

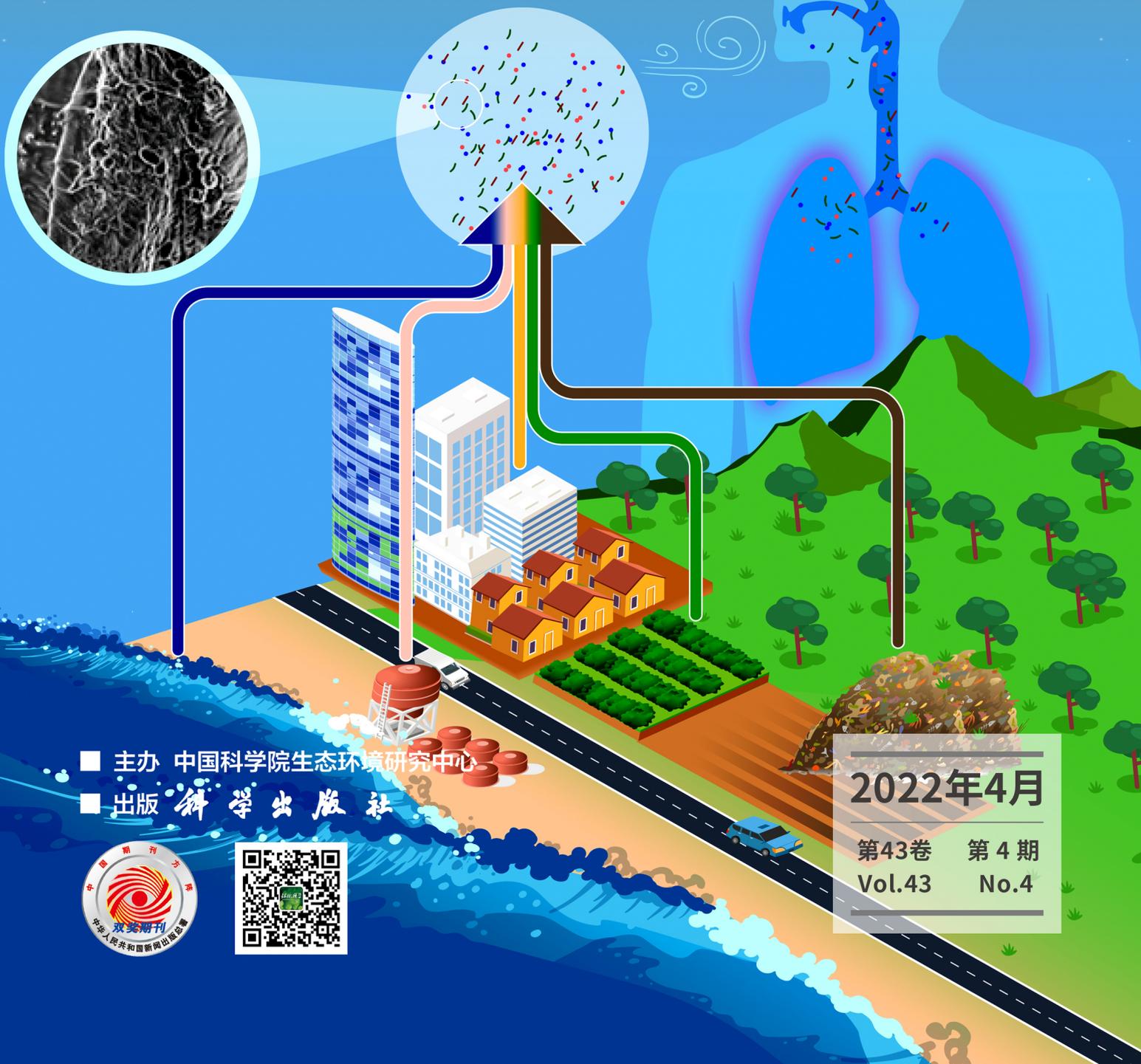
方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性  
涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期  
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM<sub>2.5</sub>时空特征与驱动因素分析 ..... 葛岂序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)

郑州市大气PM<sub>2.5</sub>中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据 ..... 曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)

宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析 ..... 杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)

上海城区PM<sub>2.5</sub>中有机组分及硝基芳香化合物分布特征 ..... 庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)

南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源 ..... 陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新锋, 盖鑫磊 (1738)

春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化 ..... 江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)

重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势 ..... 李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)

珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价 ..... 张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)

基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析 ..... 刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)

基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源 ..... 韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)

基于SOA和O<sub>3</sub>生成潜势的杭州市PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>协同控制 ..... 林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)

超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响 ..... 王鹏程, 袁勃, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)

西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应 ..... 王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性 ..... 涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)

基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征 ..... 高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)

西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征 ..... 杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)

“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析 ..... 廖雅, 侯晓姝, 任晓红 (1853)

中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重 ..... 秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)

新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系 ..... 雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)

珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素 ..... 涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)

河套灌区浅层地下水NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N时空变化及驱动因素 ..... 袁宏颖, 杨树青, 张万锋, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)

盐城地区地下水溶质来源及其成因分析 ..... 王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)

白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义 ..... 王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)

东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素 ..... 陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)

松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性 ..... 程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)

区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响 ..... 高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)

南水北调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素 ..... 朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)

千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评估 ..... 弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)

蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险 ..... 靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)

基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价 ..... 李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)

小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响 ..... 张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)

不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响 ..... 王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)

南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析 ..... 岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)

老化作用对微塑料吸附镉的影响及其机制 ..... 王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)

碳化泡沫负载Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>活化过硫酸盐降解罗丹明B ..... 王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)

低总氮浓度下Fe<sup>2+</sup>促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮 ..... 郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)

污水管道增强通风作用下氧气的传质特性 ..... 杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)

长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价 ..... 张义, 周心劝, 曾晓辉, 冯娇, 刘玉荣 (2062)

中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义 ..... 王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)

贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评估及控制因素 ..... 张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)

地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征 ..... 王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)

矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价 ..... 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)

农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价 ..... 朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)

安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析 ..... 陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)

方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果 ..... 任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)

伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响 ..... 张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)

我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性 ..... 刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)

地膜覆盖和生物炭添加对菜地N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)

化肥运筹对稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)

松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性 ..... 王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)

棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响 ..... 周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)

pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响 ..... 马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)

生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响 ..... 张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)

有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 ..... 林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)

九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征 ..... 黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)

碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望 ..... 刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)

《环境科学》征订启事(1929) 《环境科学》征稿简则(1975) 信息(1996, 2029, 2080)

# 千岛湖水体中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 的分布特征及健康风险评价

弥启欣<sup>1</sup>, 国晓春<sup>1</sup>, 卢少勇<sup>1\*</sup>, 邓义祥<sup>2\*</sup>, 卢洪斌<sup>1</sup>, 李响<sup>1</sup>, 刘晓贺<sup>1</sup>, 陈金明<sup>1</sup>

(1. 中国环境科学研究院湖泊水污染治理与生态修复国家工程实验室, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院水生态环境研究所, 北京 100012)

**摘要:** 为揭示千岛湖水体中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 的污染情况和风险水平, 对枯水期和丰水期千岛湖湖区及入湖河流共计 17 个采样点水体中 6 种 PAEs 进行了检测, 分析了 PAEs 的污染水平, 并开展健康风险评价. 结果表明, 枯水期和丰水期 6 种 PAEs 均有检出,  $\rho(\sum \text{PAEs})$  分别为  $0.98 \sim 5.33 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (平均值为  $2.63 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 和  $3.22 \sim 17.88 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (平均值为  $7.99 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ); 从检出率和检出量来看, DiBP、DBP 和 DEHP 为千岛湖主要的 PAEs 组分, 丰水期 10 个点位的 DBP 测定值和平均值高于我国《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 中规定的 ( $3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ); 主成分分析显示, 千岛湖水体中 PAEs 来源主要为个人护理品、塑料制品和生活垃圾等; 千岛湖 PAEs 的污染水平与国内外水体相比较; 健康风险评价结果显示, 千岛湖 PAEs 的非致癌风险指数 (HI) 均小于 1, 表明不会对人体产生非致癌风险; 但个别点位致癌风险值 (R) 对儿童超过了  $10^{-6}$ , 表明可能会对儿童产生致癌风险, 应引起重视.

