

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
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价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一荣, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的藜袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫酸类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

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价

唐访良¹, 张明¹, 徐建芬¹, 阮东德¹, 陈峰¹, 吴志旭², 程新良²

(1. 杭州市环境监测中心站, 杭州 310007; 2. 淳安县环境保护监测站, 杭州 311700)

摘要: 利用气相色谱法对采集于 2011 年 7 月和 2011 年 11 月的千岛湖(新安江水库)库区及其主要入库河流表层水中 10 种有机氯农药(OCPs)残留进行了分析,初步明确千岛湖水体中 HCHs 与 DDTs 的组成特征及来源,并对其健康风险进行了评价。结果表明,千岛湖水体中检出 8 种微量的 OCPs,检出频率最高的是 p,p' -DDT、 α -HCH 和 p,p' -DDE。12 个采样点均有不同浓度检出,库区 $\sum$ OCPs 的浓度范围在 $1.9 \sim 7.6 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,属低污染水平,3 条主要入库河流 $\sum$ OCPs 的浓度范围则是 $1.2 \sim 212 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。千岛湖水体中 OCPs 污染空间分布各异,主干流新安江为千岛湖 OCPs 污染的主要输入源;时间上丰水期大于枯水期,显示为面源污染特征。通过特征组分比例可确认 HCHs 污染主要是长距离传输或工业 HCHs 的降解,而 DDTs 则有新源输入。利用 EPA 推荐方法对通过饮水和皮肤接触途径摄入千岛湖水体中 OCPs 的健康风险进行评价:致癌健康风险指数在 $0.06 \times 10^{-7} \sim 23.2 \times 10^{-7}$,均位于 EPA 推荐的可接受风险范围内;非致癌健康风险指数介于 $3.43 \times 10^{-5} \sim 6.01 \times 10^{-3}$,根据评价标准均未超标。结果表明千岛湖水体中 OCPs 对人体产生的致癌、非致癌健康危害可忽略。

关键词: 有机氯农药; 表层水; 千岛湖; 污染特征; 健康风险评价

中图分类号: X524; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1735-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.05.014

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers

TANG Fang-liang¹, ZHANG Ming¹, XU Jian-fen¹, RUAN Dong-de¹, CHEN Feng¹, WU Zhi-xu², CHENG Xin-liang²

(1. Hangzhou Environmental Monitoring Central Station, Hangzhou 310007, China; 2. Chun'an Environmental Monitoring Station, Hangzhou 311700, China)

Abstract: Organochlorine pesticides (OCPs) were quantitatively determined by GC in several surface water samples collected in July 2011 and November 2011 from Lake Qiandao (Xin'an River Reservoir) and its major input rivers. Then the component characteristics and source apportionment of HCHs and DDTs were confirmed, and the health risk assessment was evaluated. The results showed that 8 OCPs were found to be in trace amount, and p,p' -DDT, α -HCH and p,p' -DDE were the highest frequently detected OCPs. The concentrations of total OCPs in surface water of the studied Lake ranged from 1.9 to $7.6 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, which were at lower pollution level, and $1.2 \sim 212 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ in the samples from its three major input rivers. The spatial distribution of OCPs in the water of lake was varying, and Xin'an River, the mainstream of the lake, was the main input source of OCPs. Also, different contamination patterns among sampling seasons were found, the concentrations of OCPs in surface water collected in wet period were higher than those in dry season, which display the characteristics of nonpoint source pollution. According to the ratio of feature components, the OCPs in surface water from the Lake Qiandao originated largely from long distance transmission or degradation of technical HCHs, while additional sources of DDTs existed in the region. In addition, human health risk assessment of ingestion through the drinking water and skin contact absorption was performed using EPA recommends methods, the carcinogenic and non-carcinogenic risks caused by OCPs were $0.06 \times 10^{-7} \sim 23.2 \times 10^{-7}$ and $3.43 \times 10^{-5} \sim 6.01 \times 10^{-3}$, respectively. According to the acceptable risk level, the carcinogenic and non-carcinogenic risks of the chemicals investigated can be considered negligible in water body of Lake Qiandao.

