

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究	颜金培, 陈立奇, 林奇, 赵淑惠, 李磊, 朱大勇 (2629)
利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征	赵仕伟, 高晓清 (2637)
秋冬季节华北背景地区 PM ₁ 污染特征及来源	张周祥, 张养梅, 张小曳, 王亚强, 沈小静, 孙俊英, 周怀刚 (2647)
杭州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献	吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 杜荣光, 夏俊荣, 齐冰, 刘刚, 李凤英, 杨孟, 盖鑫磊 (2656)
青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布	谢丹丹, 祁建华, 张瑞峰 (2667)
西安市重污染与清洁天 PM _{2.5} 组分及其活性氧物质对比	王堃, 韩永明, 何世恒, 张婷, 刘随心, 曹军骥 (2679)
黄山 PM ₁₀ 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源	孟静静, 侯战方, 张二勋, 董杰, 刘晓迪, 邢继钊, 刘加珍 (2688)
泉州市大气 PM _{2.5} 铜系元素组成特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 许文质, 张棕巍 (2698)
西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价	许亚宣, 李小敏, 于华通, 董林艳, 赵玉婷, 姚懿函, 邹广迅, 张新民 (2707)
G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析	张璘, 张祥志, 秦玮, 茅晶晶, 秦艳红, 谢卫平, 史文科, 陈文泰 (2718)
四川省 2005 ~ 2014 年农业源氨排放清单及分布特征	冯小琼, 陈军辉, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (2728)
长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单	鲁君, 黄成, 胡馨遥, 杨强, 井宝莉, 夏阳, 卢滨, 唐伟, 楼晨荣, 陶士康, 李莉 (2738)
我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定	张秋秋, 潘申龄, 张昱, 杨敏, 安伟 (2747)
地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析	赵鹏, 何江涛, 王曼丽, 崔亚丰 (2754)
胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析	张倩, 宋金明, 彭全材, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段雨琴, 曲宝晓, 王启栋 (2763)
桂江流域夏季水-气界面 CO ₂ 脱气的空间变化及其影响因素	张陶, 李建鸿, 蒲俊兵, 吴飞红, 李丽, 袁道先 (2773)
都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险	宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 刘意章, 肖唐付, 赵彦龙, 吴世良 (2784)
太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险	陈政宏, 郭敏, 徐怀洲, 刘丹, 程杰, 李江, 张圣虎, 石利利 (2793)
洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异	李文章, 张莉, 王圣瑞, 肖尚斌, 钱伟斌, 席银, 许可宸, 史玲珑 (2801)
阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征	孙清清, 陈敬安, 王敬富, 杨海全, 计永雪, 兰晨, 王箫 (2810)
北京市水环境中精神活性物质污染特征	张艳, 张婷婷, 陈卫平, 郭昌胜, 花镇东, 张远, 徐建 (2819)
降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响	陈莹, 王昭, 吴亚刚, 赵剑强, 杨文娟 (2828)
CaO ₂ 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用	徐焱, 李大鹏, 韩菲尔, 宋小君, 李鑫, 周婧, 黄勇 (2836)
坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征	鲜青松, 唐翔宇, 朱波 (2843)
微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果	陈友媛, 吴亚东, 孙萍, 吴丹 (2850)
氧化镁基生物炭高效去除水体中磷的特性	王彬斌, 林景东, 万顺利, 何锋 (2859)
Pd/Fe ⁰ 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺	张环, 傅敏, 魏俊富, 王一冰, 安慧颖, 沈书怡 (2868)
针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响	孔殿超, 周跃飞, 陈天虎, 王进, 李碧 (2875)
污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律	韩慧慧, 缪恒峰, 张雅晶, 陆敏峰, 黄振兴, 阮文权 (2883)
微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水	孙靖云, 范梦婕, 陈英文, 祝社民, 沈树宝 (2893)
水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用	苏文, 陈洁, 张胜鹏, 孔繁翔 (2901)
沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻	蔡小波, 郁强强, 刘锐, 赵远, 陈吕军 (2910)
K ⁺ 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能	吴国栋, 于德爽, 李津, 周同, 王晓静 (2917)
包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行	于濛雨, 刘毅, 田玉斌, 石欢, 徐富, 杨宏 (2925)
ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布	李惠娟, 彭聪聪, 陈国燕, 姚倩, 卓杨, 王彬斌 (2931)
厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体	李祥, 林兴, 王凡, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 毕贞, 刘忻, 杨朋兵 (2941)
基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理	林兴, 王凡, 袁砚, 李祥, 黄勇, 袁澄伟 (2947)
基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成	沈庆然, 李田, 曹熠, 潘奥 (2953)
罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响	高景峰, 孙丽欣, 樊晓燕, 潘凯玲, 李定昌 (2961)
不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水	周贵忠, 许硕, 姚倩, 银钗 (2972)
CO ₂ -咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征	王博强, 李晨阳, 卢伟, 樊昊, 张冬至, 汪治, 吕聪, 沈福东 (2978)
油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应	田冬, 高明, 黄容, 吕盛, 徐畅 (2988)
模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响	腾昌运, 沈建国, 王忠, 王行, 李鸿毅, 张志剑 (3000)
秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素	杜璨, 许晨阳, 王强, 张帆, 马武功, 和文祥, 侯琳, 耿增超 (3010)
微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响	贾钦, 朱雪梅, 王琪, 傅海辉, 郝亚琼, 何洁, 杨子良 (3020)
施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响	方至萍, 廖敏, 张楠, 吕婷, 黄小斌 (3028)
BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用	刘伟, 孟昭福, 任爽, 李文斌 (3036)
1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比	李芬, 王训, 罗辑, 袁巍, 喻子恒, 商立海 (3045)
铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征	朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 张忠义, 杨曦, 孔静 (3054)
膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用	周莉娜, 蔡函臻, 李荣华, 王美净, 赵军超, 王权, 张增强 (3061)
餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比	郭香麟, 左剑恶, 史绪川, 王凯军, 李静 (3070)
我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异	晏卓逸, 岳波, 高红, 李志龙, 黄启飞, 聂小琴, 汪群慧 (3078)
甲烷催化还原 NO _x 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化	潘华, 建艳飞, 陈宁娜, 刘红霞, 何焱, 贺亚飞 (3085)
《环境科学》征稿简则 (2737) 《环境科学》征订启事 (2809) 信息 (2867, 2971, 3027)	

