

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第8期

Vol.39 No.8

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                                 |                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 我国城市 PM <sub>2.5</sub> 污染的健康风险及经济损失评价 .....                                     | 李惠娟, 周德群, 魏永杰 (3467)                                    |
| 冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响 .....                                                      | 孙晓伟, 郭秀锐, 程水源 (3476)                                    |
| 基于区域传输矩阵和 PM <sub>2.5</sub> 达标约束的大气容量计算方法 .....                                 | 李敏辉, 廖程浩, 杨柳林, 曾武涛, 唐喜斌 (3485)                          |
| 利用 SPAMS 研究天津市夏季环境空气中细颗粒物化学组成特征 .....                                           | 温杰, 史旭荣, 田瑛泽, 徐娇, 史国良, 冯银厂 (3492)                       |
| 重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征 .....                                                   | 彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 陈建博, 江长胜 (3502)           |
| 杭甬地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析 .....                                                       | 徐宏辉, 徐婧莎, 何俊, 浦静姣, 齐冰, 杜荣光 (3511)                       |
| 城市生活垃圾露天焚烧 PM <sub>2.5</sub> 及其组分排放特征 .....                                     | 王艳, 郝伟伟, 程珂, 支国瑞, 易鹏, 樊静, 张洋 (3518)                     |
| 民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子 .....                                                       | 杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 吴剑, 郑明明, 郑煌, 严沁, 刘海彪, 王伟, 吴方琪, 程溢 (3524) |
| 大连地区夏季非甲烷烃 (NMHC) 特征及其来源解析 .....                                                | 纪德钰 (3535)                                              |
| “十三五”挥发性有机物总量控制情景分析 .....                                                       | 张嘉妮, 陈小方, 梁小明, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (3544)                     |
| 浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数 .....                                                  | 王家德, 吕建璋, 李文娟, 顾震宇, 缪孝平 (3552)                          |
| 有机溶剂使用企业挥发性恶臭有机物排放特征及特征物质识别 .....                                               | 翟增秀, 孟洁, 王巨, 翟友存, 曹阳, 邹克华 (3557)                        |
| 基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征 .....                                       | 胡俊, 亢燕铭, 陈勇航, 刘鑫, 李霞, 刘琼 (3563)                         |
| 基于路网车流量的北京城市副中心机动车污染控制情景 .....                                                  | 樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (3571)                                    |
| 北京典型跑步区域空气污染特征及跑步者呼吸暴露 .....                                                    | 陶双成, 高硕吟, 熊新竹, 姚嘉林, 邓顺熙 (3580)                          |
| 丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化 .....                                                 | 李冰, 王亚, 郑钊, 许信, 辛英督, 黄进, 郭诗君, 毕升阁, 胡兰群, 陈兆进, 李玉英 (3591) |
| 太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义 .....                                                | 吕伟伟, 姚昕, 张保华 (3601)                                     |
| 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 .....                                              | 朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 王骏飞, 于南洋, 韦斯 (3614)                      |
| 台风强降雨输入水源水库悬浮泥沙的氮磷吸附特性 .....                                                    | 姚玲爱, 赵学敏, 马千里, 梁荣昌, 夏北成, 卓琼芳 (3622)                     |
| 珠江三角洲高碑地下水赋存环境特征及成因分析 .....                                                     | 张昌延, 何江涛, 张小文, 倪泽华 (3631)                               |
| 有机污染物对杭州湾海域浮游细菌群落的影响 .....                                                      | 宣丽霞, 戴文芳, 郁维娜, 周素明, 欧昌荣, 熊金波 (3640)                     |
| 澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析 .....                                                    | 程豹, 望雪, 徐雅倩, 杨正健, 刘德富, 马骏 (3649)                        |
| 碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子 .....                                                     | 王欢, 赵文, 谢在刚, 魏杰, 姜洋 (3660)                              |
| 浑河底泥反硝化厌氧甲烷氧化菌群落多样性的时空分布特征及其与环境因子关系分析 .....                                     | 张亚迪, 宋永会, 彭剑桥, 张剑桥, 张盼月, 刘瑞霞, 石国强 (3670)                |
| 人类活动对河流沉积物中反硝化厌氧甲烷氧化菌群落特征的影响 .....                                              | 刘洋, 陈永娟, 王晓燕, 许康利 (3677)                                |
| 外源氮输入对不同土地利用排水沟底泥反硝化和 N <sub>2</sub> O 排放影响 .....                               | 余冬立, 陈心逸, 高雪梅, 张文娟, 夏永秋 (3689)                          |
| 雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布 .....                                                     | 尚宇, 周毅, 廖安意, 方正 (3696)                                  |
| 水体中 Cr(VI) 对不同混凝剂混凝过程的影响 .....                                                  | 高倩, 张大为, 徐慧, 徐建坤, 张崇森, 王东升 (3704)                       |
| Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /BiVO <sub>4</sub> 复合阳极活化过一硫酸盐强化光电催化降解双酚 A ..... | 李蒋, 王雁, 张秀芳, 赵旭 (3713)                                  |
| 海藻酸钙/生物炭复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能和机制 .....                                        | 于长江, 董心雨, 王苗, 林强 (3719)                                 |
| 磁性生物炭对水中 CIP 和 OFL 的吸附行为和机制 .....                                               | 赵华轩, 郎印海 (3729)                                         |
| 污水中新精神活性物质的分析方法优化及验证 .....                                                      | 陈培培, 杜鹏, 周子雷, 徐泽琼, 高婷婷, 李喜青 (3736)                      |
| 臭氧-CNT 膜改性联用工艺对 PVDF 中空纤维膜污染进程的缓解 .....                                         | 关羽琪, 王凯伦, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马艳林, 栾桂荣, 郭瑾 (3744)             |
| 阴离子交换树脂生物再生去除硝酸盐氮 .....                                                         | 叶婷, 张光, 王珂, 双陈冬, 李爱民 (3753)                             |
| 普鲁士蓝@酵母菌催化剂的合成及其 Fenton 性能 .....                                                | 陈思, 白波, 王洪化, 索有瑞 (3759)                                 |
| PN/A 双菌层系统的构建及其脱氮性能 .....                                                       | 许静怡, 杜俊, 杨一峰, 吕峰, 夏四清 (3767)                            |
| 苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制作用 .....                                                      | 马娟, 王瑾, 俞小军, 周猛, 李光银, 孙洪伟 (3775)                        |
| 反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能 .....                                          | 王凡, 陆明羽, 殷记强, 李祥, 黄勇 (3782)                             |
| 好/厌氧条件下反硝化细菌脱氮特性与功能基因 .....                                                     | 康鹏亮, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 商潘路, 刘珍芳, 王跃, 谭欣林 (3789)            |
| 苯并[a]芘厌氧降解的苯酚共基质协同作用与污泥微生物特性 .....                                              | 吴海珍, 胡肖怡, 王鸣, 韦景悦, 范一文, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (3797)            |
| 污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析 .....                                                    | 刘晓明, 余震, 周普雄, 罗海林, 王跃强, 廖汉鹏, 周顺桂 (3807)                 |
| 生物炭对华北农田土壤 N <sub>2</sub> O 通量及相关功能基因丰度的影响 .....                                | 刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 田秀平 (3816)                               |
| 设施菜田土壤 N <sub>2</sub> O 产生对 O <sub>2</sub> 的响应 .....                            | 陈吉吉, 宋贺, 曹文超, 王乙然, 王敬国 (3826)                           |
| 利用 $\mu$ -XRF 和 XANES 研究铅锌矿区土壤铅形态及其生物有效性 .....                                  | 孙晓艳, 柳检, 罗立强 (3835)                                     |
| 南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征 .....                                            | 李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录 (3845)                                 |
| Fe-Al 改性硅藻土的制备及其对土壤 Cd 污染固定化效果 .....                                            | 杨雨中, 朱健, 肖媛媛, 谭蓉, 王平, 陈润华, 徐海音, 杨雄 (3854)               |
| 基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移 .....                                              | 李杨梅, 贡璐, 安申群, 孙力, 陈新 (3867)                             |
| 生境过滤驱动庞泉沟华北落叶松林土壤真菌群落的构建过程 .....                                                | 赵鹏宇, 李鑫, 柴宝峰 (3876)                                     |
| 转 cry1Ab 和 epsps 基因玉米 C0030.3.5 对土壤固氮细菌丰度和群落结构的影响 .....                         | 王蕊, 朱珂, 李刚, 刘惠芬, 王晶, 修伟明, 赵建宁, 杨殿林 (3885)               |
| 脱硫石膏对稻田 CH <sub>4</sub> 释放及其功能微生物种群的影响 .....                                    | 胡翔宇, 向秋洁, 木志坚 (3894)                                    |
| 长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征 .....                                                 | 杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 魏亮, 魏晓梦, 周萍, 葛体达, 王久荣, 邹冬生, 吴金水 (3901)   |
| 黄河口滨岸潮滩湿地泥沙沉积及外源 Cd 输入对碱蓬物质量分配及抗氧化酶活性的影响 .....                                  | 宋红丽, 王立志, 郁万妮, 吴希媛 (3910)                               |
| 黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价 .....                                              | 康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 杨丹, 庞博, 何坚坚, 闫宇航 (3917)                  |
| 氧化石墨烯对邻苯二甲酸二丁酯藻毒性的影响 .....                                                      | 涂海峰, 刘成, 王宇擎, 储祺, 侯晓冬, 李锋民 (3927)                       |
| 有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响 .....                                                 | 祖波, 马兰, 刘波, 卢培利, 许君 (3937)                              |
| 中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO <sub>2</sub> 排放 .....                                 | 林婷, 吴焯, 何晓婧, 张少君, 郝吉明 (3946)                            |
| 气溶胶水相反应生成二次有机气溶胶研究进展 .....                                                      | 叶招莲, 瞿珍秀, 马帅帅, 盖鑫磊 (3954)                               |
| 《环境科学》征订启事 (3543) .....                                                         |                                                         |
| 《环境科学》征稿简则 (3570) .....                                                         |                                                         |
| 信息 (3600, 3728, 3844) .....                                                     |                                                         |

