

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, 孙蓓, 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, 沈吉敏, 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)
太原市污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, 张建龙, 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氮水处理	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)	编辑征稿通知(4172)

辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估

武江越^{1,2}, 刘征涛^{2*}, 周俊丽², 高富²

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 中国环境科学研究院, 国家环境保护化学品生态效应与风险评估重点实验室, 北京 100012)

摘要: 采用 GC-MS 方法测定了辽河流域 19 个采样点位枯水期以及丰水期表层沉积物中多环芳烃 (PAHs) 的含量, 共检出 15 种 PAHs. 枯水期 $\sum$ PAHs 为 123.5 ~ 21 233.4 ng·g⁻¹, 平均含量为 3 208.1 ng·g⁻¹; 丰水期 $\sum$ PAHs 为 37.9 ~ 9 014.0 ng·g⁻¹, 平均含量为 1 612.0 ng·g⁻¹. 利用特征化合物指数法对 PAHs 进行源分析, 主要来源是燃料燃烧. 运用平均沉积物质量基准商 (mSQG-Q) 对辽河流域 PAHs 进行风险评价, 芴和芘存在中低度生态效应; 丰水期抚顺段 L3-1 有较强的负面效应, 枯水期沈阳段 L1-1 点位、抚顺段 L3-1 和 L3-2 有较强的负面效应.

关键词: 辽河; 表层沉积物; 多环芳烃; 平均沉积物质量基准商; 风险评价

中图分类号: X131.2; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4244-07

Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River

WU Jiang-yue^{1,2}, LIU Zheng-tao², ZHOU Jun-li², GAO Fu²

(1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Ecological Effect and Risk Assessment of Chemicals, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Nineteen surface sediment samples were collected from Liaohe River and analysed for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) with GC-MS. The concentrations of 15 detected PAH compounds ranged from 123.5 to 21 233.4 ng·g⁻¹ in dry season with the average concentration was 3 208.1 ng·g⁻¹; and were 37.9 to 9 014.0 ng·g⁻¹ in wet season with the average concentration was 1 612.0 ng·g⁻¹. The isomeric ratio method using characteristic compounds of PAHs for source analysis, and the main source was attributed to fuel combustion. Average commercial use of sediment quality benchmarks (mSQG-Q) on the PAHs risk assessment of Liaohe Basin was applied, fluorene and pyrene showed the potential of low-level ecological effects. In wet season, Fushun segment L3-1 points have a higher ecological risk. In dry season, Shenyang segment L1-1 point, Fushun segment L3-1 point and L3-2 point pose a strong negative effect.

Key words: Liaohe River; surface sediment; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); mean sediment quality guideline (m SQG-Q); risk assessment

广泛分布于环境中的多环芳烃 (PAHs) 是一类持久性有机污染物 (POPs)^[1], 具有潜在的毒性、致癌、致诱变作用和生物富集性, 可通过食物链进入生态系统, 进而影响人体健康^[2]. 在 20 世纪 80 年代初, 美国环境保护局 (USEPA) 把 16 种无支链的 PAHs 列入优先控制污染物名单 (EPA Priority Pollutant List)^[3]. 由于多环芳烃 (PAHs) 具有低溶解性和疏水性, 会强烈地分配到非水相, 特别是有机相中, 常常吸附于颗粒物上, 因此沉积物是其主要的环境归宿^[4]. 同时, 水体沉积物中的 PAHs 还可通过地球化学循环重新进入水体和大气中, 形成二次污染. 因此, 水体沉积物中 PAHs 污染已引起人们的广泛重视^[5].

辽河位于我国东北地区, 地处 40°31'N ~ 45°17'N, 116°54'E ~ 125°32'E 之间, 是东北地区重要的工矿业经济区, 在我国国民经济中占有重要的地

位^[6]. 然而, 由于工农业生产活动使辽河流域土壤受到有机污染物的严重污染. 研究多环芳烃在辽河沉积物中的分布及风险水平对于辽河的污染控制, 维持生态系统健康具有非常重要的理论和现实意义.

本研究通过对辽河表层沉积物的 PAHs 污染状况调查, 对比分析丰水期、枯水期 PAHs 含量, 探究 PAHs 分布特征及主要来源, 运用平均沉积物质量基准商 (m SQG-Q) 进行初步风险评价, 以期为综合治理辽河流域 PAHs 污染提供基础数据.