太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险

陈玫宏^{1,2}, 郭敏², 徐怀洲², 刘丹³, 程杰⁴, 李江^{1*}, 张圣虎^{2*}, 石利利²

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042; 3. 南京工业大学化学与分子工程学院, 南京 211816; 4. 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310112)

摘要: 本研究对太湖表层水和沉积物中 7 种双酚 A 类似物(BPs)的浓度水平及分布特征进行了调查, 并对其潜在的风险进行了评估。结果表明太湖表层水中双酚 F(BPF)、双酚 S(BPS)和双酚 A(BPA)为主要的 BPs 组分; 沉积物中 BPA 对 BPs 总浓度的贡献率最高, 其次为 BPF 和 BPS, 且与沉积物中 TOC 含量具有显著的正相关; BPA、BPF 和 BPS 在表层水和沉积物中的高浓度水平均分布在太湖入湖支流(采样点 S4~S10)。风险评估表明 BPs 的联合毒性风险熵表现出低生态风险, 且对人体不具有明显的健康风险。

关键词: 双酚 A 类似物; 太湖; 水体; 沉积物; 风险评估

中图分类号: X524; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-2793-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201611091

Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu

CHEN Mei-hong^{1,2}, GUO Min², XU Huai-zhou², LIU Dan³, CHENG Jie⁴, LI Jiang^{1*}, ZHANG Sheng-hu^{2*}, SHI Li-li²

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China; 3. College of Chemistry and Molecular Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 4. Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310112, China)

Abstract: In this study, seven bisphenol analogues were measured in water and sediment samples from Taihu Lake, and potential risk was evaluated. The results showed that BPF, BPS and BPA were the predominant components in water samples from Lake Taihu. In sediment, BPA was always predominant, followed by BPF and BPS, and there was a significant positive correlation between BPs and TOC content. In addition, the high concentration levels of BPF, BPS and BPA were distributed in the tributaries of Lake Taihu (S4-S10). The risk assessment of the target BPs showed that the combined risk quotients posed a low eco-toxicity to aquatic ecosystem, and there was no appreciable risk to human health from potential environmental exposure of drinking water.

Key words: bisphenol analogues; Lake Taihu; water; sediment; risk assessment

大量研究表明双酚 A(BPA)具有环境内分泌干扰效应^[1~5], 在不同的环境介质(水体、河流沉积物、土壤、水产品)和人体样本中均已被检出^[6~9], 进入食物链后可危害人体的健康安全。因此, 欧盟、美国、中国等相继颁布法律法规, 限制或禁止双酚 A 的使用。目前, 为了满足市场需求, 一些双酚 A 类似物(BPs)作为替代产品用于工业生产, 比如双酚 S(BPS)、双酚 AF(BPAF)、双酚 B(BPB)、双酚 F(BPF)、双酚 Z(BPZ)、双酚 AP(BPAP), 这类双酚 A 替代品已经广泛用于制造环氧树脂、聚碳酸酯塑料以及塑料(奶)瓶、幼儿用的吸口杯、食品、饮料(奶粉)罐的内侧涂层^[10,11]。近期的研究表明 BPs 同样具有潜在的生态毒性以及相似的雌激素活性^[12,13], 其中 Kitamura 研究发现 BPAF(EC_{50} , 0.05

$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)、BPB(EC_{50} , 0.07 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)和 BPZ(EC_{50} , 0.21 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)相对于 BPA 在人体乳腺癌细胞(MCF-7)上可以表现出更强的雌激素活性^[8]。由于 BPs 在其生产、使用、处置过程中不可避免地经由各种途径进入水环境, 目前已有研究报道在水体、沉积物以及鱼体内检测到 BPs(主要为 BPAF、BPF 和 BPS)^[13~15]。因此, 系统地研究 BPs 在水体和沉积物中的分布特征, 对了解水体污染状况以及其在水体中的行为具有重要意义。

收稿日期: 2016-11-11; 修订日期: 2017-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(21407055, 41503115); 江苏省自然科学基金项目(BK20140115)

作者简介: 陈玫宏(1991~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境评价, E-mail: cmh0912@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: lijiaang0808@126.com; zsh@nies.org

太湖(30°55′~31°32′N; 119°52′~120°36′E)面积2 338 km²,平均水深1.9 m,是我国第二大淡水湖,位于江苏省南部,毗邻常州、无锡、苏州和湖州^[16].太湖不仅具有灌溉、航运、水产养殖等功能,同时也是周边城市的主要饮用水源^[17].由于太湖周边城市存在有化工企业,可能是双酚A类似物的潜在排放源,目前对于太湖水体中双酚A类似物的含量水平和污染特征已有报道,但是污染水平及趋势仍待进一步分析评估.因此,本文以太湖及其入湖支流的表层水和沉积物为研究对象,分析BPs的含量水平,探讨暴露浓度与环境特性之间的关系,对生态及人体健康进行初步评估,以期以太湖地区水环境中BPs的风险控制和水环境质量管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

2015年11月,在太湖及其入湖支流设置27个采样点,如图1所示.使用有机玻璃采水器采集2L表层水样(0~1 m),装入棕色玻璃瓶中运回实验室,水样立即经玻璃纤维滤膜(0.45 μm)过滤,过滤后的水样保存在4℃冰箱内待测.使用彼得森采泥器采集表层沉积物(0~0.1 m),置于不锈钢盒中,冷冻干燥,研磨过60目筛,-20℃保存待测.采用便携式水质监测仪现场测定表层水体pH值、温度和溶解氧(DO).