**关键词:** 千岛湖; 水体; 邻苯二甲酸酯 (PAEs); 污染水平; 健康风险

**中图分类号:** X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2022)04-1966-10 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202108110

## Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China

MI Qi-xin<sup>1</sup>, GUO Xiao-chun<sup>1</sup>, LU Shao-yong<sup>1\*</sup>, DENG Yi-xiang<sup>2\*</sup>, LU Hong-bin<sup>1</sup>, LI Xiang<sup>1</sup>, LIU Xiao-he<sup>1</sup>, CHEN Jin-ming<sup>1</sup>

(1. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Institute of Water Ecology and Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** In order to reveal the pollution and risk level of phthalic acid esters (PAEs) in Qiandao Lake, six types of PAEs in 17 sampling points (in Qiandao Lake and its inflowing rivers) in dry and wet seasons were detected. The results showed that six types of PAEs were detected in both dry and wet seasons, with the concentrations of  $0.98 \sim 5.33 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (average concentration  $2.63 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) in the dry season and  $3.22 \sim 17.88 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (average concentration  $7.99 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) in the wet season. In terms of the detection rate and concentration of each monomer PAEs, DiBP, DBP, and DEHP were the main PAEs components in the water body. The measured value of DBP at 10 sampling points and its average mass concentration in the wet season were higher than the national standard ( $3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ). Principal component analysis indicated that the main sources of PAEs were personal care products, plastics, and domestic waste. The pollution level of PAEs in Qiandao Lake was at a high level at home and abroad. The health risk assessment results in Qiandao Lake showed that the non-carcinogenic risk index of PAEs in the study area was less than 1, which would not produce non-carcinogenic risks to the human body. The carcinogenic risk index of children exceeded  $10^{-6}$  at some points, indicating that it may pose carcinogenic risks to children, to which more attention should be paid.

**Key words:** Qiandao Lake; surface water; phthalic acid esters (PAEs); pollution levels; health risk

邻苯二甲酸酯 (phthalic acid esters, PAEs), 又名酞酸酯, 是日常生活和工业生产中常见的有机化合物, 是邻苯二甲酸酐和醇在经过醇解反应之后所得到的产物<sup>[1]</sup>, 其常见的主要用途是塑料制品增塑剂及个人护理品添加剂<sup>[2]</sup>. PAEs 具有致癌、致畸和致突变作用, 是一种在水环境中常检测到的内分泌干扰物, 属于环境激素类化合物<sup>[3]</sup>, 可随食物链传递, 对不同营养级个体和种群产生毒性效应, 最终影响生物多样性<sup>[4]</sup>. 因此 PAEs 成为全球公认的环境有机污染物, 邻苯二甲酸二甲酯 (DMP)、邻苯二甲酸二乙酯 (DEP)、邻苯二甲酸二正丁酯 (DBP)、邻苯二甲酸丁苄酯 (BBP)、邻苯二甲酸二(2-乙基己基) 酯 (DEHP) 和邻苯二甲酸二正辛酯 (DOP) 等 6 种

PAEs 被美国环保署 (US EPA) 列为优控污染物<sup>[5]</sup>, 我国也将 DEP、DMP 和 DOP 这 3 种物质纳入优控污染物名单进行管控<sup>[2,6]</sup>. 据报道, 在我国长江、松花江、鄱阳湖、太湖和加拿大福溪河、西班牙曼萨纳雷斯河等水体中都监测到了不同程度的 PAEs 污染, 因此 PAEs 对生态环境的影响也亟需重视起来<sup>[7,8]</sup>.

千岛湖又名新安江水库, 地处于钱塘江上游地

收稿日期: 2021-08-11; 修订日期: 2021-09-01

基金项目: 国家科技基础性工作专项 (2015FY110900)

作者简介: 弥启欣 (1997 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊有毒有害化学品赋存特征与水环境调查, E-mail: 1066523716@qq.com

\* 通信作者, E-mail: lushy2000@163.com; dengyx@caees.org.cn

区,是我国华东地区十分重要的淡水水源地之一,其水资源存储量十分丰富,因而对本地区及下游长三角地区的经济和社会发展具有重要影响,所以千岛湖及其上下游的水环境质量一直被广泛关注,对千岛湖水质的监控和评价对周边人体和生态系统的健康具有重要意义<sup>[9,10]</sup>. 随着千岛湖旅游活动的升温,千岛湖流域在开发过程中无可避免地受到不断增强的人为活动的严重影响,流域水环境保护面临着相当大的压力. 目前,针对千岛湖地区水环境的研究较多,研究对象以水质常规和生物指标为主<sup>[10~12]</sup>,有关 PAHs<sup>[13]</sup> 和 OCPs<sup>[9]</sup> 等 POPs 的研究也逐步展开,但尚无针对 PAEs 的相关研究,其水域内 PAEs 对人体造成的健康风险也尚不明确. 因此,针对千岛湖 PAEs 污染的调查研究对其流域内及其他饮用水水源地的类似相关问题具有一定的参考价值.

本文以千岛湖及其入湖河流为研究对象,针对千岛湖水体中 PAEs 污染现状开展调查监测,探索其时空分布特征和来源,分析其污染水平,并对千岛湖水体 PAEs 展开健康风险评价,以衡量其暴露非致癌风险和致癌风险,从而填补千岛湖 PAEs 相关研究领域的空缺,以期为千岛湖流域生态环境的研究和保护提供数据支撑和相关理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂与仪器

主要试剂:PAEs 标准品为 DMP、DEP、DiBP、DBP、DEHP 和 DOP(德国 Dr. Ehrenstorfer); 内标溶液为氘代邻苯二甲酸二丁酯(DBP-d4)和氘代邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP-d4)(德国 Dr. Ehrenstorfer); 丙酮、乙酸乙酯和正己烷(色谱纯,美国 Tedia); 无水硫酸钠(分析纯,国药化学试剂公司); 高纯氮气 99.99%; 高纯氦气 99.99%.

主要仪器:DB-1701MS 气相色谱柱(30 m × 0.25 μm × 0.25 mm, 美国 Agilent); 7890B-5977B GC-MS 联用仪(美国 Agilent), 配置自动进样器和 EI 源; 冷干机(德国 Christ); 氮吹仪(美国 Biotage); 离心机 H2100R(湖南长沙湘仪); ZWY-240 往复振荡摇床(上海智诚).

### 1.2 研究区域概况与样品采集

千岛湖所在行政区域为浙江省杭州市淳安县,介于东经 118°21' ~ 119°20' 和北纬 29°11' ~ 30°02' 之间. 自 1959 年新安江水库建成后,千岛湖汇水面积达 10 442 km<sup>2</sup>, 水域面积达 573 km<sup>2</sup>, 库容量 178.4 亿 m<sup>3</sup>, 平均水深 34 m. 湖区四周地势高凸, 中间低洼, 属山地丘陵区. 所处纬度带属于亚热带季风气候, 四季分明, 雨量充沛. 降水集中在每年的 4 ~ 9

月, 而 10 月 ~ 次年 3 月的降水量则相对较少, 年均降水量可达 1 675 mm. 湖区内夏季最长, 冬季次之, 春秋两季时间则较短<sup>[14]</sup>.

为全面了解千岛湖 PAEs 的时空变化特征, 于丰水期(2019 年 9 月)和枯水期(2021 年 3 月)在图 1 所示采样点(共 17 个)进行现场采样, 采样点位包括千岛湖出入库河流断面、中心湖区及沿岸湖区. 水样的采集和保存方法参照相关技术指导<sup>[15]</sup> 和规定<sup>[16]</sup> 执行, 每个点位采集水样 2 L, 滴加浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 以调节 pH 值抑制生物活性, 并于低温环境(4℃ 以下) 避光运回实验室处理.