收稿日期: 2012-01-11; 修订日期: 2012-06-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07501-003)

作者简介: 武江越 (1987 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污染物风险评估, E-mail: wujiangyue2005@126.com

* 通讯联系人, E-mail: liuzt@craes.org.cn

1 材料与方法

1.1 样品采集

于 2010 年 5 ~ 12 月分别在辽河 ($40^{\circ}40'N \sim 42^{\circ}11'N, 121^{\circ}54'E \sim 123^{\circ}58'E$) 区域进行丰水期、枯水期 2 次大范围的表层沉积物采样调查. 主要选以大辽河为主, 上游选择: 抚顺-浑河-大伙房水库, 中游选择: 辽河沈阳段及辽阳-鞍山-太子河, 下游选择营口段或盘锦-河口, 共 8 个采样区 19 个采样点, 如图 1 所示. 采样点不完全针对城区排污口, 依照当地环保部分推荐点位进行野外采样, 并分别采集点位上游及下游样品进行分析, 丰水期采样时间为 2010 年 5 月中旬, 枯水期采样时间为 12 月份下旬, 采样深度 3 ~ 30 cm, 水体平稳无波浪.

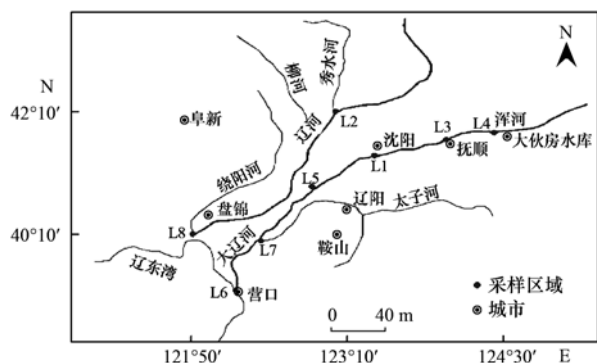


图 1 辽河采样分布示意

Fig. 1 Sampling sites in Liaohe River

1.2 仪器及材料

主要仪器为气相色谱-质谱联用仪, 型号为 Agilent 7890/5975c. 主要试剂为二氯甲烷、正己烷、丙酮等有机溶剂, 均为分析纯级并经全玻璃系统二次蒸馏. 半挥发性有机物标准样品 LB24244 浓度为 $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 购自美国 SUPLELCO 公司; 回收率指示标样为 5 种取代多环芳烃的混合物 (内含萘- D_{10} , 蒽- D_{12} , 菲- D_{12} , 菲- D_{10} 和 蔡- D_8), 购自美国 SUPLELCO 公司.

所有玻璃器皿均用铬酸洗液清洗后, 在马福炉 1000°C 中焙烧 48 h, 使用前用有机溶剂淋洗.

1.3 样品前处理

PAHs 样品前处理采用超声萃取法 (EPA3550B). 冷冻干燥沉积物样品, 研磨、过筛 (80 目), 充分混合后反复按四分法弃去过筛的沉积物样品, 留下足够的数量, 置于样品瓶密封 (4°C) 保存备用. 称取经筛分混匀的干样品 10 g, 加入回收率指示物标样及 $60 \text{ mL } V(\text{二氯甲烷})/V(\text{丙酮}) =$

2:1 的混合溶液, 同时加入活化铜片脱硫, 超声波振荡提取萃取沉积物 2 次 (每次 30 min). 提取液合并后, 加入无水硫酸钠除水, 经孔径 $0.45 \mu\text{m}$ 、型号为 BH7-92411493 聚四氟乙烯膜过滤后, 氮吹浓缩至 0.1 mL , 在色谱-质谱联机 (GC-MS) 上进行检测.

1.4 样品 PAHs GC-MS 分析条件

DB-5 石英毛细管柱 ($30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$); 升温程序, 初始温度为 50°C , 以 $8^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 300°C , 保持 5 min. 进样口温度: 300°C ; 传输线温度为 280°C ; 以氦气为载气, 柱流量 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 分流比为 10:1; 进样量为 $1 \mu\text{L}$; 全扫描工作模式, 扫描质量范围 $35 \sim 550 \text{ u}$; 每个工作日在分析样品前应先质质谱调谐标准物对 GC-MS 进行校正.

样品的定性: 根据特征离子和相对保留时间进行定性, 同时与质谱库 (NIST05a. L) 的标准质谱图进行比较, 其吻合度 $>90\%$.