Key words: organochlorine pesticides (OCPs); surface water; Lake Qiandao; pollution characteristics; health risk assessment

有机氯农药 (organochlorine pesticides, OCPs) 是环境中广泛存在的一类持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs), 对人类和生态系统构成潜在危害, 成为世界公认的全球性环境公害^[1,2], 是各国环保部门制订的优先控制的化合物, 已被《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》列为首批控制的 12 种化合物之一^[3]。虽然自 20 世

纪 80 年代起我国陆续禁止生产和使用 OCPs, 但由于其难以降解, 目前在多种环境介质中仍可检出。水环境中的有机氯农药主要通过大气传输、干湿沉

收稿日期: 2013-08-22; 修订日期: 2013-12-04

基金项目: 杭州市社会发展科研攻关项目 (20120433B05); 杭州市环境保护科技项目 (2011003)

作者简介: 唐访良 (1963 ~), 男, 教授级高工, 主要研究方向为环境监测, E-mail: TangFL001@163.com

降、水流搬运、环境介质交换等方式经远距离迁移进入流域水体,对水生态系统构成威胁,因此水体中 OCPs 的迁移、转化、分布规律的研究具有重要的环境意义^[4]. 目前国内外对于水体中 OCPs 的研究已经很广泛,但多为河流、河口和海洋区域^[5~11],对湖泊方面的研究还比较缺乏^[12,13].

千岛湖原名新安江水库,位于钱塘江上游,是我国长江三角洲地区非常重要的风景名胜,也是重要的淡水水源地和渔业生产基地,其巨大的水资源量对本地区以及长三角的经济和社会发展具有极其重要的影响. 因此,其水环境质量一直受到广泛关注^[14~17],监控和评价千岛湖水质对人体和生态系统健康均具有重要意义. 迄今为止,尚无针对千岛湖 OCPs 污染现状的研究. 本研究对千岛湖水体中的 10 种 OCPs 进行了测定,探讨其时空分布特征和污染来源,并通过与其他地区及地表水环境质量标准相比较,对有机氯农药的健康风险进行了初步的评价,以期为千岛湖今后的水环境保护积累重要的基础资料,提供一定的理论依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

分别于千岛湖丰水期(2011年7月)和枯水期

(2011年11月)进行现场采样,选取千岛湖库区有代表性的区域及其3条主要入库河流共12个采样点(图1),各采样点位详细情况见表1,包括千岛湖主要入库河流断面、出境断面、沿岸库湾以及中心湖区. 每个样点采集表层水(水面以下0.5 m)10 L,混匀后取1.0 L水样,置于2.0 L分液漏斗中,50.0 mL正己烷,自动脱气萃取仪萃取10 min,静置10 min,收集有机相并用浓硫酸净化洗至无色,水洗有机相至中性,有机相经无水硫酸钠脱水后氮吹浓缩至约0.8 mL,用正己烷定容1.0 mL待测.

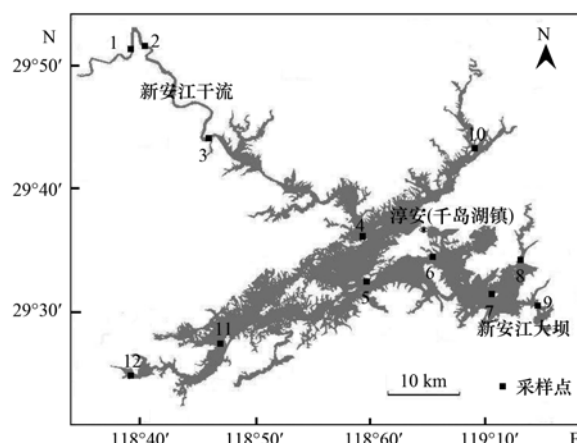


图1 千岛湖采样点分布示意

Fig. 1 Map of sampling sites in Lake Qiandao

表1 千岛湖采样点位置

Table 1 Sampling sites in Lake Qiandao

编号	点位	纬度	经度	采样点位情况
1	棉潭	N 29°51'34"	E 118°36'42"	安徽上游来水主要支流
2	深渡	N 29°51'47"	E 118°37'09"	安徽上游来水两条支流汇合区
3	街口	N 29°43'27"	E 118°43'28"	安徽上游进千岛湖的入境控制断面,约占总入湖流量 60%
4	旅游航道	N 29°36'04"	E 118°58'45"	千岛湖中心湖区,游客活动较频繁区域
5	三潭岛	N 29°32'31"	E 118°59'03"	千岛湖中心湖区
6	自来水厂	N 29°34'43"	E 119°03'36"	淳安县自来水厂取水点
7	密山	N 29°31'39"	E 119°08'53"	千岛湖东南湖泊区
8	富文库湾	N 29°34'19"	E 119°11'21"	千岛湖沿岸库湾
9	大坝前	N 29°30'33"	E 119°12'43"	千岛湖出境断面
10	航头岛	N 29°42'23"	E 119°07'17"	淳安县境内入湖的来水断面,约占总入湖流量 10%
11	茅头尖	N 29°28'18"	E 118°44'46"	千岛湖西南湖泊区
12	百亩畈	N 29°25'08"	E 118°37'42"	淳安县境内入湖的来水断面,约占总入湖流量 20%

