

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单	梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)
上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征	高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)
京津冀地区主要排放源减排对 PM _{2.5} 污染改善贡献评估	吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)
北京冬季 PM _{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析	乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)
2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析	路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)
利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染来源	刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)
南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析	迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)
喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性	张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)
生物滴滤塔净化含硫混合废气	叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)
西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析	房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)
城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力	秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)
三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征	王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)
隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素	赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)
白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析	王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)
唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价	吴婷婷, 王明猛, 陈旭峰, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)
三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征	邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)
电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)
九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险	林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)
厦门筼筮湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价	杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)
龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价	李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)
碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村高铁锰地下水效能与机制	孙楠, 湛燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)
高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势	张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)
预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验	杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)
Cu-Al ₂ O ₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物	徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)
过硫酸钾氧化去除 Cu(CN) ₂ 中的氰污染物	王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)
微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能	全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)
桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征	李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)
基于 A ² /O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)
污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)
全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性	齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)
饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响	李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曙 (1109)
快速启动厌氧氨氧化工艺	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)
一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式	完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)
侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响	马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)
厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究	陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)
有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响	戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)
过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制	白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)
不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果	董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)
全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤	杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)
纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应	衣俊, 程金平 (1173)
血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)
纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)
利用 <i>in vitro</i> 方法研究不同铁矿对土壤砷生物给性的影响	钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)
不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制	温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)
施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变	刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)
施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究	王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)
模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响	陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)
土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO ₂ 浓度和温度升高的响应	刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)
岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)
板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响	宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)
酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响	姜继超, 尧倩 (1272)
《环境科学》征稿简则 (1092)	
《环境科学》征订启事 (1158)	
信息 (1166, 1261, 1271)	

白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析

王乙震^{1,2}, 张俊¹, 周绪申¹, 孔凡青¹, 徐铭霞¹

(1. 海河流域水环境监测中心, 天津 300170; 2. 南开大学环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要: 为研究白洋淀表层水体中多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 和有机氯农药 (organochlorine pesticides, OCPs) 的季节性污染特征及来源, 分析了白洋淀 12 个监测断面春、夏两季表层水体中 17 种 PAHs 和 15 种 OCPs 的浓度。结果表明, 白洋淀春季表层水体中 PAHs 总浓度范围是 35.38 ~ 88.06 ng·L⁻¹, 平均值为 46.57 ng·L⁻¹, 夏季表层水体中 PAHs 总浓度范围是 25.64 ~ 301.41 ng·L⁻¹, 平均值为 76.23 ng·L⁻¹; 白洋淀春季表层水体中 OCPs 总浓度范围是 0.69 ~ 4.50 ng·L⁻¹, 平均值为 1.77 ng·L⁻¹; 夏季表层水体中 OCPs 总浓度范围是 0.11 ~ 3.20 ng·L⁻¹, 平均值为 0.90 ng·L⁻¹。白洋淀春、夏两季表层水体中 PAHs 季节性污染特征表现为前塘、关城和安新桥等 3 个断面夏季 PAHs 总浓度要远高于春季, 而其他 9 个断面则均表现为春季略高于夏季; OCPs 季节性污染特征表现为关城断面夏季 OCPs 总浓度高于春季, 而其他 11 个监测断面均表现为春季高于夏季。从白洋淀春、夏两季表层水体 PAHs 和 OCPs 组成特征来看, 春季各监测断面 PAHs 主要以三环芳烃为主, 占 PAHs 总浓度的比例为 45.92% ~ 61.36% (平均为 52.60%); 夏季安新桥、前塘和关城等 3 个监测断面主要以二环芳烃萘 (Naphthalene, Nap) 为主, 其浓度分别占 PAHs 总浓度的比例高达 84.91%、91.04% 和 78.10%, 其他 9 个监测断面主要以三环芳烃为主, 占 PAHs 总浓度的比例为 37.14% ~ 53.90% (平均为 48.94%); 白洋淀表层水体中只有 HCHs 和 DDTs 有不同程度检出, 且呈现出以 HCHs 为主的污染特征, 其中, 春季各监测断面表层水体中 HCHs 均以 β -HCH 为主, 占 HCHs 总浓度的 29.94% ~ 100%, 平均比例为 59.87%, 而夏季大张庄、郭里口等 5 个监测断面表层水体中 HCHs 以 β -HCH 为主, 占 HCHs 总浓度的 57.55% ~ 80.23%, 平均比例为 61.98%, 其他断面以 α -HCHs 和 δ -HCH 为主。分析白洋淀春、夏两季表层水体中 PAHs 和 OCPs 的来源, PAHs 同分异构体比值显示其 PAHs 主要来源于燃烧源, 部分监测断面还存在石油源; 而 OCPs 同分异构体比值显示其 OCPs 主要来源于环境残留和大气的长距离传输。白洋淀表层水体中 PAHs 和 OCPs 浓度不超过不同国家和组织制定的相关水质标准, 但安新桥和圈头两个监测断面表层水体中 α -HCH、 p,p' -DDD 浓度超过了美国环保署制定的人体健康水质基准, 表明 α -HCH 和 p,p' -DDD 可能会对白洋淀湖区居民产生潜在有害影响。

关键词: 白洋淀; 多环芳烃; 有机氯农药; 污染特征; 来源分析

中图分类号: X131.2; X524; X592 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-0964-15 DOI: 10.13227/j.hjxx.201608150

Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake

WANG Yi-zhen^{1,2}, ZHANG Jun¹, ZHOU Xu-shen¹, KONG Fan-qing¹, XU Ming-xia¹

(1. Haihe River Water Environmental Monitoring Center, Tianjin 300170, China; 2. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Seasonal variations of 17 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and 15 persistent organochlorine pesticides (OCPs) were analyzed during spring and summer in surface water from 12 sampling sites of Baiyangdian lake to elucidate their seasonal pollution characteristics and sources. The results showed that total concentrations of PAHs in surface water of Baiyangdian lake ranged from 35.38 to 88.06 ng·L⁻¹ (46.57 ng·L⁻¹ in average) in spring and 25.64 to 301.41 ng·L⁻¹ (76.23 ng·L⁻¹ in average) in summer, respectively, and total concentrations of OCPs ranged from 0.69 to 4.50 ng·L⁻¹ (1.77 ng·L⁻¹ in average) in spring and 0.11 to 3.20 ng·L⁻¹ (0.90 ng·L⁻¹ in average) in summer, respectively. Seasonal pollution characteristics of PAHs in surface water during two different seasons showed that the total concentration of PAHs was much higher in summer than in spring at three sampling sites of Baiyangdian lake including Qiantang, Guancheng and Anxin bridge, and the level of PAHs in spring was much higher than that in summer at the other nine sites. While seasonal pollution characteristics of OCPs showed that the total concentration of OCPs was much higher in summer than in spring in samples of Guancheng sites, and the level of OCPs in spring was slightly higher than that in summer

收稿日期: 2016-08-22; 修订日期: 2016-10-13

基金项目: 环境污染过程与基准教育部重点实验室开放课题项目 (KL-PPEC-2015-3); 科技部国际科技合作专项 (2013DFA71340); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07203-002)

作者简介: 王乙震 (1986 ~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水环境监测与水资源保护, E-mail: xiaoyiw858@163.com

in the rest of samples. From the perspective of spatial and temporal variations in the composition patterns of PAHs and OCPs in surface water of Baiyangdian lake, PAHs were predominated by 3-ring PAHs with 45.92% and 61.36% (52.60% in average) of total PAHs in spring, while in summer Nap was the chief component of 2-ring PAHs in three sampling sites including Qiantang, Guancheng and Anxin bridge with 84.91%, 91.04% and 78.10% of the total, respectively, and 3-ring PAHs were primary pollutants in the other nine sites with 37.14% to 53.90% (48.94% in average) of the total. Residues of HCHs and DDTs were detected in different degrees and β -HCH was the main pollutant at all sampling sites with 29.94% and 100% (59.87% in average) of total HCHs in spring, while β -HCH was the predominant compounds at five sampling sites with 57.55% and 80.23% (61.98% in average) in summer and α -HCHs and δ -HCH were abundant at other sampling sites. Source analysis based on isomer ratios indicated that the main source of PAHs in Baiyangdian lake originated from combustion sources, and additional sources for several sampling sites could be petroleum processes. Ratios of HCH isomers and DDT congeners confirmed that environmental historical residues and long range atmospheric transport were the major sources of OCPs contamination in the study area. Compared with the water quality standard of China and other countries or organizations, concentrations of PAHs and OCPs in surface water of Baiyangdian lake did not exceed the target values of the standard. However, the concentrations of α -HCH and p,p' -DDD in Anxin bridge and Quantou sites exceeded the limit of human health ambient water quality criteria developed by EPA, which reflected that α -HCH and p,p' -DDD would have a potential hazards risk to the residents from Baiyangdian district.

Key words: Baiyangdian Lake; polycyclic aromatic hydrocarbons; organochlorine pesticides; pollution characteristics; source apportionment

持久性有机污染物理化性质稳定,难以降解,能长期存在于水、土壤等各种环境介质中,并能随之长距离迁移,且具有很强的毒性,能够沿食物链逐步积累,对人类健康会造成严重的危害,现在已经成为一个备受关注的全球性环境问题。多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)和有机氯农药(organochlorine pesticides, OCPs)是两类典型的持久性有机污染物。PAHs是由2个或多个芳香环连接形成,超过10 000种单个化合物组成的一类复杂混合物^[1],在环境中广泛存在,主要通过石油类产品的泄漏及排放、干湿沉降、地表径流及污水排放等方式进入湖泊、河流等水体^[2~4],水环境中的PAHs对水生生物可产生潜在危害,可以影响无脊椎动物、鱼类和两栖类等水生生物的生殖系统发育,并可能产生致癌、致畸和致突变现象^[5~7],进而对人类健康构成极大威胁。正是因为PAHs具有高毒性、致畸、致突变和致癌等特性,16种PAHs已被美国EPA和欧盟列为优先控制污染物^[8]。OCPs具有难降解性、生物富集性、半挥发性和高毒性等特性,可通过各种途径在全球迁移^[9],有研究表明一些OCPs还被认为是内分泌干扰物,能够造成人体和野生动物内分泌系统紊乱和影响生殖系统的正常功能^[10,11]。自20世纪50年代起,OCPs曾在世界范围内被广泛使用,由于其具有持久性,至今仍广泛存在于各环境介质中,依旧能够在水体、土壤、空气、鱼类、甚至食品中检测到其存在^[12,13],虽然在20世纪80年代起六六六(hexachlorocyclohexanes, HCHs)、滴滴涕(dichlorodiphenyltrichloroethanes, DDTs)等OCPs已经被禁用,但是三氯杀螨醇、林丹等OCPs在最近十几年还在农业活动等特定范围内广泛应