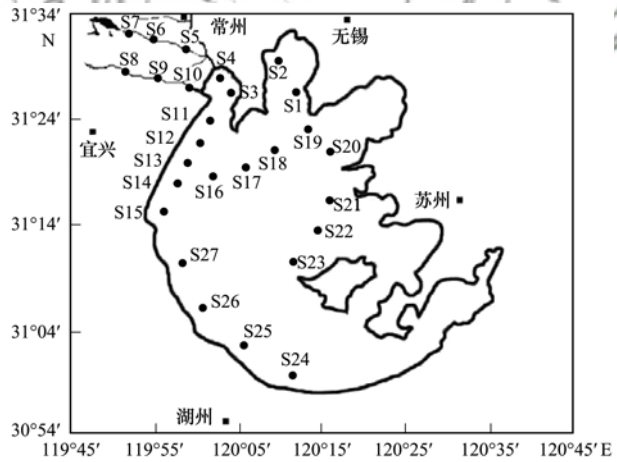


图1 太湖及支流采样分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Taihu Lake and its tributaries

1.2 仪器与试剂

高效液相色谱-串联质谱仪(LC-Agilent Technologies 1290 Infinity, MS-AB SCIEX QTRAP 4500,美国AB公司);ZORBAX Eclipse Plus C18色谱柱(150 mm×2.1 mm,3.5 μm,美国Agilent公司);

HLB固相萃取小柱(200 mg,6 mL,美国Waters公司);旋转蒸发仪(瑞士BUCHI公司);Milli-Q超纯水器(美国Mimpore公司);AG-285电子天平(瑞士Mettler公司);TOC分析仪(德国Elementar公司).

双酚A(BPA,纯度96%)、双酚F(BPF,纯度>99%)、双酚S(BPS,纯度99%)、双酚AF(BPAF,纯度99%)、双酚AP(BPAP,纯度>98%)、双酚B(BPB,纯度>98%)、双酚Z(BPZ,纯度>98%)购自百灵威科技有限公司;乙腈、甲醇、丙酮(色谱纯,德国Merck公司);氨水(色谱纯,国药集团药业股份有限公司);超纯水为Milli-Q纯水机出水.

1.3 样品前处理

水样:分别用5 mL甲醇、5 mL超纯水活化Oasis HLB(500 mg,6 mL)固相萃取小柱,准确量取经0.45 μm玻璃纤维滤膜过滤的水样1 L,经活化的固相萃取小柱萃取,上样速度约为5 mL·min⁻¹.上样后,用10 mL的超纯水淋洗HLB小柱,并在负压条件下抽真空30 min进行干燥,用10 mL甲醇洗脱,洗脱液经氮气吹干,然后用甲醇定容至1 mL,涡旋振荡2~3 min,HPLC-MS/MS分析.

沉积物:取5 g沉积物于250 mL聚四氟乙烯离心管中,加入50 mL甲醇/丙酮(50/50,体积比)混合萃取剂,超声萃取30 min后,以10 000 r·min⁻¹离心5 min,将上清液置于鸡心瓶,重复上述步骤,合并上清液(100 mL),旋转蒸发至干,用甲醇定容至1.0 mL,加入99 mL超纯水定容,重复上述水样处理过程.

1.4 仪器条件

1.4.1 液相色谱

采用ZORBAX Eclipse Plus C18色谱柱(150 mm×2.1 mm,3.5 μm),流动相为0.02%(体积比)氨水溶液(A)和乙腈(B);流速0.3 mL·min⁻¹;柱温40℃,进样5 μL;测定时采用的流动相梯度见表1.

表1 7种目标化合物测定时的洗脱梯度

Table 1 Gradient elution program for the analysis of the seven test compounds

时间/min	流速/μL·min ⁻¹	流动相 ¹⁾	
		A/%	B/%
0.00	300	60.0	40.0
2.00	300	60.0	40.0
6.00	300	40.0	60.0
8.00	300	40.0	60.0
9.00	300	20.0	80.0
13.00	300	20.0	80.0
14.00	300	60.0	40.0
15.00	300	60.0	40.0

1) A: 0.02%(体积分数)氨水溶液; B:乙腈

1.4.2 质谱条件

采用电喷雾 (ESI) 离子源, 负电离模式, 多反应离子监测 (multiple reaction monitoring, MRM) 扫描定量分析目标污染物. 气帘气 (curtain gas, CUR) 压力为 206 851.8 Pa, 喷雾气 (ion source gas 1, GS1) 压力为 241 327.1 Pa, 辅助加热气 (ion source gas 2, GS2) 压力为 275 802.4 Pa, 源温度 (temperature,

TEM) 为 450℃, 离子化电压 (ion spray voltage, IS) 为 5500V, 碰撞气 (collision gas, CAD) 为 medium, 其它参数见表 2, 包括碰撞能量 (collision energy, CE)、去簇电压 (declustering potential, DP)、入口电压 (entrance potential, EP)、出口电压 (collision cell exit potential, CXP) 和目标化合物母离子与定量/定性离子 (m/z).

表 2 分析 7 种目标化合物的质谱条件¹⁾

Table 2 Mass spectrometric conditions for the analysis of the seven target compounds

目标物	母离子(m/z)	子离子(m/z)	DP/eV	CE/eV	EP/eV	CXP/eV
BPA	227.2	211.9*	-81	-26	-10	-10
		132.9	-81	-32	-10	-10
BPF	198.6	104.9*	-100	-27	-10	-7
		92.7	-80	-31	-10	-7
BPS	248.5	108.1*	-112	-37	-11	-10
		92.1	-112	-50	-11	-10
BPAF	335.1	265.0*	-91	-31	-10	-7
		196.9	-91	-50	-10	-7
BPAP	289.1	274.0*	-111	-27	-10	-10
		195.3	-111	-27	-10	-10
BPB	240.7	211.8*	-94	-22	-10	-12
		225.8	-94	-25	-10	-12
BPZ	267.1	172.8*	-120	-32	-10	-10
		145.0	-136	-45	-10	-10

1) * 定量离子

1.5 质量保证和质量控制 (QA/QC)

整个分析过程按照方法空白、加标空白、样品平行样进行质量控制和质量保证, 目标化合物采用外标法进行定量分析, 工作曲线的相关系数均大于 0.998. 预处理土壤作为加标空白, 无目标化合物检出. 在水样和沉积物空白样品中进行 BPs 加标回收, 水样中 BPs 回收率为 66.4% ~ 118%, 相对标准偏差为 5.9% ~ 11.5%, 沉积物中 BPs 回收率为 73.1% ~ 120.2%, 相对标准偏差为 7.9% ~ 13.5%, 方法空白均未检出目标化合物, 水体和沉积物中各目标化合物的方法定量限分别为 0.5 ~ 10.3 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.1 ~ 2.0 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 实验所用锥形瓶、鸡心瓶等玻璃器皿均在丙酮溶剂中浸泡, 105℃ 下烘干, 同时尽量避免使用塑料容器.