# 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

朱冰清<sup>1</sup>, 高占啟<sup>1</sup>, 胡冠九<sup>1</sup>, 王骏飞<sup>1</sup>, 于南洋<sup>2</sup>, 韦斯<sup>2</sup>

(1. 江苏省环境监测中心, 国家环境保护地表水环境有机污染物监测分析重点实验室, 南京 210036; 2. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093)

**摘要:** 为了解太湖重点区域水环境中邻苯二甲酸酯 (phthalate esters, PAEs) 的污染情况, 对丰水期、枯水期和平水期目标区域的水体和沉积物中 6 种 PAEs 进行分析, 3 个水期水体中 PAEs 浓度分别为 1.6 ~ 11.2  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (平均值 3.68  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )、nd ~ 6.21  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (平均值 1.3  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 和 nd ~ 1.72  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (平均值 0.48  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 从上游至下游未呈现明显浓度变化, 其中邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯 [di(2-ethylhexyl)phthalate, DEHP] 对  $\sum$  PAEs 浓度的贡献比较大, 邻苯二甲酸二正丁酯 (di-n-butyl phthalate, DBP) 在某些采样点高于国内标准. 沉积物中 PAEs 含量范围在 0.74 ~ 6.90  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  (平均值 2.64  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ), 主要成分是 DBP 和 DEHP. 生态风险评价的结果表明, DBP 和 DEHP 是重点区域中最主要的风险因子; 沉积物 PAEs 中所有种类的含量均未超过风险评价低值 (effect range low, ERL), 对生物的潜在危害较小. 与国内外河流、湖泊与河口等沉积物中 PAEs 污染水平比较, 太湖重点区域水环境中 PAEs 污染属于中等水平. 工业污染和城市活动是水环境中邻苯二甲酸酯的主要来源.

**关键词:** 邻苯二甲酸酯; 太湖; 水期; 污染源; 生态风险评价

中图分类号: X524; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)08-3614-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201712230

## Contamination Levels and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Aquatic Environment of Key Areas of Taihu Lake

ZHU Bing-qing<sup>1</sup>, GAO Zhan-qi<sup>1</sup>, HU Guan-jiu<sup>1</sup>, WANG Jun-fei<sup>1</sup>, YU Nan-yang<sup>2</sup>, WEI Si<sup>2</sup>

(1. State Key Environmental Protection Laboratory of Monitoring and Analysis for Organic Pollutants in Surface Water, Jiangsu Environmental Monitoring Center, Nanjing 210036, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210039, China)

**Abstract:** To better understand phthalate esters (PAEs) pollution in key areas of Taihu Lake, water and sediment samples were collected for content analysis. The concentrations of  $\sum$  PAEs in water samples from wet, dry, and normal seasons ranged 1.6-11.2  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (mean: 3.68  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), nd-6.21  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (mean: 1.3  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), and nd-1.72  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (mean: 0.48  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), respectively. No differences were found between upstream and downstream samples. DEHP was the predominant component in water samples, whereas DBP exceeded the national surface water environmental quality standards. The total PAE concentration in the sediment ranged between 0.74 and 6.90  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  (mean: 2.64  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ), with DBP and DEHP the predominant PAEs. The risk quotient (RQ) results showed that DBP and DEHP contributed the most potentially adverse effects to the aquatic environment in the key areas. The contents of PAEs in sediment were all less than the ERLs, thus posing no significant threat to aquatic organisms. The overall level of PAEs in the study area was moderate compared to those in other areas, including rivers, lakes, and estuaries from cities worldwide. Industrial pollution and urban activities are the major sources of PAEs in the aquatic environment of key areas of Taihu Lake.

**Key words:** phthalate esters (PAEs); Taihu Lake; water period; pollutant source; ecological risk assessment

邻苯二甲酸酯 (phthalate esters, PAEs) 又称酞酸酯, 这类化合物作为重要的化工原料已被广泛应用近 50 年, 主要用作于增塑剂以提高产品的强度和可加工性, 同时也被应用于个人护理品、特定医疗器械、驱虫剂等生产原料, 甚至可作为军火弹药的原料<sup>[1,2]</sup>. 全球每年 PAEs 类化合物的使用量在 820 万 t 以上, 随着塑料品的无节制使用, 大量 PAEs 进入环境, 由于其分布广泛、难降解性及可通过生物链浓缩, PAEs 在大气、土壤、沉积物以及生物体中被广泛检测出, 并且 PAEs 会通过影响生态

平衡, 进而对人体健康造成潜在威胁<sup>[3,4]</sup>. PAEs 已被公认为全球性的环境有机污染物, 特别是对水环境的污染, 已引起世界各国的重视.

美国环保署 (Environmental Protection Agency, USEPA) 将邻苯二甲酸二甲酯 (dinethyl phthalate, DMP), 邻苯二甲酸二乙酯 (diethyl phthalate,

收稿日期: 2017-12-27; 修订日期: 2018-01-23

基金项目: 太湖水污染治理专项 (TH2015301); 江苏省环境监测科研基金项目 (1617)

作者简介: 朱冰清 (1988 ~), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为环境持久性有机污染物, E-mail: jianzhuq@aliyun.com



DEP), 邻苯二甲酸二正丁酯(di-*n*-butyl phthalate, DBP), 邻苯二甲酸丁苄酯(butylbenzyl phthalate, BBP), 邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯[di(2-ethylhexyl)phthalate, DEHP]和邻苯二甲酸二正辛酯(di-*n*-octyl phthalate, DOP)等6种PAEs列为优先控制有毒污染物,我国也将DEP、DMP和DOP这3种PAEs确定为环境优先控制污染物<sup>[5,6]</sup>,同时,我国生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006)中也规定了部分PAEs的限值,DEHP和DBP分别为 $0.008 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.003 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .据报道,国外河流沉积物中PAEs含量范围在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 100 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间<sup>[7]</sup>,我国部分地区PAEs污染也已经非常严重<sup>[8]</sup>,对环境生态系统的影响不容忽视.