用^[14,15],直到2014年中国才永久性关闭最后一条三氯杀螨醇生产线,全面停止三氯杀螨醇的生产。OCPs可通过地表径流、工业废水排放、大气干湿沉降或远距离传输等途径进入河流、湖泊等水体中^[16,17],对水生生物和人类健康构成严重危害。有关湖泊、河流水体、沉积物、悬浮颗粒物等环境介质中PAHs和OCPs污染一直受到国内外学者的极大关注并成为世界范围内的研究热点,且开展了广泛的研究^[18~20]。

白洋淀是华北地区最大的淡水湖泊,由143个大小淀泊和3 700多条壕沟组成,总面积366 km²,其中水面占44%、陆地占56%。有潞龙河、唐河、漕河、瀑河、府河、萍河、白沟河等河流入淀。白洋淀素有“华北明珠”、“北国江南”之称,是华北地区最大的一块湿地,已被列入中国重要湿地名录。白洋淀在拦洪蓄水、调节气候、改善生态环境等方面发挥了重要作用。近年来,随着经济的快速发展和人口的不断增加,白洋淀水质状况逐渐恶化。目前,白洋淀淀区及周边分布有39个村庄,约243 000人口居住,每天产生大量的生活污水;另外,来自白洋淀上游保定市的大量生活污水和工业废水经府河直接入淀^[21],对白洋淀水体造成极大污染。

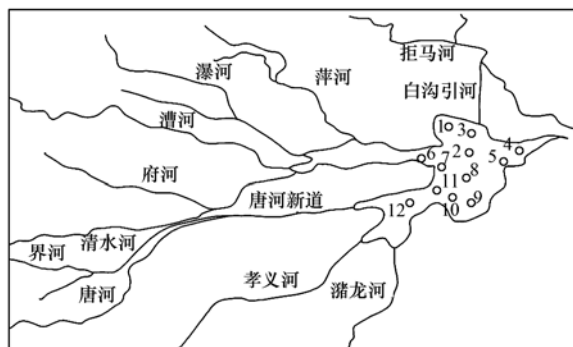
研究白洋淀PAHs、OCPs等持久性有机污染物的环境存在,是评估其对水生生物、人类和水生态系统的风险,并采取有效控制策略的基础。自90年代以来,针对白洋淀PAHs、OCPs等持久性有机污染物的分布与污染特征,已经有广泛深入的研究,特别是针对白洋淀地区沉积物/底泥^[22,23]、土壤^[24]、鱼体^[25,26]等环境介质中PAHs和OCPs的组成与分布特征多有报道,为掌握白洋淀持久性有机污染物污

染状况积累了大量数据资料。目前,关于白洋淀地表水环境中 OCPs 污染状况已有相关研究^[21,27],但至今仍缺少白洋淀水体中多环芳烃污染状况的相关资料,同时,近十几年来白洋淀水体环境状况也发生了很大变化。因此,为有效评价海河流域重要湖泊——白洋淀的持久性有机污染物的污染现状,识别人类活动对白洋淀水质状况的影响,评估持久性有机污染物对人类和生态系统的风险,亟需掌握白洋淀水体 PAHs 和 OCPs 的污染特征及来源。本文通过监测白洋淀表层水体中 17 种 PAHs 和 15 种 OCPs 的组成、分布及浓度,分析白洋淀水体中持久性有机污染物的季节性污染特征及来源,以期对白洋淀持久性有机污染物有效控制提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 监测断面布设和样品采集

结合白洋淀自身实际情况,共布设 12 个能代表白洋淀水质状况的监测断面,分别是:留通、王家寨、郭里口、枣林庄、光淀张庄、安新桥、大张庄、圈头、采蒲台、前塘、端村、关城,各监测断面位置如图 1 所示。样品分别采集于 2015 年的春季和夏季,时间分别是 5 月 9~11 日和 8 月 27~28 日,各采样点取表层(0.5 m)水样 1 L,用棕色玻璃瓶保存并带回实验室分析测定。



1. 留通; 2. 王家寨; 3. 郭里口; 4. 枣林庄; 5. 光淀张庄;
6. 安新桥; 7. 大张庄; 8. 圈头; 9. 采蒲台;
10. 前塘; 11. 端村; 12. 关城

图 1 白洋淀各采样断面示意

Fig. 1 Sampling sites of Baiyangdian Lake

1.2 实验仪器与试剂

Agilent 7890A/7000B 气相色谱-三重串联四级杆质谱(Agilent 公司,美国);全自动固相萃取仪(GL Science 公司,日本);Bond Elut C18 固相萃取小柱(500 mg/6mL,Agilent 公司)。

17 种 PAHs 标准样品,包括:萘(Naphthalene, Nap)、蒽(Acenaphthene, AcP)、蒽烯

(Acenaphthylene, Acy)、芴(Fluorene, FL)、菲(Phenanthrene, Phe)、蒽(Anthracene, Ant)、咔唑(Carbazole, Car)、荧蒽(Fluoranthene, Flu)、芘(Pyrene, Pyr)、苯并[a]蒽[Benz(a)anthracene, BaA]、䓛(Chrysene, Chr)、苯并[b]荧蒽[Benz(b)fluoranthene, BbFL]、苯并[k]荧蒽[Benz(k)fluoranthene, BkFL]、苯并[a]芘[Benzo(a)pyrene, BaP]、茚并[1,2,3-cd]芘[Indeno(1,2,3,-cd)pyrene, InP]、苯并(g,h,i)芘[Benzo(g,h,i)pyrene, BghiP]、二苯并(a,h)蒽[Drbenz(a,h)anthracene, DBA],购自美国 Accustandard 公司。

15 种 OCPs 标准样品,包括 8 种 OCPs 混标,包含: α -六氯环己烷(α -HCH)、 β -六氯环己烷(β -HCH)、林丹(γ -HCH)、 δ -六氯环己烷(δ -HCH)、 p,p' -滴滴伊(p,p' -DDE)、 p,p' -滴滴滴(p,p' -DDD)、 o,p' -滴滴涕(o,p' -DDT)和 p,p' -滴滴涕(p,p' -DDT),购自环境保护部标准样品研究所;7 种 OCPs 单标:七氯(Heptachlor)、环氧七氯(Heptachlor epoxide)、艾氏剂(Aldrin)、狄氏剂(Dieldrin)、异狄氏剂(Isodrin)、 α -硫丹(α -Endosulfan)、 β -硫丹(β -Endosulfan),购自农业部环境保护科研监测所。

色谱纯乙酸乙酯和二氯甲烷,购自韩国 Duksan 公司;色谱纯甲醇,购自美国 Baker 公司。

1.3 水体中多环芳烃与有机氯农药的测定

1.3.1 前处理条件

使用 Bond Elut C18 固相萃取小柱对水样进行富集。取水样 1 000 mL,按 $V(\text{水样}):V(\text{甲醇})=100:1$ 加入甲醇,混合均匀;将固相萃取小柱置于全自动固相萃取仪上,经 5 mL 流速为 $3 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的二氯甲烷和乙酸乙酯洗涤,10 mL 流速为 $5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的甲醇和高纯水活化后,将水样以 $15 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 流速通过小柱,富集完成后干燥固相萃取柱,再用 2 mL 乙酸乙酯、2 mL 二氯甲烷和 2 mL 二氯甲烷,分别以 1、1 和 $2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流速依次洗脱小柱,合并收集洗脱液。经干燥浓缩后,用二氯甲烷定容至 1 mL,摇匀后,上机分析。

1.3.2 气相色谱-质谱条件

气相色谱条件:HP-5MS 毛细管柱($30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$);传输线温度: 280°C ;载气:高纯氮气($>99.999\%$),柱流量: $1.2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$;进样压力 80.6 kPa (11.681 psi , 恒压模式);进样模式:不分流进样;进样体积 $1 \mu\text{L}$ 。

PAHs 检测升温程序为: 80°C 保持 1 min,以 $20^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 250°C ,再以 $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 300°C ,

保持 5.5 min,总分析时间为 20 min; 进样口温度: 270℃.

OCPs 监测升温程序为:80℃ 保持 1 min,以 20℃·min⁻¹升至 230℃,保持 6 min,总分析时间为 14.5 min; 进样口温度:270℃.

质谱条件:EI 源,能量 70 eV,温度 230℃; 四极杆温度:150℃; 碰撞气为高纯氮气; 参数优化方式为 SCAN 模式和 productor 模式; 检测方式为 MRM 模式.

1.3.3 质量控制和质量保证

样品分析过程中参考 USEPA 和《水环境监测规范》(SL 219-2013) 中 QA/QC 要求,通过方法空白、空白加标、样品加标、样品平行样等方法保证监测结果质量. 本研究水样中 OCPs 回收率范围为 70.30% ~ 115.10%, 相对标准偏差 (RSD) 为 0.60% ~ 12.20%; 检出限范围为 0.08 ~ 0.38 ng·L⁻¹. PAHs 回收率 69.80% ~ 111.60% 之间,相对标准偏差 (RSD) 为 4.90% ~ 12.60%; 检出限范围为 0.10 ~ 0.25 ng·L⁻¹. 样品进样后利用 Agilent 7890A/7000B 气相色谱-三重串联四级杆质谱的 Mass Hunter 数据采集软件对 17 种 PAHs 和 15 种 OCPs 进行定量分析.

1.4 数据处理

采用 SPSS 17.0 统计软件进行数据分析.

2 结果与讨论

2.1 白洋淀水体 PAHs 的季节性污染特征及来源分析

2.1.1 白洋淀不同季节水体 PAHs 浓度

白洋淀春、夏两季表层水体中 17 种 PAHs 浓度分析结果如表 1 所示. 从中可以看出,白洋淀春季表层水体中 PAHs 总浓度范围是 35.38 ~ 88.06 ng·L⁻¹,平均值为 46.57 ng·L⁻¹; 夏季表层水体中 PAHs 总浓度范围是 25.64 ~ 301.41 ng·L⁻¹,平均值为 76.23 ng·L⁻¹. 17 种 PAHs 中,春季除 BaP、InP、BghiP 和 DBA 未检出外,其他 13 种全部检出,检出浓度较高的两种 PAHs 依次是 Phe 和 Nap,分别占总浓度的 24.85% 和 17.67%,可见 Phe 对白洋淀春季表层水体中 PAHs 总浓度贡献最大; 夏季除 BghiP 未检出外,其他 16 种全部检出,检出浓度较高的两种 PAHs 依次是 Nap 和 Phe,分别占总浓度的 68.39% 和 11.60%,可见 Nap 对白洋淀夏季表层水体中 PAHs 总浓度贡献最大.

