

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~ 2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O ₃ 生成潜势	曹函玉, 潘月鹏, 王辉, 谭吉华, 王跃思 (2065)
利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态	牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 周敏, 王红丽, 周振, 乔利平, 黄成, 李梅, 李莉, 王倩, 黄海英, 邹兰军 (2071)
沈阳市降水化学成分及来源分析	张林静, 张秀英, 江洪, 张清新 (2081)
秦皇岛大气污染物浓度变化特征	刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 吉东生, 王跃思 (2089)
笼养鸡生长过程 NH ₃ 、N ₂ O、CH ₄ 和 CO ₂ 的排放	周忠凯, 朱志平, 董红敏, 陈永杏, 尚斌 (2098)
碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能	王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 张浩, 孙剑宇, 杨力, 蔡力栋 (2107)
生物滴滤塔净化多组分废气的研究	张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之 (2116)
在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气	金圣, 黄立维, 李国平 (2121)
模拟大气 CO ₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响	赵旭辉, 汤龙升, 史小丽, 杨州, 孔繁翔 (2126)
一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法	华祖林, 汪靛 (2134)
HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究	李燕, 李兆富, 席庆 (2139)
基于非点源污染的水质监测方案研究	吴喜军, 李怀恩, 李家科, 李强坤, 董雯 (2146)
不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究	陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革 (2151)
春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征	李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 张传松 (2159)
三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布	张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩 (2166)
湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性	冯伟莹, 张生, 焦立新, 王圣瑞, 李畅游, 崔凤丽, 付绪金, 甄志磊 (2176)
刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响	侯金枝, 魏权, 高丽, 孙卫明 (2184)
反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换	李大鹏, 王晶, 黄勇 (2191)
三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟 (2198)
UV 和 H ₂ O ₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究	张一清, 周玲玲, 张永吉 (2205)
臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素	于丽, 张培龙, 侯甲才, 庞立飞, 李越, 贾寿华 (2210)
硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响	毛雯, 孙荣国, 王定勇, 马明, 张成 (2218)
快雌醇氯化反应的动力学和机制研究	王斌楠, 刘国强, 孔德洋, 陆勇鹤 (2225)
金属离子对 δ-MnO ₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究	李非里, 牟华倩 (2232)
核-壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除	刘建明, 李红, 熊振湖 (2240)
有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究	闫梦玥, 庞志华, 李小明, 退建宇, 罗隽 (2249)
纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征	于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 席北斗, 咎逢宇, 张靖天 (2256)
改性水凝胶的制备及其对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 吸附性能研究	吴宁梅, 李正魁 (2263)
直接大红 4BE 的磷钨酸均相光催化还原脱色	魏红, 李克斌, 李娟, 陈经涛, 张涛 (2271)
基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究	张磊, 刘平, 马锦, 张静, 张明, 吴根 (2277)
Fenton 法处理竹制品废水生化出水出水的研究	郭庆稳, 张敏, 王炜, 杨治中, 吴东雷 (2283)
二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响	李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍 (2290)
进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究	陈志强, 邓毅, 黄龙, 温沁雪, 郭子瑞 (2295)
接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究	刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 丁敏 (2302)
聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究	杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清 (2309)
体积溶氧传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析	李志华, 范长青, 王晓昌 (2314)
我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价	汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 张瑞卿, 刘跃丹, 吴丰昌 (2319)
麦穗鱼物种敏感性评价	王晓南, 刘征涛, 闫振广, 张聪, 何丽, 孟双双 (2329)
不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究	雷炳莉, 文育, 王艺陪, 康佳, 刘倩 (2335)
桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究	钱建平, 张力, 李成超, 黄栋 (2344)
直流电场处理后降线藻趋光性对 Cu ²⁺ 和 Hg ²⁺ 的响应	王飞祥, 袁玲, 黄建国 (2350)
UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响	宋新章, 卜涛, 张水奎, 江洪, 王志坤, 赵明水, 刘永军 (2355)
7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聘聘 (2361)
溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析	于皓, 陈川, 张莉, 王爱杰 (2368)
不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroResp TM 方法	陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 袁红朝, 李苗苗, 朱捍华, 葛体达, 童成立, 吴金水 (2375)
典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究	韩建刚, 曹雪 (2383)
三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究	刘意章, 肖唐付, 宁增平, 贾彦龙, 黎华军, 杨菲, 姜涛, 孙旻 (2390)
北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征	陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 王永峰, 田青 (2399)
季节变化对贵阳市不同功能区地表灰土重金属的影响	李晓燕 (2407)
东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征	王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 殷永泉, 许宏宇 (2416)
模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响	段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全 (2422)
甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究	孙明明, 滕应, 骆永明, 李振高, 贾仲君, 张满云 (2428)
胶质芽孢杆菌对印度芥菜根际土壤镉含量及土壤酶活性影响	杨榕, 李博文, 刘微 (2436)
长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征	吴小莲, 向垒, 莫测辉, 姜元能, 严青云, 李彦文, 黄献培, 苏青云, 王纪阳 (2442)
有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究	张旭, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李洋, 赵昕宇 (2448)
北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析	王昭, 李振山, 冯亚斌, 焦安英, 薛安 (2456)
氨对垃圾焚烧灰渣浸出特性的影响及地球化学模拟	官贞珍, 陈德珍, Thomas Astrup (2464)
焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究	朱芬芬, 高冈昌辉, 大下和傲, 姜惠民, 北岛義典 (2473)
富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能	李坤彬, 李辉, 郑正, 张雨轩 (2479)
生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (2486)
基于物质流分析的钾素流动与循环研究	白桦, 曾思育, 董欣, 陈吉宁 (2493)
《环境科学》征订启事 (2115) 《环境科学》征稿简则 (2224) 信息 (2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知 (2478)	