太湖是我国五大淡水湖之一,地处长江经济发达地区,是流域内最主要的供水水源地和重要的淡水生态系统,担负着周边大城市(无锡及苏州等)的城市供水和改善下游地区水质的重要作用<sup>[9]</sup>.太滬运河和太滬南运河是太湖重污染区竺山湾的重要外部来源,该流域内水体污染主要来源于沿岸的生活、农业和工业污染源的排放及受上游客水的影响,太滬南运河总体水质以V类和劣V类为主<sup>[10,11]</sup>.太湖重点区域(太滬运河以南、太滬南运河以北、滬湖以东和太湖以西约 $220 \text{ km}^2$ 的片区)涉及无锡宜兴市和常州武进区,该地区经济发达,人口密集,污染负荷较大,近年来,由于流域生活污染源和农业面源的影响,加上河道沉积物中污染物含量高,水生生态系统遭到破坏,水体自净能力受到损伤,重点区域内分布有精细化工、塑料制品、纺织工业等行业,这些行业都是PAEs潜在的污染来源<sup>[12]</sup>.区域内太滬运河、漕桥河和太滬南运河等3条主要入湖河流,入湖污染量占西部沿岸主要河流入湖污染量的40%左右<sup>[13]</sup>,因此该区域内的PAEs污染与排放强度,直接影响西太湖乃至整个太湖PAEs的分布情况.

本项目选择太湖治太科研示范区为重点调研区域,针对区域内主要水体以及沉积物中蓄积的6种PAEs污染现状开展监测调查,分析污染水平、组成特征和潜在风险,旨在为太湖流域PAEs的多介质归趋研究和区域风险提供了理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品的采集

为了综合考察太湖重点区域水体和沉积物中PAEs的时空分布规律,采样时间为:丰水期

(2016年8月)、枯水期(2016年11月)和平水期(2017年4月),13个点位分布在太滬运河、漕桥河与太滬南运河的上游、中游与下游及太滬运河与太滬南运河的两个入湖口(图1),各采样点位的经纬度与其他信息如表1所示.水样分别采集于3个水期,收集在1 L棕色广口玻璃采样瓶中;沉积物采集于平水期,采用抓泥斗进行采集,取0~5 cm表层沉积物,由于4号和11号点位属于沙质湖底,未采集到沉积物样品.采集的水样和沉积物样品置于4℃冰柜中保存,并于24 h内运回实验室冷冻待分析.



图1 太湖重点区域采样点示意

Fig. 1 Map of the sampling sites from the key areas of Taihu Lake

### 1.2 仪器与试剂

ISQ气相色谱质谱联用仪(赛默飞世尔科技 Thermo Fisher Scientific 公司),快速溶剂萃取仪(Accelerate Solvent Extractor, ASE200), Milli-Q 纯水系统(美国 Millipore 公司).DMP、DEP、DBP、BBP、DEHP与DOP等6种PAEs混合标准溶液(溶剂为二氯甲烷)购于德 Dr. Ehrenstorfer 公司;替代标准物氘代邻苯二甲酸二正丁酯(d4-DBP)、内标



物酞代邻苯二甲酸二乙酯(d4-DEP)和酞代邻苯二甲酸二正辛酯(d4-DOP)购于美国 Accustandard 公司(New Haven, CT, USA);实验所用二氯甲烷、丙

酮、正己烷均为色谱纯;无水硫酸钠(优级纯)和玻璃棉于马弗炉 450℃灼烧 4 h,冷却后装瓶,于干燥器中保存.

表 1 太湖重点区域采样点地理信息

Table 1 Geographical information of sampling sites from the key areas of Taihu Lake

| 编号 | 监测断面   | 纬度/(°)   | 经度/(°)    | 备注                   |
|----|--------|----------|-----------|----------------------|
| 1  | 太滂河口区  | 31.6167  | 119.885 2 | 太滂出水                 |
| 2  | 武宜运河 1 | 31.604 5 | 119.909 2 | 武宜运河与太滂运河交汇          |
| 3  | 永安河口   | 31.574 6 | 119.964 4 | 永安河与太滂运河交汇           |
| 4  | 锡漂漕河   | 31.554 3 | 120.014 9 | 锡漂漕河与太滂运河交汇          |
| 5  | 太滂河口区  | 31.535 1 | 119.847 5 | 太滂出水                 |
| 6  | 武宜运河 2 | 31.536 0 | 119.921 1 | 武宜运河水与漕桥河交汇          |
| 7  | 漕桥     | 31.521 8 | 119.984 8 | 宜兴与武进共有河段            |
| 8  | 分水桥    | 31.496 5 | 120.036 9 | 太滂运河与漕桥河交汇前太滂运河上对照断面 |
| 9  | 王母桥西   | 31.513 7 | 119.825 4 | 滂湖出水                 |
| 10 | 武宜运河 3 | 31.496 0 | 119.900 6 | 太滂南运河与武宜运河交汇断面       |
| 11 | 陈桥     | 31.459 5 | 120.012 7 | 入湖口段面                |
| a  | 漕桥河入湖  | 31.486 1 | 120.052 7 | 湖体                   |
| b  | 殷村港入湖  | 31.456 5 | 120.021 4 | 湖体                   |

### 1.3 样品的前处理

水样:取 500 mL 水样置于分液漏斗中,加入 30 mL 二氯甲烷,液液萃取前加入回收率指示物(d4-DBP),振荡 5 min 后静置分层,下层有机相经无水硫酸钠干燥过滤后收集在浓缩管中,重复提取 3 次,合并提取液,用氮吹仪将提取液吹至近干,加入内标化合物(d4-DEP 与 d4-DOP),用二氯甲烷定容至 1 mL 进行 GC/MS 分析.

沉积物:准确称取 2 g 干燥沉积物样品,与无水硫酸钠混匀后放入快速溶剂萃取池,萃取前加入回收率指示物(d4-DBP).提取溶剂为二氯甲烷/正己烷(1:1,体积比)混合溶剂,压力为 103 MPa,温度 90℃下加热 5 min,静态时间 5 min,冲洗体积 60%,吹扫时间 60 s,静态循环次数 3 次.萃取液用内径 10 mm 的层析柱净化,从下至上依次填入 12 cm 硅胶、6 cm 氧化铝和 1 cm 无水硫酸钠.用 40 mL 丙酮/正己烷(2:8,体积比)洗脱,洗脱液用旋转蒸发仪和氮吹仪浓缩至 0.5 mL 以下,加入内标物(d4-DEP 与 d4-DOP)后用正己烷定容至 1 mL,待测.

### 1.4 仪器分析

依据 USEPA 8270D-2014 方法,采用 GC-MS 进行分析,色谱柱类型为 DB-5MS(30 m×0.25 mm×

0.25 μm)毛细管柱,初始柱温为 50℃,保持 3.5 min,以 8℃·min<sup>-1</sup>的速率升温至 310℃,载气为氮气,流速为 1.0 mL·min<sup>-1</sup>,进样口温度 250℃,进样方式为分流进样.离子源电子能量为 70 eV,离子源温度 270℃,传输线温度为 280℃,以保留时间和质谱全扫描方式(Scan)进行定性分析,以质谱选择离子(SIM)模式进行定量分析.

### 1.5 质量保证和质量控制(QA/QC)

由方法空白、加标空白、基质加标、基质加标平行样、样品平行样等 USEPA 的 QA/QC 控制样监控整个分析过程,并用回收率指示物检测样品的制备和基质的影响.DMP、DEP、BBP 和 DOP 的实验室空白和野外空白均未检出,DBP 和 DINP 的空白约为方法的检出限,故忽略不计.水体中 6 种 PAEs 检出限为 0.07 μg·L<sup>-1</sup>(DMP)~0.052 μg·L<sup>-1</sup>(DIBP),空白加标回收率为 78%~83%,基质加标回收率为 77%~81%;沉积物中 6 种 PAEs 检出限为 0.05 μg·kg<sup>-1</sup>(DBP)~1.67 μg·kg<sup>-1</sup>(DINP),空白加标回收率为 74%~89%,基质加标回收率为 83%~94%.