表 1 白洋淀表层水体中 PAHs 污染状况¹⁾/ng·L⁻¹

污染物	春季,5月9~11日(n=12)			夏季,8月27~28日(n=12)		
	浓度范围	均值	标准偏差	浓度	平均值	标准偏差
萘(Nap)	5.65~18.62	8.23	3.76	5.23~273.98	52.14	84.66
苊(AcP)	3.13~6.10	4.73	1.17	2.42~3.04	2.69	0.18
苊烯(Acy)	0.33~2.97	0.97	0.74	0.25~0.45	0.32	0.07
芴(FL)	2.02~9.65	3.47	2.73	1.39~4.37	1.99	0.86
菲(Phe)	8.74~21.64	11.57	3.96	7.53~12.24	8.84	1.33
蒽(Ant)	2.66~5.83	3.25	0.89	1.83~3.23	2.37	0.53
咔唑(Car)	0.46~7.46	1.93	2.04	<0.11~2.40	0.69	0.67
荧蒽(Flu)	2.55~10.19	4.89	2.64	1.86~3.74	2.92	1.09
芘(Pyr)	2.76~8.43	4.72	1.84	1.67~3.93	2.58	0.69
苯并[a]蒽(BaA)	0.21~1.49	0.51	0.39	<0.11~0.63	0.24	0.14
䓑(Chr)	0.81~2.80	1.48	0.66	0.48~1.99	0.77	0.44
苯并[b]荧蒽(BbFL)	0.24~1.09	0.47	0.27	0.22~1.29	0.30	0.32
苯并[k]荧蒽(BkFL)	0.24~0.61	0.34	0.12	0.17~0.67	0.26	0.13
苯并[a]芘(BaP)	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17~0.39	0.03	0.11
茚并[1,2,3-cd]芘(InP)	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10~0.44	0.06	0.15
苯并[g,h,i]芘(BghiP)	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15
二苯并[a,h]蒽(DBA)	<0.13	<0.13	<0.13	<0.13~0.34	0.05	0.12
∑ PAHs	35.38~88.06	46.57	18.57	25.64~301.41	76.23	88.15

1) 计算平均值和标准偏差时,小于检出限的数据按二分之一检出限值统计

分析白洋淀各监测断面表层水体中 PAHs 季节性污染差异,各监测断面春、夏两季表层水体中 17 种 PAHs 总浓度如图 2 所示. 从中可以看出,由于前塘、关城和安新桥夏季表层水体中 Nap 浓度分别高

达 273.98、134.19 和 131.85 ng·L⁻¹,造成这 3 个断面夏季 PAHs 总浓度要远高于春季 PAHs 总浓度,其他 9 个断面则均表现为春季 PAHs 总浓度普遍略高于夏季 PAHs 总浓度,且差异显著(P<0.05).

在研究水环境中 PAHs 浓度季节性变化过程中,根据低环数 PAHs 在水-气界面的交换作用,一般春季低环数 PAHs 浓度以及 PAHs 总浓度均要低于其夏季浓度,主要原因是由于 Nap 等低环数 PAHs 具有较高的蒸气压,且春季温度较低,大气中以气态形式存在的低环数 PAHs 通过水-气交换大量进入水体中,导致水体中低环数 PAHs 浓度升高^[28~30];另外,夏季强光照作用造成的 PAHs 光降解也能导致夏季 PAHs 浓度比春季浓度要低^[30]. 上述可能是构成白洋淀大部分监测断面表层水体春季 PAHs 总浓度要普遍略高于夏季 PAHs 总浓度的主要原因. 安新桥、前塘和关城等 3 个断面的 PAHs 季节性污染特征同北京市枯水和丰水季水源水体中 PAHs 分布特征^[31]、以及西江水体中 PAHs 的季节分布特征^[32]相似,而其表层水体中夏季 PAHs 总浓度要远高于春季 PAHs 总浓度,其中 Nap 是主要贡献因子,可能原因是这 3 个断面夏季表层水体中有特定污染源汇入. Nap 通常用作石油类物质泄漏的指示物^[33,34],尤其是前塘和关城这两个断面靠近周边村庄,作为华北平原最大的湖泊湿地和重要景区,夏季正处于旅游旺季,淀区居民的日常生活、交通运输及渔船、游船等活动更加频繁,在此过程中煤柴燃烧、作物焚烧、船舶燃油泄漏等产生大量的 PAHs 进入水体;安新桥断面所在位置处于白洋淀上游主要河流府河的入淀处,河道两侧是人口相对稠密的安新县县城,来自县城及上游保定市的大量生活污水和工业废水未经处理直接通过府河进入淀区,由此带来大量的 PAHs 污染.

2.1.2 白洋淀不同季节水体 PAHs 组成特征

白洋淀春、夏两季表层水体中 17 种 PAHs 污染

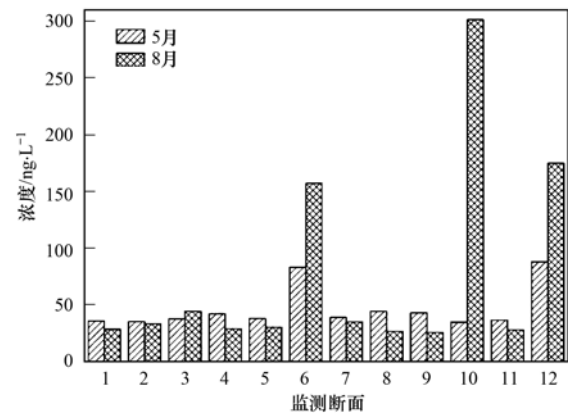


图 2 白洋淀各断面水体中 PAHs 总浓度

Fig. 2 Concentrations of total PAHs in surface water of Baiyangdian Lake

组成特征如图 3 所示. 从白洋淀春、夏两季表层水体 17 种 PAHs 组成上看,春季主要以三环芳烃为主,其次是四环和二环,占 PAHs 总浓度的比例分别为 45.92% ~ 61.36% (平均为 52.60%)、19.79% ~ 32.18% (平均为 24.61%) 和 17.31% ~ 26.11% (平均为 21.09%),王家寨断面三环芳烃所占比例最高,达到 61.36%;与春季 PAHs 组成比例相比,夏季二环芳烃比例增加还是由于安新桥、前塘和关城等 3 个监测断面二环芳烃 Nap 浓度高造成,分别占 PAHs 总浓度的比例为 84.91%、91.04% 和 78.10%,而其他 9 个监测断面主要以三环芳烃为主,占 PAHs 总浓度的比例为 37.14% ~ 53.90% (平均为 48.94%),二环和四环芳烃分别占 PAHs 总浓度比例为 21.90% ~ 48.45% (平均为 30.55%) 和 16.30% ~ 24.65% (平均为 18.96%);白洋淀春、夏两季表层水体中其他各环芳烃浓度均不超过 PAHs 总浓度 2%.

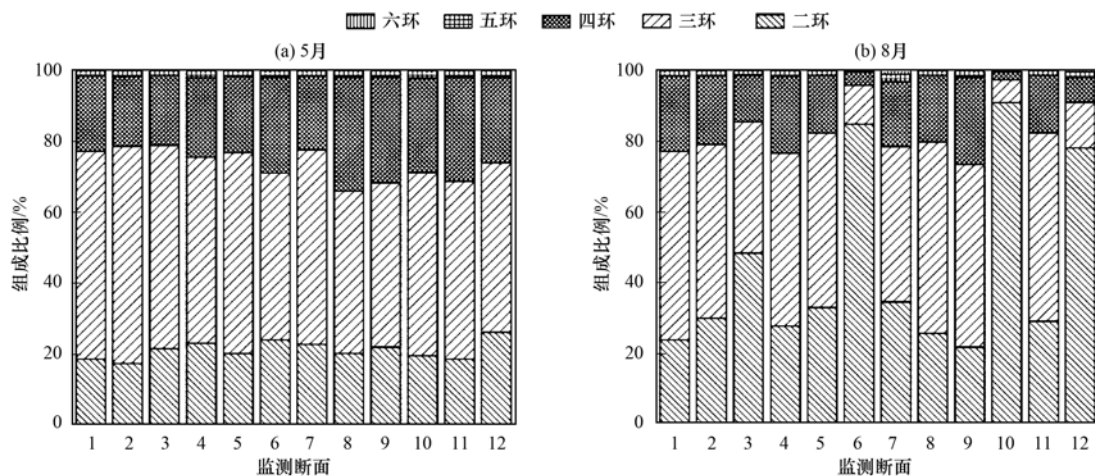


图 3 白洋淀各断面水体中 PAHs 组成比例

Fig. 3 Compositions of PAHs with different ring numbers in surface water of Baiyangdian Lake

总体来看,白洋淀春、夏两季表层水体中 PAHs 的组成均以中低环芳烃为主,一方面取决于 PAHs 的辛醇-水分配系数,高分子量的 PAHs 疏水性更强,更易于向沉积物和颗粒物相分配;另一方面与污染源有关,有研究表明 4 环及以上的 PAHs 主要来源于化石燃料高温燃烧与裂解,而低分子量(2~3 环)的 PAHs 则主要来源于石油类产品和化石燃料不完全燃烧或成岩作用^[35,36]。

2.1.3 白洋淀不同季节水体 PAHs 来源分析

PAHs 主要来源于自然因素和人为因素,自然因素主要包括森林和草原的天然火灾以及火山喷发、高等植物和微生物的合成以及成岩作用;人为因素主要包括燃烧源和石油源,燃烧源包含煤、石油等化石燃料、生物燃料等的不完全燃烧、机动车尾气的排放,以及人类工业活动等,石油源包含石油开采、运输、生产、使用过程的泄漏与排放^[37,38]。