样品的定量: 使用外标法多点 (5 点) 标准校准曲线进行定量分析; 用 3 个特征离子定量.

1.5 分析的质量控制和质量保证 (QA/QC)

在样品分析过程中, 增加 QA/QC 控制样品分析^[6] 所有分析样品均添加回收率指示物标样, 同时做空白样、平行样和加标空白样, 以控制分析流程的回收率. 指示物标样的回收率分别为: $84.56\% \pm 19.24\%$ (萘- D_{10})、 $81.89\% \pm 18.17\%$ (菲- D_{10})、 $88.93\% \pm 10.61\%$ (蒽- D_{12})、 $82.10\% \pm 13.63\%$ (菲- D_{12})、 $82.33\% \pm 15.56\%$ (蔡- D_8). 加标空白样品中 PAHs 单体的回收率范围为 $75.8\% \sim 110.1\%$. 实验空白检测较低, 不会对样品测定结果的准确度产生影响. 对 L2-1、L5-2、L8-1 采样点采集平行样进行平行测试, 相对标准偏差为 $0.04\% \sim 0.11\%$, 数据合理可信.

2 结果与讨论

2.1 PAHs 的组成和分布

2.1.1 PAHs 的浓度分布

本次共检测出 15 种优控 PAHs: 2-甲基蔡、蔡、芴、菲、蒽、荧蒽、芘、苯并(a)蒽、蒽、二氢萘、并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、茚并[1,2,3-cd]芘和苯并[g,h,i]芘.

辽河表层沉积物中 PAHs 的浓度分布见图 2, 可以看出辽河各河段 PAHs 污染水平差异较大. 其中 PAHs 最高值出现在沈阳 (L1-1), 抚顺 (L3-2) 次之, 辽河表层沉积物中 PAHs 的平均含量呈现沈阳 > 抚顺 > 营口 > 盘锦. 枯水期数据高于丰水期数据, 主要

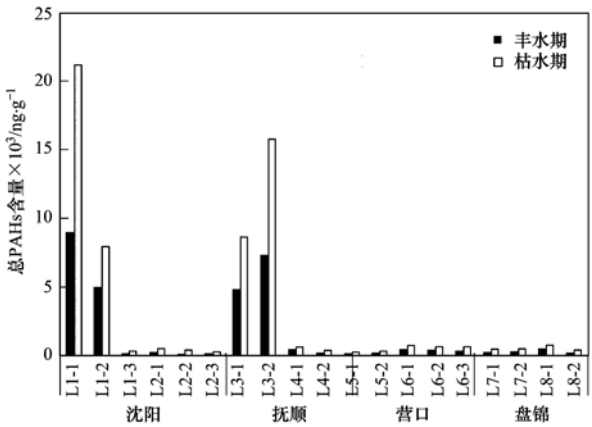


图2 各采样点的总PAHs浓度分布

Fig. 2 Concentration of total PAHs in the sampling sites

是由于辽河地区枯水期大量燃烧化石燃料导致的。

2.1.2 与其他地区的比较

不同的样品采集方式,不同的前处理方式都会

使数据结果产生偏差,选取国内外与本研究相似的文献进行比对分析. 丰水期 $\sum$ PAHs 为 $37.9 \sim 9\,014.0\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,平均浓度为 $1\,612.0\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 枯水期 $\sum$ PAHs 为 $123.5 \sim 21\,233.4\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,平均浓度为 $3\,208.1\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 表1 为与国内外其他地区报道值的比较,丰水期处于较低水平,高于白洋淀(平均 $353\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)、渤海(平均 $230.6\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)、亚得里亚海(平均 $333.9\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)等,低于珠江广州河段(平均 $7\,078\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)、意大利那不勒斯海港(平均 $3\,074\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$); 枯水期处于中度水平,高于北江(平均 $1\,071\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)、北黄海(平均 $423.5\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)、韩国海岸(平均 $820\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)等,低于珠江广州河段(平均 $7\,078\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)、西班牙桑坦德港口(平均 $49\,079.4\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$). 与国内其他关于辽河PAHs的报道值比较,本实验PAHs结果相对较低^[8,9].

