

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

**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

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序 ..... 陈卫平 (4069)  
再生水灌溉利用的生态风险研究进展 ..... 陈卫平, 张炜铃, 潘能, 焦文涛 (4070)  
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究 ..... 潘能, 侯振安, 陈卫平, 焦文涛, 彭驰, 刘文 (4081)  
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析 ..... 潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安 (4088)  
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响 ..... 赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4094)  
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响 ..... 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4100)  
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响 ..... 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4108)  
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究 ..... 赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4115)  
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟 ..... 王美娥, 陈卫平, 焦文涛 (4121)  
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究 ..... 王巧环, 陈卫平, 王效科, 任玉芬, 张烨 (4127)  
北京市再生水的公众认知度评估 ..... 张炜铃, 陈卫平, 焦文涛 (4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究 ..... 陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 高扬, 黄梦宇 (4141)  
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染来源研究 ..... 王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华, 楼晟荣, 乔利平 (4151)  
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究 ..... 张军科, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (4159)  
区域大气环境风险源识别与危险性评估 ..... 张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛 (4167)  
稻草烟尘中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素 ..... 刘刚, 孙丽娜, 李久海, 徐慧 (4173)  
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性 ..... 胡志远, 李金, 谭丕强, 楼狄明 (4181)  
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应 ..... 隆茜, 周菊珍, 孟颖, 达良俊 (4188)  
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征 ..... 杨平, 仝川, 何清华, 黄佳芳 (4194)  
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响 ..... 刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅 (4205)  
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异 ..... 孔祥胜, 祁士华, 孙寿, 黄保健 (4212)  
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究 ..... 马万里, 刘丽艳, 齐虹, 白杨, 刘吉敏, 陈忠林, 李一凡 (4220)  
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源 ..... 周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 吕金刚, 许世远, 潘琪 (4226)  
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源 ..... 周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 王璐, 许世远, 潘琪 (4237)  
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估 ..... 武江越, 刘征涛, 周俊丽, 高富 (4244)  
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究 ..... 裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华 (4251)  
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征 ..... 刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田 (4256)  
太原市市灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析 ..... 廖小平, 张彩香, 赵旭, 向青清, 李佳乐 (4263)  
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价 ..... 吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 周婕成, 韩景超 (4270)  
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价 ..... 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 贺蓓 (4276)  
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究 ..... 张伟, 张洪, 单保庆 (4284)  
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征 ..... 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟 (4291)  
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征 ..... 朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 王培震, 孔建龙, 张宁宁, 辛惠娟 (4300)  
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究 ..... 周露洪, 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 高华梅, 孙明波 (4307)  
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究 ..... 沈清清, 彭谦, 赖泳红, 纪开燕, 韩秀林 (4316)  
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为 ..... 肖萍, 肖峰, 赵锦辉, 秦潼, 王东升, 冯金荣, 许光 (4322)  
水体中甲基汞光化学降解特征研究 ..... 孙荣国, 毛雯, 马明, 张成, 王定勇 (4329)  
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究 ..... 李时银, 李小荣, 朱怡苹, 朱江鹏, 王国祥 (4335)  
酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究 ..... 陈超, 赵倩, 封莉, 张立秋 (4340)  
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究 ..... 王夏琳, 李睿华 (4346)  
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究 ..... 郭磊, 贾永刚, 付腾飞, 刘晓磊, 赵战坤 (4352)  
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究 ..... 谢杰, 王哲, 吴德意, 李春杰 (4361)  
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测 ..... 季军远, 邢雅娟, 郑平 (4367)  
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究 ..... 王振, 刘超翔, 李鹏宇, 董健, 刘琳, 朱葛夫 (4373)  
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氨水处理 ..... 庆承松, 鲍韬, 陈天虎, 陈冬, 谢晶晶 (4380)  
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究 ..... 钟晨宇, 叶杰旭, 李若愚, 陈胜, 孙德智 (4387)  
水平电场作用下活性污泥的脱水研究 ..... 季雪元, 王毅力, 冯晶 (4393)  
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中的降解的影响 ..... 宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋 (4400)  
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究 ..... 陈广银, 郑正, 常志州, 王海芹, 叶小梅 (4406)  
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为 ..... 王兴润, 农泽喜, 王琪 (4412)  
国家大气污染物排放标准体系研究 ..... 江梅, 张国宁, 张明慧, 邹兰, 魏玉霞, 任春 (4417)  
环境基准向环境标准转化的机制探讨 ..... 毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙 (4422)  
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析 ..... 傅国伟 (4428)  
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录 ..... (4434)  
《环境科学》征订启事(4099) 《环境科学》征稿简则(4166) 信息(4180, 4219, 4225, 4275) 专辑征稿通知(4172)

# 温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源

周婕成<sup>1</sup>, 毕春娟<sup>1</sup>, 陈振楼<sup>1\*</sup>, 王璐<sup>1</sup>, 许世远<sup>1</sup>, 潘琪<sup>2</sup>

(1. 华东师范大学资源与环境科学学院, 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241; 2. 上海市安装工程公司, 上海 200080)