不同来源的 PAHs 有特定的组成特征,其同分异构体比值常用于指示 PAHs 在环境介质中的来源^[38,39]。由于 Ant、Phe、Flu、Pyr、BaA、Chr 等 PAHs 具有相对稳定的特性,Ant/(Phe + Ant)、Flu/(Pyr + Flu) 和 BaA/(BaA + Chr) 的比值被广泛用于 PAHs 来源分析^[39]。通常认为当 Ant/(Phe + Ant) 比值小于 0.1 时,表示 PAHs 主要来自于石油源,大于 0.1 表示主要为燃烧源,Baumard 等^[40]研究发现,在机动车尾气排放和原油、柴油、煤炭、焦炉、木材燃烧过程产生的物质中 Ant/(Phe + Ant) 比值均大于 0.1;当 Flu/(Flu + Pyr) 比值小于 0.4 时,表示其主要来源为石油源,介于 0.4 和 0.5 之间为液态石油类产品(汽油、煤油、原油等)的燃烧,大于 0.5 为煤和草、木材等生物燃料的燃烧;当 BaA/(BaA + Chr) 比值小于 0.2 时,表示其主要来源为石油源,大

于 0.35 为燃烧源,介于 0.2 和 0.35 之间为混合源^[39,40]。

分别计算白洋淀春、夏两季表层水体中 Ant/(Phe + Ant)、Flu/(Pyr + Flu) 和 BaA/(BaA + Chr) 比值,以 Ant/(Phe + Ant) 为 X 轴,Flu/(Pyr + Flu) 为 Y 轴,BaA/(BaA + Chr) 为 Z 轴作 PAHs 来源诊断图,结果如图 4 所示。从中可以看出,在白洋淀春季表层水体中,所有监测断面 Ant/(Phe + Ant) 比值均大于 0.1,Flu/(Pyr + Flu) 比值在枣林庄和前塘小于 0.4,在端村介于 0.4 和 0.5 之间,其他监测断面均大于 0.5,所有断面 BaA/(BaA + Chr) 比值均介于 0.2 和 0.35 之间;在白洋淀夏季表层水体中,所有监测断面 Ant/(Phe + Ant) 比值均大于 0.1,Flu/(Pyr + Flu) 比值在枣林庄小于 0.4,在王家寨、光淀、张庄和端村介于 0.4 和 0.5 之间,其他监测断面均大于 0.5,BaA/(BaA + Chr) 比值小于 0.2 的断面有大张庄、留通、圈头和采蒲台,其他断面均介于 0.2~0.35 之间。可见从 PAHs 同分异构体比值来看,白洋淀表层水体中 PAHs 主要来源于燃烧源,部分监测断面还存在石油源,并且在春夏两季无明显差别。该诊断结果与白洋淀实际情况相符,淀区内村庄和人口众多,每天产生大量的生活污水,还有居民日常生活中的煤炭、木柴等燃料的燃烧,以及交通运输及捕鱼、旅游等活动过程中机动船舶所需柴油、汽油等油料的燃烧、泄漏及含油污水排放和尾气排放;同时,来自白洋淀上游保定市的生活污水和工业废水也大量排入淀内,上述原因构成白洋淀表层水体 PAHs 的主要来源。

2.1.4 白洋淀表层水体 PAHs 污染水平

PAHs 水质标准是反映其在水体中污染水平的重要指示。表 2 是中国地表水环境质量标

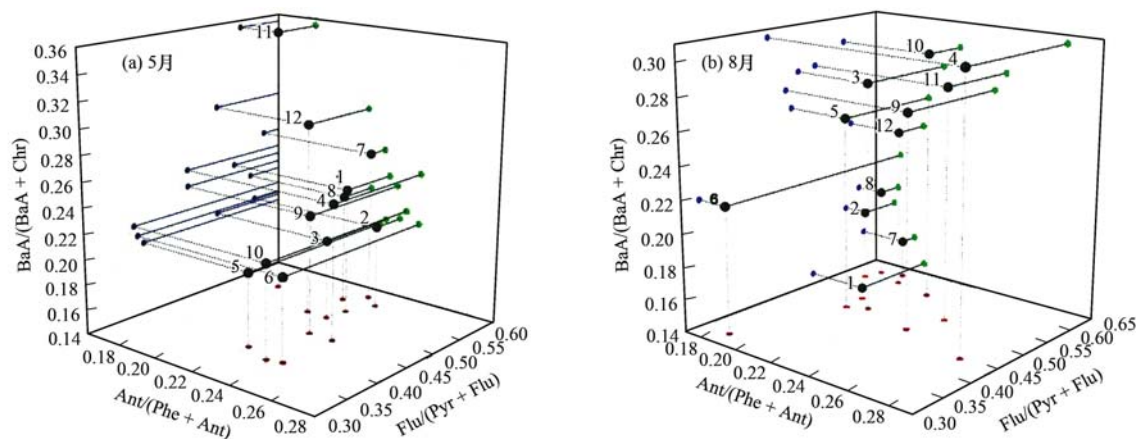


图 4 白洋淀春、夏两季水体中 PAHs 来源诊断三维图

Fig. 4 Plots of PAHs isomer pair ratios for source identification in surface water of Baiyangdian Lake in spring and summer

准^[42]、美国环保署颁布的国家水质标准^[43]、欧盟水框架指令^[44]和加拿大环境质量准则^[45]中规定的 PAHs 浓度限值。从中可以看出,白洋淀春、夏两季表层水体 PAHs 浓度均不超过上述标准规定的限值。

由于 PAHs 脂溶性强,水体中的 PAHs 可通过食物链在生物体内富集放大,再通过鱼类及贝类被人类食用而进入人类体内,对人类健康构成威胁。一些国家和国际组织通过可获得的大量毒理学数据及

一系列外推方法制定了水生生物暴露于 PAHs 污染水体的安全标准^[46](如表 3),安全标准中的数据指示的是水生生物,尤其是贻贝和牡蛎等滤食软体动物生物累积水体中相应浓度的 PAHs,通过食物链进而能够对人类健康构成威胁的 PAHs 浓度。参考国际上不同国家的安全标准,由表 3 可知,白洋淀春、夏两季表层水体中各单体 PAHs 均未超过各国制定的安全标准,但 PAHs 总浓度超过了美国环境质量标准的规定限值。

表 2 不同国家或组织 PAHs 水质标准¹⁾/ng·L⁻¹

Table 2 Standards for water quality of PAHs developed by different countries or organizations /ng·L⁻¹

国家	Nap	Phe	Acy	FL	Ant	Flu	Pyr	Chr	BaA	BaP	BbFL	BkFL	BghiP	DBA	InP	∑ PAHs
中国 ^[42]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.8	—	—	—	—	—	—
美国 ^[43]	—	—	6.7×10^5	1.1×10^6	8.3×10^5	1.3×10^5	8.3×10^5	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	—
欧盟 ^[44]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10	—	—	—	—	—	100
加拿大 ^[45]	1.1×10^3	400	5.8×10^3	3×10^3	12	40	25	—	18	15	—	—	—	—	10	—

1) 使用的标准有:中国地表水环境质量标准、美国环保署国家水质标准、欧盟水框架指令、加拿大环境质量准则;“—”表示空缺

表 3 水生生物暴露 PAHs 水体的安全标准¹⁾/μg·L⁻¹

Table 3 Safety guidelines for aquatic organisms exposed to PAHs in water/μg·L⁻¹

PAHs	爱尔兰最大 允许浓度	加拿大水质 量标准草案	奥斯罗和巴黎委员会 生态毒理评价标准	丹麦水质 评价标准	美国环境 质量标准	欧盟最大 允许浓度	本研究中浓度 (春/夏) × 10 ⁻³
Nap	—	11.0	1.0 ~ 10.0	1.0	—	—	5.65 ~ 18.62/5.23 ~ 273.98
Phe	2.0	0.8	—	—	4.6	—	8.74 ~ 21.64/7.53 ~ 12.24
Ant	—	0.12	0.005 ~ 0.05	0.01	—	—	2.66 ~ 5.83/1.83 ~ 3.23
Flu	0.5	—	0.05 ~ 0.5	—	—	—	2.55 ~ 10.19/1.86 ~ 3.74
BaA	0.2	—	—	—	—	—	0.21 ~ 1.49/ <0.11 ~ 0.63
BkFL	0.1	—	—	—	—	—	0.24 ~ 0.61/0.17 ~ 0.67
BaP	0.1	0.008	0.01 ~ 0.1	—	—	—	<0.17/ <0.17 ~ 0.39
BghiP	0.02	—	—	—	—	—	<0.15/ <0.15
∑ PAHs	—	—	—	—	0.03	0.2	35.38 ~ 88.06/25.64 ~ 301.41

1) “—”表示无数据

表 4 是白洋淀及国内外其他湖泊水体中 PAHs 的污染状况比较。由于白洋淀夏季安新桥、前塘和关城等 3 个监测断面存在特定污染源,因此春季监测数据更能反映白洋淀整体污染状况。从中可以看出,与国内部分重要湖泊水体 PAHs 污染状况相比,白洋淀水体 PAHs 污染水平与小白洋淀相当,远低于西湖、太湖、巢湖、鄱阳湖和滴水湖,其中西湖水体 PAHs 浓度约为白洋淀水体 PAHs 浓度的 30 ~ 60 倍,太湖和巢湖水体 PAHs 浓度约为白洋淀水体 PAHs 浓度的 3 ~ 4 倍;与国外部分湖泊水体 PAHs 相比,白洋淀 PAHs 污染水平要远高于阿尔卑斯山脉的 Gossenkölle 湖、比利牛斯山的 Redó 湖、苏格兰的 Øver Neådalsvatn 湖、意大利的 Maggiore 湖和南非的 Zeekoevlei 湖,低于英国的 Esthwaite 湖、埃及的 Great Bitter 和 El Tamsah 湖、斯里兰卡的 Beira 湖和 Bolgoda 湖、肯尼亚的 Victoria 湖,其中白洋淀水体

PAHs 浓度要比 Gossenkölle 湖、Redó 湖等湖泊水体 PAHs 浓度高 1 ~ 2 个数量级,比 Great Bitter、El Tamsah 湖、Victoria 湖等湖泊水体 PAHs 浓度低 3 个数量级。

2.2 白洋淀水体 15 种有机氯农药的季节性污染特征及来源分析

2.2.1 白洋淀不同季节水体 OCPs 浓度

白洋淀春、夏两季表层水体中 15 种 OCPs 污染浓度分析结果如表 5 所示。从中可以看出,白洋淀春、夏两季表层水体中只有 HCHs 和 DDTs 有不同程度检出,其他几种 OCPs 均未检出。其中,春季有 4 种 HCHs 和 2 种 DDTs 被检出,HCHs 占 OCPs 总浓度的 94.83%,DDTs 占 OCPs 总浓度的 5.17%;夏季只有 3 种 HCHs 被检出,占 OCPs 总浓度的 100%。可见白洋淀春、夏两季表层水体的 OCPs 污染主要以 HCHs 为主,其他 OCPs 的贡献很小。