表1 不同地区表层沉积物中PAHs的含量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 1 Summary of total PAHs in surface sediment from various areas/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

采样站位	PAHs 检出数/个	平均含量	$\sum$ PAHs 范围	文献
白洋淀	16	353	101.3 ~ 1 494.8	[10]
渤海	10	230.6	24.7 ~ 2 079.4	[11]
北江	16	1 071	38.2 ~ 6 470.0	[12]
珠江广州河段	16	7 078	4 787.5 ~ 8 665.0	[13]
北黄海	17	423.5	222.1 ~ 776.3	[14]
西班牙桑坦德港口	16	49 079.4	200 ~ 344 600	[15]
韩国海岸	24	820	12.4 ~ 21 510	[16]
利古里亚海	14	—	< 1 ~ 26 247	[17]
亚得里亚海	16	333.9	24.1 ~ 501.1	[18]
尼日尔三角洲	28	168	65 ~ 331	[19]
红树沼泽	15	1 142	356 ~ 11 098	[20]
意大利那不勒斯海港	17	3 074	9 ~ 31 774	[21]
辽河(丰水期)	15	1 612.0	37.9 ~ 9 014.0	本研究
辽河(枯水期)	15	3 208.1	123.5 ~ 21 233.4	本研究

2.1.3 PAHs 的组成特征

根据环数的不同,把本实验测得的PAHs分为2~3环、4环、5~6环做3项组分图. 由图3可见,辽河表层沉积物中的PAHs以4环(占13.8%~41.5%)、5+6环(37.3%~64.3%)PAHs为主. 丰水期中芴含量最高,平均含量为 $188.9\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,其次为菲、蒽、苯并(a)蒽; 枯水期中芴含量最高,平均含量为 $209.3\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,其次为苯并(a)蒽、菲、蒽. 环境介质中PAHs的来源比较复杂,石油类产品、化石燃料的不完全燃烧、石油相关产品的泄漏等是PAHs的人为来源^[22]. 通常,2~3环的低分子量PAHs来自于石油泄漏和石油类产品、化石燃料的中低温燃烧; 4~6环的高分子量PAHs来自类似化石燃料的高温热解.

2.2 特征化合物法分析PAHs的来源

本研究选用较为全面的14组枯水期数据进行PAHs来源分析. 母体PAHs同分异构体进入环境后有相似的分配行为,因此,经常使用一些来源不同的PAHs异构体的特征化合物比值作为示踪其来源的化学指标^[23]. 图4为枯水期芴(Flu)与芘(Pyr)的相关性分析,可以看出辽河表层沉积物中PAHs的Flu与Pyr之间相关性极为显著($r=0.976$, $P<0.00\,010$),适宜运用特征化合物指数法进行PAHs来源分析.

PAHs的轻重组分的比例常用于分析PAHs的可能来源,结合PAHs的特征化合物指数法分析 $\text{Flu}/\text{Pyr}>1$ (表2),这说明辽河表层沉积物中的PAHs主要来源是燃烧. 辽河水系周边尤其是沈阳、

表 3 PAHs 生态风险评价水平
Table 3 Ecological risk assessment level of PAHs

类别	生物效应水平			
	无负面效应	潜在效应	较强负面效应	强烈负面效应
SQG-Q	SQG-Q ≤ 0.1	SQG-Q < 0.5	0.5 ≤ SQG-Q ≤ 1.5	1.5 < SQG-Q
效应程度	无影响	中低度	中度	强烈

表 4 辽河表层沉积物中 PAHs 的 ERM-Q 值和 SQG-Q 值(丰水期/枯水期)¹⁾
Table 4 ERM-Q value and SQG-Q of PAHs in surface sediment from Liaohe River(wet season/dry season)

