

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源	梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)
北京大气 PM _{2.5} 与惰性 SiO ₂ 的生物毒性比较	刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)
APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析	高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)
2000 ~ 2014 年北京市 SO ₂ 时空分布及一次污染过程分析	程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)
利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因	周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)
长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟	张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)
珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征	刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)
春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成	李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)
洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究	庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)
大辽河主要污染源营养盐输入特征	马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)
三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析	张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)
不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究	李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)
周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联	王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)
华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例	孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 袁瑞强 (4051)
某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征	崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)
乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征	贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)
青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征	梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)
多环芳烃在岩溶地下表层沉积物-水相的分配	蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)
降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析	江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)
重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力	任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)
三峡水库消落带植物汞的分布特征	梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)
物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响	王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)
超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果	魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)
载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7	王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)
TiO ₂ 降解迪美唑的动力学及活性物质分析	陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)
单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究	张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)
间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)
单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究	杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)
水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响	王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)
氨氮对 AOB 抑制的形态及规律	崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)
厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水	张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)
同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征	冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)
HCO ₃ ⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响	李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究	巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)
活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响	徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)
温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响	谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙西, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)
污染场地修复技术筛选方法及应用	白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)
基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析	杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)
大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价	张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)
缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响	李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)
不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响	兰木岭, 高明 (4252)
生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征	杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)
不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响	姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)
组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究	朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文骏, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)
水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响	王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)
大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估	王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)
覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构	邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)
阳极内添加阳离子交换树脂提升铝压“三合一”膜电极 MFC 性能	梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)
应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的茚和苯并茚	李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)
《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)	

大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估

王晓迪, 臧淑英*, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙

(哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江省普通高等学校地理环境遥感监测重点实验室, 哈尔滨 150025)

摘要: 2012年2~4月采集大庆湖泊群18个典型湖泊30个水体和36个鱼体样品, 并对水体和5种鱼组织(鱼鳃、肝脏、鱼脑、肾脏和肌肉)样品中16种多环芳烃(PAHs)浓度进行分析测定。结果显示, 水中PAHs总量为 $0.2 \sim 1.21 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 浓度最高值出现在月亮泡。利用统计学聚类分析方法对18个湖泊水体PAHs浓度进行分类, 并进一步应用PAHs比值分析和物种敏感性分布模型对不同湖泊组湖泊水体PAHs分别进行来源分析和生态风险评估。结果表明, 18个湖泊水体PAHs浓度统一聚类分成4个湖泊组, 其中月亮泡(YLP)和东大海(DDH)两个湖泊分别单独成一类, 其他14个湖泊被聚类分为XHH组和DQSK组两个湖泊组。湖泊水体中PAHs除了YLP组主要来自石油污染, 其他湖泊PAHs的输入均为木柴和煤燃烧所致。根据国际和国内地表水环境质量标准, 大庆湖泊群4个湖泊组水体PAHs浓度水平均有不同程度超标。其中YLP组和XHH组大部分水样中PAHs浓度超出美国环保署(US EPA)规定的16种PAHs限量值, 尤其YLP组中致癌性最强的苯并[a]芘浓度已经超过了我国地表水环境质量标准; 而DQSK组和DDH组也有少量几种PAHs超出水质标准。大庆湖泊群鲤鱼种和鲢鱼种5种组织器官内16种PAHs浓度检测结果及统计分析结果显示, 除鲤鱼鳃中的蒽浓度显著高于鲢鱼鳃, 其他15种PAHs在两类鱼种中无显著差异。而同鱼种不同组织器官中PAHs浓度存在明显差异性, 肝脏和肾脏作为污染物外源传播的主要器官, 其浓度明显高于肌肉、鳃和脑组织中PAHs的浓度, 是PAHs在鱼体内累积的重要器官。对水生生物的生态风险和淡水鱼消费健康风险评估结果显示, 4个典型湖泊组水体中PAHs对水生生物生态风险均较小, 鲤鱼和鲢鱼鱼肉消费也均无饮食健康风险。

关键词: 大庆湖泊群; 多环芳烃; 水体; 淡水鱼; 风险评估

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4291-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.11.046

Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes

WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying*, ZHANG Yu-hong, WANG Fan, YANG Xing, ZUO Yi-long

(Key Laboratory of Geographical Resources and Environmental Remote Sensing, College of Geographic Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

Abstract: The concentrations of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in 30 water samples and 5 tissues (gill, liver, brain, kidney and muscle) of 36 fishes which were collected from 18 typical lakes of the Daqing lakes group, China were measured between February and April 2012. The results of PAHs concentrations in the water showed that the range of total concentrations was $0.2 \sim 1.21 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ and the highest concentration was found in the Yueliangpao Lake. Clustering analysis of statistical method was used to classify the concentrations of PAHs in the water of 18 lakes, and PAHs source and evaluation of ecological risk in different lake groups were obtained respectively based on the analysis of PAHs ratio and the species sensitivity distributions method. The results of cluster analysis about PAHs concentrations in the water of 18 lakes showed that all the lakes were divided into 4 lake groups. Yueliangpao (YLP) and dongdahui (DDH) lakes were respectively divided into a separate group and the other 14 lakes were divided into two groups named XHH group and DQSK group. PAHs in the water of lakes were mainly from wood and coal burning except that the PAHs of the water in YLP group was caused by oil contamination. According to the surface water quality standard of the world and China, the concentrations of PAHs in the water of 4 lake groups all exceeded the standard variously. The PAHs concentrations of most water samples in YLP group and XHH group exceeded the 16 PAHs limit value of Environmental Protection Agency (US EPA) standard, especially, the concentration of Benz[a]pyrene with the strongest carcinogenicity of YLP group exceeded Chinese surface water quality standard. While in the DQSK lake group and the DDH lake group, several PAHs contaminations of water samples exceeded the standard. The tested and statistical results of 16 PAHs concentrations in 5 tissues of *Cyprinus carpio* and *Hypophthalmichthys molitrix* fish species in Daqing lakes showed the concentrations of anthracene in the gill tissue of *Cyprinus carpio* were significantly greater than those in the *Hypophthalmichthys molitrix*, while other 15 PAHs concentrations had no difference between the two species. Among the different tissues of *Hypophthalmichthys molitrix* or *Cyprinus carpio*, the concentrations of PAHs in the liver and kidney tissues which are the

收稿日期: 2015-04-30; 修订日期: 2015-07-09

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(ZD201308); 国家自然科学基金项目(41201183); 黑龙江省教育厅科技项目(12531209)

作者简介: 王晓迪(1984~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为自然地理, E-mail: yawayxd123@126.com

* 通讯联系人, E-mail: zsy6311@163.com

important tissues of PAHs accumulation were significantly greater than those in the muscle, gill and brain tissues of fish because of their pervasion ability of pollutants. The results of ecological risks of PAHs in water samples to different aquatic organism species and health risk of PAHs to human through the consumption of fish showed that low ecological risk to aquatic organism species and health risk of PAHs in the muscle of *Hypophthalmichthys molitrix* and *Cyprinus carpio* to human were observed in the 4 lake groups.