### 1.6 总有机碳(TOC)测定

样品去除无机碳(10% HCl 浸泡)后使用 CHNS 元素分析仪测定 TOC 含量,结果见表 2.

表 2 太湖重点区域沉积物总有机碳含量

Table 2 TOC in sediment from the key areas of Taihu Lake

| 点位    | 1    | 2    | 3    | 5    | 6    | 7    | 8    | 10   | 11   | a    | b    |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| TOC/% | 1.34 | 1.06 | 1.60 | 4.73 | 1.15 | 2.11 | 1.36 | 3.45 | 1.48 | 1.66 | 1.78 |

2 结果与讨论

2.1 水相和沉积物中 PAEs 的含量及组成

从上游漏湖到下游太湖入湖口，主要有太滬运河、漕桥河与太滬南运河这 3 条入湖河流，其中各点位 PAEs 水平及组成如图 2、3 所示。丰水期 PAEs 的总量为 1.6 ~ 11.2  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (平均值 3.68  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )，6 种 PAEs 平均浓度按照 DEP > DEHP > DBP > BBP > DOP > DMP 顺序递减，其中 1 号点位

浓度最高比重最大的 DBP 含量为 5.99  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，三条河流由上游至下游并没有明显浓度或组成的波动及变化，枯水期 PAEs 的总量 nd ~ 6.21  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (平均值 1.3  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )，仅 BBP 和 DEHP 有检出，平水期太湖重点区域 PAEs 的浓度范围在 nd ~ 1.72  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (平均值 0.48  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )，太滬南运河以及两个入湖口几乎未检出，这与丰水期和枯水期水体中的情况有较大差异。

13 个采样点丰水期检测出的 PAEs 总量均比枯

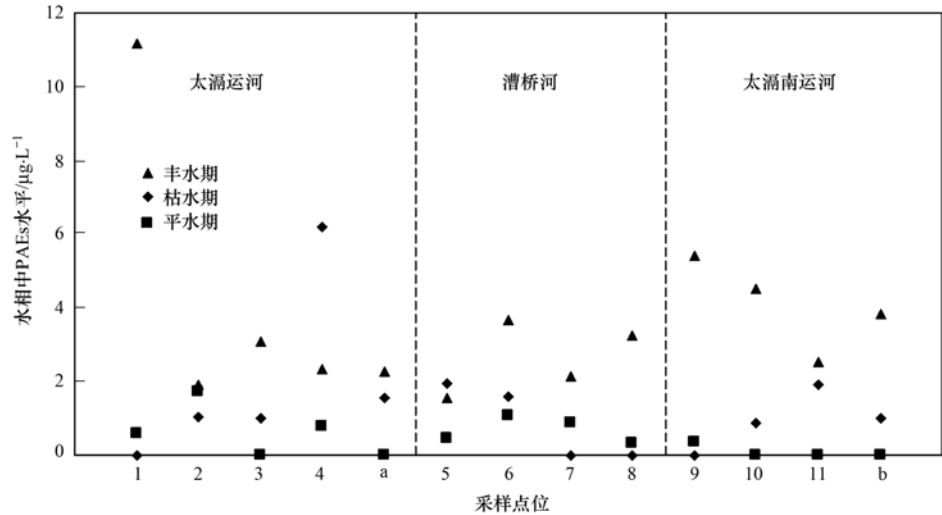


图 2 丰水期、枯水期和平水期各采样点水相中 PAEs 的浓度  
Fig. 2 Total content of PAEs in water samples from dry, wet, and normal seasons

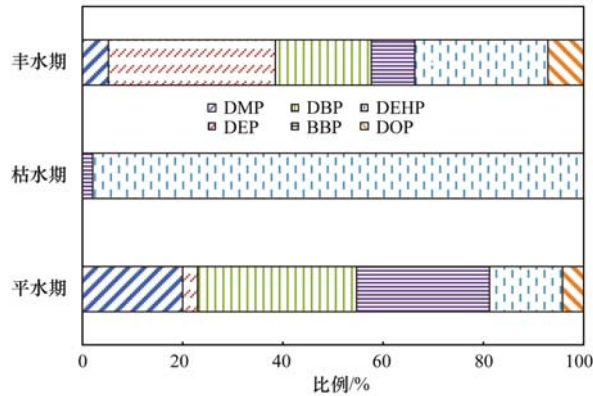


图 3 丰水期、枯水期和平水期水相中 6 种 PAEs 的组成比例  
Fig. 3 PAE composition profiles for water samples from dry, wet, and normal seasons

水期与平水期要高(采样点 4、5 除外)且 6 种 PAEs 在丰水期均有检出。可能原因是丰水期大量的外源物质汇入水体，如大气颗粒物的沉降和地表径流带来的表层土壤冲刷<sup>[14]</sup>。另外，现场调研和采样期间发现河流周边化工厂的排污设备非常隐蔽，在丰水期，大部分排污口被淹没在河流以下，难以发现，工厂在丰水期期间不达标随意排放废水现象也可能

加剧水体中 PAEs 含量。

分析测试 6 种 PAEs 的含量分布，太湖重点区域沉积物中 PAEs 总含量介于 0.74 ~ 6.90  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  (平均值 2.64  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) (图 4)，6 种 PAEs 至少在一个点位检出，其中 DBP 的比重最高 (23.9% ~ 94.4%) (a、b 两点除外)，含量介于 0.57 ~ 2.45  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，两个入湖口 a 和 b 点位沉积物中 DEHP 含

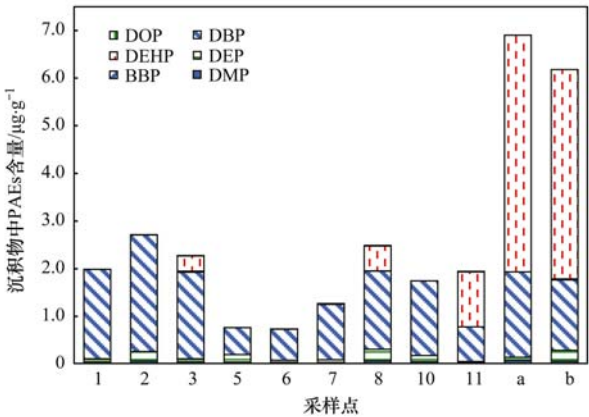


图 4 太湖重点区域沉积物中 PAEs 含量  
Fig. 4 PAEs concentrations in sediment from the key areas of Taihu Lake



量占到总含量的 70%, 分别为  $4.97 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $4.36 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , 比巢湖沉积物约高一个数量级<sup>[15]</sup>. 从涇湖至太湖, 太涇运河与太涇南运河的沉积物中 PAEs 的含量自上游至下游未出现明显波动, 漕桥河下游含量略高于上游两点, 说明该区域以及漕桥河的客水存在 PAEs 的排放. 太湖湖体沉积物中 PAEs 的含量明显高于重点区域河流.

骆马湖湖底沉积物中只检测出两种 PAEs<sup>[16]</sup>, 与水体中检出的种类一致, 但含量远远高于太湖重点区域, 这可能由于骆马湖周边 PAEs 污染较为严重, 在沉积物中富集周期长, 含量高<sup>[17,18]</sup>. 与国内其他水源地相比, 太湖 PAEs 污染属于较低水平, 但由于 PAEs 具有持久性和蓄积性, 应加强污染防治, 防止水质继续恶化.