地点	采样点	2-甲基萘	萘	芴	菲	蒽	荧蒽
沈阳	ERM ^[26] /ng·g ⁻¹	670	2100	540	1 500	1 100	5 100
	L1-1	0.29/0.43	0.16/0.31	n. d./n. d.	0.31/0.52	0.17/0.28	0.51/0.78
	L1-2	0.14/0.30	0.09/0.17	n. d./n. d.	0.18/0.35	0.09/0.16	0.33/0.47
	L1-3	0.08/0.19	0.06/0.14	n. d./n. d.	0.08/0.18	n. d. ¹⁾ /n. d.	0.09/0.15
	L2-1	n. d./n. d.	0.06/0.11	n. d./n. d.	0.05/0.14	n. d./n. d.	n. d./n. d.
	L2-2	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.07/0.14
抚顺	L2-3	n. d./n. d.	0.05/0.15	n. d./n. d.	0.01/0.14	n. d./n. d.	0.05/0.11
	L3-1	0.49./0.73	0.16/0.31	0.14/0.35.	0.39/0.62	0.07/0.38	0.61/0.78
	L3-2	0.21./0.4	0.19/0.2	0.08/0.19	0.27/0.54	0.14/0.29	0.35/0.58
	L4-1	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.02/0.05	n. d./n. d.	n. d./n. d.
	L4-2	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.01/0.04	n. d./n. d.	n. d./n. d.
	L5-1	0.07/0.17	0.06/0.14	n. d./n. d.	0.06/0.16	n. d./n. d.	0.09/0.15
营口	L5-2	0.1/0.19	0.08/0.15	n. d./n. d.	0.07/0.17	n. d./n. d.	n. d./n. d.
	L6-1	0.09/0.19	0.06/0.14	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.1/0.16
	L6-2	0.08/0.18	0.05/0.13	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.09/0.15
	L6-3	0.07/0.20	0.06/0.14	n. d./n. d.	0.08/0.18	n. d./n. d.	n. d./n. d.
	L5-1	0.07/0.17	0.06/0.14	n. d./n. d.	0.06/0.16	n. d./n. d.	0.09/0.15
	L5-2	0.1/0.19	0.08/0.15	n. d./n. d.	0.07/0.17	n. d./n. d.	n. d./n. d.
盘锦	L6-1	0.09/0.19	0.06/0.14	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.1/0.16
	L6-2	0.08/0.18	0.05/0.13	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.09/0.15
	L6-3	0.07/0.20	0.06/0.14	n. d./n. d.	0.08/0.18	n. d./n. d.	n. d./n. d.
	L7-1	0.07/0.20	0.06/0.14	n. d./n. d.	0.08/0.18	n. d./n. d.	0.07/0.15
	L7-2	n. d./n. d.	0.06/0.13	n. d./n. d.	0.05/0.09	n. d./n. d.	0.08/0.16
	L8-1	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.09/0.15
沈阳	L8-2	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.05/0.13	0.08/0.17
	ERM ^[26] /ng·g ⁻¹	2 600	2 800	1 600	1 600	640	
	L1-1	0.51/0.79	0.35/0.54	0.34/0.55	0.33/0.49	0.12/0.23	0.48/0.61
	L1-2	0.32/0.49	0.20/0.41	0.19/0.36	0.07/0.18	0.2/0.43	0.32/0.46
	L1-3	0.08/0.15	n. d./n. d.	0.03/0.16	0.02/0.08	0.07/0.20	0.09/0.15
	L2-1	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.05/0.12
抚顺	L2-2	0.08/0.13	0.06/0.13.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.08/0.14
	L2-3	0.08/0.23	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.04/0.13
	L3-1	0.61/0.79	0.35/0.54	0.44/0.62	0.43/0.61	0.15/0.28	0.55/0.73
	L3-2	0.36/0.58	0.21/0.47	0.28/0.55	0.3/0.44	0.09/0.13	0.38/0.54
	L4-1	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.02/0.05
	L4-2	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.01/0.04
营口	L5-1	0.08/0.15	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.06/0.15
	L5-2	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.09/0.14
	L6-1	0.09/0.16	n. d./n. d.	0.04/0.15	0.03/0.09	0.06/0.21	0.09/0.15
	L6-2	0.08/0.15	n. d./n. d.	0.03/0.16	0.02/0.08	0.07/0.20	0.08/0.16
	L6-3	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.05/0.17	0.03/0.07	0.06/0.21	0.07/0.15
	L7-1	0.08/0.15	n. d./n. d.	0.03/0.16	0.02/0.08	0.07/0.20	0.06/0.14
盘锦	L7-2	0.08/0.16	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.08/0.12
	L8-1	0.08/0.15	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.01/0.09	0.06/0.14	0.05/0.13
	L8-2	0.08/0.16	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	n. d./n. d.	0.07/0.16