1.2 标准样品与试剂

包含 10 种 OCPs (α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 δ -HCH、百菌清、环氧七氯、 p 、 p' -DDE、 p 、 p' -DDD、 o 、 p' -DDT、 p 、 p' -DDT) 的混合标准溶液为美国 AccuStandard 公司产品;正己烷、丙酮均为农残级,购自美国 TEDIA;浓硫酸为优级纯,购自国药集团. 无水 Na_2SO_4 为分析纯,购自国药集团,使用前于

400℃的马弗炉中活化 6 h.

1.3 色谱分析

采用配备 ECD 的气相色谱仪(Agilent 7890)测定样品^[18];色谱柱:HP-5MS 石英弹性毛细管色谱柱 30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm ;柱流速:氮气 1.6 mL $\cdot$ min⁻¹,恒流;进样口:温度 250℃,分流比 5:1;柱室:程序升温,起始温度 160℃,升温速率 10

℃·min⁻¹到 210℃,升温速率 20℃·min⁻¹到 250℃,保持 5 min;μECD 检测器:温度 310℃,尾吹氮气流量:60 mL·min⁻¹.进样量:1 μL.方法的加标回收率为:α-HCH(99.6%~109%)、β-HCH(94.4%~108%)、γ-HCH(90.0%~102%)、δ-HCH(89.2%~103%)、百菌清(85.2%~101%)、环氧七氯(91.6%~103%)、p,p'-DDE(89.2%~102%)、p,p'-DDD(85.6%~103%)、o,p'-DDT(88.5%~101%)、p,p'-DDT(81.6%~103%).方法检出限:α-HCH(0.2 ng·L⁻¹)、β-HCH(0.6 ng·L⁻¹)、γ-HCH(0.3 ng·L⁻¹)、δ-HCH(0.3 ng·L⁻¹)、百菌清(0.5 ng·L⁻¹)、环氧七氯(0.3 ng·L⁻¹)、p,p'-DDE(0.4 ng·L⁻¹)、p,p'-DDD(0.3 ng·L⁻¹)、o,p'-DDT(0.7 ng·L⁻¹)、p,p'-DDT(0.5 ng·L⁻¹).样品检测的同时完成方法空白,方法空白无 OCPs 检出.

1.4 健康风险评价

采用 EPA 推荐的健康风险评价模型^[19],对千岛湖水体中 OCPs 污染的健康风险进行评价.

非致癌风险 HI 计算公式:

HI = E / RfD (1)

式中 RfD 为参考剂量(reference dose, RfD) [mg·(kg·d)⁻¹]. E 为长期摄入量.

致癌风险 R 计算公式:

R = SF × E R ≤ 0.01
R = 1 - exp(-SF × E) R > 0.01 (2)

式中, SF 为化学致癌物的致癌斜率系数 [(mg·(kg·d)⁻¹)⁻¹],它是指一个个体终生(70 a)暴露于某一致癌物后发生癌症的概率的 95% 上限估计值.

饮水途径暴露(E):

E = (c × IR_w × EF × ED) / (BW × AT) (3)

皮肤接触途径暴露(E):

E = (c × k × A_{sd} × EF × FE × ED) / (500 × BW × AT × f) × √(6τ × TE / π) (4)

式中,c 为水体中污染物的浓度(mg·L⁻¹),IR_w 为饮水率(EPA 建议值为 2 L·d⁻¹),EF 为暴露频率(饮水为每日必需,因此该值为 365 d·a⁻¹),ED 为暴露历时(EPA 建议值:30 a),BW 为平均人体体重(我国宜采用 60 kg),AT 为平均时间(致癌为 70 a×365 d·a⁻¹、非致癌为 ED×365 d·a⁻¹),人体表面积(A_{sd})取16 600 cm²,洗澡频率 FE 取 0.3 次·d⁻¹,洗澡时间 TE 取 0.4 h,肠道吸附比率 f 取 1,假设每种污染物的延滞时间 τ 均为 1 h,皮肤渗透参数 k、SF 值、RfD 取值见表 2^[20].