表 4 白洋淀及国内外其他湖泊水体 PAHs 污染状况¹⁾/ng·L⁻¹

Table 4 Concentrations of PAHs in surface water of other lakes in China and abroad for comparison/ng·L ⁻¹								
国别	湖泊	年份	样点数	PAHs 数	浓度范围	平均值	标准差	文献
中国	白洋淀	2015	12	17	35.38 ~ 88.06	46.57	18.57	本研究
	西湖	2002	3	10	989 ~ 4 869	—	—	[47]
	太湖	2003	7	16	37.5 ~ 183.5	134.45	54.83	[48]
	小白洋淀	2007	6	15	40.1 ~ 74.0	51.0	11.9	[49]
	巢湖	2009	15	16	95.63 ~ 370.13	170.72	70.79	[50,51]
	巢湖	2010 ~ 2011	3	16	69.9 ~ 515.6	204.93	132.89	[52]
	鄱阳湖	2012	40	16	5.56 ~ 266.1	—	—	[53]
	滴水湖	2013	4	16	59 ~ 269	—	—	[54]
英国	Esthwaite 湖	1996 ~ 1997	6	14	—	158	99	[55]
阿尔卑斯山脉	Gossenkölle 湖	1996 ~ 1998	—	16	—	1.08	0.11	[56]
比利牛斯山	Redó 湖	—	—	16	—	0.70	0.21	[56]
苏格兰	Øver Neådalsvatn 湖	—	—	16	—	1.10	0.10	[56]
意大利	Maggiore 湖	2003 ~ 2004	—	16	—	3.42	0.33	[57]
埃及	Great Bitter 和 El Tamsah 湖	2004	9	16	10 780 ~ 12 380	—	—	[58]
斯里兰卡	Beira 湖	2003 ~ 2004	4	11	46 ~ 112	80.25	27.13	[59]
斯里兰卡	Bolgoda 湖	2003 ~ 2004	6	11	40 ~ 127	74.33	28.45	[59]
南非	Zeekoevlei 湖	2004	51	25	0.00 ~ 19.16	—	—	[60]
肯尼亚	Victoria 湖	2006	13	16	3 320 ~ 47 600	—	—	[61]

1) “—”表示未报道

从季节变化上看,白洋淀春、夏两季表层水体中 OCPs 总浓度呈现显著差异($P < 0.05$),总体表现为春季 OCPs 总浓度高于夏季 OCPs 总浓度.从表 5 中可见,春季表层水体中 OCPs 总浓度范围是 $0.69 \sim 4.50 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $1.77 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$;夏季表层水体中 OCPs 总浓度范围是 $0.11 \sim 3.20 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $0.90 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$.由图 5 可见,除关城断面春季 OCPs 总浓度低于夏季 OCPs 总浓度外,其他监测断面春季 OCPs 总浓度普遍要高于夏季 OCPs 总浓度.OCPs 总浓度最高值和最低值分别出现在春季(5 月)和夏季(8 月),分别为 $4.50 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.11 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,断面分别是端村和王家寨.

在研究水环境中 OCPs 浓度季节性变化过程

中,一般在径流量较大的丰水期,水流对土壤的侵蚀作用加强,土壤残留的 OCPs 随农田地表径流进入水体,使丰水期表层水体中 OCPs 浓度升高,因此很多研究表明 OCPs 污染呈现面源污染的特征^[62~64].白洋淀春季和夏季分别为枯水期和丰水期,大部分监测断面表层水体 OCPs 浓度变化却表现为春季高于夏季,即枯水期高于丰水期,只有关城断面 OCPs 浓度变化表现为夏季高于春季,可见白洋淀表层水体中 OCPs 污染并没有呈现面源污染特征,分析原因可能是丰水期上游来水和生态调水对淀区水体的稀释作用;夏季采样期间关城断面水体浑浊,其 OCPs 总浓度比春季高可能是由于表层沉积物的再悬浮造成.

表 5 白洋淀表层水体 OCPs 污染状况¹⁾/ng·L⁻¹

Table 5 Concentrations of organochlorine pesticides in surface water of Baiyangdian Lake/ng·L ⁻¹						
污染物	春季,5 月 9 ~ 11 日($n = 12$)			夏季,8 月 27 ~ 28 日($n = 12$)		
	浓度	平均值	标准偏差	浓度	平均值	标准偏差
α -HCH	0.11 ~ 0.58	0.23	0.15	<0.11 ~ 0.49	0.22	0.14
β -HCH	0.46 ~ 1.30	0.83	0.23	<0.08 ~ 0.66	0.28	0.26
γ -HCH	0.10 ~ 1.20	0.40	0.46	<0.10	<0.10	<0.10
δ -HCH	0.17 ~ 1.25	0.28	0.35	<0.17 ~ 2.75	0.37	0.78
$\sum$ HCHs	0.69 ~ 4.33	1.65	1.03	0.11 ~ 3.20	0.90	0.88
p,p' -DDE	0.12 ~ 0.17	0.10	0.05	<0.12	<0.12	<0.12
o,p' -DDT	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17
p,p' -DDD	<0.12 ~ 0.19	0.07	0.04	<0.12	<0.12	<0.12
p,p' -DDT	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12
$\sum$ DDTs	<0.08 ~ 0.35	0.12	0.09	<0.12	<0.12	<0.12
$\sum$ OCPs	0.69 ~ 4.50	1.77	1.04	0.11 ~ 3.20	0.90	0.88

1) 计算平均值和标准偏差时,小于检出限的数据按二分之一检出限值统计

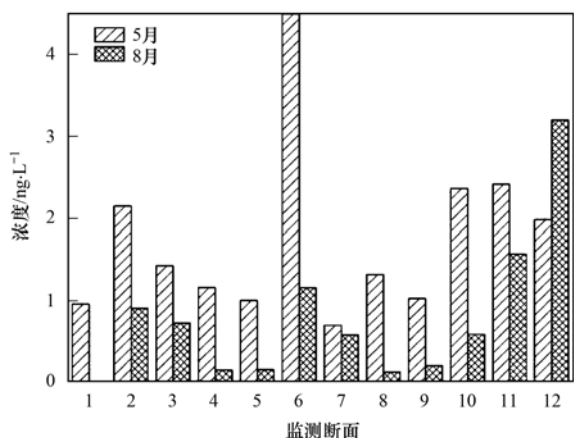


图5 白洋淀各断面水体中 OCPs 总浓度

Fig. 5 Concentrations of total OCPs in surface water of Baiyangdian Lake

2.2.2 白洋淀不同季节水体 OCPs 组成特征

根据上述分析,从白洋淀春、夏两季表层水体中 15 种 OCPs 的检出情况来看主要以 HCHs 为主,因

此本研究主要分析白洋淀春、夏两季表层水体中 HCHs 污染组成特征。

白洋淀春、夏两季表层水体 HCHs 组成特征如图 6 所示。从中可以看出,春季各监测断面表层水体 HCHs 以 β -HCH 为主,占 HCHs 总浓度的 29.94% ~ 100%,平均比例为 59.87%;夏季各监测断面表层水体中,大张庄、郭里口、王家寨、前塘、安新桥等 5 个监测断面表层水体 HCHs 以 β -HCH 为主,占 HCHs 总浓度的 57.55% ~ 80.23%,平均比例为 61.98%,枣林庄、光淀张庄、圈头、采蒲台这 4 个断面均只检测到 α -HCH,端村和关城断面表层水体以 δ -HCH 为主,分别占 HCHs 总浓度的 50.20% 和 85.96%。水体中 HCHs 以 β -HCH 为主的原因主要取决于 β -HCH 的自身结构,其物理性质相对于其他 HCHs 组分更为稳定,水溶性和挥发性较低,是最不容易被降解的 HCH 异构体。

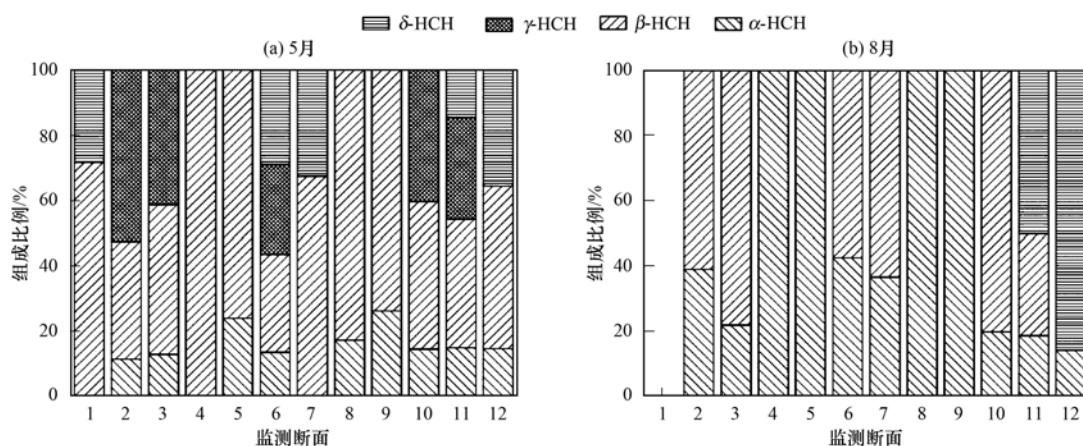


图6 白洋淀各断面水体中 HCHs 组成比例

Fig. 6 Compositions of HCHs in surface water of Baiyangdian Lake

2.2.3 白洋淀不同季节水体 OCPs 来源分析

环境中的 HCHs 主要来自于杀虫剂的使用,工业品 HCHs 和林丹是 HCHs 的两种来源已得到广泛认同和普遍接受,其中,工业品 HCHs 各同分异构体所占的比例分别是: α -HCH 占 55% ~ 80%; β -HCH 占 5% ~ 14%; γ -HCH 占 8% ~ 15%; δ -HCH 占 2% ~ 16%; 其他占 3% ~ 5%^[65],以及林丹中包含 99% 以上的 γ -HCH^[66]。通常用 α -HCH 与 γ -HCH 的浓度比值来判别 HCHs 的来源,一般情况下在工业品 HCHs 中该比值的范围为 3 ~ 7,但是当有林丹或 γ -HCH 输入时,该比值可能接近或小于 1;如果该比值高于 7,可能原因是 HCHs 的长距离传输或者工业品 HCHs 在环境中的反复循环和降解,这是因为 α -HCH 比 γ -HCH 的半衰期长约 25%^[67]。另外,在