国内外已有许多关于 PAEs 在沉积物与水之间分配系数的研究, 结果一致认为发生在沉积物与水相间的吸附作用受沉积物中有机碳含量的显著影响, 且沉积物对不同 PAEs 组分的吸附能力也不一致. 对太湖重点区域沉积物中 PAEs 和 TOC 相关性 ( $n=11$ ) 作图表明, 彼此在  $P=0.05$  的置信水平上相关性不显著 (图 5), 说明在太湖重点区域 TOC 不是影响沉积物中 PAEs 的重要因素. 而胡雄星等<sup>[19]</sup>发现苏州河沉积物中 PAEs 分布与 TOC 有正相关性, 因为 TOC 代表了沉积物中有机质的含量, 沉积物中 TOC 含量越高, 其对 PAEs 的吸附能力也越强, 导致沉积物中 PAEs 含量升高.

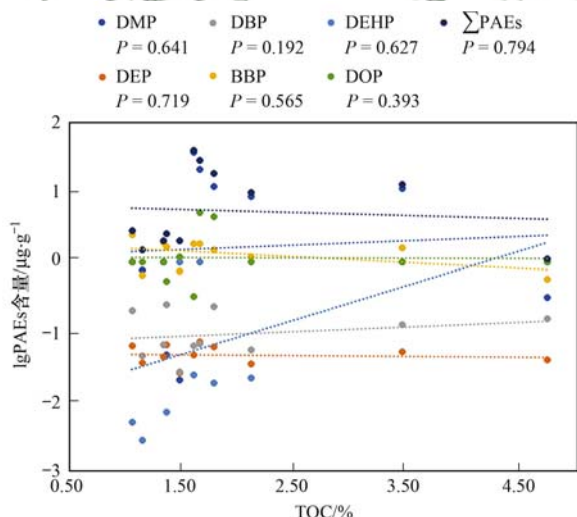


图 5 PAEs 含量与 TOC 的相关性

Fig. 5 Relationship between the concentrations of PAEs and TOC

## 2.2 太湖重点区域 PAEs 污染源

PAEs 在丰水期的检出率和检出浓度最高, 浓度水平在  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 在丰水期和枯水期, 水体中各点

位检出的 DEHP 浓度最高, 与商品化的 PAEs 组分相同, 说明水体中有新进的 PAEs 污染源, 如工业、商业活动以及人类生活活动等, 这种污染特征与其他有机污染物如多溴联苯醚等一致. 水体中, 检出的 PAEs 主要是 DEHP, 而沉积物中检出的主要是 DMP、DEP 和 DBP 等小分子 PAEs, 作为疏水类物质, PAEs 一旦进入水体, 会被颗粒物快速且大量地带向下游, 小颗粒悬浮物由于比表面积大, 容易吸附有机质, 因此, 相比于长链的 PAEs 如 DEHP, 低分子量的 DBP 等, 容易被大颗粒物吸附, 沉降于 PAEs 源附近的沉积物中, 而长链的 PAEs 被小的颗粒吸附, 不停地随河流流向下游, 因此沉降较慢, 故在水体中主要检出 DEHP 等长链 PAEs. 在漕桥河上, 漕桥河污水处理厂下游 (8 号点) 沉积物中, PAEs 的含量比上游 (7 号点) 高 0.96 倍, 说明污水处理厂对河流中 PAEs 有贡献.

## 2.3 水相 PAEs 与国内外同类研究的比较

PAEs 在全球主要工业国家的生态环境中已达到普遍检出的程度, 成为全球性最普遍的污染物之一. 将太湖重点区域水体中 PAEs 与国内外已有研究报道的水域表层水体和沉积物进行比较, 结果见表 3 和表 4.

Yuan 等<sup>[31]</sup>对中国台湾地区河流表层水样中 8 种 PAEs 测定结果显示, 8 种 PAEs 在所有样品中均有不同程度的检出. 对长江表层水体中 PAEs 检测结果发现 DBP 浓度较高<sup>[32]</sup>. Wang 等<sup>[33]</sup>分季节对长江武汉段水体中 PAEs 浓度进行了检测, 结果表明冬季水体中 PAEs 的浓度高于夏季, DBP 和 DEHP 对 PAEs 浓度的贡献较大. 从表 3 可以看出中国北方 PAEs 污染比太湖重点区域表层水严重, 且部分点位 DBP 浓度超过 GB 5749-2006《生活饮用水卫生规范》和 GB 3838-2002《地表水环境质量标准》中规定的限量值  $3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ .

沉积物中 PAEs 污染以 DBP 和 DEHP 为主, 比较 2003 年太湖区域、巢湖和国内以及世界其他湖泊沉积物 PAEs 的含量, 太湖重点区域沉积物中 DBP 和 DEHP 含量高于九龙河、印度和意大利的湖泊河流<sup>[25,28,29]</sup>, 比松花江河口沉积物 PAEs 含量低约两个数量级<sup>[21]</sup>. 随着流域内经济的高速增长, 受沿湖地区生活污水、工业废水和农业废水直接或间接排入的影响, 太湖水体污染日趋严重.

## 2.4 水体 PAEs 生态风险评估

采用欧盟适用于现有化学物质与新化学物质的风险评价技术指南 (technical guidance document,

表 3 世界其他地区河流、湖泊水体 PAEs 污染水平/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 PAEs levels in water from rivers and lakes around the world/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

| 地点            | DMP                      | DEP           | DBP           | BBP        | DEHP          | DOP             | 文献     |
|---------------|--------------------------|---------------|---------------|------------|---------------|-----------------|--------|
| 太湖            | nd <sup>1)</sup> ~ 1. 24 | nd ~ 2. 23    | nd ~ 5. 99    | nd ~ 2. 47 | nd ~ 6. 21    | nd ~ 0. 47      | 本研究    |
| 九龙河           | 0. 03 ~ 0. 24            | 0. 01 ~ 0. 09 | 0. 03 ~ 1. 77 | nd         | 0. 62 ~ 12. 4 | — <sup>2)</sup> | [ 20 ] |
| 松花江           | 0. 98 ~ 4. 12            | 1. 33 ~ 6. 67 | 1. 69 ~ 11. 8 | nd ~ 4. 39 | 2. 26 ~ 11. 6 | 0. 69 ~ 6. 14   | [ 21 ] |
| Tama 河, 日本    | nd ~ 0. 09               | nd ~ 0. 31    | nd ~ 0. 54    | —          | —             | nd              | [ 22 ] |
| Lowland 河, 荷兰 | nd ~ 0. 19               | nd ~ 2. 30    | nd ~ 3. 10    | nd ~ 1. 8  | nd ~ 5. 00    | nd ~ 0. 078     | [ 23 ] |

1) 表示未检出; 2) 表示无相关数据, 下同

表 4 世界其他地区河流、湖泊沉积物中 PAEs 污染水平/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 4 PAEs levels in surface sediment from rivers and lakes around the world/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