**摘要:** 为研究城市河流河岸带土壤中多环芳烃(PAHs)的污染特征,于2010年8月沿温州九山外河和山下河河岸带采集了21个表层土壤样品,利用加速溶剂萃取仪(ASE)萃取,净化柱提取净化,使用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)分析了土壤中18种PAHs的含量。结果表明,温州九山外河和山下河河岸带表层土壤中PAHs含量范围为 $60.7 \sim 3\,871.3 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ,山下河河岸带土壤中 $\sum$ PAHs含量显著低于九山外河。两条河流河岸带土壤中的PAHs均以2、3环的低环为主,平均占到PAHs总量的62.47%~72.51%。与国内外其他研究地区土壤中PAHs含量相比,研究河段河岸带土壤中的PAHs处于中等污染水平,但有3个样品中BaP浓度远大于前苏联土壤标准,应引起足够重视。利用 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 和 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 比值法和主成分分析方法进行判源,温州城市河流河岸带土壤中的PAHs均表现出明显的燃烧源和石油源的综合来源特征。

**关键词:** 多环芳烃; 城市河流; 河岸带; 土壤; 污染特征; 污染来源

中图分类号: X131.3; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4237-07

## Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City

ZHOU Jie-cheng<sup>1</sup>, BI Chun-juan<sup>1</sup>, CHEN Zhen-lou<sup>1</sup>, WANG Lu<sup>1</sup>, XU Shi-yuan<sup>1</sup>, PAN Qi<sup>2</sup>

(1. Key laboratory of Geo-information Science, Ministry of Education, School of Resources and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Shanghai Installation Engineering Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

**Abstract:** Twenty one riparian soil samples along Jiushanwai River and Shanxia River of Wenzhou city were collected in August 2010 to investigate the pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). The samples were extracted by an accelerated solvent extractor (ASE), purified by a purification column and determined by GC-MS. Results showed that the total concentrations of PAHs in the riparian soils ranged from  $60.7 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  to  $3\,871.3 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , and the concentrations of  $\sum$ PAHs in soils along the Shanxia River were significantly lower than the levels along Jiushanwai River. The dominant compounds were 2 to 3 rings in the riparian soils along both rivers, which in average accounted for 62.47%-72.51% in  $\sum$ PAHs. Compared with the PAHs concentrations in soils of other areas in the world, the riparian soils of the studied rivers were moderately polluted by PAHs, but the concentrations of BaP in three soil samples were much higher than the soil standard value of the former Soviet Union, which should be paid more attention. Based on the ratios of  $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$  and  $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$  and principal component analysis results, PAHs in riparian soils of the studied rivers were mainly derived from both the petroleum and combustion.

**Key words:** PAHs; urban rivers; riparian; soils; pollution characteristic; source apportionment

PAHs是由2个或2个以上苯环(或者具有和苯环结构相同的5元环)以稠环形式相连的半挥发性有机化合物,是一类重要的持久性有机污染物,具有潜在的致癌、致畸、致突变的“三致”作用<sup>[1,2]</sup>和内分泌干扰作用<sup>[3]</sup>,对人类造成很大的健康威胁<sup>[4]</sup>。

研究表明,土壤是环境中PAHs的重要储库,环境中90%以上的PAHs都存在于土壤中<sup>[2]</sup>,PAHs可由大气沉降、污水灌溉、污泥和农药化肥的施用等多种途径进入到土壤中<sup>[1]</sup>。PAHs一旦进入土壤,就会被土壤中的有机质所吸附,引起土壤污染,并对人类健康构成威胁<sup>[4]</sup>。在工业发达国家,近100~150年以来,土壤尤其是城市地区的土壤中多环芳烃含量在不断增加<sup>[3]</sup>。土壤中的多环芳烃会通过挥

发、迁移以及食物链等进入大气、水体和生物等其他环境介质中,间接危害人体健康。美国环境保护署(USEPA)规定的16种优先控制多环芳烃(PAHs)中,有8种(BaA、Chr、BbF、BkF、BaP、IcdP、DahA、BghiP)为可疑致癌多环芳烃<sup>[5]</sup>。近年来,国内外陆续开展了关于土壤中多环芳烃的研究,分析了土壤中多环芳烃的含量和分布特征<sup>[3,6~12]</sup>。

收稿日期: 2012-02-13; 修订日期: 2012-07-02

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07317-006); 国家自然科学基金项目(40971259, 40701164); 上海市优秀学科带头人计划项目(10XD1401600); 上海市科委基础研究重点项目(10JC1404300)

作者简介: 周婕成(1985~),女,硕士研究生,主要研究方向为城市水资源与水环境, E-mail: bebecky@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: cjbi@geo.ecnu.edu.cn

并对多环芳烃的来源与迁移转化规律等进行了探讨<sup>[13~15]</sup>. 说明已有的研究主要是针对农田土壤和城市绿化带土壤等. 这里加上一部分河岸带土壤中 PAHs 研究的重要性, 并查阅国内外有无河岸带土壤的研究.

目前在我国有关城市黑臭河道河岸带土壤的 PAHs 文献还相对较少, 本研究重点分析了温州城市黑臭河道河岸带土壤中 PAHs 的污染特征及其来源, 以为城市黑臭河道河岸带整治提供一定科学依据.

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品采集

2010 年 8 月, 在温州 2 条黑臭河道九山外河和

山下河, 采集并分析了 21 个河岸带表层 20 cm 的土壤样品(图 1). 其中九山外河河段全长 1 500 m, 因河岸段一侧为狭窄型硬质岸段无绿化土壤, 所以采集分析九山外河一侧河岸带土壤, 每隔 200 m 采集土壤样品, 共采集分析土壤样品 8 个; 山下河河段全长 1 000 m, 平均每隔 200 m 采集土壤样品, 分别采集分析北岸土壤样品 7 个、南岸土壤样品 6 个.