Key words: Daqing lakes; PAHs; water body; freshwater fish; risk assessment

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是一类广泛分布于空气、植物、动物、水体、土壤和沉积物等多种环境介质中的持久性有机污染物,其致癌性、致畸性、致突变性 3 种在环境中突出表现的毒害性已得到公认^[1~5]。近年来,随着石油工业和化学工业的不断发展,世界各地各类水体和水生生物都正在普遍受到 PAHs 不同程度的污染,其中包括海洋水体、河流水体、湖泊水体、地下水体等,直接影响了人类饮用水和食品的质量和安^[6~8]。因此 PAHs 的浓度分布、污染来源及生态风险评估已成为世界各国学者对持久性有毒污染物研究的热点和重点^[9~11]。

目前,欧洲北美等发达国家和地区研究学者对人口稠密的城区、河口湾、海湾及海岸带等地的近代沉积物、地表水及大气颗粒物等环境介质中 PAHs 展开了广泛的调查和研究,同时对水生生物及淡水鱼消费研究也逐渐展开^[12~15]。近年来,我国学者对水体表层沉积物中 PAHs 的分布特征及污染来源的研究也在不断地增加,现已开展了对大连湾、白洋淀、长江口、杭州湾、厦门港、太湖、南四湖、南海、珠江三角洲等一些典型污染区的调查分析^[16~19]。但我国目前对 PAHs 的污染研究仍然处在初级阶段,对水和沉积物中 PAHs 研究还主要集中在大江、大河及一些海湾和近海海域的水环境中,对大气颗粒物介质中 PAHs (主要是苯并芘污染物) 的监测也只有在部分城市中开展^[20~23]。而对北方内陆湖泊水体尤其是饮用水水源地水体中 PAHs 污染物的调查和研究较少^[1]。从已有研究内容上看我国还主要集中在 PAHs 污染浓度的测定和沉积物中的污染来源分析,而水体中 PAHs 对水生生物的毒性生态风险评估表现出明显不足,同时对鱼体组织中 PAHs 累积与消费风险更是鲜有研究。

黑龙江省大庆市是我国石油、石化工业为主的著名工业城市,也是百湖之城^[24]。本研究选取我国北方重要湖泊湿地群大庆湖泊群为对象,探讨我国北方典型湖泊群水体 PAHs 分布特征及其对水生生物的影响,弥补了 PAHs 在北方内陆湖泊水体尤其饮用水水源地水体研究的不足,同时评估了人类通过消费鱼肉带来的健康风险,给大庆这一特殊石油

城市 PAHs 污染状况及其水生生物安全性研究提供数据支持和水安全评价参考,也为我国的湖泊淡水鱼消费安全提供了可靠的科学依据和参考。此外,本研究水体采样季节选择了北方典型冬季结冰期,揭示了北方湖泊水体 PAHs 污染物的冬季污染特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大庆湖泊群位于中国黑龙江省松嫩平原北部、嫩江左岸(图 1)。其范围是东至安达,南以松花江为界,西至嫩江,北至齐齐哈尔、明水一带。湖区总面积约 18 580 km²,湖泊面积约 1 196.34 km²,湖泊率为 6.44%,是松嫩平原湖泊群中面积最大的湖泊群体。近年来,随着大庆油田的开发,湖泊群的环境发生了明显的变化,湖泊面积不断减小,水体中各种污染物明显增加。本研究样点湖泊主要选择在大庆市区和大庆周围县区的 18 个典型湖泊,其中主要包括大庆市区石油开采湖泊,城区湖泊,农田区湖泊和饮用水源湖泊等^[25]。

1.2 样品采集与指标测定

2012 年 2~4 月采集大庆湖泊群 18 个典型湖泊水体和鱼体样本,其中湖泊主要包括新华湖(XHH)、西大海(XDH)、东大海(DDH)、他拉红(TLH)、火烧黑(HSH)、喇嘛寺(LMS)、月饼泡(YBP)、龙虎泡(LHP)、赵家屯(ZJT)、中内泡(ZNP)、大庆水库(DQSK)、红旗水库(HQSK)、月亮泡(YLP)、南引水库(NYSK)、青肯泡(QKP)、库里泡(KLP)、克钦湖(KQH)、东升水库(DSSK)(图 1)。其中 LHP、DQSK 和 HQSK 这 3 个湖泊是为大庆市居民提供饮用水的水源地,其他湖泊分别分布在农田区、城区或工厂密集区。每个样点采集水样 5L,迅速存放并存满于清洗后的干净棕色玻璃瓶中,并立即将棕色玻璃瓶放入存有大量经冷冻后冰盒的保温箱中保持低温。湖泊的淡水鱼鱼种主要选择当地主要消费鱼种鲫鱼、鲤鱼和鲢鱼这 3 种(鲫鱼和鲤鱼同为中下层鱼,且饮食习惯与生活习惯相似,故本研究将其合并为鲤鱼组),采集后用现场湖水清洗干净,样品分类储存于准备好的锡箔纸包好

并做好标记后置于冰盒中冷藏, 所有样品在 3 ~ 5 h 内运输到实验室, 水体样本冷藏于 4℃ 低温环境中保存. 鱼体样品运回实验室后立即进行常规生物学测量, 并进行解剖处理, 处理所用的金属解剖刀和镊子均洗净, 蒸馏水洗涤鱼样, 去掉鱼皮, 用手术刀取出背部肌肉、肝脏、鱼鳃、肾脏和鱼脑这 5 个鱼体组织器官, 再将样品冲洗干净后以锡箔纸包装置于 -20℃ 下冷冻保存. 所有样本在 5 d 之内完成所有处理和测试.

样品预处理: 取每个水样 2 L, 添加替代物 (Nap-d8、Acy-d10、Chr-d12、Pyr-d12) 后经过 0.45 μm 微孔滤膜过滤 (微孔滤膜须事先用 1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸、重蒸水分别浸泡 12 h) 后通过固相微萃取装置 (AT-280, Thermo Fisher Scientific) 进行前处理. 水样用 SupelcleanLC-18 固相萃取小柱富集 (小柱富集前分别用 5 mL 二氯甲烷和乙酸乙酯清洗, 先后用 10 mL 甲醇和超纯水活化柱子). 加载水样调节真空度, 流速控制约为 5 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右, 水样抽干后, 用氮气吹萃取好的小柱约 20 min, 以 10 mL 二氯甲烷分 3 次洗脱每支小柱. 洗脱液在旋转蒸发仪 (RE-52 型) 上浓缩至 1 mL. 用 8 mL 正乙烷淋洗活化固相萃取柱 (SDVB, 6 mL, 500 mg), 再用 10 mL 正乙烷/二氯甲烷 (体积比为 1:1) 洗脱收集淋洗液, 氮气吹至约 1 mL, 添加内标化合物 (Phe-d10, 5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 并用甲醇定容至 1 mL 后封口冷藏待测.

鱼体组织样品分别匀浆、冷冻干燥机 (YC-3000) 冻干, 再用玛瑙研钵研磨粉碎, 过 100 目筛后准确称取一定质量的样品 (鱼肉取 5.0 g, 鱼体的其它器官为全部样品), 精确至 0.01 g, 加入 5.0 g 藻土添加替代物后搅拌均匀后置萃取池中, 使用 ASE300 加速溶剂萃取仪 (Thermo Fisher Scientific) 进行样品提取. 鱼组织提取条件: 溶剂为二氯甲烷: 正己烷 = 1:1; 温度: 100℃; 压力 1 500 psi; 静态: 5 min; 静态循环: 3 次; 吹扫体积: 60% 的池体积. 将提取液进行氮吹浓缩, 用环己烷进行溶剂转换, 浓缩至 1 mL. 使用 scientific 凝胶色谱仪 (美国, J2) 对浓缩后的提取液进行凝胶净化, 用溶剂 (环己烷: 乙酸乙酯 = 1:1) 将浓缩后的提取液定容至 5 mL, 净化条件为: 流动相为环己烷: 乙酸乙酯 (体积比) = 1:1; 流速: 5.0 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$; 填料: Bio-Beads S-X3; 收集时间: 8 ~ 17.5 min. 将流出液浓缩至 1 mL, 添加内标化合物并用正己烷定容至 1 mL 后冷藏待测.