我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价

汪浩^{1,2}, 冯承莲², 郭广慧^{2,3}, 张瑞卿^{2,3}, 刘跃丹², 吴丰昌^{2*}

(1. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650500; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘要: 双酚 A (BPA) 对水生生物有多种毒性效应, 其中雌激素作用尤为显著. 本研究依据 BPA 对水生生物是否有雌激素效应, 把数据分为两类, 并通过商值法、安全阈值法、商值概率法以及联合概率曲线法评价了我国淡水水体中 BPA 对水生生物的风险程度. 结果表明, 采用 4 种评价方法得出的结果相近, 我国淡水生物对 BPA 的雌激素效应较 BPA 对水生生物的其他毒性作用更为敏感; 安全阈值法较商值法、商值概率法、联合概率风险评价法误差较小, 评价结果更为可信. 用安全阈值法评价结果表明, 以 BPA 的雌激素作用为效应终点时, 水生生物长期暴露于我国淡水环境中, 我国 64.70% 的淡水水体有导致超过 5% 的水生生物受到雌激素作用的风险, BPA 安全浓度上限为 $15.72 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$; 而水生生物短期暴露于我国淡水环境中, 我国 20.43% 的淡水水体有导致超过 5% 的我国淡水生物受 BPA 雌激素作用的干扰, 此时 BPA 安全浓度上限为 $2.24 \times 10^2 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$.

关键词: 双酚 A; 生态风险评价; 淡水水体; 安全阈值法; 雌激素效应

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2319-10

Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters

WANG Hao^{1,2}, FENG Cheng-lian², GUO Guang-hui^{2,3}, ZHANG Rui-qing^{2,3}, LIU Yue-dan², WU Feng-chang²

(1. College of Environmental Science and Technology, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China; 3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Bisphenol A (BPA) has many toxic effects on aquatic organisms, of which the most obvious effect is the estrogenic effect. The data collected in the study were divided into two parts, based on the response of the tested organisms to the estrogenic effects of BPA and their exposed time, and the risk of BPA to Chinese aquatic water was assessed by using quotient method, quotient exponent and probability method, safety threshold value method and joint probability risk assessment, respectively. Similar results were derived from the above four methods. Aquatic organisms were more sensitive to the estrogenic effects of BPA than other toxic effects. The results of risk assessment from safety threshold value method were more accurate and confident than the other three methods. Using the chronic data of BPA's estrogenic effect on tested organisms as the endpoint for risk assessment in safety threshold value method, it was found that in 64.70% of the Chinese freshwaters more than 5% of aquatic organisms were affected by the estrogenic toxicity of BPA, and the maximum allowable concentration of BPA was $15.72 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. Using the acute data of such effects as endpoint in safety threshold value method, in about 20.43% volume of the Chinese freshwaters more than 5% of aquatic organisms were affected by the estrogenic toxicity of BPA, and the maximum allowable concentration was $2.24 \times 10^2 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$.

Key words: Bisphenol A (BPA); ecological risk assessment; freshwater; safety threshold value method; estrogenic effects

众多研究发现和证实了许多有机物质对生物有雌激素效应^[1,2], 其中双酚 A (BPA) 在工业生产、生活中较其他雌激素物质已被广泛生产使用, 据统计, 欧洲每年消耗约 69 万 t BPA^[3], 且通过各种途径进入环境, 危害水生生物, 乃至人类的人体健康. 随着我国经济的发展, BPA 的生产和使用都加大了力度^[4,5], 目前我国许多水体中已检测出浓度不等的 BPA. 其浓度范围在 $0.33 \sim 16\,200 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[6,2]. 双酚 A 过量摄入能导致肌体内分泌活动紊乱, 且影响生殖功能, 破坏生殖系统, 导致细胞癌变和器官畸形发育^[1,7]. 人体过量摄入 BPA 导致肌体肝细胞损伤以及部分器官产生肿瘤^[8~10].

生态风险评价是利用生态学、环境化学、环境

毒理学的原理和方法定量测定化合物对生态系统和特定区域危害程度的过程^[11]. 当生态系统受到一个或多个胁迫因素影响后, 利用生态风险评价可以对生态系统受到的影响程度进行评估^[12]. 由于自然环境中 BPA 的稳定性受到许多自然因素的影响 (如光照、温度、酸碱度等), 目前国外部分国家只初步评价了 BPA 对水生生物的潜在风险^[13,14], 而国内对 BPA 的风险评价开展较少.