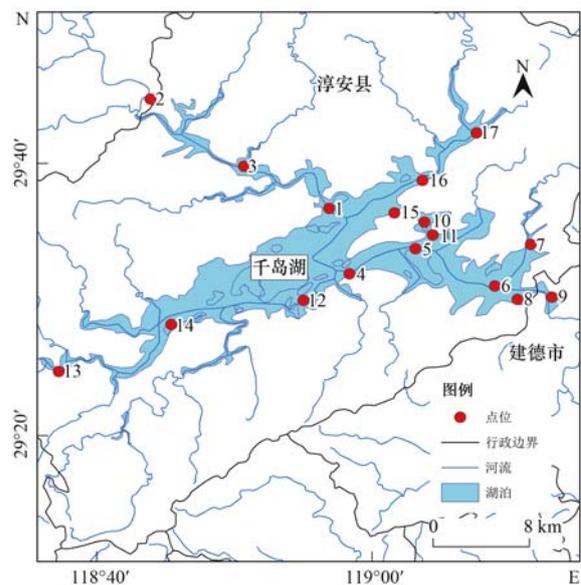


图 1 千岛湖采样点位分布示意图

Fig. 1 Distribution of sampling points in Qiandao Lake

### 1.3 样品预处理与检测分析

根据相关分析方法对水样进行预处理<sup>[17]</sup>, 首先用玻璃纤维滤膜(0.45 μm) 过滤, 过滤后样品于 4℃ 避光冷藏, 并在 48 h 内完成固相萃取. 水样中 PAEs 的固相萃取参考文献[18, 19] 中所采用的方法: ①萃取前准备工作, 先后对 HLB 固相萃取小柱加入 5 mL 甲醇和 5 mL 超纯水, 使其充分活化, 流速调节至 1 ~ 2 mL·min<sup>-1</sup>; 然后在每个样品中加入 500 ng 的 DEHP-d4 (替代标准物), 并混合均匀; ②萃取过程中, 控制水样流经 HLB 小柱的流速为 5 mL·min<sup>-1</sup>; ③萃取完成后, 使用 99.99% 氮气吹扫固相萃取小柱 20 min, 使其充分干燥, 避免在后续洗脱时有机溶剂与水产生分层现象; ④洗脱, 用二氯甲烷和正己烷体积比(1:1) 的混合溶剂 10 mL 洗脱目标污染物, 收集洗脱液并氮吹浓缩至 1 mL, 待 GC-MS 检测; ⑤GC-MS 检测完成后, 通过对 6 种 PAEs 标准溶液的全扫描, 对各 PAEs 单体进行定性分析, 通过色谱条件下单体保留时间, 对样品进行定

量分析。

#### 1.4 样品质量保证和质量控制

PAEs 的特点是易从塑料制品迁移到环境介质中,因此在水样的分析过程中任何塑料制品的使用都有可能增加污染风险,从而增加目标物质的分析浓度,使检测结果偏离正常值,因此本研究对于样品处理的全过程(从样品采集到样品前处理结束)均严格避免使用塑料或橡胶制品;所有玻璃容器在使用前高温(450℃)预处理 4 h,以保证数据的准确性和分析结果的可靠性。

质量控制采用方法空白和内标法定量测试。方法空白小于方法检出限;在 5 ~ 500  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  浓度范围内,PAEs 单体的线性相关系数均在 0.998 以上,关系良好;水样方法检出限 11.5 ~ 17.6  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$  之间,内标回收率为 73.5% ~ 104.8%,RSD 为 4.1% ~ 13.7%。

#### 1.5 健康风险评价

健康风险评价采用 US EPA 的健康风险评价模

型,其包括非致癌和致癌两方面评价内容<sup>[20~22]</sup>,具体如下。

非致癌风险是长期暴露的摄入量(CDI)与参考剂量(RfD)的比值,其值用风险指数(HI)表示:

$$HI = CDI/RfD \quad (1)$$

致癌风险是长期日摄入量(CDI)与致癌斜率因子(SF)的乘积,其值用风险值(R)表示:

$$R = CDI \times SF \quad (2)$$

长期日摄入量(CDI)的计算采用 US EPA 的计算公式:

$$CDI_{\text{饮用途径暴露}} = \frac{C \times U \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (3)$$

$$CDI_{\text{皮肤途径暴露}} = \frac{I \times A_{\text{sd}} \times FE \times EF \times ED}{BW \times AT \times f} \quad (4)$$

$$I = 2 \times 10^{-3} kC \times (6\tau \times TE/\pi)^{1/2} \quad (5)$$

以上公式中参数取值参考文献<sup>[20~23]</sup>,详见

表 1。

表 1 公式中各符号含义、参考取值及其单位

Table 1 Meaning, reference value, and unit of each symbol in the formula

符号	含义	参考取值	单位
CDI	长期日摄入量	根据公式计算	$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$
RfD	污染物的参考剂量	根据公式计算	$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$
SF	污染物的致癌斜率因子	根据公式计算	$(\text{kg}\cdot\text{d})\cdot\text{mg}^{-1}$
C	目标污染物的暴露浓度	实际测定	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
U	日饮用水量	男性 1.825、女性 1.350 和儿童 1.000(浙江省)	$\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$
EF	暴露频率	365	$\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$
ED	暴露持续时间	男性 74、女性 78 和儿童 12(中国)	a
BW	平均体重	男性 64.8、女性 55.1 和儿童 26.8(浙江省)	kg
AT	平均暴露时间	男性 27 010、女性 28 470 和儿童 4 380(浙江省)	d
I	皮肤对污染物吸附量	根据公式计算	$\text{mg}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{次})^{-1}$
$A_{\text{sd}}$	人体的表面积	男性 17 000、女性 15 000 和儿童 8 490(浙江省)	$\text{cm}^2$
FE	洗澡频率	0.3	$\text{次}\cdot\text{d}^{-1}$
TE	洗澡时间	0.4	h
f	肠道吸附比率	1	无量纲
k	皮肤吸附参数	0.001	$\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$
$\tau$	污染物延滞时间	1(其值与污染物种类有关)	h

## 2 结果与讨论

### 2.1 千岛湖水体中 PAEs 的检出情况

#### 2.1.1 污染水平

千岛湖水样共检测 DMP、DEP、DiBP、DBP、DEHP 和 DOP 共 6 种 PAEs 单体污染物,其检出结果见表 2。从中可以看出,2 个水期水样中 6 种 PAEs 均有不同程度的检出;在枯水期水样中,除 DMP 和 DOP 的检出率为 94.1% 和 76.5% 外,其它点位各 PAEs 单体检出率均为 100%,其中  $\rho$ (DEHP) 的检出最高,为 0.35 ~ 2.50  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (平均值为 0.87  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ),其次  $\rho$ (DBP) 为 0.20 ~ 1.88  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (平

均值为 0.79  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ),  $\rho$ (DOP) 为 ND ~ 0.45  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (平均值为 0.16  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ),而  $\rho$ (DMP) 最低,平均值为 0.15  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;在丰水期水样中,所有点位 6 种 PAEs 的检出率均为 100%,其中  $\rho$ (DBP) 的检出最高,为 1.07 ~ 7.33  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (平均值为 3.37  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ),其次  $\rho$ (DiBP) 为 0.56 ~ 7.48  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (平均值为 3.22  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), $\rho$ (DEHP) 为 0.80 ~ 2.47  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (平均值为 1.13  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ),而  $\rho$ (DOP) 最低,平均值为 0.08  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。从检出率和检出量来看,DiBP、DBP 和 DEHP 为千岛湖水体中主要的 PAEs 组分,这一结果与我国长江上游地区<sup>[24]</sup>、上海黄浦江<sup>[25]</sup>和广州地表湖泊<sup>[26]</sup>等其他湖泊河流的 PAEs

污染特征相一致,但值得引起注意的是丰水期 10 个点位的 DBP 测定值和平均值高于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中规定的  $\rho(\text{DBP})$  ( $3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )。

表 2 千岛湖水体中 PAEs 的检出情况及不同国家水质标准<sup>1)</sup>

Table 2 Detection of PAEs in waters of Qiandao Lake and water quality standard of different countries