表 2 有机氯污染物的致癌系数和参考剂量¹⁾
Table 2 Slope factor and reference dose of the OCPs

化合物	CAS	致癌系数 SF /(mg·(kg·d) ⁻¹) ⁻¹	皮肤渗透系数 k /cm·h ⁻¹	RfD /mg·(kg·d) ⁻¹
α-HCH	319-84-6	2.7	0.020 6	0.008
β-HCH	319-85-7	1.5	0.020 6	—
γ-HCH	58-89-9	1.1	0.020 6	0.000 3
δ-HCH	319-86-8	—	0.020 6	—
百菌清	1897-45-6	0.003 1	0.005 37	0.015
环氧七氯	1024-57-3	5.5	0.020 9	0.000 013
p,p'-DDE	72-55-9	0.34	0.545	—
p,p'-DDD	72-54-8	0.24	0.251	0.003
o,p'-DDT	789-02-6	—	0.526	—
p,p'-DDT	50-29-3	0.34	0.628	0.000 5

1) “—”表示暂无相关参数

当污染为复合污染时,一般认为各种污染物所引起的风险呈加和关系,而不是协同或拮抗关系,非致癌风险指数和致癌风险指数分别为各污染因子的风险指数之和,表示为:

∑ HI = HI₁ + HI₂ + ⋯ + HI_n (5)

∑ R = R₁ + R₂ + ⋯ + R_n (6)

2 结果与讨论

2.1 千岛湖水体中 OCPs 残留污染特征

根据监测结果(表 3),对千岛湖表层水体中 OCPs 污染时空分布特征进行探讨.丰水期,库区 7 个点位有 4 个检出 OCPs,检出率为 57.1%, ∑ OCPs 检出浓度为 2.0~7.6 ng·L⁻¹,属低污

染水平. 入库河流 5 个采样点位除百亩畈外均有不同浓度 OCPs 检出, $\sum$ OCPs 检出浓度为 1.2 ~ 212 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. $\sum$ OCPs 检出浓度最高的是深渡点位, 其次是棉潭和街口. 不同污染物浓度各异, 在所有 12 个点位中检出浓度最高的是 p,p' -DDE, 在深渡点位, 检出浓度为 104 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 检出频率最高的是 p,p' -DDT, 在 8 个采样点 (66.7%) 检出, 检出浓度范围为 1.2 ~ 35.8 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; γ -HCH 和环氧七氯未检出. 枯水期所有 12 个采样

点位均有不同浓度的 OCPs 检出, 库区水体 $\sum$ OCPs 检出浓度 1.9 ~ 6.3 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 入库河流水体则是 2.6 ~ 19.3 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, $\sum$ OCPs 检出浓度最高点位是街口, 其次为深渡、棉潭; 10 种 OCPs 污染状况各异, 检出浓度最高的是 p,p' -DDT, 街口点位检出 13.2 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; p,p' -DDT 在 12 个采样点 (100%) 均有检出, 检出浓度范围为 1.9 ~ 13.2 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; γ -HCH、百菌清、环氧七氯、 o,p' -DDT 未检出.

表 3 千岛湖表层水体中 10 种 OCPs 浓度¹⁾/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$
Table 3 Data of 10 OCPs in the surface water from Lake Qiandao/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

采样点位	采样时间	α -HCH	β -HCH	γ -HCH	δ -HCH	百菌清	环氧七氯	p,p' -DDE	p,p' -DDD	o,p' -DDT	p,p' -DDT	$\sum$ OCPs
棉潭	丰水期	1.0	—	—	—	—	—	16	—	—	33	50
	枯水期	—	—	—	—	—	—	0.6	—	—	8.0	8.6
深渡	丰水期	7.6	6.8	—	30	19.8	—	104	—	8.2	35.8	212
	枯水期	0.7	2.1	—	—	—	—	1.0	—	—	11.1	14.9
街口	丰水期	—	—	—	—	—	—	2.0	2	—	28.6	32.6
	枯水期	0.6	3.1	—	—	—	—	2.4	—	—	13.2	19.3
三潭岛	丰水期	—	—	—	—	—	—	0.8	—	—	2.0	2.8
	枯水期	0.3	—	—	0.3	—	—	0.5	—	—	3.3	4.4
旅游航道	丰水期	—	—	—	1.0	—	—	4.2	—	—	3.4	7.6
	枯水期	0.3	—	—	—	—	—	1.2	—	—	4.8	6.3
自来水厂	丰水期	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.0	2.0
	枯水期	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.9	1.9
密山	丰水期	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.0	2.0
	枯水期	0.3	—	—	—	—	—	—	—	—	2.6	2.9
茅头尖	丰水期	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
	枯水期	0.4	—	—	0.5	—	—	—	—	—	2.5	3.4
百亩畈	丰水期	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
	枯水期	0.3	—	—	—	—	—	—	—	—	2.3	2.6
航头岛	丰水期	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.2	1.2
	枯水期	—	—	—	—	—	—	0.6	—	—	3.4	4.0
富文库湾	丰水期	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
	枯水期	—	—	—	0.5	—	—	—	2.5	—	1.9	4.9
大坝前	丰水期	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
	枯水期	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.2	2.2