收稿日期: 2012-09-24; 修订日期: 2012-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U0833603, 41130743)

作者简介: 汪浩 (1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为淡水水体水质基准和污染物生态风险评价, E-mail: jeffwh87@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: wufengchang@vip.skleg.cn

本研究通过收集中国主要淡水水体中 BPA 暴露浓度数据,以及 BPA 对我国淡水生物的毒性数据,依据不同的毒性效应终点,分别评价了我国淡水水体中 BPA 对水生生物的潜在风险。

1 材料与方法

1.1 数据分析

1.1.1 毒性数据分析

本研究的毒性数据来源于 EPA ECOTOX 数据库 (<http://www.epa.gov/ecotox/>) 和中国知网 (<http://www.cnki.net/>) 文献等。数据筛选原则:①受试物种主要由我国本地物种和在我国生殖繁衍的外来引进物种构成。②毒性实验条件为室温下淡水流水暴露;③急性毒性实验数据主要选取 24~96 h 的半致死浓度 (lethal concentration to 50 percent of the population, LC_{50})、半效应浓度 (median effect concentration, EC_{50})、最低观察效应浓度 (lowest effect concentration, LOEC) 以及无观察效应浓度 (no observed effect concentration); 慢性毒性实验数据主要选取暴露时间超过 14 d 的 LC_{50} 、 EC_{50} 、LOEC 值以及 NOEC 值,在筛选数据过程中,如果一个生物有多个符合要求的数据,取其几何均值来代表该物种的生物毒性数据^[15,16]。④因不同的受试生物对外界环境条件(如日照时间、酸碱度、水体硬度、水温等)适应程度各异,且未报对效应终点有影响,本研究只把筛选出的数据依据是否影响生物繁殖相关行为[如诱导水生生物血清中卵黄蛋白原(VTG)的浓度、性腺发育畸形、影响雌雄比例及配对行为、对精细胞和卵细胞数量及活性的影响等]分类 2 组,然后依据暴露时间的长短共分为 4 组。⑤因 NOEC 值与 LOEC、 EC_{50} 、 LC_{50} 之间有明显差别,本研究将筛选出的 NOEC 值乘以 2,作为对应水生生物的 LOEC 值^[17]。⑥剔除测试时间较早(2000 年以前)以及影响数据整体正态分布等异常数据,并采用分析软件 Origin 8,选取最佳数学模型评价我国水体中 BPA 的风险程度。

Crain 等^[18]把 BPA 对水生生物的雌激素效应数据依据对生物的性别比、对性腺发育和第二性特征的影响、对血清中 VTG 浓度的影响分为 3 类,并推导了 BPA 对水生生物的风险程度。Vandenberg 等^[1]分析大量 BPA 对生物毒性的数据后,依据 BPA 是否对水生生物有雌激素效应分为两部分,分别为 BPA 对水生生物的雌激素效应和 BPA 对水生生物的其他毒性效应。本研究依据上述的分类,收集

和整理了 BPA 对我国水生生物的雌激素效应以及其他毒性效应数据,分析我国淡水环境中 BPA 对水生生物的风险程度。

1.1.2 暴露数据分析

本研究收集了我国主要河流、淡水湖泊以及部分入海河口水体中 BPA 的暴露浓度数据。数据的收集筛选原则:①检测方法与美国环境保护署(US EPA)的 BPA 分析方法或改进方法一致,其中 BPA 的检测方法主要是液相质谱联用(LC-ESI-MS/MS)或高效液相(HPLC)紫外检测器。②所选水样数据为河流的典型断面采样数据,若个别暴露数据大于所有数据的 10 倍,或检测时间较早的数据,本研究认为异常值,并剔除。检测时间较早的数据以及影响暴露数据,以保证数据能代表河流总体和局部水体 BPA 浓度分布特征。为便于计算和分析,本研究用各暴露浓度最小值的 1/2 为未检出点的浓度值^[19,20]。

1.2 风险表征

本研究采用确定性风险评价和不确定性风险评价,确定性风险评价的主要方法为商值法,商值法为半定量风险评价方法,即通过实测浓度与浓度标准的商值来分析生态系受到的影响,操作简单,但其评价结果有较大的不确定性;不确定性风险评价方法是基于人类对生态环境认知局限性,采用一定的评价方法降低不确定水平,量化污染物对生态环境的影响^[21,22]。本研究基于污染物对生物的毒性效应以及污染物在水体中的分布服从正态分布的原理,利用统计学方法量化环境风险,不确定性生态风险评价方法主要包括商值概率法、安全阈值法、联合概率分布法^[23]。

1.2.1 确定性评价

商值法是一种初级风险评价方法。因商值法在选取毒性参考值以及测定暴露量时未综合考虑干扰因素影响,只能用于粗略的风险评价。危害商值(HQ)的计算方法是:

$$HQ = c/TV$$

式中, HQ 为危险商值, c 为污染物的水体暴露浓度, TV 为污染物的毒性参考值, 本研究采用各组水生生物的毒性数据的最小值作为 BPA 的毒性参考值^[1], 风险程度可以划分为: 当 $HQ > 1$ 时, 表明该物质对暴露生物潜在风险高; 当 $HQ < 0.1$, 说明该物质对暴露生物风险低^[24]。又因水体中 BPA 与其他化合物相互作用以及底泥、生物的富集作用, 本研究中, 当 $HQ > 0.3$ 时, 表明水体中该化合物存在潜在风险^[25]。

1.2.2 不确定风险评价

(1) 安全阈值评价(MOS₁₀)法 通过累积概率和取对数化的暴露浓度和毒性浓度建立线性关系,从图上直接分析污染物对水生生物的影响程度,可以借助安全阈值(margin of safety, MOS₁₀)定量暴露浓度和毒性浓度的累积概率曲线重叠的程度. 计算方法:

MOS₁₀ = SSD₁₀/EXD₉₀

式中,MOS₁₀为安全阈值,SSD₁₀为 10% 的水生生物受到影响时的污染物浓度,EXD₉₀为自然水体中污染物在水体中累积浓度为 90% 对应的暴露浓度. MOS₁₀越大,表明毒性数据域暴露浓度重合度越高,潜在风险越大,一般取 MOS₁₀为 1 界定风险程度, MOS₁₀>1,表明无风险. 若 MOS₁₀<1,表明曲线重叠程度高,该化合物具有潜在风险. MOS₁₀越小,表明水生生物毒性累积概率分布模拟曲线与水体污染物累积分布曲线重合度越高,水生生物面临污染物的潜在危害风险值越大^[26].