化合物	枯水期				检出率 /%	丰水期			不同国家水质标准 / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	
	检出率/%	检出量/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$				最小值	最大值	平均值	中国 <sup>[27]</sup>	加拿大 <sup>[28]</sup>
		最小值	最大值	平均值						
DMP	94.1	ND	0.27	0.15	100	0.07	0.27	0.11	—	—
DEP	100	0.12	0.21	0.14	100	0.07	0.20	0.10	—	—
DiBP	100	0.16	1.20	0.52	100	0.56	7.48	3.22	—	—
DBP	100	0.20	1.88	0.79	100	1.07	7.33	3.37	3	19
DEHP	100	0.35	2.50	0.87	100	0.80	2.47	1.13	8	16
DOP	76.5	ND	0.45	0.16	100	0.08	0.11	0.08	—	—
$\sum$ PAEs	100	0.98	5.33	2.63	100	3.22	17.58	7.99	—	—

1) ND 表示未检出,“—”表示无数据

在枯水期和丰水期所有水样中, DiBP、DBP 和 DEHP 的浓度占绝对优势, 枯水期的质量分数为 72.8%~90.9% [见图 2(a)], 丰水期的质量分数为 92.5%~98.3% [见图 2(b)]. 黄晓丽等<sup>[29]</sup>的研究表明, 在自然水体中, PAEs 主要依靠微生物作用代谢降解, 而微生物对于 PAEs 的降解能力随邻苯二甲酸酐本体上侧链烷基链长度的增长而有

所下降, 也就是说, PAEs 的相对分子质量越高, 其分子的空间位阻就越大, 生物可降解性随之减小, 这可能是水体中 DEHP 的浓度较高的原因之一, 而 DiBP 和 DBP 的含量则可能与环境中的使用量以及水体底泥的释放量有关, 这一结果与贺小敏等<sup>[21]</sup>和 Gao 等<sup>[30]</sup>在梁子湖和松花江的研究结果一致。

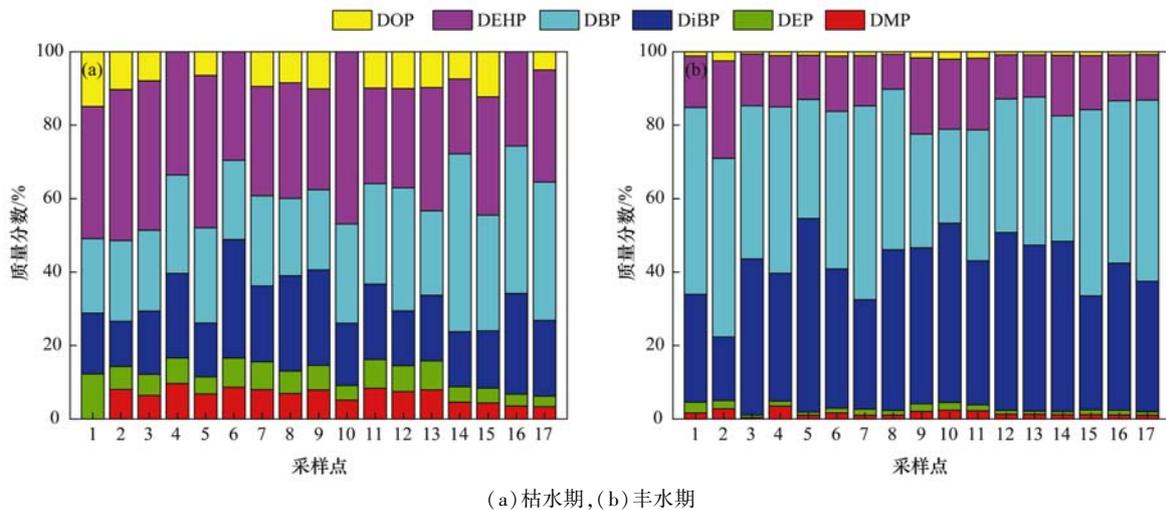


图 2 千岛湖各采样点水体中各 PAEs 比例

Fig. 2 Percentage of PAEs in surface water of each sampling site in Qiandao Lake

### 2.1.2 时空分布特征

从时间分布上来看, 丰水期和枯水期 PAEs 各组分的含量和组成差异较明显, 在丰水期, DMP 和 DOP 的检出率比枯水期有所增加, 均达到了 100%; DiBP、DBP 和 DEHP 的检出量较枯水期显著上升, 分别为  $0.56 \sim 7.48 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (平均值为  $3.22 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 上升 519.23%)、 $1.07 \sim 7.33 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (平均值为  $3.37 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 上升 326.58%)、 $0.80 \sim 2.47 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (平均值为  $1.13 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 上升 29.89%), 而 DMP、DOP 和 DEP 的检出量均有所下降, 其浓度平均值分别为  $0.11$ 、 $0.08$  和  $0.10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 说明不同

时间水体中 PAEs 的赋存形态具有一定的差异, 其中 DiBP、DBP 和 DEHP 等物质主要源于化妆品、个人护理品和塑料制品等, 这些物质的来源渠道和人为活动有着密不可分的联系, 因此从时间角度来看, 丰水期(4~9月)气温较高, 人为活动较枯水期对应时间更加频繁和剧烈, 这就会加大 PAEs 相关产品的使用量及其进入环境中的可能性<sup>[21]</sup>, 从而导致千岛湖水体中丰水期的污染物含量高于枯水期, 这与检测数据反映情况一致。

从空间分布上来看, 枯水期 10 号点位西园库湾的  $\sum$  PAEs 浓度是其他点位的 1.1~5.4 倍, 丰水

期 3 号点位威坪林场的  $\sum$  PAEs 浓度是其他点位的 1.6 ~ 5.5 倍. 在枯水期, 湖体中水量和水流速度等都较小, 各点位之间的平均值变化不大, 但浓度最高的 10 号点位远超其他点位, 这种结果可能是由于西园库湾点位附近为学校、居民区和酒店等人类活动较密集的场所, 而人口密度和生产生活等都会导致 PAEs 的污染水平较高<sup>[21]</sup>; 在丰水期, 以入湖河流新安江上 3 号点位威坪林场的  $\sum$  PAEs 浓度为最高, 其他点位的浓度较枯水期也有所增加, 原因可能是由于丰水期降水量较大, 使得大气中的 PAEs 通过干湿沉降进入水体, 同时地表径流也从地面将大量 PAEs 带入水体中, 因此导致入湖口位置的浓度最高, 进入湖体后, 丰水期

水流速度较大, 污染物在湖体内迅速扩散, 加之湖区周边的干湿沉降和雨水冲刷也直接带入大量污染物, 从而导致丰水期所有点位  $\sum$  PAEs 浓度较枯水期均有所升高.

## 2.2 千岛湖水体中 PAEs 的主成分分析

环境中 PAEs 的来源十分复杂, 为评价千岛湖水体中 PAEs 的主要来源, 采用主成分分析法 (PCA)<sup>[31]</sup> 对千岛湖不同水期 PAEs 的进行数据层面的降维分析, 对于枯水期和丰水期的水体样品, PCA 均提取出 2 个主成分, 其中枯水期主成分的方差贡献率分别为 58.81% 和 17.38%, 丰水期为 56.75% 和 19.51%, 每个主成分的特征根均大于 1, 各 PAEs 单体成分主成分因子载荷如图 3 所示.