1.6 风险评价方法

1.6.1 生态风险评价

根据欧盟关于环境风险评价的技术指导, 采用风险商值法 (risk quotient, RQ) 评估太湖水体的环境风险. 风险商值 (RQ) 的计算公式如下, 即实际测定浓度 (measured environmental concentration, MEC) 和无效应浓度 (predicted no effect concentration, PNEC) 之间的比值^[18,19],

$$RQ = MEC/PNEC \quad (1)$$

PNEC 值通常由实验所得的急性和慢性毒性数据 (LC_{50} 、 EC_{50} 、NOEC 等) 除以评估因子 (assessment factors, AF) 得到, 毒性数据可通过 ECTOX 查询获得, AF 的取值范围在 10 ~ 1 000^[20]. 根据 RQ 值的大小, 将环境风险分为 3 个等级, 即在 0.01 ~ 0.1 间为低环境风险, 在 0.1 ~ 1.0 间为中等环境风险, 大于 1 为高环境风险.

1.6.2 健康风险评价

为了评估太湖水体中 BPs 对人体的健康风险, 采用雌激素毒性当量 (EEQ) 来表征 BPs 对人体的健康效应, 当 EEQ (以 E2 计) > 1.0 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 则认为对人体健康有风险^[21]. 由于太湖是重要的饮用水源地, 因此本研究中将饮水作为主要的摄入途径, 具体计算公式如下:

$$EEQ_i = \sum EEQ_i = \sum (c_i \times EEF_i) \quad (2)$$

式中, c_i 是目标物在表层水中的浓度 ($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$); EEQ_i 是总的雌激素毒性当量; EEF_i 是雌激素毒性当量因子. 其中, EEF 被定义为目标物的 EC_{50} 相对于 17 β -雌二醇的 EC_{50} 的比值, EC_{50} 为目标物产生 50% 的最大雌激素效应的浓度.

1.7 数据处理

采用 Windows SPSS 17.0 和独立样本 *T* 检验,对试验数据进行差异显著性分析, $P < 0.05$ 为差异显著(*).

2 结果与讨论

2.1 太湖表层水中 BPs 的污染水平

太湖表层水中 BPs 的浓度水平如表 3 所示.所有采样点水样中均能检测到 BPs,且 BPA、BPS、BPAF 和 BPA 在所有水样中的检出率为 100%.虽然 BPF 在所有水样中的检出率为 59%,但是平均浓度最高,其次为 BPS 和 BPA.此外,BPAF、BPAP、BPB 和 BPZ 在同一个浓度水平,但是均低于上述 3 种 BPs.在检测的 7 种 BPs 中,对 BPs 总浓度的贡献率为 $BPF > BPS > BPA$,表明 BPs 可能逐渐替代了 BPA 在太湖周边区域的使用,但是 BPA 的使用量仍占据较大比重.有研究报道 BPA 在中国属于高产量化学品,年产量大约为 167 000 t,但是在 2008 年后 BPF 和 BPS 逐渐代替了 BPA^[22,23],这与本研究监测结果相符.Jin 等^[24]

于 2013 年测定了太湖表层水中 9 种 BPs 的含量,结果也发现 BPA、BPS、BPF 为主要的 BPs 成分,其中 BPA 为主导成分(55%),但是整体浓度水平较低,这一方面表明 BPF 和 BPS 在太湖区域已经成为 BPA 的替代品,另一方面也表明 BPA 和 BPS 的整体需求呈增加趋势.目前,双酚 A 在国内外其它河流和湖泊水体中的污染水平报道较多,比如辽河流域($4.4 \sim 141 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、珠江($43 \sim 639 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、松花江($23 \sim 714 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、密西西比河($6.0 \sim 113 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、美国运河($1.9 \sim 158 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)等^[22~25],与本研究监测结果处于同一污染水平.然而,BPS 在天然水体中的污染水平报道较少,有研究报道 BPS 在辽河、浑河、珠江、印度 Cooum 河、印度白金汉运河的平均浓度水平分别为 14、11、135、768 和 1 080 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[22~26],BPF 在辽河、浑河、九乡河、西江、日本荒川河、韩国汉江的浓度水平为 nd、nd、15~25 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 、nd~105 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 、76~82 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 121~1 300 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[22~26],上述研究结果表明 BPs 在不同区域的使用存在较大差异.

表 3 7 种双酚 A 类似物在太湖水体中的暴露浓度

Table 3 Concentrations of seven bisphenol analogues in the water samples from Lake Taihu

化合物	平均值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	中值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	范围/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	检出率/%	$\sum \text{BPs}^{(2)}/\%$
BPA	86	45	27~565	100	27
BPF	114	15	nd ¹⁾ ~1 634	59	35
BPS	101	17	4.5~1 569	100	31
BPAF	7.8	7.7	0.71~23	100	2.4
BPAP	4.8	4.8	1.0~15	100	1.5
BPB	6.6	5.1	nd~28	93	2.0
BPZ	4.0	3.4	nd~17	81	1.2