1) n. d. 为未检测

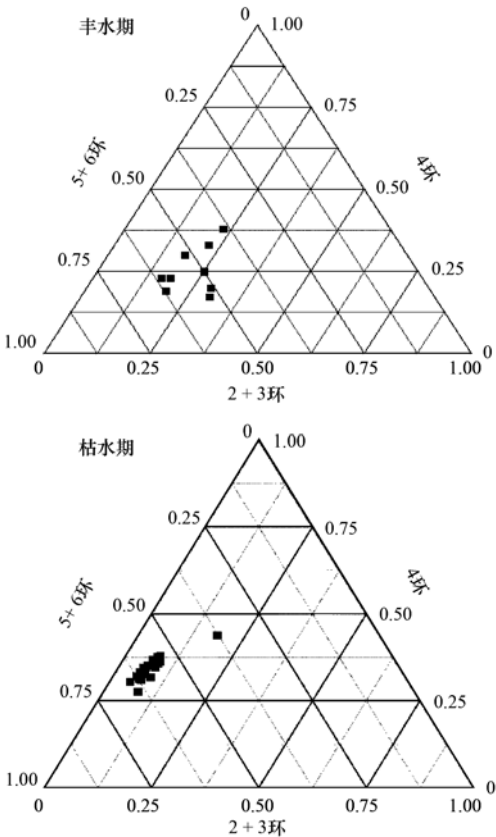


图3 15种优先PAHs丰水期、枯水期的各组分含量
Fig. 3 Relative concentrations for the 15 priority PAHs between wet season and dry season

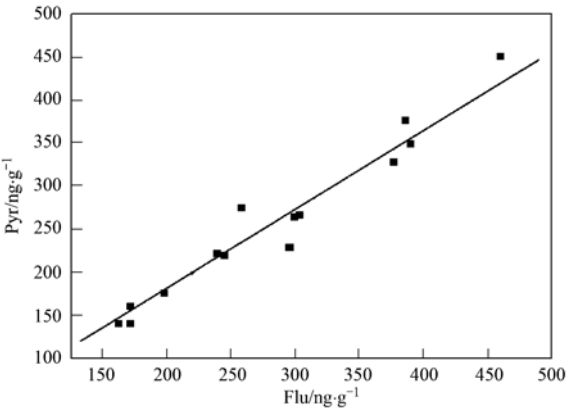


图4 枯水期荧蒽(Flu)与芘(Pyr)的相关性分析
Fig. 4 Correlation analysis between levels of Flu and Pyr

抚顺等均为老工业基地,拥有石油、化工、冶金等重工业,大量使用化石燃料作为能源动力。

2.3 辽河表层沉积物风险评价

我国目前还没有关于水体沉积物质量评价的基准,仅有少量关于如何建立水体沉积物环境质量评价基准的报道,如方涛等^[24]利用平衡分配法初步建立了长江水系沉积物重金属质量基准,但是缺乏生

表2 燃烧和石油来源 PAHs 的特征化合物指数¹⁾

Table 2 Characteristic values of selected molecular ratios for pyrolytic and petrogenic origins of PAHs

指数	燃烧来源	石油来源	本研究
菲/蒽	<10	>15	1.39~2.52
蒽/苯并[a]蒽	<1	>1	N. D. ~0.94
芴/芘	>1	<1	N. D. ~1.18
芴/(芴+芘)	>0.5	<0.5	0.4~1
LMW/HMW	低	高	0.11~0.32

1) LMW 为低环 PAHs; HMW 为高环 PAHs, N. D. 为无法测出

物效应的校正;王立新等^[25]以渤海锦州湾海洋沉积物为例,应用生物效应数据库法建立重金属质量基准,同时还对基准进行检验,结果显示,计算所得基准与定义的生物效应基本一致;而对于水体沉积物中有机污染物评价标准,目前国内还缺乏相应的研究。

Long 等^[26]曾在大量实验的基础上,对海洋和河口湾水体表层沉积物中 PAHs 进行分析研究,提出了风险评价效应区间低值 ERL 及风险评价效应中值 ERM。其中 ERL 值表示生物有害效应概率 <10%;ERM 值表示生物有害效应概率 >50%。当 PAHs 浓度低于 ERL 时,则产生的毒副作用不明显;当 PAHs 大于 ERM 时,可能会产生一定程度的负面生态效应;介于两者之间,只会偶尔产生负面效应;某些多环芳烃苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、茚并[1,2,3-cd]芘和苯并[g,h,i]芘没有最低安全值,只要存在于环境中就会产生毒副作用。

鉴于我国尚无水体沉积物风险评价的基准,因此本研究采用 Long 等^[26]提出的基于 SQG 的污染物生态风险评价指数法进行评价,也称之为平均沉积物质量基准商 mSQG-Q (mean sediment quality guideline)。有关公式见式(1)及式(2)^[27]。

$$SQG-Q = (\sum_{i=1}^n ERM - Q_i)/n \tag{1}$$

$$ERM-Q_i = \frac{c_i}{ERM_i} \tag{2}$$

式中,n 表示 PAHs 种类,c_i 表示某单一多环芳烃实际测量值,ERM-Q_i 表示某单一多环芳烃的 ERM 商,ERM_i 表示某单一多环芳烃的可能效应水平。