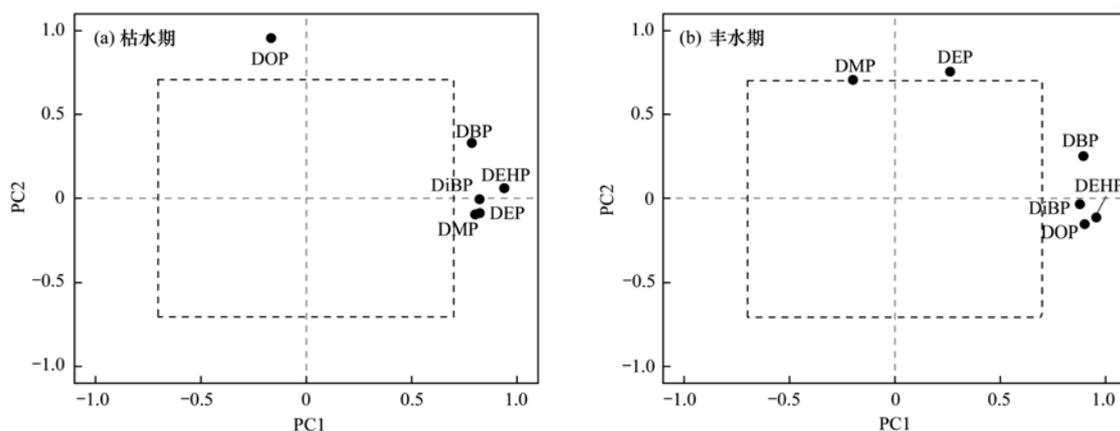


图 3 千岛湖不同水期水体中各 PAEs 单体的主成分

Fig. 3 Rotated principal components of PAEs in different water periods of Qiandao Lake

查阅已有研究可知, DMP 和 DEP 的相对分子质量较小, 广泛应用于香水中, 以延长香水的持续时间; DBP 和 DiBP 的相对分子质量相对适中, 主要用于化妆品和个人护理品, 在生活垃圾中也较为常见<sup>[32,33]</sup>; DEHP 和 DOP 的相对分子质量较大, 主要来源于塑料制品加工等行业, 同时也是生活垃圾中最常见的 PAEs<sup>[34,35]</sup> 单体. 由图 3 可知, 对于枯水期样品, PC1 中 DEHP、DiBP、DBP、DEP 和 DMP 的因子载荷最高, PC2 中 DOP 的因子载荷最高; 对于丰水期样品, PC1 中 DEHP、DiBP、DBP 和 DOP 的因子载荷最高, PC2 中 DEP 和 DMP 的因子载荷最高. 枯水期中除 DOP 外的 5 种 PAEs 单体对 PC1 的因子载荷均超过 0.7, 说明千岛湖水体中 PAEs 的来源主要为个人护理品、塑料制品和生活垃圾等; 丰水期各 PAEs 单体因子载荷与枯水期有所不同, 但 DMP 和 DEP 对 PC2 的因子载荷也超过 0.7, 这说明丰水期 PAEs 的来源与枯水期相同, 不同 PC 的单体因子载荷差异说明不同水期中不同 PAEs 单体所占比例不同.

## 2.3 与国内外其他水体 PAEs 浓度水平比较

PAEs 在全球水环境中已普遍检出, 近年来, 国内外关于地表水 PAEs 的研究报道层出不穷, 为充分了解千岛湖水体中 PAEs 的污染水平, 本文选取了国内外部分湖泊河流水体的 PAEs 浓度进行对比分析, 结果见表 3.

从表 3 中可看出, Le 等<sup>[36]</sup> 研究的越南湖泊中污染水平不论从单体还是总量来说, 都远高于本研究 and 我国境内所有河流湖泊; 吴明红等<sup>[25]</sup> 的研究发现黄浦江流域 PAEs 的检出量范围为 18.071 ~ 346.662  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 此污染水平远高于本研究; Gao 等<sup>[30]</sup> 研究的松花江流域 PAEs 各单体检出量也高于本研究, 刘成等<sup>[37]</sup> 在胶州湾的研究表明其 PAEs 水平也远高于本研究, 而本研究中 PAEs 的污染水平与 Paluselli 等<sup>[38]</sup> 的研究 (法国 Rhone 河) 相比则是远远高于后者.

在千岛湖水体中, 低分子量的 DMP 和 DEP 的检出量低于越南天光湖和松花江流域, 与九龙河、淮河、鄱阳湖、广州地表湖泊和荷兰境内河流水平

表 3 国内外部分地区河流和湖泊水体中 PAEs 的值<sup>1)</sup>/μg·L<sup>-1</sup>

Table 3 PAEs concentrations in surface water of rivers and lakes in various places at home and abroad

研究区域(国家)	采样年份	ρ(DMP)	ρ(DEP)	ρ(DiBP)	ρ(DBP)	ρ(DEHP)	ρ(DOP)	ρ(∑ PAEs)	文献
浙江千岛湖(中国)	2021	ND~0.27	0.07~0.21	0.16~7.84	0.20~7.33	0.35~2.50	0.08~0.45	0.98~17.66	本研究
天光湖等6个湖泊(越南)	2020	0.115~2.950	0.639~14.000	0.605~26.600	0.783~34.000	1.040~48.070	ND~7.310	19.600~127.000	[36]
Rhone 河(法国)	2014	0.003~0.005	0.016~0.031	—	0.022~0.041	0.039~0.407	—	0.080~0.484	[38]
曼萨纳斯河(西班牙)	2012	ND	ND	—	0.255~1.759	ND	—	0.255~1.759	[18]
福溪河(加拿大)	2005	<0.5	<0.5	—	<0.5	<0.5	<0.5	—	[39]
荷兰境内全部河流	2002	0.01~0.19	0.07~2.3	—	0.07~3.1	0.9~5.0	ND	1.05~10.59	[40]
Tama 河(日本)	2000	ND~0.09	ND~0.31	—	ND~0.54	—	ND	ND~0.94	[41]
江西鄱阳湖(中国)	2019	ND~0.253	ND~0.127	—	0.121~1.297	0.023~0.896	ND~0.018	0.265~2.058	[19]
湖北梁子湖(中国)	2018	ND	ND~0.01	ND~3.00	ND~0.91	0.07~1.67	ND	0.10~3.56	[21]
太湖重点区域(中国)	2017	ND~1.24	ND~2.23	—	ND~5.99	ND~6.21	ND~0.47	ND~11.21	[2]
长江上游(中国)	2016	ND~0.003	0.000~0.005	0.04~0.193	0.078~1.870	0.054~3.100	0.000~0.003	0.118~6.640	[24]
胶州湾(中国)	2015	ND~8.34	ND~14.80	ND~1.81	0.04~11.20	0.00~1.58	ND~2.41	3.63~21.20	[37]
上海黄浦江(中国)	2014	—	0.138~2.457	1.822~194.891	—	6.700~99.019	ND~18.499	18.071~346.662	[25]
辽宁大辽河(中国)	2013	ND~0.037	0.015~0.684	—	0.017~0.595	—	0.081~0.754	0.197~1.828	[42]
四川九龙河(中国)	2012	0.03~0.24	0.01~0.09	—	0.03~1.77	0.62~12.4	—	3.48~17.7	[43]
安徽巢湖(中国)	2011	0.015~3.670	0.006~0.283	—	0.070~17.529	nd~0.576	nd~0.045	0.467~17.953	[44]
安徽淮河(中国)	2011	0.02~0.19	0.02~0.92	2.81~21.05	2.17~21.98	0.08~1.52	—	6.19~36.07	[45]
松花江(中国)	2011	0.98~4.12	1.33~6.67	—	1.68~11.81	2.26~11.6	0.69~6.14	9.93~45.55	[30]
长江三角洲(中国)	2010	0.008~0.129	ND~0.086	—	ND~7.188	0.226~28.403	ND~0.343	0.330~28.550	[46]
广州湖泊(中国)	2008	0.003~0.085	0.015~0.32	0.16~0.92	0.94~3.60	0.087~0.63	ND	1.69~4.72	[26]
武汉月湖(中国)	2006	0.001~0.006	0.004~0.025	—	0.172~0.377	0.247~0.501	—	0.424~0.893	[47]
三峡库区(中国)	2005	—	0.83~2.21	—	0.07~0.13	0.07~3.60	—	0.99~5.88	[48]

1)ND 表示未检出,“—”表示未测定

相当;高分子量的 DEHP 和 DOP 浓度水平低于黄浦江和松花江流域,与太湖、大辽河、三峡库区和长江三角洲等地污染水平相当;DBP 在所有研究报告中,检出率最高,单体浓度水平也最高或仅次于 DEHP,本研究中 DBP 的检出水平与太湖重点流域和长江三角洲水环境中浓度相当,低于巢湖和淮河流域污染水平;关于 DiBP 的报道较少,千岛湖的浓度水平低于上海黄浦江,但是高于湖北梁子湖和长江上游流域。综合来看,千岛湖的 PAEs 污染水平低于越南天光湖、上海黄浦江和黑龙江松花江,与荷兰境内全部河流、四川九龙河和太湖重点区域相当,高于国内外大部分水体,千岛湖各 PAEs 单体及总浓度处于中等偏高水平。

