater	····· WEI Ze-jun, XIE Jian-ping, HUANG Yu-ming (3812)
Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland	····· GAO Feng, YANG Zhao-hui, LI Chen, <i>et al.</i> (3820)
Degradation of β -Naphthol by Catalytic Wet Air Oxidation	····· LIU Jie, YU Chao-ying, ZHAO Pei-qing, <i>et al.</i> (3826)
Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Aqueous Solution by ZVI/EDDS/Air System	····· SUN Qian, ZHOU Hai-yan, CAO Meng-hua, <i>et al.</i> (3833)
Study on Photocatalytic Degradation of 1,2,3-Trichlorobenzene Using the Microwaved MWNTs/TiO ₂ Composite	····· SHI Zhou, ZHANG Qian, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3840)
Mechanism of Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using Biochar Promoted by Humic Acid	····· DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3847)
Research on the Treatment of Wastewater Containing PVA by Ozonation-Activated Sludge Process	····· XING Xiao-qiong, HUANG Cheng-lan, LIU Min, <i>et al.</i> (3854)
Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment	····· XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, <i>et al.</i> (3859)
Research of Input Water Ratio's Impact on the Quality of Effluent Water from Hydrolysis Reactor	····· LIANG Kang-qiang, XIONG Ya, QI Mao-rong, <i>et al.</i> (3868)
Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	····· HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin, <i>et al.</i> (3873)
National Survey of Urban Sewage Reuse in China	····· GUO Yu-jie, WANG Xue-chao, ZHOU Zhen-min (3881)
Sorption and Desorption of 17 α -Ethinyl Estradiol and 4- <i>n</i> -Nonylphenol in Soil	····· JIANG Lu, WANG Ji-hua, LI Jian-zhong, <i>et al.</i> (3885)
Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China	····· MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai (3893)
Effects of Soil Crusts on Surface Hydrology in the Semiarid Loess Hilly Area	····· WEI Wei, WEN Zhi, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3901)
Environmental Factors on Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China	····· KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, JIANG Zhong-cheng, <i>et al.</i> (3905)
Investigation on Mechanism of Pyrite Oxidation in Acidic Solutions	····· WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3916)
Monitoring of Water and Salt Transport in Silt and Sandy Soil During the Leaching Process	····· FU Teng-fei, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (3922)
Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging	····· FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3927)
Detecting the Cytotoxicities of Five Bisphenol A Analogues to the MCF-7 Human Breast Carcinoma Cell Line Through Different Endpoints	····· ZHANG Shuai-shuai, LIU Yan, LIU Shu-shen, <i>et al.</i> (3935)
Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai	····· CHEN Li-jing, WU Yan-fang, JING Yu-xiang, <i>et al.</i> (3941)
Isolation, Identification and Characterization of Halotolerant Petroleum-degrading Bacteria	····· WU Tao, XIE Wen-jun, YI Yan-li, <i>et al.</i> (3949)
Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10	····· CHEN Xiao-hua, WEI Gang, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (3956)
Isolation of Aerobic Degrading Strains for TBBPA and the Properties of Biodegradation	····· QIAN Yan-yuan, LIU Li-li, YU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3962)
Influences of Long-term Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Composition and Abundance of <i>nirS</i> -type Denitrifiers in Black Soil	····· YIN Chang, FAN Fen-liang, LI Zhao-jun, <i>et al.</i> (3967)
Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types	····· HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, <i>et al.</i> (3976)
Degradation of Carbendazim in Paddy Soil and the Influencing Factors	····· XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang (3983)
Effects of Sulphur Compounds on the Volatile Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash from the MSW and Sewage Sludge Co-combustion Plant During the Disposal Process with Higher Temperature	····· LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3990)
Low-temperature Thermal Treatment of Dioxin in Medical Waste Fly Ash Under Unert Atmosphere	····· JI Sha-sha, LI Xiao-dong, XU-Xu, <i>et al.</i> (3999)
Hourly Measurement on Aerosol NH ₃ and Gas NO _x Emission in the Rice Field	····· GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (4006)
Implementation of an Electronic Nose for Rapid Detection of Volatile Chloralkane and Chloroalkene	····· WEN Xiao-gang, LIU Rui, CAI Qiang, <i>et al.</i> (4012)
Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling	····· SUN Shao-ai, LI Yang, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (4018)
Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujiang Watershed	····· DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao (4025)
Difference of P Content in Different Area Substrate of Constructed Wetland	····· CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (4033)
Selective Detection of Viable Pathogenic Bacteria in Water Using Reverse Transcription Quantitative PCR	····· LIN Yi-wen, LI Dan, WU Shu-xu, <i>et al.</i> (4040)
Formation of Disinfection By-products; Temperature Effect and Kinetic Modeling	····· ZHANG Xiao-lu, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (4046)
A Novel Quantitative Approach to Study Dynamic Anaerobic Process at Micro Scale	····· ZHANG Zhong-liang, WU Jing, JIANG Jian-kai, <i>et al.</i> (4052)
Leaves of <i>Platanus orientalis</i> as the Carbon Source for Denitrification	····· XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, <i>et al.</i> (4057)
Isolation, Characterization of an Anthracene Degrading Bacterium <i>Martellella</i> sp. AD-3 and Cloning of Dioxygenase Gene	····· CUI Chang-zheng, FENG Tian-cai, YU Ya-qi, <i>et al.</i> (4062)

《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)

2012年11月15日 33卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 11 Nov. 15, 2012

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行