### 1.2 样品处理

土壤样品采集后立即带回实验室冷冻, 经冷冻干燥机冻干后, 研磨过 60 目筛, 使用 ASE300 加速溶剂萃取仪(Dionex, 美国)进行萃取. 将 20 g 土壤样品、5 g 中性氧化铝和 2 g 铜粉充分混合后加入 34 mL 萃取池中提取净化. 萃取条件为丙酮/二氯

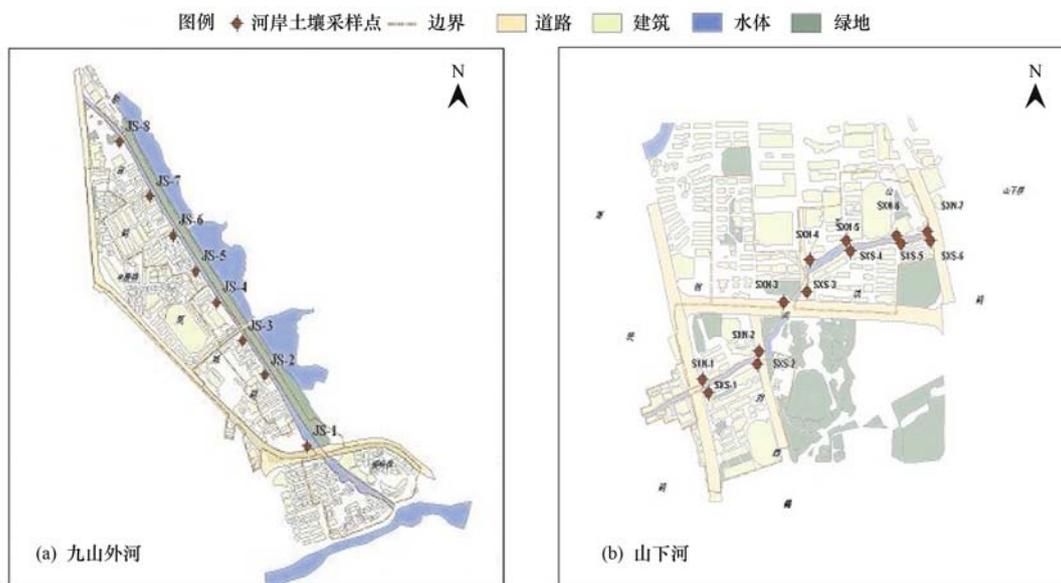


图 1 九山外河和山下河河岸带土壤采样点

Fig. 1 Sampling sites of riparian soils along Jiushanwai River and Shanxia River

甲烷(体积比为 1:1), 加热温度为 100℃, 萃取压力 10 342.14 KPa, 静态萃取循环次数 3 次, 溶剂快速冲洗样品体积比为 60%, 氮气吹扫收集提取液时间 60 s. 洗脱液使用 DryVap 全自动定量浓缩仪(LabTech, 美国)浓缩至约 2 mL 后, 过硅胶/氧化铝/无水硫酸钠净化柱净化. 层析柱填装自下至上依次是脱脂棉、石英砂、硅胶、中性氧化铝和无水硫酸钠, 硅胶/氧化铝体积比为 2:1. 先用 20 mL 正己烷洗脱烷烃组分, 弃去淋洗液. 随后用 70 mL 二氯甲烷/正己烷(体积比为 3:7)提取收集多环芳烃组分. 整个淋洗洗脱过程控制流速为 2 mL·min<sup>-1</sup>. 上述洗脱液用 DryVap 全自动定量浓缩仪浓缩至约 2~3 mL 体积后, 加入 15 mL 正己烷进行溶剂转换, 最后定量浓缩至 0.9 mL, 加入 0.1 mL 内标十氯联

苯后待 GC/MS 上机检测.

实验所用有机试剂(丙酮、二氯甲烷、正己烷)均为农残级, 购自 Merck(德国). 无水硫酸钠、中性氧化铝、石英砂、硅胶、铜粉均为分析纯, 购自国药集团. 脱脂棉购自 CNW 公司(美国). 石英砂、无水硫酸钠、中性氧化铝和脱脂棉经马弗炉 450℃ 灼烧 4 h 以去除杂质, 硅胶于 130℃ 条件下活化 13 h, 脱脂棉、铜粉均经二氯甲烷浸润. 实验所用玻璃仪器均经马弗炉 450℃ 灼烧, 冷却后并经有机试剂淋洗.

### 1.3 仪器分析

PAHs 含量测定采用配有自动进样器 CTC 的气相色谱-质谱联用仪(Agilent 7890A-5975C, 美国)测定, 色谱柱为 HP-5MS 石英毛细管柱(30 m × 0.25

mm × 0.25 μm). 色谱分析条件为进样量 1 μL, 不分流进样, 进样口温度为 300℃, 载气为高纯氮气 (99.999%). 升温程序为初始温度 80℃, 保持 1 min, 以 10℃·min<sup>-1</sup> 升温到 235℃, 再以 4℃·min<sup>-1</sup> 升温到 300℃, 保持 4 min, 总升温时间 36.75 min. 质谱条件为电子轰击 EI 离子源, 电子能量 70 eV, 离子源温度为 280℃, 四级杆温度为 150℃, 数据采集采用选择离子扫描 (SIM). 通过检索 NIST 质谱谱库和标准品色谱峰保留时间进行定性分析, 采用峰面积内标法、5 点校正曲线定量. 标样包括 18 种 PAHs (Supleco, 美国), 其中包含 EPA 优先控制的 16 种 PAHs, 分别为萘 (Nap)、1-甲基萘 (1MNap)、2-甲基萘 (2MNap)、蒽 (Acy)、二氢蒽 (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).