1) “—”表示未检出,统计时浓度以 0 计

综合两次监测结果,千岛湖库区表层水体 OCPs 污染较轻,而三条主要入库河流中,主干流新安江表层水体检出浓度最高. 从时间分布上来看,丰水期(7 月)大于枯水期(11 月),显示为农业面源污染特征. 从空间分布来看,棉潭、深渡和街口这 3 个断面 $\sum$ OCPs 检出浓度较高,街口是新安江安徽和浙江交界断面,也是千岛湖水量最大的入库断面,而棉潭和深渡则位于新安江上游安徽境内点位,受流域内

农业面源污染,且沿途接纳部分工农业污废水,导致水体有机氯农药污染较为严重. 千岛湖湖心区及出口断面可能由于沉积物吸附及湖水稀释而降低水体中 OCPs 浓度,其中三潭岛和旅游航道 $\sum$ OCPs 检出浓度较其他湖区点位略高.

2.2 来源解析

OCPs 是一类对环境构成严重危害的人工合成的持久性有机污染物,于 2001 年 5 月通过的《斯

德哥尔摩公约》首批列入 12 种 POPs 物质, 其中就有 9 种 OCPs. 一般来说, 禁用 DDT 后, 随着 DDT 降解为 DDE 和 DDD, DDT 浓度与 DDE、DDD 浓度和的比值应小于 1, 但当该比值大于 1 时, 说明有新源输入^[21,22]. 在所有监测的水样中, 同时检出 DDT、DDE 和 DDD 的有 1 个; 同时检出 DDT 和 DDE 的有 10 个; 同时检出 DDT 和 DDD 的有 1

个; 检出 DDT 而没有检出 DDE 或者 DDD 的有 9 个; 未检出 DDT 而有检出 DDE 或者 DDD 的有 1 个. 由图 2 可以看出, 在检出 DDT、DDE 或 DDD 的水样中, 丰水期采样的深渡、旅游航道和百亩畈以及枯水期采样的富文库湾的比值小于 1 外, 其余都大于 1, 最高达 13.3, 说明千岛湖流域有 DDT 新源输入.

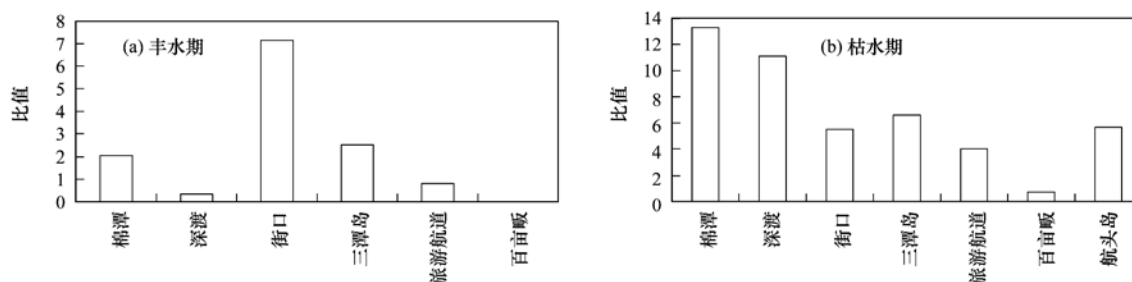


图 2 千岛湖水中 DDT 浓度和 DDE、DDD 浓度之和比值

Fig. 2 Ratio between the DDT concentration and the total concentration of DDD and DDE in the water samples from Lake Qiandao collected in wet period and dry season

在工业 HCH 中, α -HCH 浓度与 γ -HCH (林丹) 浓度的比值为 3 ~ 7, 当有林丹输入时, 该比值可能接近或小于 1; 如果该比值高于 7, 可能是由于 HCH 的长距离传输或者工业 HCH 降解所致^[21~23]. 这是因为 α -HCH 比林丹的半衰期长约 25%, 所以该比值越高, 说明长距离传输的越远, 或者降解年份越长. 在有 OCPs 检出的 39 个水样中, 14 个水样只检出了 α -HCH, 没有检出林丹; 1 个采样点同时检出 α -HCH 和 γ -HCH, 浓度比值为 4.21; 其余 24 个水样 α -HCH 与林丹均未检出. 说明千岛湖水体中的 HCH 污染主要是长距离传输或工业 HCH 的降解.