(2) 商值概率分布法 通过比较暴露浓度和毒性浓度分布可以判定预期的商值大于或小于决定标准的概率^[26],能全面分析和评价我国淡水水体面临的生态风险程度. 商值概率分布法采用蒙特卡罗(Monte Carlo)随机抽样,模拟毒性浓度分布和暴露浓度分布,并预测商值的概率分布模型,商值概率分布的计算方法为:

HQD = ECD/SSD

式中,HQD 为商值分布,ECD 为暴露浓度分布,SSD 为毒性浓度分布. 本研究采用对数化后的毒性浓度

和暴露浓度正态分布模型预测商值分布特征. 因考虑到不同化合物之间的相互作用以及生物累积效应,当污染物的商值大于 0.3 时表明污染物对生物的危害存在潜在风险^[25].

(3) 联合概率分布法 联合概率曲线法是依据毒性数据以及暴露数据的分布特征,通过建立模型分析自然水体中一定比例的生物受到污染物危害的概率的生态风险评价方法. 该方法是以毒性数据的累积概率为 x 轴,污染物暴露浓度的反累积概率为 y 轴,得到拟合曲线,该曲线反应了各危害水平下暴露浓度超过临界浓度的概率,即不同伤害水平下环境中的污染物对水生生物的风险程度. 当曲线越靠近坐标轴,说明生物受到伤害的潜在风险较小^[26].

1.3 统计方法

本研究使用 SPSS 软件对收集的毒性浓度和暴露浓度数据 Kolmogorov-Smirnov 和 Shapiro-Wilk 正态检验;采用 Crystal Ball 11.1 中的 Monte Carlo (10 000次)拟合毒性数据和暴露数据概率分布和商值概率分布;采用 Origin Pro 8 展开安全阈值法分析;采用 Matlab 7.12 分析和绘制联合概率曲线.

2 结果与分析

2.1 数据分析

2.1.1 数据统计检验

本研究收集和筛选的数据除 BPA 整体毒性效应浓度数据外,经对数转化后符合正态分布模型(P>0.05),所以采用对数化的效应浓度和暴露浓度数据进行生态风险评价(表 1).

表 1 数据正态分布检验结果
Table 1 Results of Kolmogorov-Smirnov and Shapiro -Wilk tests of the data

检验对象	检验类型及显著性分析		文献
	Kolmogorov-Smirnov	Shapiro-Wilk	
水体暴露浓度数据	0.200	0.940	
整体毒性效应浓度数据	<0.001	<0.001	
雌激素效应-慢性浓度数据	0.200	0.264	[27~39]
雌激素效应-急性浓度数据	0.200	0.108	[30,39,40~50]
其他毒性效应-慢性浓度数据	0.200	0.383	[29,30,35,39,43,51~58]
其他毒性效应-急性浓度数据	0.200	0.081	[38,43,47~49,54,55,58~65]

2.1.2 生物毒性数据分析

本研究通过收集和筛选,总共收集到了 61 个淡水水生生物毒性数据,按暴露终点效应是否与 BPA 的雌激素效应有关,分为雌激素效应和其他毒性效应,并按暴露时间的长短,分为急性毒性数据组和慢性毒性数据组,表 2 中给出对应的物种数量、效应浓度范围以及经对数转化后的数据.

2.1.3 水体毒性数据分布

本研究收集筛选了我国主要河流湖泊中 BPA 的暴露浓度检测数据,采样个数为 155 个. 由表 3 可知,不同水体中 BPA 的含量也有较大差异性,我国淡水水体中 BPA 的浓度范围为 no detected~4 713.6 ng·L⁻¹,算术平均值为 421.31 ng·L⁻¹,本研究所收集的暴露数据在取对数后符合正态分布模型.

表 2 BPA 对水生生物的毒性数据分布特征

Table 2 Statistic distribution parameters for toxicity data of BPA to aquatic organisms

毒性效应分类		物种数	BPA 对水生生物的毒性数据分布				
			范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	原始数据		经对数转换后的数据	
				均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	标准差	均值
雌激素效应	急性	13	0.23 ~ 22 828	3 883.23	4 171.82	2.56	1.21
	慢性	14	0.015 ~ 7 760	1 081.64	1 276.44	1.73	1.37
其他毒性效应	急性	18	1 000 ~ 63 900	8 645.78	6 581.41	3.72	0.26
	慢性	13	2.0 ~ 22 828	4 009.56	5 662.90	2.58	0.96
整体毒性效应		58	0.015 ~ 63 900	4 713.33	5 052.29	2.72	1.12