为保证实验数据的准确性和精确性, 实验全过

程进行质量保证/质量控制 (QA/QC). 实验以氘代 PAHs 作回收率指示物, 十氯联苯作为内标. 每 7 个样品增加一个实验室空白和一个平行空白. 土壤回收率指示物的回收率分别为 67.04% ~ 83.47%. 此外, 对每批样品加平行样, 对同一样品进行 8 次重复测试, 相对标准偏差 < 13.04%. 利用统计分析软件 SPSS 11.5 完成 PAHs 因子分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 河岸带土壤中 PAHs 含量和组成特征

温州河岸带土壤样品中 18 种 PAHs 含量的统计结果列于表 1. 九山外河河岸带土壤中 ∑ PAHs 含量范围为 207.14 ~ 3 871.26 ng·g<sup>-1</sup>, 平均值为 1 380.09 ng·g<sup>-1</sup>; 山下河河岸带土壤中 ∑ PAHs 含量显著低于九山外河, 在 60.71 ~ 894.76 ng·g<sup>-1</sup> 之间变化, 其中, 山下河北岸土壤中 ∑ PAHs 的含量又明显高于南岸土壤, 其平均值分别为 343.64 ng·g<sup>-1</sup> 和 234.99 ng·g<sup>-1</sup> (所列数据均为干重).

表 1 温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 含量<sup>1)</sup>/ng·g<sup>-1</sup> (干重)

Table 1 Concentrations of PAHs in riparian soils in urban rivers of Wenzhou city/ng·g<sup>-1</sup> (dry weight)

化合物	九山外河土壤		山下河北岸土壤		山下河南岸土壤	
	含量	平均值	含量	平均值	含量	平均值
Nap	30.55 ~ 264.18	95.99	ND ~ 81.11	26.93	4.89 ~ 57.95	24.53
2MNap	94.88 ~ 707.18	285.12	ND ~ 233.58	111.00	70.01 ~ 125.82	94.24
1MNap	40.08 ~ 292.44	120.07	2.72 ~ 98.87	46.98	28.80 ~ 53.05	41.15
Acy	ND ~ 9.75	3.40	ND ~ 1.64	0.23	ND ~ 2.21	0.56
Ace	ND ~ 19.17	6.11	ND ~ 3.32	1.31	ND ~ 3.57	0.83
Flo	2.24 ~ 51.53	16.46	ND ~ 8.61	3.56	ND ~ 7.54	3.64
Phe	6.00 ~ 451.34	136.23	2.35 ~ 54.60	18.70	3.88 ~ 20.81	11.67
Ant	5.33 ~ 46.46	23.51	ND ~ 14.02	5.27	3.80 ~ 19.94	11.21
Fla	3.83 ~ 586.96	174.63	1.48 ~ 83.86	25.49	4.00 ~ 17.47	10.42
Pyr	2.49 ~ 442.39	131.28	0.94 ~ 64.13	18.97	3.32 ~ 13.54	7.70
BaA	ND ~ 131.82	44.89	ND ~ 22.97	5.97	0.66 ~ 2.45	1.53
Chr	2.47 ~ 115.36	47.30	ND ~ 29.88	9.34	0.88 ~ 6.15	3.62
BbF	3.60 ~ 172.18	54.33	ND ~ 42.47	12.81	3.13 ~ 5.84	4.28
BkF	3.40 ~ 153.21	48.34	ND ~ 37.78	11.48	3.00 ~ 5.38	4.01
BaP	6.32 ~ 233.07	74.48	ND ~ 35.32	14.79	ND ~ 12.82	8.14
IcdP	ND ~ 65.44	15.23	ND ~ 42.62	11.91	ND ~ 4.77	0.80
DahA	ND ~ 18.78	6.63	ND ~ 5.89	2.98	ND	ND
BghiP	4.38 ~ 333.23	96.06	ND ~ 46.47	15.78	4.55 ~ 8.23	6.68
PAHs	207.14 ~ 3 871.26	1 380.09	60.71 ~ 894.76	343.64	169.29 ~ 346.11	234.99

1) ND: 未检出

温州河岸带土壤不同环数 PAHs 组成结构如图 2 所示. 九山外河河岸带土壤 PAHs 组成以 2、3 环的低环为主, 2、3 环比例在 39.35% ~ 88.14% 之间, 平均占 PAHs 总量的 62.47%, 4 环比例为 3.67% ~ 33.76%, 5、6 环比例为 5.02% ~ 26.59%, 4 环和 5、6

环分别平均占 PAHs 总量的 20.19% 和 17.34%. 山下河河岸带土壤 PAHs 也以 2、3 环的低环为主, 2、3 环比例在 9.23% ~ 95.99% 之间, 平均占 PAHs 总量的 72.51%, 4 环和 5、6 环分别平均占 PAHs 总量的 12.16% 和 15.33%.