仪器分析条件: PAHs 分析用气相色谱-质谱联用仪 (GC/MS, HP5890 II/HP5972) 进行定量测定分

析, 色谱柱为 DB-5MS 石英弹性毛细管色谱柱 (30 m $\times$ 0.32 mm $\times$ 0.25 μm). 色谱柱升温程序为: 初温 80℃, 保持 2 min, 以 6 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温到 290℃, 保持 5 min, 载气为高纯氮气, 流速为 1.0 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 进样口温度 280℃, 接口温度 280℃, 不分流进样, 进样时间为 1 min. 全扫描方式, 扫描范围 (m/z) 为 35 ~ 400; SIM 模式下对样品定量, 通过检索 NIST 质谱谱库和色谱峰保留时间进行定性分析, 采用内标峰面积法、6 点校正曲线定量. 对 16 种 PAHs 萘 (Nap)、萘 (Ace)、二氢萘 (Acy)、芴 (Fle)、菲 (Phe)、蒽 (An)、荧蒽 (Flu)、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)、二苯并[a, h]蒽 (DahA)、茚并[1,2,3-cd]芘 (InD)、苯并[g, h, i]芘 (BghiP) 进行定量分析. 拟合线性相关系数为 0.996 ~ 0.999.

质量控制与质量保证 QA/QC: 水中回收率替代物的回收率分别为: Nap-d8 102 ~ 118%, Acy-d10 83% ~ 98%, Chr-d12 87% ~ 95%, Pyr-d12 89% ~ 101%. 鱼样中回收率替代物的回收率分别为: Nap-d8 80 ~ 92%, Acy-d10 75% ~ 94%, Chr-d12 73% ~ 90%, Pyr-d12 78% ~ 96%. 加标回收率实验结果显示, 水体中 PAHs 回收率范围为 80.4% ~ 124.4%, 鱼样中 PAHs 回收率范围为 75% ~ 115.7%, 符合 US EPA 标准.

1.3 统计方法

SPSS(11.5) 软件聚类分析方法对大庆湖泊群 18 个典型湖泊进行分组. T 检验和方差分析方法分别对两组鱼种和同鱼种不同组织器官 PAHs 浓度进行差异性分析 ($P < 0.05$).

1.4 污染源辨别方法

不同污染源其特征 PAHs 比值有着不同的特点, 可用 PAHs 单个组分的相对浓度比值作为判别 PAHs 来源及输入途径的指标. Flu 和 Pyr 具有相似的环境过程, 由此两者的比例常常用来辨别 PAHs 的来源和环境过程^[26-27], 本研究采用 Flu/[Flu + Pyr] 和 InD/[InD + BghiP] 这 2 个系列的比值来判断 PAHs 的来源. Flu/[Flu + Pyr] 比值小于 0.4, 指示为石油污染源, 大于 0.5 则主要是木柴、煤燃烧来源, 位于 0.4 与 0.5 之间则为石油及其精炼产品的燃烧来源; InD/[InD + BghiP] 之比小于 0.2 表明主要是石油排放污染, 大于 0.5 则主要是木柴、煤燃烧污染, 介于两值之间为化石燃料燃烧污染^[28-30].

1.5 对水生生物的生态风险评估方法

应用物种敏感性分布 (species sensitivity distributions, SSD) 模型对各湖泊组水体 Ace、An、BaP、Flu、Fle、Nap、Phe、Pyr 这 8 种 PAHs 浓度对生物的潜在影响比例 PAF (potential affected fraction) 值进行计算, 比较不同湖泊组水体 PAHs 对淡水生物的生态风险. SSD 曲线模型是一种描述生态毒性和暴露数据的累积分布, 并用来评估对水生生物生态风险的模型, 其中模型中 PAF 代表在一定浓度下, 可能受到影响的物种所占全部物种的比例. 在当前研究中, 由以下 3 个方程可获得 Ace、An、BaP、Flu、Fle、Nap、Phe 和 Pyr 这 8 种 PAHs 对 3 种生物类别 (全部物种、脊椎动物和无

脊椎动物) 的 PAF 值, 其中, x 为环境浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), b 、 c 、 k (α 、 β 、 θ) 为函数的参数 (表 1). 而其他 8 种 PAHs 由于缺少参数数据无法进行毒性生态风险评估^[31].

Burr III 型函数的参数方程为:

$$F(x) = \frac{1}{[1 + (b/x)^c]^k} \quad (1)$$

当 k 趋于无穷大时, Burr III 分布可变化为 ReWeibull 分布:

$$F(x) = \exp(-\alpha/x^\beta) \quad (2)$$

当 c 趋于无穷大时, 可变化为 RePareto 分布:

$$F(x) = \left(\frac{x}{x_0}\right)^\theta, I\{x \leq x_0\} \quad (x_0, \theta > 0) \quad (3)$$

表 1 SSD 模型参数值

Table 1 SSD model parameters

项目	全部物种拟合曲线	函数参数及数值	脊椎动物拟合曲线	函数参数及数值	无脊椎动物拟合曲线	函数参数及数值
Ace	ReWeibull	$\alpha = 254.220$ $\beta = 0.790$	ReWeibull	$\alpha = 451.605$ $\beta = 1.844$	ReWeibull	$\alpha = 185.782$ $\beta = 0.780$
An	Burr III	$b = 204.144$ $c = 1.075$ $k = 0.329$			ReWeibull	$\alpha = 10.994$ $\beta = 0.877$
BaP	ReWeibull	$\alpha = 4.120$ $\beta = 0.437$				
Flu	Burr III	$b = 67.529$ $c = 0.801$ $k = 1.412$	ReWeibull	$\alpha = 71.807$ $\beta = 0.930$	ReWeibull	$\alpha = 51.563$ $\beta = 0.945$
Fle	Burr III	$b = 5652.548$ $c = 1.292$ $k = 0.445$			RePareto	$x_0 = 5986.667$ $\theta = 0.534$
Nap	Burr III	$b = 1560.085$ $c = 0.979$ $k = 2.708$		$b = 564.800$ $c = 0.810$ $k = 3.953$		$\alpha = 8124.511$ $\beta = 1.110$
Phe	Burr III	$b = 492.867$ $c = 0.845$ $k = 1.080$				$b = 8.154$ $c = 0.704$ $k = 12.634$
Pyr	Burr III	$b = 30.457$ $c = 0.406$ $k = 1.802$				$\alpha = 9.732$ $\beta = 0.651$

1.6 淡水鱼消费健康风险评估

应用健康风险评价模型估算日均摄入量 (estimated daily intake, EDI) 以反映 PAHs 对人体的危害程度, 是一种典型的健康风险评价方法, 能够定量评估 PAHs 对人体的影响^[32]. EDI 可按以下方程进行计算:

$$\text{EDI}_a = \frac{(c_i \times \text{IR}_d)}{\text{BW}} \quad (4)$$

$$\text{EDI}_m = \frac{(c_m \times \text{IR}_d)}{\text{BW}} \quad (5)$$

式中, EDI_a 代表每天摄入量 [$\text{ng}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$], c_i 为污染物平均含量 ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$), IR_d 为日均摄食量 2.5 g,

BW 为体重 (假定体重为 70 kg). EDI_m 代表每天最大摄入量, c_m 为污染物最大浓度 ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$). Nap、Acy、Fle、An、Flu 和 Pyr 的 RfD 值分别为 20、60、40、300、40 和 30 $\text{ng}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$. RfD 为可接受日摄入量, 从美国环保署综合风险信息系统 US EPA (IRIS) <http://www.epa.gov/iris/> 得到.