1) nd: 未检出;2) 单一 BPs 总浓度占有所有 BPs 总浓度的百分比

BPs 在太湖表层水中的空间分布(见图 2)表明 BPA、BPF 和 BPS 具有相似的分布特征,而其余 4 种 BPs(BPAF、BPAP、BPB 和 BPZ)则呈现出一致的分布特征.除了在 S25 采样点水样中有较高浓度的 BPF 外,BPA、BPF 和 BPS 的总体空间分布表现为入湖支流(采样点 S4~S10)污染程度较大,其中 BPA 和 BPS 在 S5 采样点水样中具有最高浓度,而 BPF 的最高值出现在采样点 S9.太湖入湖支流靠近常州、宜兴等工业城市,工业废水排放量较大,其中采样点(S4~S7)处于漕桥河区域,两岸约有 3 000 家企业,其中重点控制的污染企业中化工企业约占 67.7%,采样点(S8~S10)处于太滬运河区域,周围 61 家工业污染源中以纺织印染企业为主,其次是化工企业^[27].根据调研资料表明,太湖入湖支流水体

中 BPA、BPF 和 BPS 的高污染水平大部分来自于入湖支流工业废水的排放.此外,相关性分析发现 BPA 和 BPS 具有显著的正相关性关系($P < 0.01$,表 4),这在另一方面进一步表明它们具有相似的污染源.

其余 4 种 BPs(BPAF、BPAP、BPB 和 BPZ)在太湖 3 个区域表现出较高的污染水平,即太湖入湖支流(采样点 S4~S10)、靠近宜兴入湖区域(采样点 S14~S18)和靠近湖州入湖区域(采样点 S22~S27),其中最高值均出现在采样点 S23 处,这表明 BPAF、BPAP、BPB 和 BPZ 的污染来自多个污染源,而且相关性分析表明这 4 种 BPs 之间具有显著的正相关性($P < 0.01$,表 4),也进一步证实它们具有相似的污染来源.

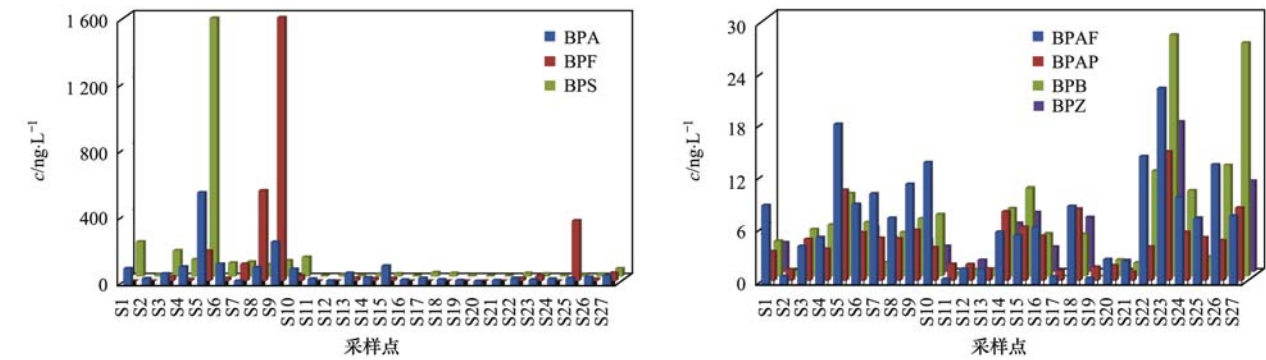


图2 双酚 A 类似物在太湖水体中的浓度分布

Fig. 2 Concentration distribution of bisphenol analogues in the water samples from Lake Taihu

表 4 7 种双酚 A 类似物两两相关性¹⁾ (R^2)

	BPA	BPF	BPS	BPAF	BPAP	BPB	BPZ
BPA	1						
BPF	0.400 *	1					
BPS	0.912 **	0.077	1				
BPAF	0.421 *	0.190	0.410 *	1			
BPAP	0.354	0.118	0.353	0.776 **	1		
BPB	0.100	0	0.077	0.682 **	0.780 **	1	
BPZ	0.190	0	0.197	0.760 **	0.936 **	0.898 **	1

1) * 表示在 0.05 水平具有显著性关系, ** 表示在 0.01 水平具有显著性关系

2.2 太湖沉积物中 BPs 的污染水平

太湖沉积物中 BPs 的含量水平如表 5 所示。由于采样点 S3、S7、S26 和 S27 底部为砂石,未采集到沉积物。除 BPAF 外,在所有采样点的沉积物样品中均能检测到 BPs,且检出率为 100%。其中,BPA、BPF 和 BPS 在太湖沉积物中的检出含量相对较高,而 BPAF、BPAP、BPB 和 BPZ 均低于上述 3 种 BPs,这与表层水中 BPs 的检测结果相似。在检测的 7 种 BPs 中,对 BPs 总含量的贡献率为 BPA > BPF > BPS,这与表层水中的贡献率结果略有不同,即 BPF > BPS > BPA,表明双酚 A 在太湖区域的使用量可能有所下降,但是在沉积物中仍具有相对较高的赋存量。与 Jin 等^[24]2013 年在太湖区域的研究结果相

比,除了 BPAF 在同一个含量水平,其余目标物几乎均高 1 个数量级,这也进一步表明 BPs 在太湖区域使用量有增加的趋势。此外,BPA 和 BPF 与其它研究结果相比基本处于同一水平,比如 BPA (以 dw 计):美国萨吉诺流域和密歇根内陆湖泊 ($<0.25 \sim 13 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[22,23]、中国珠江口 ($2.0 \sim 4.3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[26]、日本东京湾 ($1.9 \sim 23 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[25]、英国梅德韦河 ($7.7 \sim 56 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[28]、德国易北河 ($66 \sim 343 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[29],BPF (以 dw 计):美国 (nd ~ $28 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、日本 (nd ~ $9.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[24,25]。BPS ($0.30 \sim 31 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)略高于美国河流沉积物中的含量 (nd ~ $4.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[11,22,23],但是要低于韩国河流沉积物中的含量 (nd ~ $1970 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[11,22,23]。