表 3 我国主要淡水水体中 BPA 的浓度分布特征¹⁾

Table 3 Summary of BPA concentrations in surface waters of China

河流	采样个数	浓度范围 / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	原始数据/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$		经对数转换后的数据		文献
			均值	标准差	均值	标准差	
温州市水体	8	0.01 ~ 3.16	1.80	0.59	0.25	0.12	[66]
杭州地区水体	20	0.33 ~ 25.09	10.73	7.81	1.03	0.43	[67]
钱塘江	2	7.51 ~ 18.3	12.89	5.38	1.11	0.19	[67]
富春江	2	6.63 ~ 21.88	14.26	7.63	1.15	0.26	[67]
九溪	2	6.40 ~ 23.21	14.81	8.41	1.17	0.28	[67]
笕笃湖	4	14.2 ~ 31.4	23.81	4.80	1.38	0.10	[68]
海河	13	19.1 ~ 106	41.90	—	1.62	—	[69]
武汉附近水体	11	9.2 ~ 198.7	45.22	40.11	1.66	0.47	[70]
松花江	15	12.97 ~ 206.5	50.92	26.39	1.71	0.21	[71]
胶州湾	17	3.8 ~ 227.6	78.16	69.06	1.89	0.59	[72]
辽河	21	12.3 ~ 755.6	149.80	—	2.18	—	[73]
珠江	14	97.8 ~ 540.6	192.79	95.12	2.29	0.15	[74,75]
旅顺入海河口	2	23.14 ~ 714.70	368.92	345.78	2.57	0.74	[76]
黄浦江	4	2.38 ~ 1 920	509.37	705.32	2.71	0.87	[67,77]
黄河水	1	—	540.00	—	2.73	—	[78]
滇池	10	0.7 ~ 4 713.6	852.01	820.03	2.93	0.51	[79]
珠江三角洲鱼塘	9	960 ~ 4 510	3 294.44	718.52	3.52	0.13	[80]

1) “—”表示数据不可获得

2.2 风险表征结果

2.2.1 商值法评价

本研究采用各组的最小毒性浓度值为污染物的毒性参考值^[1,26]. 其中以 BPA 雌激素效应为评价因子时,急性、慢性毒性数据分别选取 228 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 、14.8 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 为毒性参考值(TV);以 BPA 的其他毒性效应为评价因子时,急性、慢性毒性数据分别选取1 000 000 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和2 000 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 毒性参考值. 表 4 为我国主要河流中 BPA 对水生生物不同毒性效应时风险商值(HQ)的统计结果. 若以水生生物受到的 BPA 雌激素效应为评价因子,水生生物长期暴露我国淡水水体中时,除温州市附近水源,其他水体的 BPA 的 HQ 均大于 0.3,潜在风险水体占总水体的比例为 94.12%,水生生物长时间暴露于该水体中,会受到 BPA 雌激素效应的影响,表明我国淡水水体 BPA 的潜在风险高;水生生物短期暴露时,我国 47.06%淡水水体对水生生物有潜在风险;以 BPA

对水生生物的其他毒性效应为评价因子时,水生生物长期暴露我国淡水环境时,我国有 11.76%的水体对水生生物有潜在风险;短期暴露时,我国所有淡水水体无风险. 依据商值法,本研究得到我国主要淡水水体 BPA 含量短时间不会导致水生生物大量死亡,但会导致水生生物受到 BPA 雌激素效应的干扰. 我国淡水水体中 BPA 短期暴露浓度不得超过 68.40 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,长期暴露浓度不应超过 4.44 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.2.2 安全阈值评价(MOS₁₀)

本研究以 BPA 的暴露浓度为 x 轴,以 BPA 在不同水体和生物体内的累积概率为 y 轴,评价了我国水体 BPA 的风险程度. 图 1(a)采用 BPA 雌激素效应的慢性浓度值作为评价因子,表明水生生物长期暴露且受害生物大于 5%时,受到 BPA 雌激素作用的潜在风险是 64.70%;短期暴露受到该类干扰的风险是 20.43%[图 1(b)]. 采用 BPA 对水生生物

的其他毒性效应作为评价因子时,长期、短期暴露水生生物受到 BPA 毒害的潜在风险分别为 12.40%、3.40% [图 1(c) 和 1(d)]. 表 5 中给出了各拟合曲线以及线性相关系数 r^2 , 以及控制受损生物低于 5% 的风险值. 以 BPA 对水生生物的雌激素效应为评价因子,水生生物长期暴露和短期暴露时, MOS_{10} 依次为 0.08 和 1.36, 不超过 5% 水生

物受害(以 LOEC 为效应终点)时得到水体最大允许浓度分别为 $31.44\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.47\times 10^2\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 因以 BPA 的其他毒性效应为评价因子,水生生物长期和短期暴露时, MOS_{10} 依次为 3.16 和 1 308.07, 5% 水生生物受害时的风险水域比例分别为 12.40% 和 3.40%, 水体最大安全浓度分别为 $1.13\times 10^3\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 以及 $1.71\times 10^6\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$.