2 结果与讨论

2.1 大庆湖泊群水体 PAHs 浓度聚类分区及其污染特征

大庆湖泊群 18 个典型湖泊水体 PAHs 的定量

分析结果可见(表2), PAHs 总量浓度范围为 $0.2 \sim 1.21 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $0.41 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 其中浓度较高的为 Nap、Ace、Fle 和 Phe 等低环烃, 较低的为 DahA、BaP 和 InD 等高环烃. 湖泊群 PAHs 聚类分析结果显示 18 个典型湖泊被分成 4 个湖泊组, 其中湖泊 YLP 和湖泊 DDH 分别各成一类成为 YLP 组和 DDH 组; 而 XHH、XDH、NYSK、KLP、TLH、HSH、LMS 和 YBP 这 8 个湖泊被分成一组(XHH 组); LHP、QKP、DSSK、KQH、ZJT、ZNP、DQSK 和 HQSK 这 8 个湖泊被分成一类(DQSK 组)(图1). 从分类后的不同湖泊组地理位置可见, 同组湖泊大部分出现了明显的位置相邻性, XHH 组和 DQSK 组的湖泊分别聚集在大庆湖泊群的西南西北方向和东北方向. 18 个湖泊分组中, 只有 YLP、DDH 和 LHP 这 3 个湖泊区别于位置相邻性呈现了特殊的 PAHs 环境特征性分组, 原因可能是 YLP

地处石油开采基地其 PAHs 呈现出较高的浓度和特征; DDH 地处化工厂密集区域但作为水深不足 50 cm 靠降雨形成的水泡, 污染物聚集有其独特的发生过程; 而 LHP 则是因为其水源地特殊性而分组到与其它水源地一个湖泊组, 呈现了湖泊分区地域性与 PAHs 特征分布科学性相结合的可靠分组特征. 4 个湖泊组中 16 种 PAHs 浓度最高值均出现在 YLP 组和 XHH 组两个湖泊组, 除了 Ace、BbF、InD 和 BghiP 这 4 种 PAHs 浓度高值存在于 XHH 组中以外, 其他 12 种 PAHs 在 YLP 组中浓度明显高于其他 3 个湖泊组(表2). 而 16 种 PAHs 中除了 Nap 的最低值存在于 XHH 组以外, 其他最低值均存在于 DDH 组和 DQSK 湖泊组, 尤其是水源地湖泊组 DQSK 组. 可见 4 个湖泊组水体中 PAHs 污染严重程度总体呈现出 YLP 组 > XHH 组 > DDH 组 > DQSK 组.

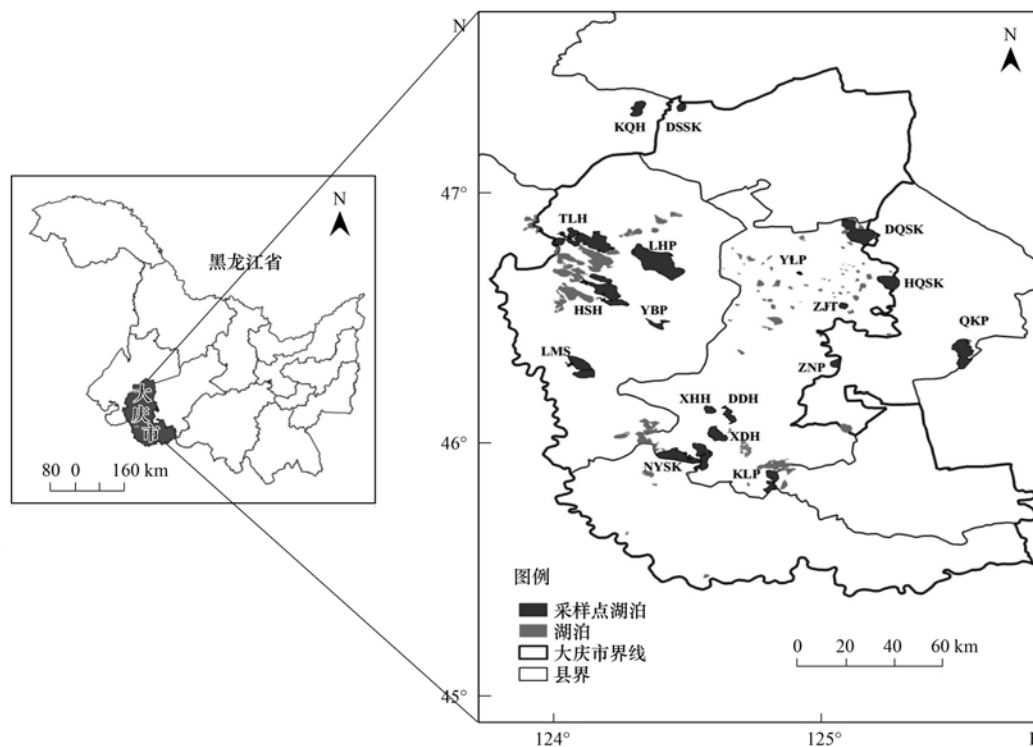


图1 黑龙江省大庆湖泊群采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in Daqing lakes Basin in Heilongjiang Province, China

2.2 大庆湖泊群水体 PAHs 组分分布特征与来源辨析

大庆湖泊群 4 个湖泊组不同环数 PAHs 所占总量的百分比(质量分数,下同)呈现大体相似的特征比例,均以 2~3 环低环为主,且所占比例之和均超过 80%(图2). 其中,DDH 组、DQSK 组和 YLP 组 2 环 PAHs 所占比例较高,分别为 76%,

73% 和 46%; 而 XHH 组则 3 环所占比例最高,占总量的 54%. 对于 5~6 环高环的 PAHs 在 4 个湖泊组中浓度均较低,尤其 DDH 和 DQSK 组所占比例均不超过 3%. 对于 PAHs 浓度相对较高的 YLP 和 XHH 两个湖泊组,不同环数所占比例分布相对比较均匀. PAHs 组分的差异可能是由于 PAHs 来源不同和环境过程不同引起的^[33~38].