#### 2.4 千岛湖水体中 PAEs 健康风险评价

对千岛湖水体中检出的 6 种 PAEs 进行健康风险评价,根据国际癌症研究机构对化学物质致癌性的划分标准,DMP、DEP、DIBP、DBP、DEHP 和 DOP 均具有非致癌风险,因此本文对 ∑ PAEs 作非致癌风险评价,DEHP 为 2B 类(可能对人类致癌的化学物质),因此本研究仅对 DEHP 作致癌风险评价<sup>[19,21,49]</sup>。根据 US EPA 和相关研究得到 DMP、DEP、DIBP、DBP、DEHP 和 DOP 的 RfD 参考值和 DEHP 的 SF 参考值如表 4 所示。

根据 1.5 节中式(1)~(5)计算可得千岛湖不

同水期水体中 PAEs 的非致癌风险指数和致癌风险值,结果如图 4 所示。

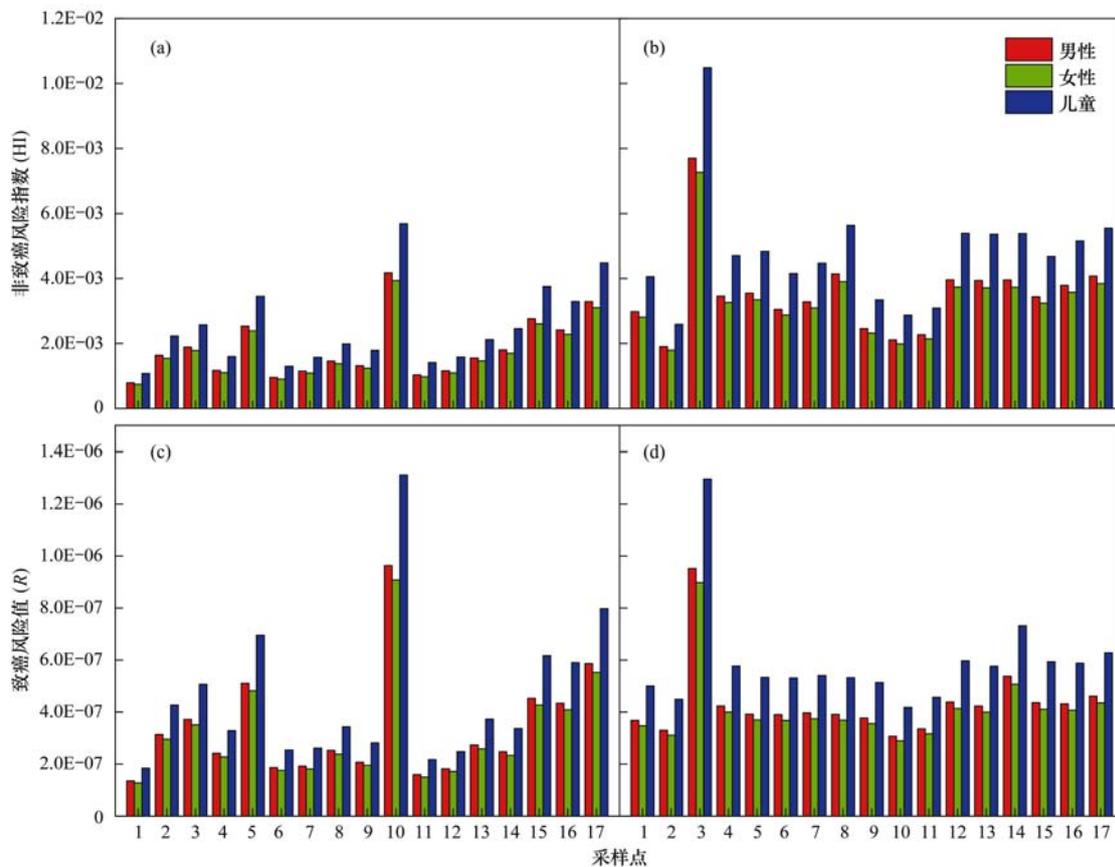
表 4 污染物参考剂量(RfD)和致癌斜率因子(SF)参考取值

Table 4 Reference values of pollutant reference dose (RfD) and carcinogenic slope factor (SF)

化合物	RfD/mg·(kg·d) <sup>-1</sup>	SF/(kg·d)·mg <sup>-1</sup>
DMP	0.1	
DEP	0.8	
DiBP	0.098	
DBP	0.1	
DEHP	0.02	0.014
DOP	0.02	

当 HI 值小于 1 时,说明暴露剂量不会对人体产生非致癌风险;当 HI 值大于 1 时,说明对人体将产生非致癌健康风险。当 R 值小于 10<sup>-6</sup>时,表明暴露不会对人体造成致癌伤害;当 R 在 10<sup>-4</sup>~10<sup>-6</sup>之间时,暴露剂量可能对人体存在潜在致癌风险,应重视此方面的健康问题;当 R 大于 10<sup>-4</sup>时,暴露将会对人体造成致癌伤害<sup>[20,21]</sup>。计算多种物质的多途径健康风险时,本文分别计算各污染物各途径的致癌风险和非致癌风险,然后根据需要加和,不考虑他们之间的协同作用和拮抗作用。

千岛湖枯水期 17 个点位 ∑ PAEs 对男性、女性和儿童的非致癌风险指数分别为 7.9 × 10<sup>-4</sup> ~ 4.2 × 10<sup>-3</sup>、7.4 × 10<sup>-4</sup> ~ 3.9 × 10<sup>-3</sup>和 1.1 × 10<sup>-3</sup> ~



(a)和(c)为枯水期,(b)和(d)为丰水期

图4 千岛湖水体中PAEs致癌和非致癌风险指数

Fig. 4 Carcinogenic and non-carcinogenic risk indexes of PAEs in surface water in Qiandao Lake

$5.7 \times 10^{-2}$ , 丰水期为  $1.9 \times 10^{-3} \sim 7.7 \times 10^{-3}$ 、 $1.8 \times 10^{-3} \sim 7.3 \times 10^{-3}$  和  $2.6 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-2}$ , 风险值从高到低依次为: 儿童 > 男性 > 女性, 但所有点位两个水期的 HI 值均远远低于 1, 表明千岛湖水体中 PAEs 对人体不会产生明显的非致癌风险. 千岛湖枯水期 17 个点位 DEHP 对周边男性、女性和儿童的致癌风险值分别为  $1.4 \times 10^{-7} \sim 9.6 \times 10^{-7}$ 、 $1.3 \times 10^{-7} \sim 9.1 \times 10^{-7}$  和  $1.8 \times 10^{-7} \sim 1.3 \times 10^{-6}$ , 丰水期为  $3.1 \times 10^{-7} \sim 9.5 \times 10^{-7}$ 、 $2.9 \times 10^{-7} \sim 9.0 \times 10^{-7}$  和  $4.2 \times 10^{-7} \sim 1.3 \times 10^{-6}$ , 风险值从高到低依次为: 儿童 > 男性 > 女性, 其中污染物浓度较大的枯水期 10 号点位和丰水期 3 号点位对儿童的致癌风险值超过  $10^{-6}$ , 存在潜在的致癌风险, 其余水期和点位对男性、女性和儿童的致癌风险值均小于  $10^{-6}$ , 表明致癌风险可忽略. 由图 4 可知, 人群暴露风险不仅与污染物本体的致癌和非致癌性质有关, 还与受体的接受能力密切相关, 如本研究中, 在千岛湖 PAEs 的暴露水平下, 儿童的 HI 值和 R 值均高于成年人, 此现象可能是由于儿童身体抵抗力差, 难以抵抗各污染物的风险, 因此在同等剂量暴露条件儿童受体的风险值远高于成人<sup>[50]</sup>. 此外, 还需引起注意的是, 由于中国目前没有健康风险评价参数相关的

标准体系, 本研究中仅部分参数是参考中国人群暴露参数手册和相关文献确定的, 其中 RfD 和 SF 等风险表征值取自 US EPA 的人体最大可接受风险值, 这些参数值是以西方人群为研究对象制定的, 所以评价结果针对中国居民具有很大的不确定性, 因此围绕中国居民人群为对象的相关标准体系的制定和建立显得尤为必要和迫切. 鉴于 PAEs 进入人体后会对人体内分泌系统产生干扰效应, 本研究中儿童的非致癌风险指数和致癌风险值均高于成人, 虽按标准可忽略其风险影响, 但笔者认为还是应当引起有关部门的重视.