表 4 商值法评价我国淡水水体中 BPA 的风险结果

评价结果	雌激素效应		其他毒性效应	
	慢性	急性	慢性	急性
$TV/\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	14.8	228	2 000	1 000 000
存在风险水体所占比例/%	94.12	47.06	11.76	<0.01
水体安全浓度/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	4.44	68.40	6.00×10^2	3.00×10^5

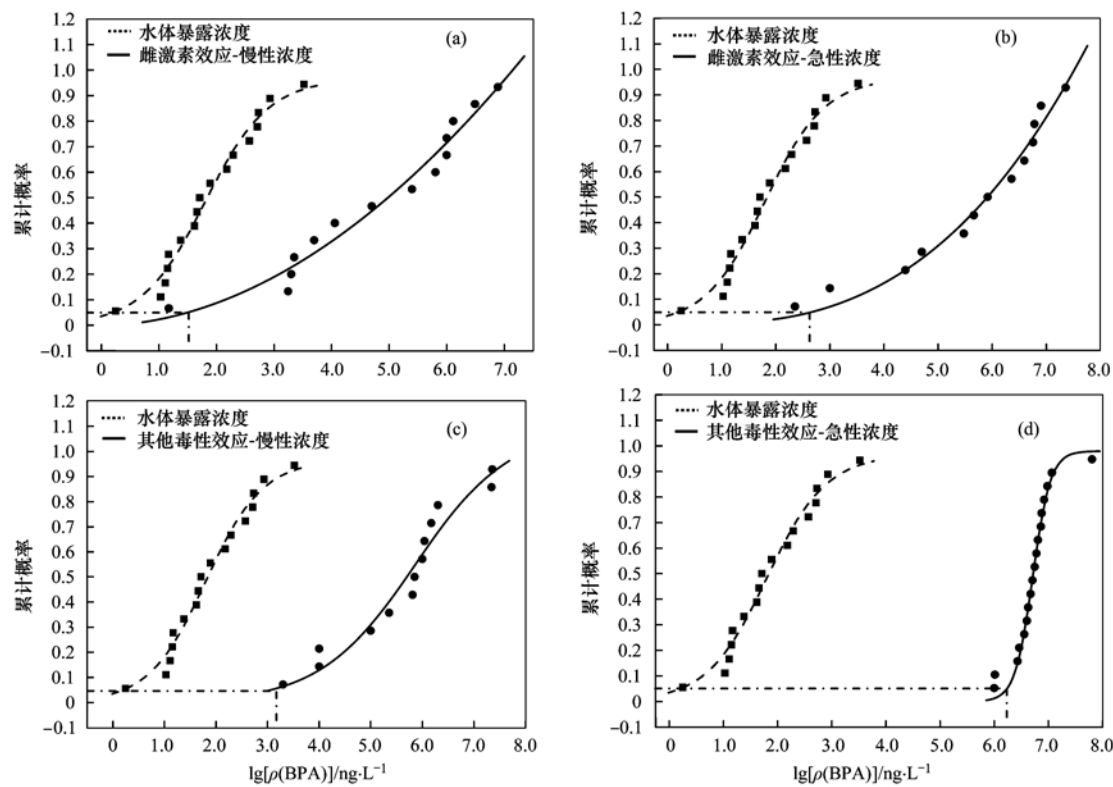


图 a、b 为 BPA 对生物的雌激素效应的慢性、急性数据分析结果,图 c、d 分别为 BPA 对水生生物的其他毒性效应的慢性、急性分析结果

图 1 我国淡水水体 BPA 的暴露浓度和毒性数据的累积概率分布

Fig. 1 Cumulative probability distributions of exposure concentrations and toxicity data in freshwaters of China

表 5 我国淡水水体中 BPA 的毒性数据以及暴露浓度的累积概率分布情况

Table 5 Details of cumulative probability distributions of exposure concentrations and toxicity data					
拟合对象	拟合公式	r^2	MOS_{10}	风险水体比例 ¹⁾ /%	安全浓度上限/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$
水体暴露浓度	$y = a/(1 + be^{-kx})$	0.98			
雌激素效应慢性数据	$y = V_{\max}x^n/(k^n + x^n)$	0.96	0.08	64.70	31.44
雌激素效应急性数据	$y = V_{\max}x^n/(k^n + x^n)$	0.97	1.36	20.43	4.47×10^2
其他毒性效应慢性数据	$y = a/(1 + be^{-kx})$	0.94	3.16	12.40	1.13×10^3
其他毒性效应急性数据	$y = a/(1 + be^{-kx})$	0.99	1 308.07	3.40	1.71×10^6

1) 表示超过 5% 水生生物受到 BPA 毒性危害时潜在风险水体比例

2.2.3 商值概率分布法分析

以 BPA 对水生生物的雌激素效应为评价因子,慢性数据和急性数据的商值几何均值依次为 9.12×10^{-4} 和 1.35×10^{-4} , 风险商值大于 0.3 的水体约占总水体比例的 15.00% 和 7.60%; 以 BPA 的其他毒性效应为评价因子时,慢性数据和急性数据的商值几何均值依次为 1.29×10^{-4} 和 9.33×10^{-6} , 风险商值大于 0.3 时,风险水体比例分别为 4.75% 和 < 0.01%. 表明长期暴露条件下,约 15.00% 的淡水水体对水生生物有雌激素效应的风险较高,4.75% 的水体会导致生物死亡;短期暴露下 7.60% 的淡水水体对生物有雌激素效应,不足 0.01% 的水体会导致生物死亡. 保护 95% 的水生生物时,以 BPA 的雌激素效应的慢性、急性数据分别展开风险评价时,我国水体的最大安全浓度分别为 $1.07 \times 10^2 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.02 \times 10^3 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 以 BPA 的其他毒性效应(以 LOEC 值为效应终点)的急性、慢性数据分别进行风险评价时,我国淡水水体的最大安全浓度分别为 $3.63 \times 10^3 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.15 \times 10^6 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 上述结果表明:目前我国淡水水体中的 BPA 的暴露浓度对部分敏感生物产生危害的风险较大,长期暴露具有致死的风险.