表 5 7 种双酚 A 类似物在太湖沉积物中的暴露含量

化合物	平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	中值/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	检出率/%	$\sum \text{BPs}^2)/\%$
BPA	20	7.8	1.1 ~ 199	100	63
BPF	4.4	1.8	0.54 ~ 20	100	14
BPS	3.8	1.2	0.30 ~ 31	100	12
BPAF	0.028	nd ¹⁾	nd ~ 0.27	39	0.088
BPAP	0.76	0.72	0.68 ~ 1.2	100	2.4
BPB	2.2	1.8	1.0 ~ 6.5	100	6.7
BPZ	0.69	0.66	0.61 ~ 1.1	100	2.1

1) nd: 未检出;2)单一 BPs 总含量占有所有 BPs 总含量的百分比

BP_s 在太湖沉积物中的空间分布如图 3 所示。结果表明 BPA、BPF、BPS 和 BPB 具有与水体相似的空间分布特征,而其余 3 种双酚 A 类似物(BPAF、BPAP 和 BPZ)在各采样点无明显的分布差异。沉积物中各目标物的含量相较表层水体普遍偏低,可能得益于太湖“清淤工程”的实施,为太湖水质带来一定程度的改善。由于太湖沉积物中有机碳(TOC)所占质量分数为 0.69%~5.27%(见表 6),平均值 1.72%,沉积物中有机碳所占质量分数对其中 BP_s

的含量可能也有较大影响,因此将沉积物中 TOC 与 BP_s 含量线性拟合(表 7)。由表 7 可见,除了 BPAF 和 BPB 外,沉积物中各 BP_s 的浓度与 TOC 之间呈现显著的正相关(R 为 0.70~0.91, $P<0.01$),沉积物中由于富含有机质,其复杂的孔隙结构具有快速吸附污染物的特性,沉积物中 TOC 含量越高,可吸附的位点越多,越有利于疏水性有机污染物在表层沉积物中富集。因此沉积物中 TOC 含量对太湖中 BP_s 的污染水平、归趋和生物可利用性具有重要影响。

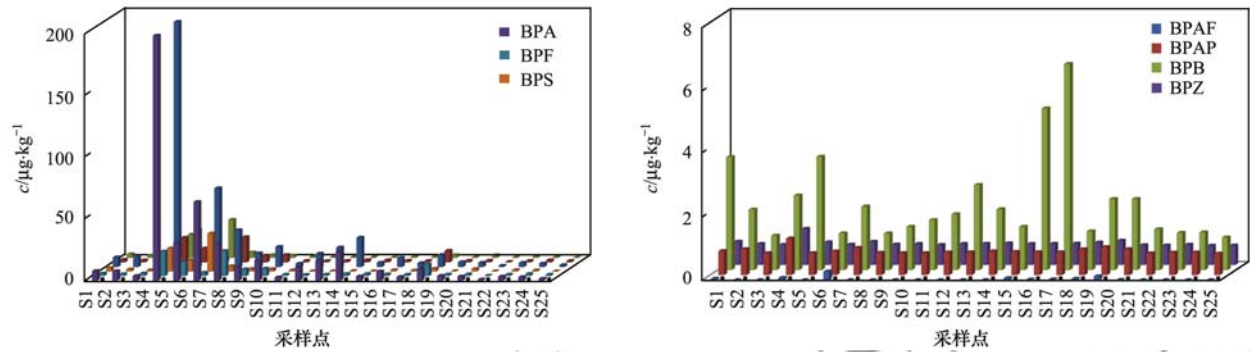


图 3 双酚 A 类似物在太湖沉积物中的浓度分布

Fig. 3 Concentration distribution of bisphenol analogues in sediment samples from Lake Taihu

表 6 太湖沉积物 TOC 质量分数¹⁾

Table 6 TOC mass fraction of sediment samples from Lake Taihu			
采样点	TOC 质量分数/%	采样点	TOC 质量分数/%
S1	2.10	S15	1.69
S2	2.14	S16	1.59
S3	— ¹⁾	S17	1.49
S4	0.96	S18	1.15
S5	5.27	S19	1.38
S6	2.61	S20	—
S7	—	S21	1.29
S8	2.38	S22	1.36
S9	1.32	S23	1.39
S10	1.75	S24	0.69
S11	1.77	S25	1.11
S12	1.96	S26	—
S13	1.86	S27	—
S14	1.53		

1) “—”为未采集到沉积物

表 7 沉积物中双酚 A 类似物含量与 TOC 的相关性

Table 7 Correlation between the concentration of bisphenol analogues and TOC in sediment of Lake Taihu	
化合物	相关性 R
BPA	0.91
BPF	0.70
BPS	0.91
BPAF	0.22
BPAP	0.76
BPB	0.17
BPZ	0.90

2.3 生态风险评估

基于最坏情况考虑,RQ_s 的计算采用筛选出的最敏感物种的 PNEC。本文对于检出的 BP_s 进行了风险评估,其中 BPAP、BPZ 未查到其毒性数据,因此对其余 5 种 BP_s 进行了生态风险评估,其对应敏感物种的毒理数据见表 8。

表 8 5 种双酚 A 类似物最敏感物种毒性数据

Table 8 Most sensitive species toxicity data of five bisphenol analogues						
化合物	最敏感物种	评价终点	毒性数据/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	评估因子	PNEC/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	文献
BPF	<i>Daphnia magna</i>	48h-EC ₅₀	8 700	1 000	8 700	[30]
BPAF	<i>Daphnia magna</i>	48h-EC ₅₀	2 700	1 000	2 700	[30]
BPA	<i>Danio rerio</i>	21 d-NOEC	500	100	5 000	[31]
BPS	<i>Daphnia magna</i>	48h-EC ₅₀	55 000	1 000	55 000	[32]
BPB	<i>Daphnia magna</i>	48h-EC ₅₀	5 500	1 000	5 500	[32]