### 3 结论

(1) 千岛湖水体中 17 个点位均有 PAEs 检出, 枯水期  $\rho(\sum \text{PAEs})$  为  $0.98 \sim 5.33 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为  $2.63 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 丰水期  $\rho(\sum \text{PAEs})$  为  $3.22 \sim 17.88 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为  $7.99 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , DiBP、DBP 和 DEHP 的检出量最高, DEP 检出量最低.

(2) 采用主成分分析法分析枯水期和丰水期水体样品, 分别筛选出 2 个主成分, 其累计贡献率为

78.85%和76.26%;分析主成分因子载荷可知千岛湖水体中PAEs来源为个人护肤品、塑料制品以及生活垃圾等;不同水期来源相同,所含比例不同。

(3)千岛湖的PAEs污染水平低于国内松花江和黄浦江,与九龙河和太湖重点区域相当,高于国内外大部分其他河流湖泊,千岛湖各PAEs单体及总浓度污染水平在全球范围内处于中等偏高水平。

(4)PAEs的非致癌风险(HI)均在可接受的范围内,致癌风险(R)除个别点位对儿童的影响不可忽略外其余也均可接受;HI值和R值总体表现为:儿童>男性>女性;鉴于PAEs进入人体后会对人体内分泌系统产生干扰效应,且诸多参数取值为US EPA制定,故PAEs风险还是应当引起有关部门的重视。

#### 参考文献:

- [1] 黄盼盼,王晨晨,邱春生,等.水环境中PAEs的赋存、环境风险及水质标准[J].环境工程,2020,38(5):23-29.  
Huang P P, Wang C C, Qiu C S, et al. Occurrence, environmental risk and water quality standard of PAEs in water environment[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(5): 23-29.
- [2] 朱冰清,高占敬,胡冠九,等.太湖重点区域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价[J].环境科学,2018,39(8):3614-3621.  
Zhu B Q, Gao Z Q, Hu G J, et al. Contamination levels and ecological risk assessment of phthalate esters (PAEs) in the aquatic environment of key areas of Taihu Lake [J]. Environmental Science, 2018, 39(8): 3614-3621.
- [3] van Wezel A P, van Vlaardingen P, Posthumus R, et al. Environmental risk limits for two phthalates, with special emphasis on endocrine disruptive properties[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2000, 46(3): 305-321.
- [4] Kim Y J, Kim E Y, Ryu J C. Identification of estrogenic genes responding to phthalate esters treatment in human MCF-7 cells [J]. Molecular & Cellular Toxicology, 2011, 7(2): 163-170.
- [5] Tan G H. Residue levels of phthalate esters in water and sediment samples from the Klang River Basin [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1995, 54(2): 171-176.
- [6] 周文敏,傅德黔,孙宗光.中国水中优先控制污染物黑名单的确定[J].环境科学研究,1991,4(6):9-12.  
Zhou W M, Fu D Q, Sun Z G. Determination of black list of China's priority pollutants in water [J]. Research of Environmental Sciences, 1991, 4(6): 9-12.
- [7] Sung H H, Kao W Y, Su Y J. Effects and toxicity of phthalate esters to hemocytes of giant freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii* [J]. Aquatic Toxicology, 2003, 64(1): 25-37.
- [8] 莫测辉,蔡全英,吴启堂,等.我国城市污泥中邻苯二甲酸酯的研究[J].中国环境科学,2001,21(4):362-366.  
Mo C H, Cai Q Y, Wu Q T, et al. A study of phthalic acid esters (PAEs) in the municipal sludges of China [J]. China Environmental Science, 2001, 21(4): 362-366.
- [9] 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价[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.
- [10] 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.  
Li P P, Shi W, Liu Q G, et al. Spatial and temporal distribution patterns of chlorophyll-a and the correlation analysis with environmental factors in Lake Qiandao [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(4): 568-574.
- [11] 胡忠军,莫丹玫,周小玉,等.千岛湖浮游植物群落结构时空分布及其与环境因子的关系[J].水生生态学杂志,2017,38(5):46-54.  
Hu Z J, Mo D M, Zhou X Y, et al. Spatial and seasonal distribution of phytoplankton in Qiandao Lake and relationship with environmental factors [J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38(5): 46-54.
- [12] 鲁文艳,李恒鹏,吴志旭,等.千岛湖流域下游工业污染的行业组成结构与优化管理策略[J].湖泊科学,2017,29(2):317-325.  
Lu W Y, Li H P, Wu Z X, et al. Industry pollution structure and the optimal management strategy in lower reaches of Lake Qiandao Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(2): 317-325.
- [13] 张明,唐访良,吴志旭,等.千岛湖表层沉积物中多环芳烃污染特征及生态风险评价[J].中国环境科学,2014,34(1):253-258.  
Zhang M, Tang F L, Wu Z X, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from Xin'anjiang Reservoir [J]. China Environmental Science, 2014, 34(1): 253-258.
- [14] 文军,罗献宝,骆东奇,等.千岛湖区域酸雨污染成因分析[J].水土保持研究,2005,12(2):42-45.  
Wen J, Luo X B, Luo D Q, et al. Analysis of cause of formation acid rain pollution in Qiandao Lake area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(2): 42-45.
- [15] HJ 494-2009,水质 采样技术指导[S].
- [16] HJ 493-2009,水质采样 样品的保存和管理技术规定[S].
- [17] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.
- [18] Domínguez-Morueco N, González-Alonso S, Valcúrcel Y. Phthalate occurrence in rivers and tap water from central Spain [J]. Science of the Total Environment, 2014, 500-501: 139-146.
- [19] 艾舜豪.鄱阳湖邻苯二甲酸酯的水质基准研究与风险评价[D].南昌:南昌大学,2020.  
Ai S H. Water quality criteria and risk assessment of phthalate esters in Poyang lake [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [20] 昌盛,樊月婷,付青,等.北江清远段地表水及沉积物中酞酸酯的分布特征与风险评估[J].生态环境学报,2019,28(4):822-830.  
Chang S, Fan Y T, Fu Q, et al. Distribution characteristics and risk assessment of phthalic acid esters in surface water and sediment of Qingyuan section of Beijiang River [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(4): 822-830.
- [21] 贺小敏,施敏芳.梁子湖水体和沉积物中邻苯二甲酸酯分布特征及生态健康风险评价[J].中国环境监测,2021,37(2):115-127.  
He X M, Shi M F. Distribution characteristics and ecological and