2.2.4 联合概率风险评价

本研究以 BPA 毒性数据的累积概率为 x 轴,以 BPA 暴露浓度数据的反累积概率为 y 轴分别拟合联合概率曲线. 图 2 给出分别以 BPA 对水生生物的雌激素效应和其他毒性效应为评价因子时,我国淡水水体与受害生物之间的比例关系. 表明生物对 BPA 的雌激素作用敏感度较高,对 BPA 的其他毒性效应敏感度较低. 以 BPA 的雌激素效应为评价因子时,水生生物短期和长期暴露于我国淡水水体中,超过 5% 的生物受害时的潜在风险分别为 33.21% 和 4.74%; 以 BPA 的其他毒性效应为评价因子时,超过 5% 的水生生物受害时的潜在风险为 0.90% 和

< 0.001%, 表明目前我国淡水中,长期暴露时,33.21% 的水体就导致超过 5% 的水生生物受到 BPA 雌激素效应的风险,且由 0.90% 的水体会导致水生生物死亡,短期暴露时,有 4.74% 的水体会导致超过 5% 的水生生物受到 BPA 的雌激素效应的潜在影响,但造成水生生物死亡的风险较低.

3 讨论

本研究采用了商值法、安全阈值法、商值概率法以及联合概率风险评价这 4 种方法评价了我国淡水水体中 BPA 对水生生物的潜在风险. 上述 4 种风险评价方法的结果表明水生生物对 BPA 的雌激素效应较其他毒性效应更为敏感,采用 BPA 雌激素效应为评价因子时,上述 4 种方法得到我国风险水体占我国总淡水水体的比例较分别为 94.12%、64.70%、15.10% 以及 33.21%, 表明长期暴露时,水生生物受到 BPA 雌激素作用的风险较大;短期暴露时水生生物受到 BPA 雌激素作用的风险分别为 47.06%、20.43%、7.06% 以及 4.74%. 采用 BPA 的其他毒性效应作为评价因子,水生生物长期和短期暴露于我国淡水水体时,上述 4 种评价方法的结果表明我国风险水体占总淡水水体比例分别为 11.76%、12.40%、4.75%、0.90% 和 < 0.01%、3.40%、< 0.01%、< 0.01%. 由上述数据比较得出采用 BPA 的雌激效应作为评价因子较其他毒性效应更能表征我国水体中 BPA 的风险程度.

商值法为非概率评价方法,所推导的结果未能反映我国所有水体中 BPA 分布的真实情况,且在选取每组的水生生物的最小毒性效应值为毒性参考值,未充分考虑 BPA 毒性敏感生物;且因选取的 BPA 水体暴露数据评价我国全部淡水水体的风险情况,未对环境中的不确定因素做出修正,所以评价结果较为保守. 商值概率法、联合概率风险评价法,通过随机抽样优化了 BPA 的毒性数据和暴露数据;但以 BPA 对水生生物的雌激素效应的急、慢性效应和 BPA 其他毒性效应的急、慢性效应作为评价因子,所有数据对数化并采用商值法得到 HQD 值分别为 -3.04 ± 2.43 、 -3.65 ± 2.34 和 -3.67 ± 2.02 、 -4.81 ± 1.19 , 误差较大,影响风险水体比例的确定,且联合概率法也是基于受试生物以及暴露浓度的筛选服从正态分布的前提推导 BPA 风险水域的比例,其最终结果也存在较大误差,影响数据结果的准确性. 所以这两种方法对于本研究,其结果均不能真实地反映我国水体中 BPA 浓度以及分布.

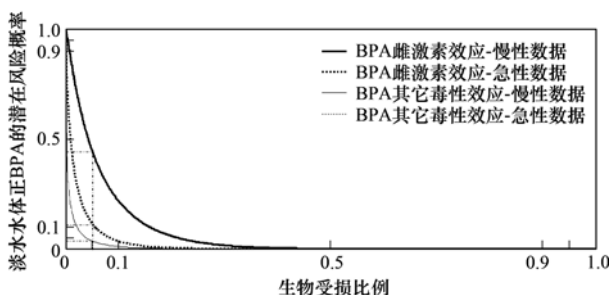


图 2 我国水体中基于不同评价因子的 BPA 的联合概率曲线

Fig. 2 Joint probability curves of BPA in surface waters of China using different assessment factors

安全阈值法的评价结果较商值法更能反映我国水体的风险状况,但因数据量有限,未能充分考虑水生生态环境的诸多因素,如有研究发现 BPA 能被水体中的悬浮颗粒以及污泥吸附、生物降解、被氧化转化成其他产物,水体中 BPA 的半衰期一般是 2.5 ~ 4 d^[12] 厌氧条件下, BPA 的半衰期一般为 4.5 ~ 4.7 d^[81],也有研究发现水体底泥中 BPA 的吸附解析与水体中的 BPA 浓度密切相关,两者处于一种动态平衡^[82]。有研究发现当水体中有多种污染物质共存时,化合物的相互作用影响暴露生物对 BPA 的毒性敏感度^[83],其结果较商值概率法以及联合概率风险评价法保守,综上所述,采用安全阈值法评价我国淡水水体生态风险状况,其结果更为合理客观。