表 2 大庆湖泊群和国内一些典型河流、湖泊水体 PAHs 浓度值及 PAHs 地表水环境质量标准值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Average PAHs concentrations in surface water collected from the Daqing lakes, some rivers and lakes in China and standards of surface water in the worldwide/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

浓度	Nap	Ace	Acy	Fle	Phe	An	Flu	Pyr	文献
XHH 组	0.121	0.147	0.028	0.024	0.032	0.003	0.012	0.009	本研究
DQSK 组	0.194	0.007	0.009	0.012	0.022	0.002	0.006	0.006	本研究
DDH 组	0.487	0.058	0.018	0.007	0.031	0.006	0.007	0.005	本研究
YLP 组	0.552	0.076	0.048	0.112	0.159	0.02	0.033	0.039	本研究
红枫湖	0.037	0.007	0.02	0.023	0.043	0.022	0.031	0.005	[26]
小白洋淀	ND	0.004	0.004	0.02	0.017	0.001	0.003	0.002	[25]
百花湖	0.049	0.028	0.026	0.006	0.261	0.025	0.026	0.02	[1]
白沙洲	0.065	ND	ND	ND	0.399	0.194	ND	ND	[27]
武汉关	0.109	0.262	1.196	0.492	0.193	ND	2.611	1.029	[27]
滦河水	0.002	ND	0.001	0.001	0.029	0.002	0.009	0.009	[24]
长江口岸	0.071	0.042	0.031	0.161	0.545	0.176	0.262	0.203	[23]
EPA 标准			1 200	1 300		9 600	300	960	[26]
中国国家地表水环境质量标准									[23]
爱尔兰(最大允许浓度)					2.0		0.5		[23]
加拿大(水质评价标准)	11.0				0.8	0.12			[23]
丹麦(水质评价标准)	1.0					0.01			[23]
奥斯罗和巴黎委员会(生态毒理标准)	1.0~10					0.005~0.05	0.005~0.5		[23]
浓度	BaA	Chr	BbF	BkF	BaP	InD	DahA	BghiP	文献
XHH 组	0.005	0.014	0.007	0.01	0.003	0.005	0.004	0.008	本研究
DQSK 组	0.001	0.004	0.001	0.002	0.000 5	0.000 2	0	0.000 7	本研究
DDH 组	0.000 4	0.003 2	0	0.015	0	0	0	0	本研究
YLP 组	0.01	0.054	0.004	0.024	0.003	0.001	0.07	0.006	本研究
红枫湖	0.006	0.016	0.008	0.005	0.003	0.011	0.004	0.017	[26]
小白洋淀	0.000 1	0.0004	ND	ND	ND	ND	ND	ND	[25]
百花湖	0.007	0.005	0.001	ND	0.003	0.006	ND	0.01	[1]
白沙洲	ND	ND	ND	ND	0.214	ND	ND	ND	[27]
武汉关	0.215	0.120	ND	ND	ND	ND	ND	ND	[27]
滦河水	0.016	0.011	ND	0.0007	ND	ND	ND	ND	[24]
长江口岸	0.063	0.084	0.015	0.013	0.011	0.01	0.000 3	0.011	[23]
EPA 标准	0.004 4	0.004 4	0.004 4	0.004 4	0.004 4	0.004 4	0.004 4		[26]
中国国家地表水环境质量标准					0.002 8				[23]
爱尔兰(最大允许浓度)	0.2			0.1	0.1			0.02	[23]
加拿大(水质评价标准)					0.008				[23]
丹麦(水质评价标准)									[23]
奥斯罗和巴黎委员会(生态毒理标准)					0.01~0.1				[23]

由表 3 可见,水样的 Flu/[Flu + Pyr] 比值为 0.385~0.599,除了 YLP 和 ZNP 湖以外大部分湖泊的 Flu/[Flu + Pyr] 比值均在 0.5~0.6 之间,可推测大庆湖泊群水体的 PAHs 污染主要为木材及煤燃烧所致. 湖泊 YLP 和 ZNP 比值分别为 0.457 和 0.385,揭示 YLP 污染源为石油及其炼油产品的燃烧,而 ZNP 的 PAHs 污染源则主要为石油排放污染. 同时, InD/[InD + BghiP] 比值为 NC(没有检测到某种组分而使比值无法计算)~1.022,结果同样指示 PAHs 的输入主要为木柴和煤燃烧所致. 综合考虑上述 2 个系列的比值,大庆湖泊群水体中 PAHs 主要来源于燃烧排放产物,包括木材、煤以及化石燃料的燃烧. 这是因为湖泊周围城镇居民的生活燃

气是煤和液化气,而木材和煤也是当地居民冬季取暖的主要燃烧源,另外周边的发电厂、化工厂等工业用户也均大量使用煤作为能源. 此外, YLP 湖泊水体还有一部分 PAHs 污染来源于石油类物质的排放,如湖内石油开采,以及周边化工厂的含油废水排放.

2.3 大庆湖泊群淡水鱼体内 PAHs 的浓度及分布特征

大庆湖泊群鲤鱼和鲢鱼 2 类鱼种(共计 36 条) 5 种组织器官内 16 种 PAHs 浓度检测结果及统计分析结果显示: 鲤鱼和鲢鱼两个鱼种只有鱼鳃中的 An 浓度有显著差异,且鲤鱼鳃中的 An 浓度显著高于鲢鱼鳃($P=0.02$),其他 15 种 PAHs 在两类鱼种

表 3 大庆湖泊群 18 个典型湖泊水体中 (Flu/Flu + Pyr) 和 (IP/IP + BghiP) 比值

Table 3 Ratio analysis of (Flu/Flu + Pyr) and (IP/IP + BghiP) in surface water from 18 typical lakes in Daqing lakes group									
PAHs 比值	YLP	XHH	XDH	NYSK	KLP	TLH	HSB	LMS	YBP
Flu/[Flu + Pyr]	0.457	0.579	0.552	0.577	0.542	0.558	0.592	0.587	0.582
InD/[InD + BghiP]	1.006	1.008	1.002	1.002	1.012	1.022	1.002	1.006	1.012
PAHs 比值	DDH	QKP	ZJT	ZNP	DQSK	HQSK	LHP	DSSK	KQH
Flu/[Flu + Pyr]	0.599	0.557	0.547	0.385	0.565	0.578	0.574	0.573	0.566
InD/[InD + BghiP]	NC	1	1.005	NC	NC	1	NC	NC	1

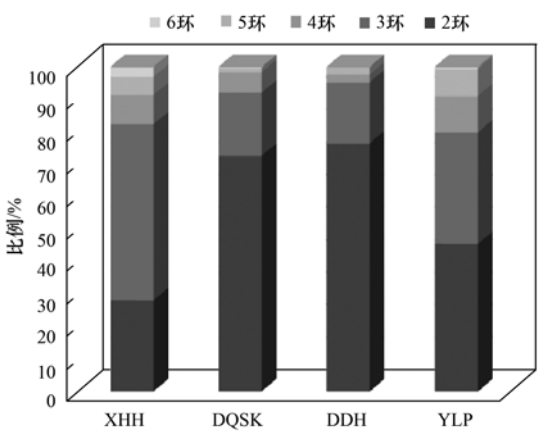


图 2 XHH 组、DQSK 组、DDH 组和 YLP 组不同环数 PAHs 烃所占组分比例

Fig. 2 Proportion of PAHs in surface water with different rings in XHH, DQSK, DDH and YLP lakes group

中均无显著差异(表 4)。同鱼种不同组织器官内 PAHs 浓度方差结果显示:鲤鱼组中 Ace、Acy、Pyr 和 BaA 有显著差异,且呈现出 Ace 在肾脏和脑组织中浓度明显高于鱼鳃中浓度,Acy 在肾脏累计显著高于鳃、脑和肌肉组织($P < 0.05$),而 Pyr 和 BaA 在肝中累计较高,明显高于其在脑、肌肉和鱼鳃中的浓度($P < 0.05$)。鲢鱼组内 Ace、Acy 浓度也呈现出显著差异,Ace 在肾脏中浓度显著高于脑、鳃和肝脏组织浓度,Acy 在肾脏和脑组织中浓度显著高于鱼鳃和肌肉组织中的浓度($P < 0.05$)。PAHs 在肾脏和肝脏两种鱼组织中浓度较高这一结果与国内外一些研究学者得出结果相似,这是由于肝脏与肾脏是鱼体外源污染物传播的主要聚集和排泄器官,易于有机物累积^[39~41]。