大气的长距离传输过程中, γ -HCH 在光化学作用下可转化为 α -HCH,这也可能使 α -HCH 与 γ -HCH 的浓度比值高于 7^[67,68]。白洋淀春、夏两季各监测断面表层水体 α -HCH/ γ -HCH 比值如表 6 所示,从中可见,白洋淀春、夏两季大部分监测断面表层水体中 α -HCH/ γ -HCH 比值要大于 7,表明白洋淀表层水体中 HCHs 主要来源于环境残留和大气的长距离传输。另外,春季王家寨、郭里口、安新桥、前塘和端村等 5 个断面 α -HCH/ γ -HCH 比值小于 1,表明在春季这几个断面可能有新的林丹或 γ -HCH 输入。

工业品 DDTs 一般包含 77.1% p , p' -DDT, 14.9% o , p' -DDT, 4% p , p' -DDE^[69]。自然界中 DDT 能够在不同环境条件下转化为不同的产物,一般在

有氧条件下转化为 DDE,而在厌氧条件下转化为 DDD^[70]. 通常用 DDT/DDE 的值来预估 DDT 的使用年限^[71]. 一般在禁用 DDT 后,随着 DDT 降解为 DDE 和 DDD,DDT 浓度与 DDE、DDD 浓度之和的比值应小于 1,如果该比值大于 1,则说明有新源输入^[66,72]. 本研究在白洋淀表层水体只有在春季检出 p,p' -DDE 和 p,p' -DDD 两种 DDTs,说明 DDTs 污染是来源于环境中的残留.

表 6 白洋淀春夏两季表层水体 α -HCH/ γ -HCH 比值¹⁾

Table 6 Ratios of α -HCH/ γ -HCH in surface water of Baiyangdian Lake in spring and summer												
断面编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
春季	—	0.21	0.31	—	>7	0.49	—	>7	>7	0.36	0.47	>7
夏季	>7	>7	>7	>7	>7	>7	>7	>7	>7	>7	>7	>7

1) “—”表示由于 α -HCH 和 γ -HCH 均未检出,无法计算两者比值

2.2.4 白洋淀表层水体 OCPs 污染水平

表 7 是中国地表水环境质量标准^[42]、美国环保署颁布的国家水质标准^[43]、欧盟水框架指令^[44]和加拿大环境质量准则^[45]中规定的部分 OCPs 浓度限值. 从中可以看出,白洋淀春、夏两季表层水体 OCPs 浓度均远低于上述标准规定的限值.

表 7 不同国家或组织 OCPs 水质标准¹⁾/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 7 Standards for water quality of OCPs provided by different countries or organizations/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$								
国家	γ -HCH	DDTs	七氯	环氧七氯	艾氏剂	狄氏剂	异狄氏剂	硫丹
中国 ^[42]	2.0	1.0	—	0.2	—	—	—	—
美国 ^[43]	0.95	1.1	0.52	0.52	3.0	0.24	0.086	0.22
欧盟 ^[44]	0.1	0.1	0.03	—	0.1	0.1	—	—
加拿大 ^[45]	0.01	—	—	—	—	—	—	0.06

1) 使用的标准有:中国地表水环境质量标准、美国环保署国家水质标准、欧盟水框架指令、加拿大环境质量准则;“—”表示空缺

环境水质基准是制定水体环境质量标准限值的基础,对于预测、评价、控制和治理进入水环境中的污染物质,维护良好生态环境具有重要意义. 如表 8 所示,根据毒理学数据和数值计算,美国环保署制定了 OCPs 人体健康水质基准和水生生物水质基准,其中,人体健康水质基准代表的是通过饮水和食用水生生物或只通过食用水生生物而对人类不产生有害影响的污染物最大可接受浓度;水生生物基准代表的是水体中特定污染物预计不会对大多数物种构成重大

风险的最低浓度,包括急性毒性值和慢性毒性值. 参考美国环保署 OCPs 人体健康水质基准和水生生物水质基准,从中可见,春、夏两季中安新桥断面表层水体中 α -HCH 浓度均超过人体健康水质基准,夏季中圈头断面表层水体中 p,p' -DDD 浓度超过了人体健康水质基准, α -HCH、 p,p' -DDD 通过食物链被富集于鱼类、贝类等水生生物体内,进而通过饮水、皮肤接触、食用鱼类或贝类等途径进入人体内,对白洋淀这两个断面所属淀区居民健康会产生潜在有害影响.

表 8 美国环保署 OCPs 人体健康水质基准和水生生物水质基准¹⁾/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 8 Human health ambient water quality criteria and aquatic life criteria by EPA/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$					
OCPs	人体健康水质基准		水生生物水质基准(淡水水体)		本研究中浓度 (春/夏) $\times 10^{-3}$
	饮水 + 食用水生生物	食用水生生物	急性毒性	慢性毒性	
α -HCH	0.000 36	0.000 39	—	—	0.11 ~ 0.58 / <0.11 ~ 0.49
β -HCH	0.008 0	0.014	—	—	0.46 ~ 1.30 / <0.08 ~ 0.66
γ -HCH	4.2	4.4	0.95	—	0.10 ~ 1.20 / <0.10
p,p' -DDD	0.000 12	0.000 12	—	—	<0.12 ~ 0.19 / <0.12
p,p' -DDE	0.000 018	0.000 018	—	—	0.12 ~ 0.17 / <0.12
p,p' -DDT	0.000 030	0.000 030	1.1	0.001	<0.12 / <0.12
七氯	0.000 005 9	0.000 005 9	0.52	0.003 8	<0.13 / <0.13
环氧七氯	0.000 032	0.000 032	0.52	0.003 8	<0.21 / <0.21
艾氏剂	0.000 000 77	0.000 000 77	3.0	—	<0.37 / <0.37
狄氏剂	0.000 001 2	0.000 001 2	0.24	0.056	<0.27 / <0.27
异狄氏剂	0.03	0.03	0.086	0.036	<0.15 / <0.15
α -硫丹	20	30	0.22	0.056	<0.16 / <0.16
β -硫丹	20	40	0.22	0.056	<0.38 / <0.38

1) “—”表示无数据

表9是白洋淀及国内外其他湖泊水体中 OCPs 的污染状况比较. 从中可以看出,白洋淀水体 OCPs 污染水平与白洋淀历史水平相比要低,表明白洋淀表层水体 OCPs 污染状况相对于历史状况有所好转;与国内其他重要湖泊水体 OCPs 污染状况相比,白洋淀水体 OCPs 污染水平与太湖相当,低于西湖、微山湖、巢湖、鄱阳湖、百花湖、官厅水库和千岛湖,要远远低于洱海和滇池中 OCPs 污染水平,其中,西

湖水体 OCPs 浓度约为白洋淀水体 OCPs 浓度的 26 倍,洱海和滇池水体中 OCPs 浓度要比白洋淀水体 OCPs 浓度高 1~2 个数量级;与国外部分湖泊水体 OCPs 相比,白洋淀 OCPs 污染水平与加纳的 Bosomtwi 湖相当,要低于伊朗的 Tashk 湖、加纳的 Volta 湖、希腊的 Volvi 湖、Vistonida 湖、Vegoritida 湖、L. Prespa 湖和 S. Prespa 湖,其浓度相差 1~2 个数量级.

表 9 白洋淀及国内外其他湖泊水体 OCPs 污染状况¹⁾/μg·L⁻¹

Table 9 Concentrations of OCPs in surface water of other lakes in China and abroad for comparison/μg·L ⁻¹								
国别	湖泊	年份	样点数	OCPs 数	浓度范围	平均值	标准差	文献
中国	白洋淀	2015	12	15	0.69~4.50	1.77	1.04	本研究
	白洋淀	2008	15	19	11.37~30.43	17.46	—	[21]
	西湖	2007	7	17	8.04~126.22	46.20	—	[73]
	洱海	2003	1	6	5 560.00	5 560.00	—	[74]
	滇池	2003	1	6	6 700.00~24 530.00	—	—	[74]
	太湖	2009	33	10	0.89~2.58	1.78	—	[75]
	微山湖	2009	9	8	6.50~33.80	—	—	[76]
	巢湖	2008	13	19	0.54~64.01	7.92	—	[77]
	鄱阳湖	2009	14	11	3.60~52.03	11.68	—	[78]
	百花湖	2012	8	11	15.50~43.80	—	—	[79]
	官厅水库	2008	9	18	10.06~87.37	—	—	[80]
	千岛湖	2011	12	10	1.90~7.60	—	—	[64]
伊朗	Tashk 湖	2003	48	6	<DL~312.00	253.00	—	[81]
加纳	Bosomtwi 湖	2004	10	6	<DL~3.79	0.21	—	[82]
加纳	Volta 湖	1995~1996	6	6	<DL~91.00	—	—	[83]
乌干达	Victoria 湖	1998	5	6	<DL	—	—	[84]
希腊	Volvi 湖		1	20	<DL~64.00	—	—	[85]
	Vistonida 湖		1	20	<DL~57.00	—	—	[85]
	Vegoritida 湖	1996~1998	1	20	<DL~421.00	—	—	[85]
	L. Prespa 湖		1	20	<DL~232.00	—	—	[85]
	S. Prespa 湖		1	20	<DL~440.00	—	—	[85]

1) “—”表示未报道

3 结论

(1)白洋淀春、夏两季表层水体中 PAHs 季节性污染特征表现为前塘、关城和安新桥等 3 个断面夏季 PAHs 总浓度要远高于春季 PAHs 总浓度,分析原因可能是存在特定污染源汇入,而其他 9 个断面则均表现为春季 PAHs 总浓度略高于夏季 PAHs 总浓度,其中,白洋淀春季表层水体中 PAHs 总浓度范围是 35.38~88.06 ng·L⁻¹,平均值为 46.57 ng·L⁻¹,夏季表层水体中 PAHs 总浓度范围是 25.64~301.41 ng·L⁻¹,平均值为 76.23 ng·L⁻¹. 从 PAHs 组成特征来看,白洋淀春、夏两季表层水体中不同环数 PAHs 组成比例差异明显,春季主要以三环芳烃为主,其次是四环和二环;与春季 PAHs 组成比例相比,夏季二环芳烃比例明显增加是由于安新桥、前

塘和关城等 3 个监测断面二环芳烃 Nap 浓度高造成,而其他 9 个监测断面主要以三环芳烃为主,其次是二环和四环芳烃. PAHs 同分异构体比值显示白洋淀春、夏两季表层水体中 PAHs 主要来源于燃烧源,部分监测断面还存在石油源. 同国内部分湖泊 PAHs 污染水平相比,白洋淀春、夏两季表层水体中 PAHs 污染水平要低,而与国外部分湖泊水体中 PAHs 污染水平相比白洋淀污染水平要高,但浓度不超过不同国家和组织制定的地表水水质标准和水生生物安全标准.