太湖的生态风险评估结果见图 4。5 种 BPs 的 RQ 基本都小于 0.1,不具有高风险。BPA 的 RQ 为 0.01~0.11,均大于 0.01,表现为低风险,表明了其对于水生生物较低的急性或慢性毒性风险。BPF 在大部分采样点 $RQ < 0.01$,但是在采样点 S8 和 S9 的 RQ 值分别为 0.1 和 0.2,表明其对于太湖水体相应的水生生物表现出中等环境风险。对于其余 3 种 BPs, $RQ_s \leq 0.01$,说明其对于太湖的生态风险不显著。BPs 的联合毒性风险熵范围为 0.01~0.25,主要是由于 BPA 的贡献,整体上看,太湖 BPs 对于水生生物表现出低风险。

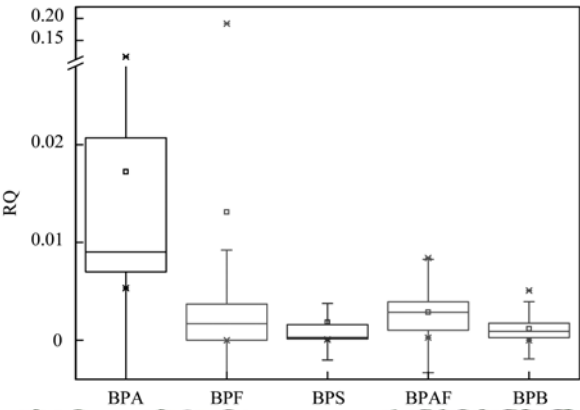


图 4 5 种目标物的 RQs
Fig. 4 RQs of 5 target compounds

2.4 健康风险评估

由于 BPB、BPZ 和 BPAP 缺乏数据,因此仅对 BPA、BPS、BPF 和 BPAF 在每个采样点的 EEQ 值进行计算(4 种化合物的 EEF 值见表 9),每个采样点的总 EEQ_i 值见图 5。总 EEQ_i 值(以 E2 计)在 0.003 97~0.213 4 ng·L⁻¹,均小于 1 ng·L⁻¹,表明其对于人体无健康风险。

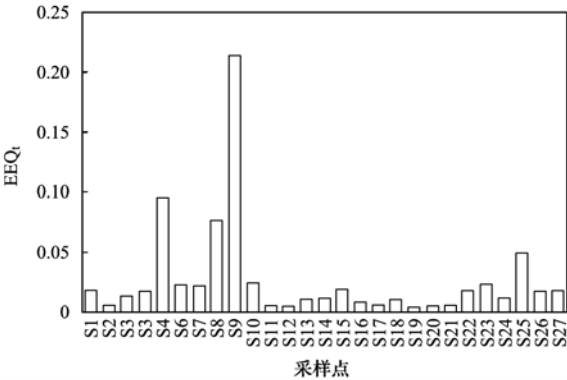


图 5 目标化合物在太湖水体中的雌激素毒性当量
Fig. 5 Estradiol equivalency quantities of the target compounds in the surface water from Lake Taihu

表 9 4 种目标物的 EEF 值

Table 9 EEF of the four target compounds to the aquatic species	
化合物	EEF
BPA	1.07×10^{-4}
BPF	1.08×10^{-4}
BPS	1.06×10^{-6}
BPAF	7.23×10^{-4}

3 结论

(1)太湖 27 个采样点水样中均能检测到 BPs,平均浓度最高为 BPF,其次为 BPS 和 BPA,此外,BPAF、BPAP、BPB 和 BPZ 在同一个浓度水平,其中 BPF、BPS 和 BPA 为主要污染物,含量较高的采样点分布于太湖入湖支流区域。

(2)除 BPAF 外,太湖 23 个采样点沉积物样品中均能检测到 BPs, BPA、BPF 和 BPS 在太湖沉积物中的检出浓度相对较高,其余 4 种目标物 BPAF、BPAP、BPB 和 BPZ 均低于上述 3 种 BPs。除了 BPAF 和 BPB 外,沉积物中各 BPs 的浓度与 TOC 之间呈现显著的正相关。

(3)运用 RQ 模型对 5 种 BPs 进行生态风险评估,5 种 BPs 的 RQs 基本都小于 0.1,说明其对于太湖的生态风险不显著。同时,BPs 的联合毒性风险熵表现出低风险。

(4)4 种 BPs 对于人体健康风险评估表明健康风险总 EEQ_i 值 $< 1 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,对于人体健康不具有明显的风险。

参考文献:

[1] Tordjman K, Grinshpan L, Novack L, *et al.* Exposure to endocrine disrupting chemicals among residents of a rural vegetarian/vegan community [J]. *Environment International*, 2016, **97**: 68-75.

[2] Deb P, Bhan A, Hussain I, *et al.* Endocrine disrupting chemical, bisphenol-A, induces breast cancer associated gene HOXB9 expression *in vitro* and *in vivo* [J]. *Gene*, 2016, **590** (2): 234-243.

[3] Varayoud J, Ramos J G, Muñoz-de-Toro M, *et al.* Long-lasting effects of neonatal bisphenol A exposure on the implantation process [J]. *Vitamins & Hormones*, 2014, **94**: 253-275.

[4] Alonso-Magdalena P, Ropero A B, Soriano S, *et al.* Bisphenol-a acts as a potent estrogen via non-classical estrogen triggered pathways [J]. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 2012, **355** (2): 201-207.

[5] Meeker J D, Calafat A M, Hauser R. Urinary bisphenol a concentrations in relation to serum thyroid and reproductive hormone levels in men from an infertility clinic [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44** (4): 1458-1463.