2.4 大庆湖泊群 PAHs 生态风险评估

2.4.1 与水质标准和典型参考水体进行比较

将大庆湖泊群 4 个湖泊组水体 PAHs 的浓度和 PAF 值与国际上现有 PAHs 水质标准、国内标准及其他水域 PAHs 污染状况相对比,发现大庆湖泊群水体 4 个湖泊组 Nap、Ace、Acy、Fle、Phe 和 Pyr 这 6 种 PAHs 无超标情况,而其他 10 种 PAHs 均有不同程度

高于国际标准的情况^[42](表 2)。DDH 组和 YLP 组 An 浓度分别超过丹麦水质标准和奥斯罗和巴黎委员会生态毒理评价标准;DQSK 组、DDH 组和 YLP 组 Flu 浓度均高于奥斯罗和巴黎委员会的生态毒理评价标准;而 YLP 组水体中致癌性最强的 BaP 浓度均值已明显超过了我国地表水环境质量标准。与美国环保署(US EPA)规定的 16 种优控 PAHs 相比,XHH 组和 YLP 组的 BaA、Chr、BbF、BkF 和 BghiP 均高于水质标准;XHH 组的 InD, YLP 组的 DahA 及 DDH 组的 BkF 也均有不同程度的超出 EPA 标准。其中 XHH 组和 YLP 组超标 PAHs 较多,分别有 6 种和 9 种 PAHs 超出国际和国内标准。

与国内几个典型湖泊、河流 PAHs 浓度对比,大庆湖泊群 4 个湖泊组 Nap 和 DahA 的浓度均高于参考的国内其他典型水域浓度;而 InD 和 BghiP 两种高环 PAHs 的浓度均低于参考的国内其他典型水域浓度;其他 PAHs 在 YLP 组和 XHH 组中具有相对较高的浓度并高于大部分的国内对比水体中 PAHs 浓度,而 DQSK 和 DDH 湖泊组水体 PAHs 浓度相对较低并低于大部分其他参考水体的浓度值^[42~46](表 2)。由此可见,大庆湖泊群 4 个典型湖泊组中 YLP 组和 XHH 组两组湖泊水体 PAHs 污染较重,而 DQSK 和 DDH 湖泊组水体 PAHs 污染较小。

2.4.2 大庆湖泊群水体 PAHs 对水生生物生态风险和淡水鱼消费健康风险评估

利用 SSD 曲线模型对 4 个特征类型湖泊组 PAHs 的平均聚集浓度进行 PAF 值计算以进一步进行生态风险评估,结果显示 4 个类型湖泊水体 PAHs 生态风险值均较低,未达到 5% 的阈值,其中 8 种 PAHs 中除了 An 以外的其他 PAHs 生态风险均小于 1%(表 5)。YLP 组和 DDH 组 An 的生态风险普遍高于其他湖泊组分别达到 3.84% 和 2.49%,而 XHH 和 DQSK 组 An 的水体生态风险相对较低分别为 1.97% 和 1.778%。结果表明几个典型湖泊组水体 PAHs 对水生生物生态风险均不明显,污染小,还不存在明显的急性生态风险。

表 4 大庆湖泊群鲤鱼和鲢鱼不同鱼组织器官中 PAHs 浓度¹⁾ (平均值 ± 标准误)/μg·kg⁻¹
Table 4 Concentrations (mean ± standard error) of PAHs in the tissues from *Cyprinus carpio* and *Hypophthalmichthys molitrix* in the Daqing lakes/μg·kg⁻¹

器官	Nap	Ace	Acy	Fle	Phe	An	Flu	Pyr
鲤肌	77.1 ± 20.2	1.6 ± 0.4 ^{ab}	1.0 ± 0.2 ^b	4.3 ± 1.2	11.0 ± 1.9	1.14 ± 0.28	1.24 ± 0.29	3.03 ± 0.52 ^b
鲤鳃	21.0 ± 9.6	0.5 ± 0.2 ^b	1.3 ± 0.4 ^b	2.7 ± 0.6	11.7 ± 2.5	2.99 ± 0.9A	1.41 ± 0.45	3.77 ± 1.03 ^b
鲤肝	112.1 ± 50.3	2.0 ± 1.1 ^{ab}	3.1 ± 0.8 ^{ab}	2.6 ± 0.9	9.5 ± 3.3	1.2 ± 1.2	2.93 ± 1.39	12.58 ± 2.8 ^a
鲤脑	60.0 ± 24.9	9.2 ± 8.0 ^a	2.7 ± 0.9 ^b	2.2 ± 0.9	4.1 ± 3.0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0 ^b
鲤肾	30.55 ± 15.2	9.1 ± 4.7 ^a	5.6 ± 2.5 ^a	2.8 ± 1.3	16.4 ± 4.9	0.49 ± 0.49	1.1 ± 0.79	2.3 ± 1.7 ^b
P ^a	0.055	0.023	0.003	0.613	0.29	0.075	0.134	0

器官	BaA	Chr	BbF	BkF	BaP	InD	DahA	BghiP	P ^b - An
鲤肌	1.14 ± 0.7 ^b	0.5 ± 0.13	0.22 ± 0.12	0.07 ± 0.07	0 ± 0	0.15 ± 0.15	0 ± 0		
鲤鳃	0.83 ± 0.47 ^b	1.61 ± 1.2	0.52 ± 0.45	0.05 ± 0.05	0.2 ± 0.2	0 ± 0	0 ± 0	0.02	
鲤肝	11.45 ± 8.2 ^a	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0			
鲤脑	0 ± 0 ^b	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0			
鲤肾	4.65 ± 4.65 ^{ab}	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0			
P ^a	0.036	0.615	0.777	0.921	0.739	0.789		0.739	

器官	Nap	Ace	Acy	Fle	Phe	An	Flu	Pyr
鲢肌	88.2 ± 51.2	0.8 ± 0.4 ^b	1.7 ± 0.8 ^b	4.0 ± 1.3	10.8 ± 3.3	0.79 ± 0.2	0.8 ± 0.27	2.1 ± 0.57
鲢鳃	47.3 ± 14.4	0.5 ± 0.3 ^b	1.2 ± 0.4 ^b	1.7 ± 0.4	7.1 ± 1.1	0.59 ± 0.1B	0.68 ± 0.2	2.2 ± 0.56
鲢肝	55.1 ± 14.6	6.7 ± 1.8 ^a	5.5 ± 1.4 ^{ab}	4.6 ± 1.5	5.7 ± 1.0	4.33 ± 1.81	2.29 ± 1.44	5.19 ± 2.53
鲢脑	135.4 ± 71.6	1.4 ± 1.4 ^b	7.5 ± 3.4 ^a	8.8 ± 4.3	17.8 ± 8.4	4.78 ± 4.78	0.95 ± 0.95	0.75 ± 0.75
鲢肾	238.6 ± 201	11.1 ± 5.2 ^a	10.1 ± 4.7 ^a	6.0 ± 4.3	16.5 ± 12	7.07 ± 4.8	1.95 ± 1.46	4.38 ± 1.97
P ^a	0.394	0	0.006	0.169	0.353	0.119	0.453	0.156