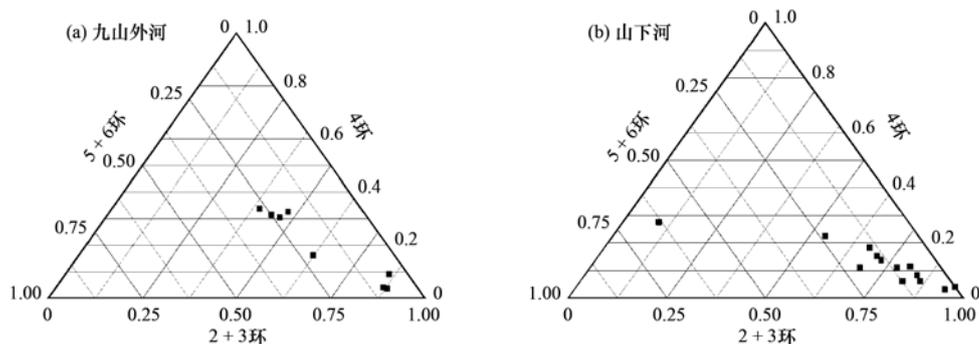


图 2 河岸带土壤中 PAHs 组成结构

Fig. 2 Composition of PAHs in riparian soils

## 2.2 河岸带土壤中 PAHs 污染水平

土壤中典型的内源性 PAHs 范围在  $1 \sim 10 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 它们主要来自植物的分解和自然火灾<sup>[18]</sup>. 本研究河段河岸带土壤中 PAHs 的含量均远高于背景值, 说明这些土壤均已受到人为因素的影响. 研

究河段河岸带土壤中 PAHs 含量范围为  $60.71 \sim 3871.26 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均值为  $707.44 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ . 与国内其他研究地区土壤中 PAHs 含量相比(见表 2), 温州黑臭河道河岸带土壤中 PAHs 含量基本处于中等污染水平.

表 2 本研究与其他地区土壤中 PAHs 含量对比/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ Table 2 Comparison of PAHs in soils of other reported regions/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 

研究区域	PAHs 种类	含量	平均值	文献
温州黑臭河道	18	60.71 ~ 3871.26	707.44	本研究
辽河流域	16	285 ~ 8347	2292	[17]
大清河流域	16	54.2 ~ 3231.6	405.1	[18]
天津	16	199 ~ 5190	839	[19]
汕头经济特区	16	22.1 ~ 1256.9	317.3	[20]
辽宁地区	15	192 ~ 4259	1000	[21]
珠江三角洲	16	31.5 ~ 791.6	279.1	[22]
北京城区	16	467 ~ 5470	1637	[23]
北京郊区	16	16 ~ 3884	464	[24]
长江三角洲	15	9 ~ 3881	397	[25]
香港	16	7 ~ 410	55	[26]
瑞士	16	50 ~ 619	225	[27]
法国塞纳河谷	14	450 ~ 5650	2510	[28]
美国 New Orleans 城区	16	647 ~ 40692	中值 3731	[29]
美国新奥尔良	16	906 ~ 7290	2930	[30]
美国郊区	16	527 ~ 3753	中值 731	[30]
泰国曼谷	20	12 ~ 380	130	[31]
英国	14	40 ~ 14100	976	[32]
日本 Tokushima	13	81 ~ 1640	479	[33]
巴西 Uberlandia	20	7 ~ 390	118	[34]

目前, 国际上尚无较为统一的 PAHs 土壤环境质量标准. 前苏联曾规定 BaP 在土壤中的最高允许浓度为  $20 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ <sup>[42]</sup>. 我国还未制定土壤 PAHs 的允许浓度, 只是规定农用污泥中 PAHs 的 BaP 最高的容许含量为  $3000 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  (GB 4284-84)<sup>[43,44]</sup>, 以及对工业企业生产活动造成的土壤污染危害进行风险评价的风险评价基准<sup>[45]</sup>. 荷兰的 PAHs 治理和评价标准较为完善, 制定了 10 种优控 PAHs 的土壤恢复标准<sup>[46]</sup>, 规定无污染土壤的 PAHs 值为  $20 \sim 50$

$\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$  (干重)<sup>[47]</sup>. 美国也制定了 13 种优控 PAHs 风险评价的风险浓度标准(见表 3)<sup>[48]</sup>.

与美国有关 PAHs 风险评价标准相比(表 3), 温州河岸带土壤中 BaA 和 BbF 最大值分别为  $131.82 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $172.18 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , BkF 最大值为  $153.21 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 均远低于标准中居住用土壤中 PAHs 风险浓度. 与前苏联标准相比, 本研究中有 7 个土壤样品中 BaP 含量超过标准, 且其中 3 个样品中 BaP 浓度远大于  $20 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 达到标准的 6 ~ 8 倍,

应引起足够重视. 与荷兰无污染土壤中 PAHs 的标准值相比,本研究土壤样中 PAHs 均超标,PAHs 最小值也达到  $60.71 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ,说明本研究区域土壤已受到明显污染.

表 3 美国部分土壤 PAHs 致癌性风险浓度标准/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

PAHs	居住用土壤	工业用土壤
BaA	870	3 900
BbF	870	3 900
BkF	8 700	39 000

### 2.3 河岸带土壤中 PAHs 的来源

PAHs 主要来自天然源和人为源. 天然源主要是森林和草原大火、火山喷发、植物和微生物的合成,其中高等植物和微生物的合成、火山活动是产生 PAHs 背景值的主要因子. 人为源来自工业生产和加工(如焦炭、碳黑和煤焦油的生产、原油及其衍生物的精炼和分馏等),以及有机物的不完全燃烧等过程. 与自然源相比,人为源是 PAHs 的主要产生源. PAHs 的来源又可划分为 3 种主要类型:石油成因、高温燃烧成因和生物成因. 其中石油和高温燃烧是主要的 PAHs 人为源,石油成因的 PAHs 与石油及煤产品的泄漏和散失有关,而生物成因基本

与天然源一致. 石油来源的 PAHs 以 2、3 环的低环为主,在 PAHs 总量中占到 50% 以上,而高温燃烧成因的 PAHs 以 4~6 环的中高环为主,同样在 PAHs 总量中占到 50% 以上,主要是在化石燃料和木材的燃烧过程中产生的<sup>[42]</sup>.