SQG-Q 按风险水平可分为 4 个级别,见表 3。

结合表 3 的评价标准、ERM 值、公式(1)及公式(2),对辽河沉积物中多环芳烃进行风险计算,评价结果参见表 4。

从表 4 可以看到,菲、蒽、苯并[a]蒽和芘对整个辽河流域均不存在负面生态效应,即不对当地水

环境沉积物中生物构成生态威胁。而单体芴和芘的 $m\text{ERM-Q}$ 值在所有可检测出的点位值均大于 0.5, 存在中低度生态效应。苯并[b]荧蒹、苯并[k]荧蒹没有最低安全值, 属于高环致癌性多环芳烃^[28], 只要存在于环境中, 就会对生物体产生健康威胁。而上述评价方法中需要用到的 ERM 值, 对于苯并[b]荧蒹及苯并[k]荧蒹而言, 则缺少相应的 ERM 值, 因此无法对其生物毒副作用的程度进行准确判断。

辽河流域 19 个采样点表层沉积物中 L4-1 和 L4-2 点位位于抚顺市大伙房水库, 是辽宁省第二大水库, 担负着为沈阳、抚顺城市供水的职责, 丰水期、枯水期均小于 0.1, 处于无影响水平。丰水期时仅抚顺段 L3-1 点位 SQG-Q 值大于 0.5, 有较强的负面效应, 其余点位均处于无影响和中低度风险水平; 枯水期时沈阳段 L1-1、抚顺段 L3-1 和 L3-2 点位 SQG-Q 值大于 0.5, 有较强的负面效应。当然, 不同化合物之间可能存在拮抗和促进作用, 因此本研究的风险评价结果只是针对部分野外采样的初步探究, 更为全面的风险评价结果还应进行长期深入的分析, 并加强对有机污染物的赋存形态及毒理的研究。

3 结论

(1) 对辽河流域 8 个采样区 19 个采样点位的表层沉积物样品中 PAHs 进行检测分析, 检测出 15 种 PAHs, 枯水期 $\sum\text{PAHs}$ 为 123.5 ~ 21 233.4 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均浓度为 3 208.1 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 丰水期 $\sum\text{PAHs}$ 为 37.9 ~ 9 014.0 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均浓度为 1 612.0 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。辽河表层沉积物中 PAHs 的平均含量呈现沈阳 > 抚顺 > 营口 > 盘锦。

(2) 通过特征化合物指数法分析, 可基本判断出辽河流域表层沉积物中 PAHs 主要来源于燃料燃烧, 且高环数的多环芳烃含量水平较高, 而低环数的多环芳烃含量水平相对较低。辽河流域表层沉积物检出的 15 种优控污染物中, 荧蒹和芘的 $m\text{ERM-Q}$ 值在所有可检点位值均 > 0.5, 存在中低度生态效应。

(3) 丰水期抚顺段 L3-1 点位 SQG-Q 值 > 0.5, 有较强的负面效应, 其余点位均处于无影响和中低度风险水平; 枯水期沈阳段 L1-1 点位、抚顺段 L3-1 和 L3-2 点位 SQG-Q 值 > 0.5, 有较强的负面效应, 其余点位均处于无影响和中低度风险水平。超标点位增加可能是由于东北地区冬季大量化石燃料燃烧导致, 为说明此原因还需进一步野外调查和论证说明。

参考文献:

- [1] 陈来国, 冉勇, 麦碧娴, 等. 广州周边菜地中多环芳烃的污染现状[J]. 环境化学, 2004, **23**(3): 341-344.
- [2] 杨建丽, 冯流, 周俊丽, 等. 淮河盱眙段柱状沉积物中 PAHs 分布及生态风险评估[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(4): 404-408.
- [3] Li G X, Xia X H, Yang Z F, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the middle and lower reaches of the Yellow River, China[J]. Environmental Pollution, 2006, **144**(3): 985-993.
- [4] Mai B X, Qi S H, Zeng E Y, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the coastal region off Macao, China: assessment of input sources and transport pathways using compositional analysis [J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(21): 4855-4863.
- [5] Shi Z, Tao S, Pan B, *et al.* Partitioning and source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons in rivers in Tianjin, China [J]. Environmental Pollution, 2007, **146**(2): 492-500.
- [6] 郭伟, 何孟常, 杨志峰, 等. 大辽河水系表层沉积物中石油烃和多环芳烃的分布及来源[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(5): 824-830.
- [7] 许士奋, 蒋新, 王连生, 等. 长江和辽河沉积物中的多环芳烃类污染物[J]. 中国环境科学, 2000, **20**(2): 128-131.
- [8] 刘楠楠, 陈鹏, 朱淑贞, 等. 辽河和太湖沉积物中 PAHs 和 OCPs 的分布特征及风险评估[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(2): 293-300.
- [9] 王浩正, 何孟尝, 林春野, 等. 松辽流域河流表层沉积物中有机氯农药的分布特征[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(7): 1523-1527.
- [10] 胡国成, 郭建阳, 罗孝俊, 等. 白洋淀表层沉积物中多环芳烃的含量、分布、来源及生态风险评估[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(3): 321-326.
- [11] 林秀梅, 刘文新, 陈江麟, 等. 渤海表层沉积物中多环芳烃的分布与生态风险评估[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(1): 70-75.
- [12] 许静, 任明忠, 杜国勇, 等. 北江表层沉积物中多环芳烃的分布与风险评估[J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3269-3275.
- [13] 杜娟, 吴宏海, 袁敏, 等. 珠江水体表层沉积物中 PAHs 的含量与来源研究[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(4): 766-770.
- [14] 李斌, 吴莹, 张经. 北黄海表层沉积物中多环芳烃的分布及其来源[J]. 中国环境科学, 2002, **22**(5): 429-432.
- [15] Viguri J, Verde J, Irabien A. Environmental assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments of the Santander Bay, Northern Spain[J]. Chemosphere, 2002, **48**(2): 157-165.
- [16] Yim U H, Hong S H, Shim W J. Distribution and characteristics of PAHs in sediments from the marine environment of Korea[J]. Chemosphere, 2007, **68**(1): 85-92.
- [17] Bertolotto R M, Ghioni F, Frignani M, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in surficial coastal sediments of the Ligurian Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, **46**(7): 907-913.
- [18] Magi E, Bianco R, Ianni C, *et al.* Distribution of polycyclic

- aromatic hydrocarbons in the sediments of the Adriatic Sea[J]. *Environmental Pollution*, 2002, **119**(1): 91-98.
- [19] Sojinu O S, Wang J Z, Sonibare O O, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments and soils from oil exploration areas of the Niger Delta, Nigeria[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, **174**(1-3): 641-647.
- [20] Gaspere L, Machiwa J F, Mdachi S J M, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) contamination of surface sediments and oysters from the inter-tidal areas of Dar es Salaam, Tanzania [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(1): 24-34.
- [21] Hyötylöinen T, Olkari A. The toxicity and concentrations of PAHs in creosote-contaminated lake sediment[J]. *Chemosphere*, 1999, **38**(5): 1135-1144.
- [22] 陈燕燕, 尹颖, 王晓蓉, 等. 太湖表层沉积物中 PAHs 和 PCBs 的分布及风险评价[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(2): 118-124.
- [23] Qiao M, Wang C X, Huang S B, *et al.* Composition, sources, and potential toxicological significance of PAHs in the surface sediments of the Meiliang Bay, Taihu Lake, China [J]. *Environment International*, 2006, **32**(1): 28-33.
- [24] 方涛, 徐小清. 应用平衡分配法建立长江水系沉积物金属相对质量基准[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, **16**(4): 525-531.
- [25] 王立新, 陈静生, 刘华民. 应用生物效应数据库法建立沉积物重金属质量基准的初步研究——以渤海锦州湾海洋沉积物为例[J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2004, **35**(4): 467-472.
- [26] Long E R, Macdonald D D, Smith S L, *et al.* Incidence of adverse biological effects with range of chemical concentrations in marine and estuarine sediments [J]. *Environmental Management*, 1995, **19**(1): 81-97.
- [27] Ingersoll C G, MacDonald D D, Wang N, *et al.* Predictions of sediment toxicity using consensus-based freshwater sediment quality guidelines[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, **41**(1): 8-21.
- [28] Witt G. Polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediment of the Baltic Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, **31**(4-12): 237-248.

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 Musk 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-he, 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 Ruoyu, <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