- health risk assessment of phthalic acid esters in surface water and sediment of Liangzi Lake, China[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(2): 115-127.
- [22] 张坤锋, 付青, 涂响, 等. 武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 5836-5847.  
Zhang K F, Fu Q, Tu X, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of typical POPs in typical drinking water sources in Wuhan[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5836-5847.
- [23] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册, 成人卷[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [24] 郭勇勇, 杨丽华, 周炳升, 等. 长江上游水体中酞酸酯的污染水平及生态风险评价[J]. *水生生物学报*, 2019, **43**(S1): 62-68.  
Guo Y Y, Yang L H, Zhou B S, *et al.* Contaminated level and risk assessment of PAEs in the upper reaches of the Yangtze River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(S1): 62-68.
- [25] 吴明红, 王扶琳, 杨雪霞, 等. 上海地区水环境中邻苯二甲酸酯类污染物的浓度水平及分布特征[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2016, **22**(2): 105-113.  
Wu M H, Wang F L, Yang X X, *et al.* Concentration levels and distribution features of PAEs in water environment in Shanghai [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2016, **22**(2): 105-113.
- [26] Zeng F, Cui K Y, Xie Z Y, *et al.* Occurrence of phthalate esters in water and sediment of urban lakes in a subtropical city, Guangzhou, South China[J]. *Environment International*, 2008, **34**(3): 372-380.
- [27] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [28] Canadian Council of Ministers of Environment (CCME), 1999, Canadian Environmental Quality Guidelines[S].
- [29] 黄晓丽, 汤施展, 覃东立, 等. 城市湖泊中邻苯二甲酸酯(PAEs)类物质的组成及其分布特征[J]. *水产学杂志*, 2017, **30**(4): 33-39.  
Huang X L, Tang S Z, Qin D L, *et al.* Distribution and composition of phthalate esters in surface water of Urban Lakes [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2017, **30**(4): 33-39.
- [30] Gao D W, Li Z, Wen Z D, *et al.* Occurrence and fate of phthalate esters in full-scale domestic wastewater treatment plants and their impact on receiving waters along the Songhua River in China[J]. *Chemosphere*, 2014, **95**: 24-32.
- [31] 董磊, 汤显强, 林莉, 等. 长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2588-2599.  
Dong L, Tang X Q, Lin L, *et al.* Pollution characteristics and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters during high water level periods in the Wuhan section of the Yangtze River, China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2588-2599.
- [32] Romero-Franco M, Hernández-Ramírez R U, Calafat A M, *et al.* Personal care product use and urinary levels of phthalate metabolites in Mexican women[J]. *Environment International*, 2011, **37**(5): 867-871.
- [33] Koniecki D, Wang R, Moody R P, *et al.* Phthalates in cosmetic and personal care products: concentrations and possible dermal exposure[J]. *Environmental Research*, 2011, **111**(3): 329-336.
- [34] Simoneit B R T, Medeiros P M, Didyk B M. Combustion products of plastics as indicators for refuse burning in the atmosphere[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(18): 6961-6970.
- [35] Net S, Sempere R, Delmont A, *et al.* Occurrence, fate, behavior and ecotoxicological state of phthalates in different environmental matrices [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(7): 4019-4035.
- [36] Le T M, Nguyen H M N, Nguyen V K, *et al.* Profiles of phthalic acid esters (PAEs) in bottled water, tap water, lake water, and wastewater samples collected from Hanoi, Vietnam[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **788**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147831.
- [37] 刘成, 孙翠竹, 张弢, 等. 胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1726-1733.  
Liu C, Sun C Z, Zhang G, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of phthalate esters (PAEs) in the surface water of Jiaozhou Bay[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1726-1733.
- [38] Paluselli A, Aminot Y, Galgani F, *et al.* Occurrence of phthalate acid esters (PAEs) in the northwestern Mediterranean Sea and the Rhone River[J]. *Progress in Oceanography*, 2018, **163**: 221-231.
- [39] Mackintosh C E, Maldonado J A, Ikonomou M G, *et al.* Sorption of phthalate esters and PCBs in a marine ecosystem [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(11): 3481-3488.
- [40] Vethaak A D, Lahr J, Schrap S M, *et al.* An integrated assessment of estrogenic contamination and biological effects in the aquatic environment of the Netherlands [J]. *Chemosphere*, 2005, **59**(4): 511-524.
- [41] Net S, Dumoulin D, El-Osmani R, *et al.* Case study of PAHs, Me-PAHs, PCBs, phthalates and pesticides contamination in the Somme River water, France [J]. *International Journal of Environmental Research*, 2014, **8**(4): 1159-1170.
- [42] 时瑶, 马迎群, 秦延文, 等. 大辽河表层水中邻苯二甲酸酯分布特征及环境健康风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2016, **11**(6): 197-206.  
Shi Y, Ma Y Q, Qin Y W, *et al.* Distribution characteristics and environmental health risk assessment of phthalic acid esters in surface water of the Daliao River, China[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, **11**(6): 197-206.
- [43] Li R L, Liang J, Gong Z B, *et al.* Occurrence, spatial distribution, historical trend and ecological risk of phthalate esters in the Jiulong River, Southeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 388-397.
- [44] He W, Qin N, Kong X Z, *et al.* Spatio-temporal distributions and the ecological and health risks of phthalate esters (PAEs) in the surface water of a large, shallow Chinese lake[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **461-462**: 672-680.
- [45] Shi W, Deng D Y, Wang Y T, *et al.* Causes of endocrine disrupting potencies in surface water in East China [J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 1435-1442.
- [46] Zhang L F, Dong L, Ren L J, *et al.* Concentration and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters in the surface water of the Yangtze River Delta, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(2): 335-342.
- [47] 宋慧婷, 贺锋, 成水平, 等. 武汉月湖水体和表层沉积物中 25 种半挥发性有机污染物分布特性[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(4): 521-526.  
Song H T, He F, Cheng S P, *et al.* Distribution characteristics of 25 semi-volatile organic compounds in water and surface

- sediment from Lake Yuehu in Wuhan, China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(4): 521-526.
- [48] 许川, 舒为群, 罗财红, 等. 三峡库区水环境多环芳烃和邻苯二甲酸酯类有机污染物健康风险评估[J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(5): 57-60.
- Xu C, Shu W Q, Luo C H, *et al.* Water environmental health risk assessment of PAHs and PAEs in the three Gorges Reservoir [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, **20**(5): 57-60.
- [49] 贺涛, 许振成, 魏东洋, 等. 珠江流域湖库型水源集水区酞酸酯(PAEs)类污染物环境健康风险评估[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, **30**(6): 699-705.
- He T, Xu Z C, Wei D Y, *et al.* Environmental health risk assessment of phthalic acid esters like pollutants in reservoir or lake type water source catchments in the Pearl River Basin [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, **30**(6): 699-705.
- [50] 黄宏伟, 肖河, 王敦球, 等. 漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1714-1723.
- Huang H W, Xiao H, Wang D Q, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in the water of Lijiang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1714-1723.

## 《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站([www.hjcx.ac.cn](http://www.hjcx.ac.cn))进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:  
**期刊**: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.  
**图书**: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.  
**会议文集**: 作者. 论文名[A]. 见(In); 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.  
**学位论文**: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.  
**报告**: 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.  
**专利**: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.
11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: [hjcx@rcees.ac.cn](mailto:hjcx@rcees.ac.cn); 网址: [www.hjcx.ac.cn](http://www.hjcx.ac.cn)

## CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM <sub>2.5</sub> in Henan Province from 2015 to 2019 .....	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i> (1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data .....	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo .....	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i> (1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM <sub>2.5</sub> in Urban Area of Shanghai .....	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i> (1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing .....	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i> (1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta .....	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i> (1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing .....	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i> (1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region .....	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i> (1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study .....	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i> (1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System .....	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i> (1788)
Coordinated Control of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Hangzhou Based on SOA and O <sub>3</sub> Formation Potential .....	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants .....	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i> (1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an .....	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i> (1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn .....	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i> (1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors .....	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i> (1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City .....	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i> (1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning .....	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong (1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight .....	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i> (1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang .....	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River .....	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i> (1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District .....	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area .....	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i> (1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake .....	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China .....	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i> (1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment .....	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i> (1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source .....	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i> (1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors .....	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China .....	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria .....	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i> (1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity .....	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i> (1988)
Effects of Pollution Control of Xiaoqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay .....	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i> (1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands .....	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-ni, <i>et al.</i> (2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City .....	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i> (2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms .....	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i> (2030)
Carbonized Foam Supported Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation .....	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i> (2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe <sup>2+</sup> Under Low Nitrogen Concentration .....	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation .....	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i> (2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt .....	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xiao-min, <i>et al.</i> (2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China .....	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i> (2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China .....	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i> (2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background .....	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i> (2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment .....	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i> (2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment .....	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui (2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City .....	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long (2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize .....	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings .....	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China .....	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i> (2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N <sub>2</sub> O Emission from a Vegetable Field .....	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i> (2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions in Paddy Field .....	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i> (2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River .....	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue (2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation .....	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i> (2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils .....	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i> (2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area .....	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i> (2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil .....	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i> (2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Julong River Estuary .....	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i> (2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy .....	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i> (2237)