3 千岛湖水体中 OCPs 健康风险

根据分类标准^[20,24]对所测 10 种 OCPs 进行分类, 除 δ -HCH 和 o,p' -DDT 暂无分类数据外, 其他几种均为 IRIS 分类系统 B2 或者 IARC 分类系统 2B 类化合物, 均为可能致癌化合物. 因此, 对所测的 10 种 OCPs 分别进行非致癌和致癌健康风险评价, δ -HCH 和 o,p' -DDT 评价时分别以同系列化合物中毒性最大者参数计算. 其中水样中未检出项目浓度以 0 计, 参与评价. 利用式(3)和式(4)计算饮水及皮肤接触途径摄入量(E), 然后通过式(1)和式(2)分别计算其非致癌(HI)和致癌风险指数(R), 最后根据式(5)和式(6)计算 $\sum HI$ 和 $\sum R$.

从监测结果可以看出, 千岛湖丰、枯水期表层水体特征污染物各异, 饮水摄入和洗澡过程中的皮

肤接触暴露途径导致的非致癌风险评价结果也有所不同, 下面按监测时期分别进行评价. 丰水期评价结果: 在各监测断面水体 OCPs 非致癌健康风险指数的最大值为 6.01×10^{-3} , 平均值为 0.74×10^{-3} ; 从污染物分类来看, p,p' -DDE 和 p,p' -DDT 较高, 其非致癌健康风险指数分别为 0.35×10^{-3} 和 0.26×10^{-3} ; 风险指数空间分布各异, 深渡点位的风险指数最高, 其次是棉潭和街口. 枯水期评价结果: 各监测断面水体中均有 OCPs 检出, 人体非致癌健康风险指数介于 $0.05 \times 10^{-3} \sim 0.60 \times 10^{-3}$ 之间, 平均为 0.18×10^{-3} ; 不同污染物对总风险指数贡献不同, p,p' -DDT 的健康风险指数最高, 平均为 0.14×10^{-3} , 其次为 β -HCH 和 p,p' -DDE; 空间分布上街口断面最高, 达 0.60×10^{-3} , 其次是深渡和棉潭, 分别为 0.45×10^{-3} 和 0.24×10^{-3} . 千岛湖水体中 OCPs 引起的 $\sum HI$ 时空分布如图 3 所示, 从中可以看出无论丰水期还是枯水期, 棉潭、深渡和街口这 3 个断面 $\sum HI$ 较高, 中心湖区及出境断面较低. 时间分布上 $\sum HI$ 值丰水期高于枯水期, 特别是主要入境断面街口及上游棉潭和深渡点位, 丰水期明显高于枯水期, 显示为面源污染特征, 其他点位除了湖心区旅游航道点位丰水期 $\sum HI$ 略高外, 枯水期的 $\sum HI$ 相对较高, 呈现点源污染特征. 也说明千岛湖干流新安江是其水体中 OCPs 健康风险的最主要输入源.

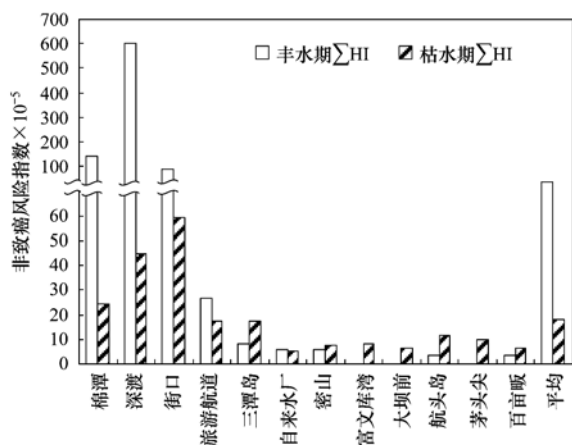


图3 千岛湖各点位水体中 OCPs 总非致癌
风险指数时空分布特征

Fig. 3 Non-carcinogenicity total health risk index of
OCPs in the sampling sites of the Lake Qiandao

千岛湖水体中 OCPs 致癌健康风险指数总体分布和非致癌健康风险指数总体一致. 丰水期致癌健康风险深渡点位最高, 达 23.2×10^{-7} , 其次是棉潭和街口, 分别为 2.76×10^{-7} 和 1.56×10^{-7} ; 从单个污染物贡献来看, δ -HCH 最高, 平均为 1.00×10^{-7} , 其次是 p, p' -DDE 和 p, p' -DDT, 分别为 0.52×10^{-7} 和 0.44×10^{-7} . 枯水期风险指数街口最高, 为 1.65×10^{-7} , 其次是深渡, 为 1.31×10^{-7} ; 各污染物贡献不同, p, p' -DDT 最高, 平均为 0.23×10^{-7} , 其次为 α -HCH 和 β -HCH, 均为 0.09×10^{-7} . 图 4 为千岛湖水体中 OCPs 引起的 ΣR 时空分布, 从中可以看出, 千岛湖水体中 OCPs 的 ΣR 时空分布特征与 ΣHI 基本一致, 各期评价总致癌健康风险指数介于 $0.09 \times 10^{-7} \sim 89.8 \times 10^{-7}$ (指数为 0 的除外, 下