| 地点               | DMP             | DEP             | DBP             | BBP               | DEHP            | DOP               | 文献     |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|--------|
| 太湖               | 0. 026 ~ 0. 071 | 0. 027 ~ 0. 244 | 0. 568 ~ 2. 45  | nd ~ 0. 024       | nd ~ 4. 97      | nd ~ 0. 011       | 本研究    |
| 太湖               | —               | —               | 1. 08 ~ 21. 5   | —                 | 2. 22 ~ 23. 9   | —                 | [ 24 ] |
| 巢湖               | 0. 006 ~ 1. 34  | 0. 001 ~ 0. 042 | 0. 080 ~ 2. 63  | 0. 000 4 ~ 0. 286 | 0. 031 ~ 1. 82  | 0. 000 2 ~ 0. 029 | [ 15 ] |
| 永定河              | nd ~ 0. 021     | 0. 009 ~ 0. 054 | 0. 095 ~ 0. 16  | nd                | 0. 017 ~ 1. 090 | nd ~ 0. 020       | [ 25 ] |
| 松花江              | 25. 18 ~ 87. 8  | 26. 7 ~ 38. 2   | 58. 1 ~ 881     | nd ~ 96. 3        | 227 ~ 566       | nd ~ 377          | [ 21 ] |
| 钱塘江              | nd ~ 0. 18      | nd ~ 0. 22      | 0. 034 ~ 0. 24  | nd ~ 0. 021       | 0. 36 ~ 6. 24   | nd ~ 0. 019       | [ 3 ]  |
| 珠江               | 0. 001 ~ 0. 019 | 0. 001 ~ 0. 091 | 0. 042 ~ 5. 03  | nd ~ 0. 11        | 0. 41 ~ 29. 5   | nd ~ 0. 18        | [ 2 ]  |
| 九龙河              | nd ~ 0. 001     | nd ~ 0. 002     | 0. 002 ~ 0. 092 | nd                | 0. 007 ~ 0. 39  | nd                | [ 14 ] |
| 高雄港              | nd              | nd              | 0. 29           | nd                | 4. 90           | 0. 14             | [ 26 ] |
| The Ogun 河, 尼日利亚 | 0. 21           | 0. 18           | 0. 41           | —                 | 0. 050          | —                 | [ 27 ] |
| Gomti 河, 印度      | 0. 011          | 0. 005          | 0. 011          | —                 | 0. 032          | 0. 005            | [ 28 ] |
| Rieti 河, 意大利     | nd              | nd ~ 0. 002     | nd ~ 0. 028     | nd ~ 0. 018       | nd ~ 0. 49      | nd ~ 0. 017       | [ 29 ] |
| Klang 河, 马来西亚    | nd ~ 0. 010     | nd ~ 0. 003     | 0. 067 ~ 0. 637 | —                 | 0. 49 ~ 15. 0   | nd ~ 0. 017       | [ 30 ] |

TGD) 中的商值风险评估方法对太湖重点区域水体中 PAEs 进行生态风险评价<sup>[34]</sup>, 对 3 个水期重点区域 4 种 PAEs 的风险商值( risk quotient,  $RQ = MEC/PNEC$ ) 进行分析, MEC 代表环境中 PAEs 的测量浓度, PNEC 代表预测的无效应浓度, 文献给出 DMP、DEP、DBP 和 DEHP 的 PNEC 值分别为 96. 0、96. 0、0. 500 和 1. 54<sup>[35]</sup>, 计算出各水期 PAEs 的 RQ 见表 5, DBP 在丰水期和枯水期 RQ 均大于 1, DEHP 在丰水期和平水期 RQ 均大于 1, 表明这两种 PAEs 存在潜在的生态风险。

表 5 太湖重点区域水体中 4 种 PAEs 生态风险评价结果

Table 5 Ecological risk assessment results of PAEs in water from the key areas of Taihu Lake

| 水期  | 化合物  | 水体浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ | $RQ_{\text{水}}$ |
|-----|------|---------------------------------------|-----------------|
| 丰水期 | DMP  | 0. 503                                | 0. 005          |
|     | DEP  | 3. 87                                 | 0. 040          |
|     | DBP  | 14. 5                                 | 29              |
|     | DEHP | 20. 0                                 | 13. 0           |
| 平水期 | DMP  | nd                                    | nd              |
|     | DEP  | nd                                    | nd              |
|     | DBP  | nd                                    | nd              |
|     | DEHP | 17. 0                                 | 11. 0           |
| 枯水期 | DMP  | 1. 24                                 | 0. 013          |
|     | DEP  | 0. 186                                | 0. 002          |
|     | DBP  | 1. 97                                 | 3. 94           |
|     | DEHP | 0. 903                                | 0. 586          |

沉积物是 PAEs 的源和汇, 但目前尚未建立起统一的评价标准, 有关沉积物中 PAEs 的环境风险评价研究较少, Van Wezel 等<sup>[36]</sup>通过大量的体内和体外毒理实验, 建议 DEHP 和 DBP 的风险评价低值( effect range low, ERL) 分别为  $1\ 000\ \text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $700\ \text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ . 当 PAEs 污染物含量小于 ERL 时, 认为不存在 PAEs 的内分泌干扰和生态毒理风险. 将沉积物中检测到的 PAEs 含量与 ERL 对比分析可知相对污染系数( relative contamination factor,  $RCF = MEC/ERL$ ) 结果均小于 1, 即沉积物中 PAEs 的含量未超过 ERL, 对生物的潜在危害比较小。

3 结论

我国水环境中 PAEs 的污染已相当普遍, 已威胁到我国水环境生态安全. 6 种 PAEs 在太湖重点区域水体和沉积物中均有检出, 从上游至下游未出现明显波动. 总体来说, 丰水期水体中 PAEs 的浓度比枯水期和平水期要高, DEHP 对水体中  $\sum$  PAEs 浓度的贡献远高于其他 PAEs, DBP 在某些采样点高于国内标准. DBP 和 DEHP 是沉积物中最主要的两种 PAEs, 与世界其他地方河口湖泊沉积物做比较, 太湖重点区域中 PAEs 污染处于中等

偏下水平。目前针对有效去除水体中 PAEs 污染技术的研究已初见报道,对我国不同环境介质中 PAEs 的来源、污染分布特征、毒性和生态风险水平等急需掌握,并且应持续跟踪污染状况,对饮用水污染加以控制和治理,防止污染加剧,降低饮用水 PAEs 污染的风险。