(2)白洋淀春、夏两季表层水体中 OCPs 季节性污染特征总体表现为关城断面夏季 OCPs 总浓度高于春季 OCPs 总浓度,分析原因可能是由于表层沉积物的再悬浮,其他 11 个监测断面均表现为春季 OCPs 总浓度高于夏季 OCPs 总浓度,其中,白洋淀

春季表层水体中 OCPs 总浓度范围是 $0.69 \sim 4.50 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $1.77 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$; 夏季表层水体中 OCPs 总浓度范围是 $0.11 \sim 3.20 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $0.90 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 从 OCPs 组成特征来看, 白洋淀春、夏两季表层水体中 OCPs 只有 HCHs 和 DDTs 有不同程度检出, 且呈现出以 HCHs 为主的污染特征, 其中, 春季各监测断面表层水体中 HCHs 均以 β -HCH 为主, 而夏季大张庄、郭里口、王家寨、前塘、安新桥等 5 个监测断面表层水体中 HCHs 以 β -HCH 为主, 占 HCHs 总浓度的 $57.55\% \sim 80.23\%$, 平均比例为 61.98% , 其他断面以 α -HCH 和 δ -HCH 为主. OCPs 同分异构体比值显示白洋淀春、夏两季表层水体中 OCPs 主要来源于环境残留和大气的长距离传输, 同时春季王家寨、郭里口、安新桥、前塘和端村等 5 个断面还可能新的林丹或 γ -HCH 输入. 同国内外部分湖泊 OCPs 污染水平相比, 白洋淀春、夏两季表层水体中 OCPs 污染水平平均要偏低, 其浓度不超过不同国家和组织制定的地表水水质标准, 但安新桥和圈头两个监测断面表层水体中 α -HCH、 p,p' -DDD 浓度超过了美国环保署制定的人体健康水质基准, 表明 α -HCH、 p,p' -DDD 可能会对白洋淀居民健康产生潜在有害影响.

参考文献:

- [1] Logan D T. Perspective on ecotoxicology of PAHs to fish[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2007, **13**(2): 302-316.
- [2] Eganhouse R P, Simoneit B R T, Kaplan I R. Extractable organic matter in urban storm water runoff. 2. Molecular characterization[J]. Environmental Science & Technology, 1981, **15**(3): 315-326.
- [3] Dickut R M, Gustafson K E. Atmospheric inputs of selected polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls to Southern Chesapeake Bay[J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, **30**(6): 385-396.
- [4] Heemken O P, Stachel B, Theobald N, et al. Temporal variability of organic micropollutants in suspended particulate matter of the River Elbe at Hamburg and the River Mulde at Dessau, Germany[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2000, **38**(1): 11-31.
- [5] Skarphéðinsdóttir H, Ericson G, Svavarsson J, et al. DNA adducts and polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) tissue levels in blue mussels (*Mytilus* spp.) from Nordic coastal sites[J]. Marine Environmental Research, 2007, **64**(4): 479-491.
- [6] Engraff M, Solere C, Smith K E C, et al. Aquatic toxicity of PAHs and PAH mixtures at saturation to benthic amphipods: linking toxic effects to chemical activity[J]. Aquatic Toxicology, 2011, **102**(3-4): 142-149.
- [7] 郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 等. 中国地表水体多环芳烃含量分布特征及其生态风险评价[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2012, **42**(5): 680-691.
- Guo G H, Wu F C, He H P, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of PAHs in surface waters of China[J]. Science China Earth Sciences, 2012, **55**(6): 914-925.
- [8] Manoli E, Samara C, Konstantinou I, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the bulk precipitation and surface waters of Northern Greece[J]. Chemosphere, 2000, **41**(12): 1845-1855.
- [9] Shete A, Gunale V R, Pandit G G. Organochlorine pesticides in *Avicennia marina* from the Mumbai mangroves, India[J]. Chemosphere, 2009, **76**(11): 1483-1485.
- [10] Briz V, Molina-Molina J M, Sánchez-Redondo S, et al. Differential estrogenic effects of the persistent organochlorine pesticides dieldrin, endosulfan, and lindane in primary neuronal cultures[J]. Toxicological Sciences, 2011, **120**(2): 413-427.
- [11] Xue N D, Wang H B, Xu X B. Progress in study on endocrine disrupting pesticides (EDPs) in aquatic environment[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, **50**(20): 2257-2266.
- [12] Tanabe S, Iwata H, Tatsukawa R. Global contamination by persistent organochlorines and their ecotoxicological impact on marine mammals[J]. Science of the Total Environment, 1994, **154**(2-3): 163-177.
- [13] Wu C F, Luo Y M, Gui T, et al. Concentrations and potential health hazards of organochlorine pesticides in shallow groundwater of Taihu Lake region, China[J]. Science of the Total Environment, 2014, **470-471**: 1047-1055.
- [14] Li Y F, Cai D J, Shan Z J, et al. Gridded usage inventories of technical hexachlorocyclohexane and lindane for China with $1/6^\circ$ latitude by $1/4^\circ$ longitude resolution[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2001, **41**(3): 261-266.
- [15] Li J, Zhan G, Qi S H, et al. Concentrations, enantiomeric compositions, and sources of HCH, DDT and chlordane in soils from the Pearl River Delta, South China[J]. Science of the Total Environment, 2006, **372**(1): 215-224.
- [16] Doong R A, Sun Y C, Liao P L, et al. Distribution and fate of organochlorine pesticide residues in sediments from the selected rivers in Taiwan[J]. Chemosphere, 2002, **48**(2): 237-246.
- [17] Feng J L, Zhai M X, Liu Q, et al. Residues of organochlorine pesticides (OCPs) in upper reach of the Huaihe River, East China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2011, **74**(8): 2252-2259.
- [18] Kafilzadeh F. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediments of the Soltan Abad River, Iran[J]. The Egyptian Journal of Aquatic Research, 2015, **41**(3): 227-231.
- [19] Zheng B H, Wang L P, Lei K, et al. Distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in water, suspended particulate matter and sediment from Daliao River estuary and the adjacent area, China[J]. Chemosphere, 2016, **149**: 91-100.
- [20] Eremina N, Paschke A, Mazlova E A, et al. Distribution of polychlorinated biphenyls, phthalic acid esters, polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine substances in the Moscow River, Russia[J]. Environmental Pollution, 2016, **210**: 409-418.
- [21] Dai G H, Liu X H, Liang G, et al. Distribution of organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls

- (PCBs) in surface water and sediments from Baiyangdian Lake in North China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23** (10): 1640-1649.
- [22] 窦薇, 赵忠宪. 白洋淀水体、底泥及鲫鱼体内 DDT、BHC 污染状况研究[J]. *环境科学学报*, 1998, **18**(3): 308-312.
- Dou W, Zhao Z X. Contamination of DDT and BHC in water, sediments and fish (*Carassius auratus*) muscle from Baiyangdian lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, **18**(3): 308-312.
- [23] Hu G C, Luo X J, Li F C, *et al.* Organochlorine compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment from Baiyangdian Lake, North China: concentrations, sources profiles and potential risk[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(2): 176-183.
- [24] 赵健, 周怀东, 陆瑾, 等. 白洋淀土壤中多环芳烃的分布特征及来源[J]. *生态学杂志*, 2009, **28**(5): 901-906.
- Zhao J, Zhou H D, Lu J, *et al.* Distribution and source of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils of Baiyangdian area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(5): 901-906.
- [25] 窦薇, 赵忠宪. 白洋淀几种不同食性鱼类对六六六、DDT 的富集[J]. *环境科学进展*, 1996, **4**(6): 51-56.
- Dou W, Zhao Z X. A study on bioaccumulation of BHC and DDT in fish muscles of different food structure from Baiyangdian lake [J]. *Advances in Environmental Science*, 1996, **4**(6): 51-56.
- [26] Xu F L, Wu W J, Wang J J, *et al.* Residual levels and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in freshwater fishes from Lake Small Bai-Yang-Dian, Northern China [J]. *Ecological Modelling*, 2011, **222**(2): 275-286.
- [27] 王怡中, 刘季昂, 胡春, 等. 白洋淀地区水中有机污染物的定性分析[J]. *环境化学*, 1995, **11**(5): 442-448.
- Wang Y Z, Liu J A, Hu C, *et al.* Analysis of organic contaminants in the water of Bai-Yang-Dian lake [J]. *Environmental Chemistry*, 1995, **11**(5): 442-448.
- [28] Park J S, Wade T L, Sweet S. Atmospheric distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons and deposition to Galveston Bay, Texas, USA [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35** (19): 3241-3249.
- [29] Park J S, Wade T L, Sweet S T. Atmospheric deposition of PAHs, PCBs, and organochlorine pesticides to Corpus Christi Bay, Texas [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36** (10): 1707-1720.
- [30] 李海燕, 段丹丹, 黄文, 等. 珠江三角洲表层水中多环芳烃的季节分布、来源和原位分配[J]. *环境科学学报*, 2014, **34** (12): 2963-2972.
- Li H Y, Duan D D, Huang W, *et al.* Seasonal distribution, sources, and *in-situ* partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and suspended particulate matters from the Pearl River Delta[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34** (12): 2963-2972.
- [31] 李霞, 王东红, 王金生, 等. 北京市枯水季和丰水季水源水中持久性有机污染物的水平分析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(2): 437-442.
- Li X, Wang D H, Wang J S, *et al.* Analysis of persistent organic pollutants (POPs) levels in dry and wet seasons in source water of municipal waterworks in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(2): 437-442.
- [32] 邓红梅, 陈永亨. 西江水体中多环芳烃的分布特征及来源[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(2): 435-440.
- Deng H M, Chen Y H. Distribution characters and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Xijiang river [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(2): 435-440.
- [33] Deng W, Li X G, Li S Y, *et al.* Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment of mud areas in the East China Sea using diagnostic ratios and factor analysis [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, **70**(1-2): 266-273.
- [34] 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 等. 基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3789-3797.
- Wang C L, Zou X Q, Zhao Y F, *et al.* Source apportionment and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water from Yangtze river, China: based on PMF model [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3789-3797.
- [35] Mai B X, Fu J M, Sheng G Y, *et al.* Chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Pollution*, 2002, **117**(3): 457-474.
- [36] Zeng Y E, Vista C L. Organic pollutants in the coastal environment off San Diego, California. 1. Source identification and assessment by compositional indices of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1997, **16**(2): 179-188.
- [37] Garban B, Blanchoud H, Motelay-Massei A, *et al.* Atmospheric bulk deposition of PAHs onto France: trends from urban to remote sites [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36** (34): 5395-5403.
- [38] Wu Y L, Wang X H, Li Y Y, *et al.* Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in seawater from the Western Taiwan Strait, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **63** (5-12): 459-463.
- [39] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al.* PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**(4): 489-515.
- [40] Baumard P, Budzinski H, Michon Q, *et al.* Origin and bioavailability of PAHs in the Mediterranean sea from mussel and sediment records [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, **47**(1): 77-90.
- [41] Tam N F Y, Ke L, Wang X H, *et al.* Contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of mangrove swamps [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **114**(2): 255-263.
- [42] GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S].
- GB 3838-2002 Environmental quality standards for surface water [S].
- [43] US Environmental Protection Agency. National recommended water quality criteria[S].
- [44] EUR-Lex-31998L0083-EN Council directive 98/83/EC 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption[S].
- [45] Canadian Council of Ministers of the Environment. Canadian environmental quality guidelines[S].
- [46] Law R J, Dawes V J, Woodhead R J, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in seawater around England and Wales