器官	BaA	Chr	BbF	BkF	BaP	InD	DahA	BghiP	P ^b - An
鲢肌	0.24 ± 0.09	0.43 ± 0.14	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	
鲢鳃	0.39 ± 0.16	0.51 ± 0.17	0.23 ± 0.23	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0.02
鲢肝	3.57 ± 1.51	1.69 ± 0.98	0.8 ± 0.8	0.98 ± 0.98	0.8 ± 0.8	0.85 ± 0.85	0.77 ± 0.77	0.8 ± 0.8	
鲢脑	8.39 ± 8.39	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	
鲢肾	1.02 ± 1.02	1.32 ± 1.32	1.42 ± 1.42	1.42 ± 1.42	1.1 ± 1.1	1.15 ± 1.15	1.05 ± 1.05	1.2 ± 1.2	
P ^a	0.167	0.249	0.349	0.257	0.266	0.264	0.264	0.245	

1) P^a 代表同鱼种中不同组织器官(肝脏、肌肉、鱼脑、鱼鳃和肾脏)PAHs 差异性用小写字母(a、b 和 c)表示(方差分析, $P < 0.05$), P^b - An 代表鲤鱼鳃和鲢鱼鳃 PAHs 显著性差异用大写字母(A 和 B)表示(T 检验, $P < 0.05$)

大庆湖泊群 18 个典型湖泊中淡水鱼消费健康风险评估结果显示: 16 种 PAHs 的 EDI 计算值中 Nap 的 EDI 值最高(图 3), 这一结果与其他研究学

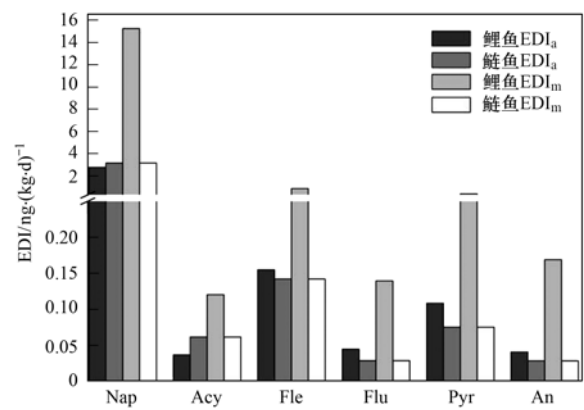


图 3 大庆湖泊群鲤鱼和鲢鱼鱼肉消费摄入 PAHs 的 EDI 值
Fig. 3 EDI of PAHs through the consumption of *Cyprinus carpio* and *Hypophthalmichthys molitrix* from Daqing lakes

者所得结果明显相似^[16]. 本研究区淡水鱼鲤鱼和鲢鱼种 PAHs 的 EDI 值明显低于中国长江和华北南四湖淡水鱼消费摄入量^[13,47]. 且大庆湖泊群鲤鱼和鲢鱼鱼肉消费 16 种 PAHs 的 EDIm 和 EDIa 值均明显低于消费参考剂量值 RfD (US, EPA Integrate Risk Information System). 评估结果表明, 目前就 PAHs 对人体健康的危害而言, 大庆湖泊群的淡水鱼鱼肉消费无明显饮食消费风险.

3 结论

(1) 大庆湖泊群 18 个典型湖泊水体统一聚类分成 4 个湖泊组, 分别为 YLP 组、XHH 组、DDH 组和 DQSK 组. 大部分湖泊分组依赖于地理位置分区, 只有 YLP 和 LHP 因其分别是石油开采湖泊和水源地而区别于地理位置分区, 呈现出明显的污染特征分区.

表 5 不同湖泊组水体中 PAHs 生态风险/%

Table 5 Ecological risks of PAHs in surface water from different lakes/%

湖泊组	XHH 组	DQSK 组	DDH 组	YLP 组	XHH 组	DQSK 组	DDH 组	YLP 组
PAF	Nap				Ace			
所有物种	1.28E-9	4.41E-9	5.09E-8	7.06E-8	0	0	0	0
脊椎动物	1.79E-10	8E-10	1.53E-8	2.26E-8	0	0	0	0
无脊椎动物	0	0	0	0	0	0	0	0
PAF	Fle				Phe			
所有物种	0.082	0.055	0.039	0.198	0.015	0.011	0.015	0.065
无脊椎动物	0.132	0.091	0.067	0.299	2.89E-20	1.11E-21	2.36E-20	2.81E-14
PAF	Flu				Pyr			
所有物种	5.4E-03	2.81E-03	3.13E-03	0.018	0.243	0.179	0.155	0.68
脊椎动物	0	0	0	0	—	—	—	—
无脊椎动物	0	0	0	0	2.49E-90	4.59E-120	5.19E-137	1.03E-33
PAF	BaP				An			
所有物种	2.84E-22	2.3E-46	—	4.98E-22	1.969	1.778	2.494	3.84
脊椎动物	—	—	—	—	—	—	—	—
无脊椎动物	—	—	—	—	0	0	0	1.99E-144

(2) 湖泊群水体 PAHs 污染来源分析表明 YLP 组污染源主要为石油类物质的输入和污染,其他湖泊水体 PAHs 的主要来源为木材、煤以及化石燃料的燃烧。

(3) 根据国际和国内地表水环境质量标准评估湖泊群不同湖泊组水体污染程度,显示 XHH 组和 YLP 组 PAHs 浓度高,超标较多,DQSK 组和 DDH 组 PAHs 超标较少。

(4) 湖泊群不同鱼种间 PAHs 累积结果显示鲤鱼鳃中的 An 浓度明显高于鲢鱼鳃中 An 浓度,此结果证实了生活在水体底层的杂食性鲤鱼种较生活在中上层的滤食性鲢鱼种更易于有机物的累积。相同鱼种不同组织器官中 PAHs 浓度也存在明显差异性,肝脏和肾脏作为污染物外源传播的主要器官,其 PAHs 的累积能力强于肌肉、鳃和脑组织中 PAHs 累积能力。

(5) 4 个典型湖泊组水体中 PAHs 对水生生物生态风险均不明显,不存在明显的急性生态风险。同时,大庆湖泊群淡水鱼鲤鱼和鲢鱼鱼肉消费摄入的 PAHs 明显低于参考剂量,不存在饮食消费风险。

致谢: 哈尔滨市环境监测中心协助完成多环芳烃样品测试,作者在此表示衷心的感谢。

参考文献:

[1] 曲明昕. 百花湖水体中持久性有机污染物——多环芳烃的污染初步研究[D]. 贵州: 贵州师范大学, 2006.

[2] Ma Y G, Cheng J P, Jiao F, *et al.* Distribution, sources, and potential risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in drinking water resources from Henan Province in middle of China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **146**(1-3): 127-138.

[3] Lv J P, Xu J, Guo C S, *et al.* Spatial and temporal distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface water from Liaohe River Basin, northeast China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(11): 7088-7096.

[4] Seegar W S, Yates M A, Doney G E, *et al.* Migrating tundra peregrine falcons accumulate polycyclic aromatic hydrocarbons along gulf of Mexico following deepwater horizon oil spill [J]. *Ecotoxicology*, 2015, **24**(5): 1102-1111.

[5] El-Saeid M H, Al-Turki A M, Nadeem M E A, *et al.* Photolysis degradation of polyaromatic hydrocarbons (PAHs) on surface sandy soil [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(13): 9603-9616.

[6] Cao Q M, Wang H, Qin J Q, *et al.* Partitioning of PAHs in pore water from mangrove wetlands in Shantou, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **111**: 42-47.

[7] 李昆, 王玲, 李兆华, 等. 丰水期洪湖水质空间变异特征及驱动力分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1285-1292.