目前对于环境中 PAHs 来源的识别有很多方法,分子比值法是较常用的一种方法(见表 4). 由于本研究中 Ant、Phe、Fla 和 Pyr 检出量和检出率均较高,因此选用 Ant/(Ant + Phe) 和 Fla/(Fla + Pyr) 2 种比值对 PAHs 来源进行识别,这 2 种比值判源覆盖了燃烧、石油及石油燃烧 3 类 PAHs 污染来源. 如表 4 所示,如果 Ant/(Ant + Phe) < 0.1 和 Fla/(Fla + Pyr) < 0.4,说明 PAHs 主要是石油来源,如果 Ant/(Ant + Phe) > 0.1 和 Fla/(Fla + Pyr) > 0.4,说明 PAHs 主要是燃烧来源. 在燃烧来源的 PAHs 中,如果 Fla/(Fla + Pyr) 的比值介于 0.4~0.5 之间,说明 PAHs 主要来源于石油的燃烧;如果 Fla/(Fla + Pyr) 比值 > 0.5,则说明 PAHs 主要来源于煤和木材的燃烧. 九山外河和山下河河岸带土壤 PAHs 主成分分析结果均较为集中地显示出石油和燃烧两部分来源,说明河岸带土壤中的 PAHs 均来自石油和燃烧两类综合来源.

表 4 不同污染来源 PAHs 分子特征值

Table 4 Molecular ratios of different components of PAHs from different origins

污染源	Phe/Ant	Fla/Pyr	BaA/Chr	Ant/(Ant + Phe)	Fla/(Fla + Pyr)	BaA/(BaA + Chr)	IcdP/(IcdP + BghiP)
燃烧	<10	>1	>1	>0.1	>0.50	>0.35	>0.50
石油	>10	<1	<1	<0.1	<0.40	<0.20	<0.20
石油燃烧					0.40~0.50	0.20~0.35	0.20~0.50
九山外河土壤	1.03~9.89	1.26~1.54	ND~1.29	0.09~0.49	0.56~0.61	ND~0.56	ND~0.40
山下河土壤	ND~1.04	1.20~2.01	ND~1.15	ND~0.40	0.55~0.67	ND~0.54	ND~0.65

由河岸带土壤中 PAHs 的主成分分析结果(图 3)可知,九山外河河岸带土壤 PAHs 大致聚为两类,

除高环 DahA、IcdP、BbF、BkF 和小部分中低环 Chr 和 Acy 聚为一类外,其余 PAHs 均明显聚为一类. 山

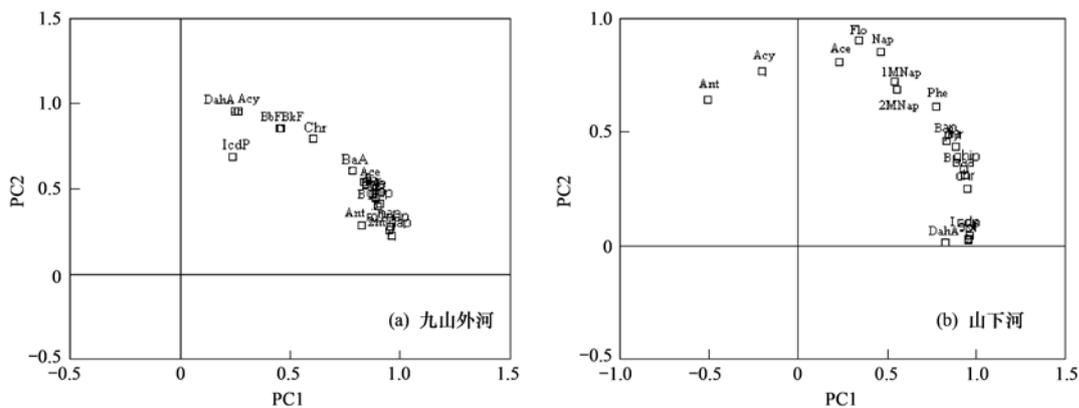


图 3 九山外河和山下河河岸带土壤中 PAHs 的主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis (PCA) for PAHs in riparian soils along Jiushanwai River and Shanxia River

下河河岸带土壤 PAHs 主成分分析较为分散,但也基本分为高环和中低环两类. 低环中较易挥发的 Nap、1MNap 和 2MNap 在环境中主要源于原油和原煤的燃烧<sup>[43~48]</sup>,中低环的 PAHs 如 Phe、Ant、Fla 及 Pyr 等主要表现出煤燃烧源的特征<sup>[49~51]</sup>,而中高环的 BbF、BkF、BaP 和 IcdP 等更多指示柴油燃烧的来源<sup>[52]</sup>. 在 EPA 优控的 16 种 PAHs 中,Phe 和 BghiP 可以指示交通燃油的排放特点<sup>[49]</sup>,Ace 和 Flo 可以指示焦炉的来源特征<sup>[53]</sup>. 因此,研究河段河岸带土壤中的 PAHs 均显示出中低环和中高环聚类的特征,表明中低环的燃煤等燃烧来源特征以及 BbF、BkF、BaP 和 IcdP 等中高环 PAHs 柴油、交通燃油等燃烧来源. 可见,温州城市河流河岸带土壤均表现出明显的燃烧源和石油源的综合来源特征.