#### 参考文献:

- [1] 陈波,林建国,陈清. 水环境中的邻苯二甲酸酯类污染物及其环境行为研究[J]. 环境科学与管理, 2009, **34**(2): 71-75.  
Chen B, Lin J G, Chen Q. Research on contamination of phthalate esters in aqueous environment and its environmental behaviors[J]. Environmental Science and Management, 2009, **34**(2): 71-75.
- [2] Liu H, Cui K Y, Zeng F, *et al.* Occurrence and distribution of phthalate esters in riverine sediments from the Pearl river delta region, South China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, **83**(1): 358-365.
- [3] Sun J Q, Huang J, Zhang A P, *et al.* Occurrence of phthalate esters in sediments in Qiantang River, China and inference with urbanization and river flow regime[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **248-249**: 142-149.
- [4] Wang J, Bo L J, Li L N, *et al.* Occurrence of phthalate esters in river sediments in areas with different land use patterns[J]. Science of the Total Environment, 2014, **500-501**: 113-119.
- [5] 赵振华. 酞酸酯对人与环境潜在危害的研究概况[J]. 环境化学, 1991, **10**(3): 64-68.  
Zhao Z H. Review of environmental and human health hazards of phthalate esters[J]. Environmental Chemistry, 1991, **10**(3): 64-68.
- [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] 陆铭锋,徐彬,杨旭昌. 太湖水质评价计算方法及近年来水质变化分析[J]. 水资源保护, 2008, **24**(5): 30-33.  
Lu M F, Xu B, Yang X C. Evaluation method for water quality of Taihu Lake and its variation in recent years[J]. Water Resources Protection, 2008, **24**(5): 30-33.
- [10] 黄娟,王惠中,吴云波,等. 太滬南运河入湖污染物控制对策研究[J]. 环境科学与管理, 2010, **35**(7): 1-3, 13.  
Huang J, Wang H Z, Wu Y B, *et al.* Study on measures to control pollutants into the lake of Taige South River[J]. Environmental Science and Management, 2010, **35**(7): 1-3, 13.
- [11] 翟淑华,张红举. 环太湖河流进出湖水量及污染负荷(2000-2002年)[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(3): 225-230.
- Zhai S H, Zhang H J. Water quantity and waste load variation of rivers around lake Taihu from 2000 to 2002[J]. Journal of Lake Sciences, 2006, **18**(3): 225-230.
- [12] 张文艺,韩有法,陆巧丽,等. 太滬运河流域水环境污染解析[J]. 中国农村水利水电, 2012, (9): 47-50.  
Zhang W Y, Han Y F, Lu Q L, *et al.* An analysis of water environmental pollution in the Taige canal watershed[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012, (9): 47-50.
- [13] 朱滨. 太湖主要入湖河流支浜水环境现状调查诊断与整治对策研究[D]. 南京:东南大学, 2016. 23-26.  
Zhu B. Research on water environment survey and control strategies for rural tributaries of rivers in Taihu basin[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. 23-26.
- [14] 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.
- [15] Kang L, Wang Q M, He Q S, *et al.* Current status and historical variations of phthalate ester (PAE) contamination in the sediments from a large Chinese lake (Lake Chaohu)[J]. Environmental Science and Pollution research, 2016, **23**(11): 10393-10405.
- [16] 徐怀洲,宋宁慧,张圣虎,等. 骆马湖邻苯二甲酸酯分布特征及健康风险评估[J]. 生态与农村环境学报, 2017, **33**(10): 928-934.  
Xu H Z, Song N H, Zhang S H, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of phthalate esters in Lake Luoma[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, **33**(10): 928-934.
- [17] 张芹,张圣虎,汪贞,等. 骆马湖表层水体中32种PPCPs类物质的污染水平、分布特征及风险评估[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 162-169.  
Zhang Q, Zhang S H, Wang Z, *et al.* Pollution level, distribution characteristics and risk assessment of 32 PPCPs in surface water of Luomahu Lake[J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 162-169.
- [18] 叶玲. 骆马湖面临的环境问题和保护对策[J]. 污染防治技术, 2015, **28**(6): 87-88, 96.  
Ye L. The environmental problems and protection countermeasures of Luoma Lake[J]. Pollution Control Technology, 2015, **28**(6): 87-88, 96.
- [19] 胡雄星,韩中豪. 苏州河表层沉积物中邻苯二甲酸酯的分布特征及风险评估[J]. 环境监测管理与技术, 2011, **23**(S1): 49-52.  
Hu X X, Han Z H. Distribution of phthalic acid esters in surface sediments from Suzhou River and its risk evaluation[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2011, **23**(S1): 49-52.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Suzuki T, Yaguchi K, Suzuki S, *et al.* Monitoring of phthalic acid monoesters in river water by solid-phase extraction and GC-MS determination[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(18): 3757-3763.
- [23] 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.
- [24] Wang H, Wang C X, Wu W Z, *et al.* Persistent organic pollutants in water and surface sediments of Taihu Lake, China and risk assessment[J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(4): 557-562.
- [25] Wang X T, Ma L L, Sun Y Z, *et al.* Phthalate esters in sediments from Guanting reservoir and the Yongding river, Beijing, people's republic of China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2006, **76**(5): 799-806.
- [26] Chen C W, Chen C F, Dong C D. Distribution of phthalate esters in sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2013, **22**(2): 119-131.
- [27] Adeniyi A A, Okedeyi O O, Yusuf K A. Flame ionization gas chromatographic determination of phthalate esters in water, surface sediments and fish species in the Ogun river catchments, Ketu, Lagos, Nigeria [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **172**(1-4): 561-569.
- [28] Srivastava A, Sharma V P, Tripathi R, *et al.* Occurrence of phthalic acid esters in Gomti River Sediment, India [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **169**(1-4): 397-406.
- [29] Vitali M, Guidotti M, Macilenti G, *et al.* Phthalate esters in freshwaters as markers of contamination sources—A site study in Italy[J]. *Environment International*, 1997, **23**(3): 337-347.
- [30] 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.
- [31] Yuan S Y, Liu C, Liao C S, *et al.* Occurrence and microbial degradation of phthalate esters in Taiwan river sediments[J]. *Chemosphere*, 2002, **49**(10): 1295-1299.
- [32] 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.
- [33] Wang F, Xia X H, Sha Y J. Distribution of phthalic acid esters in Wuhan section of the Yangtze River, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1-3): 317-324.
- [34] Verro R, Finizio A, Otto S, *et al.* Predicting pesticide environmental risk in intensive agricultural areas. I: Screening level risk assessment of individual chemicals in surface waters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(2): 522-529.
- [35] 韩文辉, 赵颖, 党晋华, 等. 汾河流域邻苯二甲酸酯的分布特征及生态风险评价[J]. *环境化学*, 2017, **36**(6): 1377-1387.
- Han W H, Zhao Y, Dang J H, *et al.* Distribution and ecological risk evaluation of phthalate esters in Fenhe river basin [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(6): 1377-1387.
- [36] 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.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                            |                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| An Assessment of PM <sub>2.5</sub> -Related Health Risks and Associated Economic Losses in Chinese Cities                                                                                                                  | LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (3467)                         |
| Impact of the Electric Power Industry on Air Quality in Winter of Urban Agglomerations Along the Middle Reaches of the Yangtze River                                                                                       | SUN Xiao-wei, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan (3476)                     |
| Capacity Simulation Method Based on Regional Transfer Matrix and PM <sub>2.5</sub> Concentration Target Constraint                                                                                                         | LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, YANG Liu-lin, <i>et al.</i> (3485)        |
| Analysis of Chemical Composition of the Fine Particulate Matter in Summer in Tianjin City via a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)                                                                          | WEN Jie, SHI Xu-rong, TIAN Ying-ze, <i>et al.</i> (3492)              |
| Pollution Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing                                                                                                     | PENG Xiao-le, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3502)         |
| Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo                                                                                                              | XU Hong-hui, XU Jing-sha, HE Jun, <i>et al.</i> (3511)                |
| Emission Characteristics and Chemical Components of PM <sub>2.5</sub> from Open Burning of Municipal Solid Waste                                                                                                           | WANG Yan, HAO Wei-wei, CHENG Ke, <i>et al.</i> (3518)                 |
| Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China                                                                                                                            | YANG Guo-wei, KONG Shao-fei, ZHENG Shu-ni, <i>et al.</i> (3524)       |
| Characteristics and Source Analysis of Non-methane Hydrocarbons (NMHC) in Dalian                                                                                                                                           | Ji De-yu (3535)                                                       |
| Scenario Analyses of the Volatile Organic Compound Emission Allowance and Allocation in the 13th Five-Year Period                                                                                                          | ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, LIANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (3544)   |
| Pollution Characteristics and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Packaging and Printing Industry in Zhejiang Province                                                                            | WANG Jia-de, LÜ Jian-zhang, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3552)         |
| Emission Characteristics and Characteristic Substance Identification of Volatile Odorous Organic Compounds in Industries Using Organic Solvents                                                                            | ZHAI Zeng-xiu, MENG Jie, WANG Gen, <i>et al.</i> (3557)               |
| Analysis of Aerosol Optical Depth Variation Characteristics for 10 years in Urumqi Based on MODIS_C006                                                                                                                     | HU Jun, KANG Yan-ming, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (3563)           |
| Motor Vehicle Pollution Control Scenarios of Beijing Subsidiary Administrative Center Based on Road Traffic Flow                                                                                                           | FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (3571)                         |
| Air Pollution Characteristics and Jogger Inhalation Exposure in Typical Running Area of Beijing                                                                                                                            | TAO Shuang-cheng, GAO Shuo-han, XIONG Xin-zhu, <i>et al.</i> (3580)   |
| Temporal and Spatial Changes in Sediment Nutrients and Heavy Metals of the Danjiangkou Reservoir Before and After Water Division of the Mid-route Project                                                                  | LI Bing, WANG Ya, ZHENG Zhao, <i>et al.</i> (3591)                    |
| Fluorescence Characteristics and Environmental Significance of Organic Matter in the Northern Part of Lake Taihu in Spring and Winter                                                                                      | LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua (3601)                             |