[8] Dong W H, Lin X Y, Du S H, *et al.* Risk assessment of organic contamination in shallow groundwater around a leaching landfill site in Kaifeng, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(3): 2749-2756.

[9] Marrucci A, Marras B, Campisi S S, *et al.* Using SPMDs to monitor the seawater concentrations of PAHs and PCBs in marine protected areas (Western Mediterranean) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, **75**(1-2): 69-75.

[10] Li C H, Wong Y S, Wang H Y, *et al.* Anaerobic biodegradation of PAHs in mangrove sediment with amendment of NaHCO₃ [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **30**: 148-156.

[11] Chen R, Lv J G, Zhang W, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) pollution in agricultural soil in Tianjin, China: a spatio-temporal comparison study [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(3): 2743-2748.

[12] 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.

- [13] 张桂斋. 两类持久性有机污染物和重金属在南四湖食物链中的分布和生物积累[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [14] Mekonnen K N, Chandravanshi B S, Redi-Abshiro M, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of Akaki River, Lake Awassa, and Lake Ziway, Ethiopia[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**: 474.
- [15] Mandal S, Khuda N, Mian M R, *et al.* Analysis of ground and surface water samples from some area of Dhaka city for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)[J]. *Dhaka University Journal of Science*, 2015, **63**(1): 59-60.
- [16] 罗孝俊. 珠江三角洲河流、河口和邻近南海海域水体、沉积物中多环芳烃与有机氯农药研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2004.
- [17] Zhi H, Zhao Z H, Zhang L. The fate of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorine pesticides (OCPs) in water from Poyang Lake, the largest freshwater lake in China[J]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 1134-1140.
- [18] Dong J W, Xia X H, Wang M H, *et al.* Effect of water-sediment regulation of the Xiaolangdi Reservoir on the concentrations, bioavailability, and fluxes of PAHs in the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **527**: 101-112.
- [19] Zhao Z H, Zhang L, Deng J M, *et al.* The potential effects of phytoplankton on the occurrence of organochlorine pesticides (OCPs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in water from Lake Taihu, China[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2015, **17**(6): 1150-1156.
- [20] Zhang H L, Sun L N, Sun T H, *et al.* Spatial distribution and seasonal variation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminations in surface water from the Hun River, Northeast China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(2): 1451-1462.
- [21] Li Y L, Liu J L, Cao Z G, *et al.* Spatial distribution and health risk of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the water of the Luanhe River Basin, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **163**(1-4): 1-13.
- [22] 张健, 樊曙先, 孙玉, 等. 厦门春季 PM₁₀ 中 PAHs 成分谱特征及其与气象要素相关性分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1173-1181.
- [23] Bortey-Sam N, Ikenaka Y, Akoto O, *et al.* Levels, potential sources and human health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in particulate matter (PM₁₀) in Kumasi, Ghana[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(13): 9658-9667.
- [24] Wang X D, Zang S Y, Na X D. Analyzing dynamic process of land use change in Ha-Da-Qi industrial corridor of China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, **11** (Part B): 1008-1015.
- [25] Wang X D, Zang S Y. Distribution characteristics and ecological risk assessment of toxic heavy metals and metalloid in surface water of lakes in Daqing Heilongjiang province, China[J]. *Ecotoxicology*, 2014, **23**(4): 609-617.
- [26] 汪祖丞. 典型河口湿地/海湾多环芳烃多介质迁移机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
- [27] Zhang J D, Wang Y S, Cheng H, *et al.* Distribution and sources of the polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of the Pearl River estuary, China[J]. *Ecotoxicology*, 2015.
- [28] 邓伟. 南黄海、东海表层沉积物中脂肪烃与多环芳烃的分布特征及来源初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [29] 母清林, 方杰, 邵君波, 等. 长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 839-846.
- [30] Teng Y, Zhou Q X, Miao X Y, *et al.* Assessment of soil organic contamination in a typical petrochemical industry park in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(13): 10227-10234.
- [31] 刘良, 颜小品, 王印, 等. 应用物种敏感性分布评估多环芳烃对淡水生物的生态风险[J]. *生态毒理学报*, 2009, **4**(5): 647-654.
- [32] Conti G O, Copat C, Ledda C, *et al.* Evaluation of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in *Mullus barbatus* from Sicily channel and risk-based consumption limits[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, **88**(6): 946-950.
- [33] 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.
- [34] 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 等. 岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 855-861.
- [35] 李佳乐, 张彩香, 王焰新, 等. 太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 172-178.
- [36] Bayat J, Hashemi S H, Khoshbakht K, *et al.* Monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons on agricultural lands surrounding Tehran oil refinery[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**: 451.
- [37] Hsieh P C, Jen J F, Lee C L, *et al.* Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in environmental water samples by microwave-assisted headspace solid-phase microextraction[J]. *Environmental Engineering Science*, 2015, **32**(4): 301-309.
- [38] Botello A V, Soto L A, Ponce-Vélez G, *et al.* Baseline for PAHs and metals in NW gulf of Mexico related to the deepwater horizon oil spill[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, **156**: 124-133.
- [39] 林建清, 王新红, 洪华生. 养殖水体中多环芳烃污染对水产品安全的影响[J]. *食品科学*, 2006, **27**(12): 41-45.
- [40] 夏文迪. 多环芳烃(PAHs)人体内暴露剂量与致癌风险研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [41] van der Oost R, Beyer J, Vermeulen N P E. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review[J]. *Environmental Toxicology and*

- Pharmacology, 2003, 13(2): 57-149.
- [42] 欧冬妮. 长江口滨岸多环芳烃(PAHs)多相分布特征与源解析研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [43] 曹治国, 刘静玲, 栾芸, 等. 滦河流域多环芳烃的污染特征、风险评价与来源辨析[J]. 环境科学学报, 2010, 30(2): 246-253.
- [44] 朱樱, 吴文婧, 王军军, 等. 小白洋淀水-沉积物系统多环芳烃的分布、来源与生态风险[J]. 湖泊科学, 2009, 21(5): 637-646.
- [45] 罗世霞, 朱淮武, 张笑一, 等. 红枫湖地表水中多环芳烃的分布及来源[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(5): 466-470.
- [46] 冯承莲, 夏星辉, 周追, 等. 长江武汉段水体中多环芳烃的分布及来源分析[J]. 环境科学学报, 2007, 27(11): 1900-1908.
- [47] 王汨, 闫玉莲, 李建, 等. 长江朱杨江段和沱江富顺江段鱼类体内 16 种多环芳烃的含量[J]. 水生生物学报, 2013, 37(2): 358-366.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2014 年 9 月 26 日, 中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2013 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示 2013 年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分 76.6, 排名第一, 总被引频次 6 941, 影响因子 1.266.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系, 计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等), 采用层次分析法确定重要指标的权重, 分学科对每种期刊进行综合评定, 计算出每个期刊的综合评价总分. 这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异, 使科技期刊可以进行跨学科比较. 根据发布的统计结果, 2013 年度《环境科学》综合评价总分 76.6, 在被统计的 33 种环境科学技术及资源科学技术类期刊中名列第一.

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM _{2.5} from Beijing and Inert Particle SiO ₂	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC ...	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO ₂ and An Ambient SO ₂ Pollution Process in Beijing During 2000-2014	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer(SPAMS)	 ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China	 LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County	 KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Shi-hui, <i>et al.</i> (4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing	 REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO ₂	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O ₃ -BAC and Double O ₃ -BAC	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)
Effect of HCO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming	LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行