- [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1997, **34**(5): 306-322.
- [47] Chen B L, Xuan X D, Zhu L Z, *et al.* Distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface waters, sediments and soils of Hangzhou City, China[J]. *Water Research*, 2004, **38**(16): 3558-3568.
- [48] Qiao M, Huang S B, Wang Z J. Partitioning characteristics of PAHs between sediment and water in a shallow lake[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2008, **8**(2): 69-73.
- [49] 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.
- Zhu Y, Wu W J, Wang J J, *et al.* Distribution, sources and ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in water-sediment system in Lake Small Baiyangdian[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(5): 637-646.
- [50] 秦宁, 何伟, 王雁, 等. 巢湖水体和水产品中多环芳烃的含量与健康风险[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(1): 230-239.
- Qin N, He W, Wang Y, *et al.* Residues and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water and aquatic products from Lake Chaohu[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(1): 230-239.
- [51] Qin N, He W, Kong X Z, *et al.* Ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the water from a large Chinese lake based on multiple indicators[J]. *Ecological Indicators*, 2013, **24**: 599-608.
- [52] Qin N, He W, Kong X Z, *et al.* Distribution, partitioning and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water - SPM - sediment system of Lake Chaohu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **496**: 414-423.
- [53] 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.
- [54] 李娟英, 石文瑄, 崔昱, 等. 滴水湖水体及沉积物中重金属和多环芳烃的污染分析与评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, **32**(1): 96-101.
- Li J Y, Shi W X, Cui Y, *et al.* Analysis and evaluation of heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediment of lake Dishui[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, **32**(1): 96-101.
- [55] Gevaio B, Hamilton-Taylor J, Jones K C. Polychlorinated biphenyl and polycyclic aromatic hydrocarbon deposition to and exchange at the air - water interface of Esthwaite Water, a small lake in Cumbria, UK[J]. *Environmental Pollution*, 1998, **102**(1): 63-75.
- [56] Vilanova R M, Fernández P, Martínez C, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in remote mountain lake waters[J]. *Water Research*, 2001, **35**(16): 3916-3926.
- [57] Olivella M à. Polycyclic aromatic hydrocarbons in rainwater and surface waters of Lake Maggiore, a subalpine lake in Northern Italy[J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(1): 116-131.
- [58] Said T O, El Agroudy N A. Assessment of PAHs in water and fish tissues from Great Bitter and El Tamsah lakes, Suez Canal, as chemical markers of pollution sources[J]. *Chemistry and Ecology*, 2006, **22**(2): 159-173.
- [59] Pathiratne K A S, De Silva O C P, Hehemann D, *et al.* Occurrence and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Bolgoda and Beira lakes, Sri Lanka[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, **79**(2): 135-140.
- [60] Das S K, Routh J, Roychoudhury A N. Sources and historic changes in polycyclic aromatic hydrocarbon input in a shallow lake, Zeekoevlei, South Africa[J]. *Organic Geochemistry*, 2008, **39**(8): 1109-1112.
- [61] Kwach B O, Lalah J O. High concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons found in water and sediments of car wash and Kisat areas of Winam Gulf, Lake Victoria-Kenya[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, **83**(5): 727-733.
- [62] 杨清书, 麦碧娟, 傅家谟, 等. 珠江干流河口水体有机氯农药的时空分布特征[J]. *环境科学*, 2004, **25**(2): 150-156.
- Yang Q S, Mai B X, Fu J M, *et al.* Spatial and temporal distribution of organochlorine pesticides (OCPs) in surface water from the pearl river artery estuary[J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(2): 150-156.
- [63] 肖春艳, 邵超, 赵同谦, 等. 黄河湿地孟津段水体及沉积物中有机氯农药的分布特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1614-1620.
- Xiao C Y, Tai C, Zhao T Q, *et al.* Distribution characteristics of organochlorine pesticides in surface water and sediments from the Mengjin wetland[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(6): 1614-1620.
- [64] 唐访良, 张明, 徐建芬, 等. 千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1735-1741.
- Tang F L, Zhang M, Xu J F, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of organochlorine pesticides (OCPs) in the water of lake Qiandao and its major input rivers[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(5): 1735-1741.
- [65] Qiu X H, Zhu T, Li J, *et al.* Organochlorine pesticides in the air around the Taihu Lake, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(5): 1368-1374.
- [66] Gao J, Zhou H F, Pan G Q, *et al.* Factors influencing the persistence of organochlorine pesticides in surface soil from the region around the Hongze Lake, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **443**: 7-13.
- [67] Willett K L, Ulrich E M, Hites R A. Differential toxicity and environmental fates of hexachlorocyclohexane isomers[J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32**(15): 2197-2207.
- [68] Barrie L A, Gregor D, Hargrave B, *et al.* Arctic contaminants: sources, occurrence and pathways[J]. *Science of the Total Environment*, 1992, **122**(1-2): 1-74.
- [69] Zhu Y F, Liu H, Xi Z Q, *et al.* Organochlorine pesticides (DDTs and HCHs) in soils from the outskirts of Beijing, China[J]. *Chemosphere*, 2005, **60**(6): 770-778.
- [70] Heberer T, Dünbier U. DDT metabolite Bis (chlorophenyl) acetic acid; the neglected environmental contaminant[J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(14): 2346-2351.
- [71] Bidleman T F. Atmospheric transport and air-surface exchange of pesticides[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1999, **115**(1-4): 115-166.

- [72] Wang X, Ren N Q, Qi H, *et al.* Levels, distributions, and source identification of organochlorine pesticides in the topsoils in Northeastern China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(10): 1386-1392.
- [73] 梁一灵, 梁国伟, 姜普查, 等. 杭州西湖表层水体有机氯农药残留特性研究[J]. *中国计量学院学报*, 2008, **19**(2): 174-177.
- Liang Y L, Liang G W, Jiang P C, *et al.* Studies on residual characteristic of organochlorine pesticides in surface water of West Lake of Hangzhou [J]. *Journal of China Jiliang University*, 2008, **19**(2): 174-177.
- [74] Yang J, Zhang W J, Shen Y F, *et al.* Monitoring of organochlorine pesticides using PFU systems in Yunnan lakes and rivers, China[J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(2): 219-225.
- [75] Guo G H, Wu F C, He H P, *et al.* Ecological risk assessment of organochlorine pesticides in surface waters of lake Taihu, China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2013, **19**(4): 840-856.
- [76] 葛冬梅, 韩宝平, 郑曦. 微山湖水体中有机氯农药的分布及风险评价[J]. *安徽农业科学*, 2010, **38**(22): 11987-11989, 12024.
- Ge D M, Han B P, Zheng X. Research on the distribution of organochlorine pesticide in the Weishan lake and its risk evaluation[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, **38**(22): 11987-11989, 12024.
- [77] 张明, 花日茂, 李学德, 等. 巢湖表层水体中有机氯农药的分布及其组成[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(1): 209-214.
- Zhang M, Hua R M, Li X D, *et al.* Distribution and composition of organochlorine pesticides in surface water body of Chaohu Lake [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(1): 209-214.
- [78] 龙智勇. 鄱阳湖有机氯农药分布特征与来源研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2009.
- Long Z Y. Study on organic pollutants sources and their distribution characteristics in Poyang Lake [D]. Nanchang: Nanchang University, 2009.
- [79] 沈烨冰, 张勇, 李存雄, 等. 贵州百花湖水体中有机氯农药的残留及健康风险评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2013, **29**(3): 311-315.
- Shen Y B, Zhang Y, Li C X, *et al.* Residues of organochlorine pesticides and health risk assessment in lake Baihuahu of Guizhou [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, **29**(3): 311-315.
- [80] 万译文, 康天放, 周忠亮, 等. 北京官厅水库有机氯农药分布特征及健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(4): 803-807.
- Wan Y W, Kang T F, Zhou Z L, *et al.* Distribution and health risk assessment of organochlorine pesticides in Beijing Guanting reservoir[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2009, **28**(4): 803-807.
- [81] Kafilzadeh F. Assessment of organochlorine pesticide residues in water, sediments and fish from lake Tashk, Iran [J]. *achievements in the Life Sciences*, 2015, **9**(2): 107-111.
- [82] Darko G, Akoto O, Oppong C. Persistent organochlorine pesticide residues in fish, sediments and water from Lake Bosomtwi, Ghana[J]. *Chemosphere*, 2008, **72**(1): 21-24.
- [83] Ntow W J. Pesticide residues in Volta Lake, Ghana[J]. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 2005, **10**(4): 243-248.
- [84] Kasozi G N, Kiremire B T, Bugenyi F W B, *et al.* Organochlorine residues in fish and water samples from lake victoria, Uganda[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, **35**(2): 584-589.
- [85] Golfinopoulos S K, Nikolaou A D, Kostopoulou M N, *et al.* Organochlorine pesticides in the surface waters of Northern Greece[J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(4): 507-516.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-rui, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₃ ²⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)