| Contamination Levels and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Aquatic Environment of Key Areas of Taihu Lake                                                                                       | ZHU Bing-qing, GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, <i>et al.</i> (3614)         |
| Nitrogen and Phosphorous Adsorption Characteristics of Suspended Solids Input into a Drinking Water Reservoir via Typhoon Heavy Rainfall                                                                                   | YAO Ling-ai, ZHAO Xue-min, MA Qian-li, <i>et al.</i> (3622)           |
| Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta                                                                                                                      | ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao, ZHANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3631)   |
| Effects of Organic Pollutants on the Bacterioplankton Community in Hangzhou Bay                                                                                                                                            | XUAN Li-xia, DAI Wen-fang, YU Wei-na, <i>et al.</i> (3640)            |
| Bacterioplankton Community Structure in the Lancang River Basin and the Analysis of Its Driving Environmental Factors                                                                                                      | CHENG Bao, WANG Xue, XU Ya-qian, <i>et al.</i> (3649)                 |
| Bacterial Community Structure Characteristics in the Biliuhe Reservoir and Its Key Driving Factors                                                                                                                         | WANG Huan, ZHAO Wen, XIE Zai-gang, <i>et al.</i> (3660)               |
| Analysis of the Temporal and Spatial Distribution of the Diversity of the Denitrifying Anaerobic Methane-Oxidizing Bacterial Community in the Sediments of the Hunhe River and Its Relationship with Environmental Factors | ZHANG Ya-di, SONG Yong-hui, PENG Jian-feng, <i>et al.</i> (3670)      |
| Influences of Anthropogenic Activities on the Community Structure of N-DAMO Bacteria in the North Canal                                                                                                                    | LIU Yang, CHEN Yong-juan, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3677)         |
| Impact of Exogenous Nitrogen Import on Sediment Denitrification and N <sub>2</sub> O Emissions in Ditches Under Different Land Uses                                                                                        | SHE Dong-li, CHEN Xin-yi, GAO Xue-mei, <i>et al.</i> (3689)           |
| Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments                                                                                                                               | SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-yi, <i>et al.</i> (3696)                   |
| Effect of Cr(VI) on Coagulation Process of Different Coagulants                                                                                                                                                            | GAO Qian, ZHANG Da-wei, XU Hui, <i>et al.</i> (3704)                  |
| Enhancement of Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A with Peroxymonosulfate Activated by a Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /BiVO <sub>4</sub> Composite Photoanode                                               | LI Jiang, WANG Yan, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (3713)              |
| Preparation and Characterization of a Calcium Alginate/Biochar Microsphere and Its Adsorption Characteristics and Mechanisms for Pb(II)                                                                                    | YU Chang-jiang, DONG Xin-yu, WANG Miao, <i>et al.</i> (3719)          |
| Behaviors and Mechanisms of CIP and OFL Adsorption by Magnetic Biochar                                                                                                                                                     | ZHAO Hua-xuan, LANG Yin-hai (3729)                                    |
| Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect New Psychoactive Substances in Wastewater                                                                                                                   | CHEN Pei-pei, DU Peng, ZHOU Zi-lei, <i>et al.</i> (3736)              |
| Effect of Hybrid Process of Pre-ozonation and CNT Modification on Hollow Fiber Membrane Fouling Control                                                                                                                    | GUAN Yu-qi, WANG Kai-lun, ZHU Xue-dong, <i>et al.</i> (3744)          |
| Bioregeneration of Anion Exchange Resin Used in Nitrate Removal                                                                                                                                                            | YE Ting, ZHANG Guang, WANG Ke, <i>et al.</i> (3753)                   |
| Preparation of Prussian Blue@Yeast Catalyst and Its Heterogeneous Fenton Performance                                                                                                                                       | CHEN Si, BAI Bo, WANG Hong-lun, <i>et al.</i> (3759)                  |
| Nitrogen Removal of Double-bacteria-layer System via PN/A Process                                                                                                                                                          | XU Jing-yi, DU Jun, YANG Yi-feng, <i>et al.</i> (3767)                |
| Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System                                                                                                                                            | MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3775)                  |
| Treatment of Old Landfill Leachate via a Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Process                                                                                                                               | WANG Fan, LU Ming-yu, YIN Ji-qiang, <i>et al.</i> (3782)              |
| Denitrification Characteristics and Functional Genes of Denitrifying Bacteria Under Aerobic or Anaerobic Conditions                                                                                                        | KANG Peng-liang, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3789) |
| Characteristic of Benzo[a]pyrene Anaerobic Degradation by Phenol Co-substrate and Microbial Communities from Two Types of Sludge                                                                                           | WU Hai-zhen, HU Xiao-yi, WANG Ming, <i>et al.</i> (3797)              |
| Spectroscopic Characterization of DOM During Hyperthermophilic Composting of Sewage Sludge                                                                                                                                 | LIU Xiao-ming, YU Zhen, ZHOU Pu-xiong, <i>et al.</i> (3807)           |
| Effects of Biochar on Nitrous Oxide Fluxes and the Abundance of Related Functional Genes from Agriculture Soil in the North China Plain                                                                                    | LIU Xing-ren, ZHAO Guang-xin, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i> (3816)    |
| Nitrous Oxide Production in Response to Oxygen in a Solar Greenhouse Vegetable Soil                                                                                                                                        | CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, <i>et al.</i> (3826)               |
| Comprehensive Study of Lead Speciation and Its Bioavailability in Soils From a Lead/Zinc Mining Area by Micro X-Ray Fluorescence and X-Ray Absorption Near-Edge Structure                                                  | SUN Xiao-yan, LIU Jian, LUO Li-qiang (3835)                           |
| Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioaccumulation by Dominant Plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing                                                                                                 | LI Jun-kai, ZHANG Dan, ZHOU Pei, <i>et al.</i> (3845)                 |
| Preparation of Iron-Aluminum Modified Diatomite and Its Immobilization in Cadmium-Polluted Soil                                                                                                                            | YANG Yu-zhong, ZHU Jian, XIAO Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3854)         |
| Transfer of Soil Organic Carbon to Inorganic Carbon in Arid Oasis Based on Stable Carbon Isotope Technique                                                                                                                 | LI Yang-mei, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3867)               |
| Environmental Filters Drive the Assembly of the Soil Fungal Community in the <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forests of the Guandi Mountains                                                                            | ZHAO Peng-yu, LI Cui, CHAI Bao-feng (3876)                            |
| Effects of Transgenic Maize with <i>cry1Ab</i> and <i>Epsps</i> Genes C0030.3.5 on the Abundance and Community Structure of Soil Nitrogen-fixing Bacteria                                                                  | WANG Rui, ZHU Ke, LI Gang, <i>et al.</i> (3885)                       |
| Effects of Gypsum on CH <sub>4</sub> Emission and Functional Microbial Communities in Paddy Soil                                                                                                                           | HU Xiang-yu, XIANG Qiu-jie, MU Zhi-jian (3894)                        |
| Effects of Long-term Fertilization on Enzyme Activities in Profile of Paddy Soil Profiles                                                                                                                                  | DU Lin-sen, TANG Mei-ling, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3901)          |
| Effects of Sediment Burial and Exogenous Cd Input on Biomass Allocation and Antioxidative Enzyme Activities of <i>Suaeda salsa</i> in the Coastal Wetland of the Yellow River Delta                                        | SONG Hong-li, WANG Li-zhi, YU Wan-ni, <i>et al.</i> (3910)            |
| Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat Grains Cultivated in Kaifeng Irrigation Area of the Yellow River                                                                             | KANG Guo-hua, ZHANG Peng-yan, LI Yan-yan, <i>et al.</i> (3917)        |
| Effect of Graphene Oxide on Algal Toxicity of Dibutyl Phthalate                                                                                                                                                            | TU Hai-feng, LIU Cheng, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (3927)            |
| Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance                                                                                                                                    | ZU Bo, MA Lan, LIU Bo, <i>et al.</i> (3937)                           |
| Well-to-Wheels Fossil Energy Consumption and CO <sub>2</sub> Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China                                                                                                             | LIN Ting, WU Ye, HE Xiao-yi, <i>et al.</i> (3946)                     |
| Secondary Organic Aerosols from Aqueous Reaction of Aerosol Water                                                                                                                                                          | YE Zhao-lian, QU Zhen-xiu, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (3954)       |