### 3 结论

(1) 温州九山外河和山下河河岸带土壤中 PAHs 含量范围为  $60.71 \sim 3871.26 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ,PAHs 组成以 2、3 环的低环为主,基本处于中等污染水平. 与国内外的土壤环境质量标准比较,研究河段河岸带土壤中强致癌性的 BaP 含量较高,应引起足够重视.

(2) 由 Ant/(Ant + Phe) 和 Fla/(Fla + Pyr) 比值可知,温州河岸带土壤中 PAHs 较为集中地显示出石油和燃烧两部分来源,且是两部分来源的综合体现. 由 PAHs 的主成分分析结果可知,PAHs 基本分为中低环和中高环两类,显示出以中低环的燃煤等燃烧来源特征以及中高环的柴油、交通燃油等燃烧来源特征.

#### 参考文献:

- [1] 肖汝,汪群慧,杜晓明,等. 典型污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布特征[J]. 环境科学研究, 2006, **19**(6): 49-53.
- [2] 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.
- [3] Jones K C, Stratford J A, Waterhouse K S, et al. Organic contaminants in Welsh soils: polynuclear aromatic hydrocarbons [J]. Environmental Science and Technology, 1989, **23**(5): 540-550.
- [4] 程家丽,黄启飞,魏世强,等. 我国环境介质中多环芳烃的分布及其生态风险[J]. 环境工程学报, 2007, **1**(4): 138-144.
- [5] Menzie C A, Potoki B B, Santodomato J. Exposure to carcinogenic PAHs in the environment [J]. Environmental Science and Technology, 1992, **26**(7): 1278-1284.
- [6] 祁士华,张干,刘建华,等. 拉萨市城区大气和拉鲁湿地土壤中的多环芳烃[J]. 中国环境科学, 2003, **23**(4): 349-352.
- [7] 章海波,骆永明,黄铭洪,等. 香港土壤研究Ⅲ. 土壤中多环芳烃的含量及其来源初探[J]. 土壤学报, 2005, **42**(6): 936-941.
- [8] 葛成军,安琼,董元华. 钢铁工业区周边农业土壤中多环芳烃(PAHs)残留及评价[J]. 农业生态环境, 2005, **21**(21): 66-69.
- [9] 孙娜,卢晨刚,高翔,等. 青藏高原东部土壤中多环芳烃的污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 664-668.
- [10] Jensen H, Reimann C, Finne T E, et al. PAH concentrations and compositions in the top 2cm of forest soils along a 120 km long transect through agricultural areas, forests and the city of Oslo, Norway [J]. Environmental Pollution, 2007, **145**(3): 829-838.
- [11] Honda K, Mizukami M, Ueda Y, et al. Residue level of polycyclic aromatic hydrocarbons in Japanese paddy soils from 1959 to 2002 [J]. Chemosphere, 2007, **68**(9): 1763-1771.
- [12] Wu S P, Tao S, Xu F L, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in dustfall in Tianjin, China [J]. Science of the Total Environment, 2005, **345**(1-3): 115-126.
- [13] 潘根兴, Andres C C, Albert L P. 土壤-作物污染物迁移分配与食品安全的评价模型及其应用[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(7): 854-858.
- [14] 占新华,周立祥. 多环芳烃(PAHs)在土壤-植物系统中的环境行为[J]. 生态环境, 2003, **12**(4): 487-492.
- [15] 葛成军,俞花美. 多环芳烃在土壤中的环境行为研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2006, **14**(1): 162-165.
- [16] Edwards N T. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the terrestrial environmental review [J]. Journal of Environmental Quality, 1983, **12**(4): 427-441.
- [17] 宋雪英,孙丽娜,杨晓波,等. 辽河流域表层土壤多环芳烃污染现状初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(1): 216-220.
- [18] 赵健,周怀东,陆瑾,等. 大清河流域表层土壤中多环芳烃的污染特征及来源分析[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(7): 1452-1458.
- [19] 段永红,陶澍,王学军,等. 天津表土中多环芳烃含量的空间分布特征与来源[J]. 土壤学报, 2005, **42**(6): 942-947.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Ma L L, Chu S G, Wang X T, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soil from outskirts of Beijing, China [J]. Chemosphere, 2005, **58**(10): 1355-1363.
- [25] Ping L F, Luo Y M, Zhang H B, et al. Distribution of polycyclic