[6] Yang Y J, Guan J, Yin J, *et al.* Urinary levels of bisphenol analogues in residents living near a manufacturing plant in south

- China[J]. *Chemosphere*, 2014, **112**: 481-486.
- [7] Lee S, Liao C Y, Song G J, *et al.* Emission of bisphenol analogues including bisphenol A and bisphenol F from wastewater treatment plants in Korea[J]. *Chemosphere*, 2014, **119**: 1000-1006.
- [8] Calafat A M, Ye X Y, Wong L Y, *et al.* Exposure of the U. S. Population to Bisphenol A and 4-*tertiary*-Octylphenol: 2003-2004 [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2008, **116**(1): 39-44.
- [9] Fromme H, Kuchler T, Otto T, *et al.* Occurrence of phthalates and bisphenol A and F in the environment[J]. *Water Research*, 2002, **36**(6): 1429-1438.
- [10] Ruan T, Liang D, Song S J, *et al.* Evaluation of the *in vitro* estrogenicity of emerging bisphenol analogs and their respective estrogenic contributions in municipal sewage sludge in China[J]. *Chemosphere*, 2015, **124**: 150-155.
- [11] Liao C Y, Liu F, Alomirah H, *et al.* Bisphenol S in urine from the United States and seven Asian countries: occurrence and human exposures [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(12): 6860-6866.
- [12] Okuda K, Fukuuchi T, Takiguchi M, *et al.* Novel pathway of metabolic activation of bisphenol A-related compounds for estrogenic activity [J]. *Drug Metabolism and Disposition: the Biological Fate of Chemicals*, 2011, **39**(9): 1696-1703.
- [13] Kitamura S, Suzuki T, Sanoh S, *et al.* Comparative study of the endocrine-disrupting activity of bisphenol A and 19 related compounds [J]. *Toxicological Sciences: An Official Journal of the Society of Toxicology*, 2005, **84**(2): 249-259.
- [14] Ji K, Hong S, Kho Y, *et al.* Effects of bisphenol s exposure on endocrine functions and reproduction of zebrafish [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(15): 8793-8800.
- [15] Yoshihara S, Mizutane T, Makishima M, *et al.* Potent estrogenic metabolites of bisphenol A and bisphenol B formed by rat liver S9 fraction: their structures and estrogenic potency [J]. *Toxicological Sciences*, 2004, **78**(1): 50-59.
- [16] Rose N L, Boyle J F, Du Y, *et al.* Sedimentary evidence for changes in the pollution status of Taihu in the Jiangsu region of eastern China[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2004, **32**(1): 41-51.
- [17] 王志强, 张依章, 张远, 等. 太湖流域宜溧河酚类内分泌干扰物的空间分布及风险评价[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(12): 1351-1358.
- Wang Z Q, Zhang Y Z, Zhang Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of typical EDCs in Yili River of Taihu basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(12): 1351-1358.
- [18] Yan C X, Yang Y, Zhou J L, *et al.* Antibiotics in the surface water of the Yangtze Estuary: occurrence, distribution and risk assessment[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **175**: 22-29.
- [19] 雷炳莉, 黄圣彪, 王子健. 生态风险评价理论和方法[J]. *化学进展*, 2009, **21**(2-3): 350-358.
- Lei B L, Huang S B, Wang Z J. Theories and methods of ecological risk assessment[J]. *Progress in Chemistry*, 2009, **21**(2-3): 350-358.
- [20] 张怡婷, 王蕾, 刘济宁, 等. 应用不同毒理学终点评估酚类物质的生态危害和风险[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, **32**(2): 326-331.
- Zhang Y T, Wang L, Liu J N, *et al.* Using different toxicological end points to evaluate phenolic compounds for ecological hazard and risk[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, **32**(2): 326-331.
- [21] Leeuwen K V. Technical guidance document on risk assessment in support of commission directive 93/67/EEC on risk assessment for new notified substances and commission regulation (EC) No1488/94 on risk assessment for existing substances Part II [R]. 1996.
- [22] Liao C Y, Liu F, Guo Y, *et al.* Occurrence of eight bisphenol analogues in indoor dust from the united states and several Asian countries: implications for human exposure [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(16): 9138-9145.
- [23] Liao C, Liu F, Kannan K. Bisphenol S, A new bisphenol analogue, in paper products and currency bills and its association with bisphenol a residues [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(12): 6515-6522.
- [24] Jin H B, Zhu L Y. Occurrence and partitioning of bisphenol analogues in water and sediment from Liaoh River Basin and Taihu Lake, China [J]. *Water Research*, 2016, **103**: 343-351.
- [25] Yamazaki E, Yamashita N, Taniyasu S, *et al.* Bisphenol A and other bisphenol analogues including BPS and BPF in surface water samples from Japan, China, Korea and India [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **122**: 565-572.
- [26] Peng X Z, Wang Z D, Mai B X, *et al.* Temporal trends of nonylphenol and bisphenol A contamination in the Pearl River Estuary and the adjacent South China Sea recorded by dated sedimentary cores[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **384**(1-3): 393-400.
- [27] Zhong W J, Wang D H, Xu X W, *et al.* Screening level ecological risk assessment for phenols in surface water of the Taihu Lake[J]. *Chemosphere*, 2010, **80**(9): 998-1005.
- [28] Hibberd A, Maskouki K, Zhang Z, *et al.* An improved method for the simultaneous analysis of phenolic and steroidal estrogens in water and sediment[J]. *Talanta*, 2009, **77**(4): 1315-1321.
- [29] Heemken O P, Reincke H, Stachel B, *et al.* The occurrence of xenoestrogens in the Elbe river and the North Sea [J]. *Chemosphere*, 2001, **45**(3): 245-259.
- [30] Tišler T, Krel A, Gerželj U, *et al.* Hazard identification and risk characterization of bisphenols A, F and AF to aquatic organisms [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **212**: 472-479.
- [31] Little A G, Seebacher F. Temperature determines toxicity: bisphenol A reduces thermal tolerance in fish[J]. *Environmental Pollution*, 2015, **197**: 84-89.
- [32] Chen M Y, Ike M, Fujita M. Acute toxicity, mutagenicity, and estrogenicity of bisphenol-A and other bisphenols [J]. *Environmental Toxicology*, 2002, **17**(1): 80-86.

CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM ₁ in North China During the Autumn and Winter Polluted Period ...	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Hangzhou	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM _{2.5} in Xi'an, China During Haze and Clean Days	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM ₁₀ from Mt. Huangshan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM _{2.5} of Quanzhou	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO ₂ Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir ...	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO ₂	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K ⁺ Addition in Saline Surroundings	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO ₂ -Brine-Sandstone Interaction Process	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China; A Comparison Study Between 1999 and 2014	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO _x by CH ₄	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)