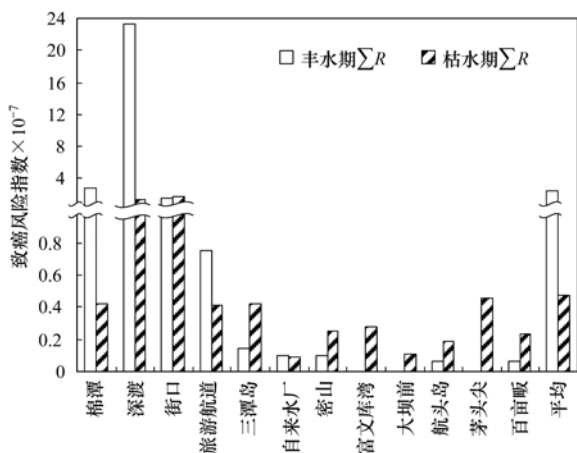


图4 千岛湖各点位水体中 OCPs 总致癌风险指数

Fig. 4 Total carcinogenicity health risk index of OCPs in the
sampling sites of the Lake Qiandao

同), 若以人均寿命 70 a 计, 则年均致癌健康风险指数最大为 $1.28 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$, 位于 EPA 规定社会人群可接受的风险值 ($10^{-7} \sim 10^{-6} \text{ a}^{-1}$) 范围内.

从以上数据可以看出, 千岛湖流域水体中 OCPs 的健康风险不大, 对人体的健康不构成威胁. 但是本研究仅对饮水及洗澡皮肤接触这 2 个暴露途径摄入 OCPs 污染物健康风险进行评价, 对食用千岛湖鱼类暴露途径未进行分析和评价. 而通过食物链后, 在水生物体内的含量将大大高于水体中的浓度^[25~28], 从而将对人体健康构成直接且更为严重的威胁. 有关部门应给予足够的重视, 加强对千岛湖流域农业区有机类农药的宏观调控和限制使用, 使得其水源得到保护和改善.

4 结论

(1) 千岛湖库区及其三条主要入库河流水体中共检出 8 种 OCPs, 库区 Σ OCPs 检出浓度为 $1.9 \sim 7.6 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 入库河流 Σ OCPs 检出浓度为 $1.2 \sim 212 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 检出频率最高的是 p, p' -DDT、 α -HCH 和 p, p' -DDE. 综合两次监测结果, 千岛湖水体中 OCPs 污染在丰水期 (7 月) 大于枯水期 (11 月), 显示为农业面源污染特征. 从空间分布来看, 棉潭、深渡和街口这 3 个断面 Σ OCPs 检出浓度较高, 街口是新安江安徽和浙江交界断面, 而棉潭和深渡则位于新安江上游安徽境内点位, 可能受流域内农业面源污染, 且沿途接纳部分生活污水, 导致水体有机氯农药污染较为严重.