- aromatic hydrocarbons in thirty typical soil profiles in the Yangtze River Delta region, east China [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **147**(2): 358-365.
- [26] 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.
- [27] Bucheli T D, Blum F, Desaulles A, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons, black carbon and molecular markers in soils of Switzerland [J]. *Chemosphere*, 2004, **56**(11): 1061-1076.
- [28] Motelay-Massei A, Ollivon D, Garban B, *et al.* Distribution and spatial trends of PAHs and PCBs in soils in the Seine River basin, France [J]. *Chemosphere*, 2004, **55**(4): 555-565.
- [29] Saltiene Z, Brukstiene D, Ruzgite A, *et al.* Contamination of soil by Polyaromatic hydrocarbons in some urban areas [J]. *Polycycl Aromat Comp*, 2002, **22**(3): 23-35.
- [30] Mielke H W, Wang G D, Gonzales C R, *et al.* PAHs and metals in the soils of inner-city and suburban New Orleans, Louisiana, USA [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2004, **18**(3): 243-247.
- [31] Wilcke W, Müller S, Kanchanakool N, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in hydromorphic soils of the tropical metropolis Bangkok [J]. *Geoderma*, 1999, **91**(3-4): 297-309.
- [32] Heywood E, Wright J, Wienburg C L, *et al.* Factors influencing the national distribution of Polycyclic aromatic hydrocarbons and Polychlorinated biphenyls in British soils [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, **40**(24): 7629-7635.
- [33] Yang Y, Zhang X X, Korenaga T. Distribution of polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) in the soil of Tokushima, Japan [J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2002, **138**(1-4): 51-60.
- [34] Wilcke W, Lilienfein J, Lima S D C, *et al.* Contamination of highly weathered urban soils in Uberlandia, Brazil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1999, **162**(5): 539-548.
- [35] 张从, 夏立江, 陈光, 等. 污染土壤生物修复技术 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.
- [36] 孟范平, 吴方正. 土壤的 PAHs 污染及其生物治理技术进展 [J]. *土壤学进展*, 1995, **23**(1): 32-42.
- [37] 杨国义, 张天彬, 高淑涛, 等. 珠江三角洲典型区域农业土壤中多环芳烃的含量分布特征及其污染来源 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(10): 2350-2354.
- [38] 国家环境保护总局. 工业企业土壤环境质量风险评价基准 HJ/T25-1999 [R]. 1999.
- [39] 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其来源分析 [J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(10): 2111-2117.
- [40] 于国光, 张志恒, 叶雪珠, 等. 杭州市郊区表层土壤中的多环芳烃 [J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(3): 925-928.
- [41] Patterson J, Hakkinen P J, Wullenweber A E. Human health risk assessment: selected internet and world wide web resources [J]. *Toxicology*, 2002, **173**(1-2): 123-143.
- [42] Readman J W, Fillmann G, Tolosa I, *et al.* Petroleum and PAH contamination of the Black Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, **44**(1): 48-62.
- [43] Utvik T I R, Durell G S, Johnsen S. Determining produced water originating polycyclic aromatic hydrocarbons in North Sea waters: comparison of sampling techniques [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, **38**(11): 977-989.
- [44] Zakaria M P, Takada H, Tsubeumi S, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in rivers and estuaries in Malaysia; a widespread input of petrogenic PAHs [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, **36**(9): 1907-1918.
- [45] De Luca G, Furesi A, Leardi R, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons assessment in the sediments of the Proto Torres Harbor (Northern Sardinia, Italy) [J]. *Marine Chemistry*, 2004, **86**(1-2): 15-32.
- [46] Wang X C, Sun S, Ma H Q, *et al.* Sources and distribution of aliphatic and polyaromatic hydrocarbons in sediments of Jiaozhou Bay, Qingdao, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, **52**(2): 129-138.
- [47] Ye B X, Zhang Z H, Mao T. Pollution sources identification of polycyclic aromatic hydrocarbons of soils in Tianjin area, China [J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(4): 525-534.
- [48] Yang Y, Ligous B, Pies C, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in river floodplain soils: coal and coal-derived particles [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **151**: 121-129.
- [49] Harrison R M, Smith D J T, Lubana L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham. UK [J]. *Environmental Science and Technology*, 1996, **30**(3): 825-832.
- [50] Masclet P, Bresson M A, Mouvier G. Polycyclic aromatic hydrocarbons emitted by power stations, and influence of combustion conditions [J]. *Fuel*, 1987, **66**(4): 556-562.
- [51] Shimizu T, Ohkawara A, Nishihira J, *et al.* Assessment of PAH emissions as a function of coal combustion variables [J]. *Fuel*, 1996, **75**(13): 1533-1536.
- [52] Li C K, Kamens R M. The use of polycyclic aromatic hydrocarbons as source signatures in receptor modeling [J]. *Atmospheric Environment*, 1993, **27A**(4): 523-532.
- [53] Matt F S, Steven J E, Paul J L. 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.

## CONTENTS

Preface .....	CHEN Wei-ping (4069)
Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review .....	CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)
Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water .....	PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)
Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment .....	PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)
Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal .....	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)
Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model .....	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)
Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model .....	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)
Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water .....	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)
Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musks in Soils Input Through Recycle Water Irrigation .....	WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)
Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality .....	WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)
Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing .....	ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)
Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing .....	CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)
Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO .....	WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151)
Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station .....	ZHANG Jun-ke, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)
Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment .....	ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)
Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw .....	LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)
Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car .....	HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)
Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai .....	LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)
Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary .....	YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)
Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation .....	LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)
Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China .....	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)
Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season .....	MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City .....	ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City .....	ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River .....	WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)
Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site .....	PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)
Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China .....	LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)
Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City .....	LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai .....	LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)
Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China .....	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River .....	ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)
Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake .....	QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)
Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region; A Case Study of Baishui Glacier No. 1 .....	ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)
Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification .....	ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)
Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i> .....	SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)
A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process .....	XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)
Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body .....	SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)
Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent .....	LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)
Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors .....	CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)
Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS) .....	WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)
Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage .....	GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)
Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites .....	XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)
Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters .....	JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)
Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks .....	WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)
Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation .....	QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)
Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge .....	ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruo-yu, <i>et al.</i> (4387)
Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field .....	JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)
Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils .....	SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)
Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i> .....	CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)
Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste .....	WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)
Study on Emission Standard System of Air Pollutants .....	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)
Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China .....	BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)
Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals .....	FU Guo-wei (4428)

# 《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12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 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. 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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行