(2) 采用 EPA 建议的评价模型和参数对千岛湖水体中 OCPs 污染进行健康风险评价. 千岛湖水体中 OCPs 健康风险时间、空间分布特征明显: 丰水期风险指数高于枯水期; 最大入库断面街口及其上游安徽境内断面深渡、棉潭的健康风险指数较高, 湖库中心断面及出库断面健康风险指数较低. 各个监测断面 OCPs 引起的非致癌健康风险指数介于 $3.43 \times 10^{-5} \sim 6.01 \times 10^{-3}$, 根据评价标准均未超标. 致癌健康风险指数在 $0.09 \times 10^{-7} \sim 89.8 \times 10^{-7}$, 年均致癌风险指数为 $1.28 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$, 位于 EPA 推荐的可接受风险范围内. 结果显示千岛湖水体不会对人体产生明显的致癌、非致癌健康危害.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Willett K L, Ulrich E M, Hites A. Differential toxicity and environmental fates of hexachlorocyclohexane isomers [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32** (15): 2197-2207.
- [3] Stockholm Convention on persistent organic pollutants (SCPOPs). The Nine New POPs An introduction to the nine chemicals added to the Stockholm Convention by the Conference of the Parties at its fourth meeting [EB/OL]. 2010-08-01. <http://chm.pops.int/Programmes/NewPOPs/Publications/tabid/695/ctl/Download/mid/2784/language/en-US/Default.aspx?id=2>.
- [4] Shen L, Wania F. Compilation, evaluation, and selection of physical-chemical property data for organochlorine pesticides [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2005, **50** (3): 742-768.
- [5] 杨清书, 麦碧娴, 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.
- [6] 杨清书, 麦碧娴, 罗孝俊, 等. 澳门水域水体有机氯农药的垂线分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2004, **24** (3): 428-434.
- [7] 杨嘉谟, 王赞, 苏青青. 有机氯农药在长江武汉段的残留状况调查 [J]. *武汉化工学院学报*, 2004, **26** (4): 38-41.
- [8] 安琼, 董元华, 葛成军, 等. 南京市小河流表层沉积物中的有机氯农药残留及其分布现状 [J]. *环境科学*, 2006, **27** (4): 737-741.
- [9] 齐维晓, 刘会娟, 曲久辉, 等. 天津主要纳污及入海河流中有机氯农药的污染现状及特征 [J]. *环境科学学报*, 2010, **30** (8): 1543-1550.
- [10] 程晨, 陈振楼, 毕春娟, 等. 上海市黄浦江水源地六六六、滴滴涕类内分泌干扰物污染特征分析及健康风险评价 [J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27** (2): 705-710.
- [11] 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.
- [12] 张家泉, 肖宇伦. 我国湖泊水环境中有机氯农药污染的研究进展 [J]. *黄石理工学院学报*, 2012, **28** (1): 22-27.
- [13] 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.
- [14] 余员龙, 任丽萍, 刘其根, 等. 2007~2008 年千岛湖营养盐时空分布及其影响因素 [J]. *湖泊科学*, 2010, **22** (5): 684-692.
- [15] 李培培, 史文, 刘其根, 等. 千岛湖叶绿素 a 的时空分布及其与影响因子的相关分析 [J]. *湖泊科学*, 2011, **23** (4): 568-574.
- [16] 李共国, 虞左明. 千岛湖轮虫群落结构及水质生态学评价 [J]. *湖泊科学*, 2003, **15** (2): 170-176.
- [17] 张明, 唐访良, 范晓开, 等. 固相萃取-亲水相互作用液相色谱法同时测定环境水样中 3 种酰胺类化合物 [J]. *分析化学*, 2012, **40** (10): 1555-1560.
- [18] 徐建芬, 阮东德, 唐访良, 等. 气相色谱法同时测定地表水中的百菌清、环氧七氯和有机氯农药 [J]. *干旱环境监测*, 2011, **25** (3): 129-132.
- [19] U. S. EPA. Risk assessment guidance for superfund (Volume 1) human health evaluation manual, EPA/540/1-89/002 [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- [20] Integrated Risk Information System. Database developed and maintained by the U. S. EPA, Office of health and environmental assessment, environmental criteria and assessment office, Cincinnati, OH [EB/OL]. <http://www.epa.gov/iris/>.
- [21] Wang X, Ren N Q, Qi H, *et al.* Levels, distributions and source-acceptor relationship of organochlorine pesticides in the top soils in Northeastern China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21** (10): 1541-1546.
- [22] Yang Y Y, Li D L, Mu D H. Levels, Seasonal variations and sources of organochlorine pesticides in ambient air of Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42** (4): 677-687.
- [23] 张利, 刘红玉, 张慧, 等. 湖南东部地区稻田土壤中有有机氯农药残留及分布 [J]. *环境科学研究*, 2008, **21** (1): 118-123.
- [24] IARC. Complete List of Agents evaluated and their classification [EB/OL]. <http://www.iarc.fr/>, 2006.
- [25] 窦薇, 赵忠宪. 白洋淀水生食物链 BHC、DDT 生物浓缩分析 [J]. *环境科学*, 1997, **18** (5): 41-43.
- [26] Li Y F, Macdonald R W. Sources and pathways of selected organochlorine pesticides to the Arctic and the effect of pathway divergence on HCH trends in biota: a review [J]. *The Science of the total Environment*, 2005, **342** (1-3): 87-106.
- [27] Hu G C, Dai J Y, Mai B X, *et al.* Concentrations and accumulation features of organochlorine pesticides in the baiyangdian lake freshwater food web of North China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, **58** (3): 700-710.
- [28] 王莹, 仇雁翎, 费勇, 等. 养殖鳊鱼体内典型有机氯化物的检测与人体健康风险评估初探 [J]. *环境科学*, 2011, **32** (8): 2385-2390.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-lu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行