本研究结果采用安全阈值法推导的我国水体最大安全浓度与国外部分研究结果属同一数量级,如 Wright-Walters 等^[84]通过 SSD 曲线拟合分析得到美国水体中 BPA 可预测无效应浓度(predicted no effect concentration, PNEC)为 60 ng·L⁻¹, Crain 等^[18]采用安全阈值法初步分析了所有水体中 BPA 的风险程度,并建议 BPA 的安全浓度上限为 30 ng·L⁻¹。本研究以 BPA 雌激素效应(以受试生物的 LOEC 为效应终点)为评价因子推导我国淡水水体最大安全浓度为 31.44 ng·L⁻¹,但根据欧洲委员会技术指导文件(the European Commission Technical Guidance Document, TGD),如果少于 20% 的受试物种受到影响时的最低有效应浓度(LOEC)可以为最低无效应浓度(no observed effect concentration, NOEC)的 2 倍^[17],少许差异的原因是本研究采用雌激素作用作为效应终点,故本研究认为我国淡水水体长期和短期暴露条件下有效最大安全浓度分别为 15.72 ng·L⁻¹。数据之间的差异可能是由于本研究选取水生生物较为敏感的 BPA 雌激素效应为评价因子导致本研究推导的水体最大安全浓度偏小的原因,其次不同区域水生生物对 BPA 的敏感度也存在差异性。综上,本研究认为以雌激素作用为效应终点,采用安全阈值法风险评价结果能更好地反映我国水体的风险程度,最终结果表明以 BPA 雌激素作用为效应终点时,水生生物长期暴露时,我国 64.70% 的淡水水体有潜在风险,安全浓度上限为 15.72 ng·L⁻¹;水生生物短期暴露时,我国 20.43% 的淡水水体有潜在风险,安全浓度上限为 2.24 × 10² ng·L⁻¹。

4 结论

(1) 本研究采用商值法、安全阈值法、商值概

率评价法以及联合概率曲线评价法分别评价了我国水体中 BPA 的生态风险程度。结果表明,采用雌激素作用作为效应终点更能反映我国淡水水体的风险程度。

(2) 采用安全阈值法得到的评价结果更能反映我国水体的风险程度,表明水生生物长期暴露于我国淡水水体中,风险水体占全部水体的 64.70%, BPA 安全浓度上限为 15.72 ng·L⁻¹;短期暴露时,风险水体比例为 20.43%,安全浓度上限为 2.24 × 10² ng·L⁻¹。

致谢:感谢中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室对本研究的支持。同时也感谢穆云松、于晓玲等为数据分析提供的帮助。

参考文献:

- [1] Vandenberg L N, Maffini M V, Sonnenschein C, *et al.* Bisphenol-A and the Great Divide: A review of controversies in the field of endocrine disruption[J]. *Endocrine Reviews*, 2009, **30**(1): 75-95.
- [2] Dodds E, Ca W L. Synthetic estrogenic agents without the phenanthrene nucleus[J]. *Nature*, 1936, **137**: 996.
- [3] EU. European Union risk assessment report 4, 4'-isopropylidenediphenol (bisphenol-A) [R]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003. 13-41.
- [4] 秦伟程. 双酚 A 生产现状与发展趋势[J]. *四川化工与腐蚀控制*, 2001, **4**(5): 32-36.
- [5] 李振东, 韩占元, 郭桂荣, 等. 双酚 A 市场发展趋势[J]. *热固性树脂*, 2011, **26**(4): 50-53.
- [6] Huang Y Q, Wong C K C, Zheng J S, *et al.* Bisphenol A (BPA) in China: a review of sources, environmental levels, and potential human health impacts[J]. *Environment International*, 2012, **42**: 91-99.
- [7] Kuiper G G J M, Lemmen J G, Carlsson B, *et al.* Interaction of estrogenic chemicals and phytoestrogens with estrogen receptor β [J]. *Endocrinology*, 1998, **139**(10): 4252-4263.
- [8] 张江华, 李华文, 石丹, 等. 双酚 A 对人胚肝细胞 DNA 损伤和修复功能的影响[J]. *环境与职业医学*, 2005, **22**(3): 197-199.
- [9] 李芙蓉, 蔡云朗, 任慕兰. 双酚 A 对离体人子宫肌瘤细胞增殖的影响[J]. *环境与健康杂志*, 2008, **25**(4): 311-313.
- [10] 郑继翠, 肖现民, 刘江斌, 等. 双酚 A 对人神经母细胞瘤 SK-N-SH 细胞增殖的影响[J]. *中华小儿外科杂志*, 2006, **27**(2): 90-92.
- [11] 徐镜波, 王咏. 生态风险评价[J]. *松辽学刊(自然科学版)*, 1999, **1**(2): 10-13.
- [12] Hope B K. An examination of ecological risk assessment and management practices[J]. *Environment International*, 2006, **32**(8): 983-995.
- [13] Staples C A, Dom P B, Klecka G M, *et al.* A review of the environmental fate, effects, and exposures of bisphenol A [J].

- Chemosphere, 1998, **36**(10): 2149-2173.
- [14] Mochida K, Ohkubo N, Matsubara T, *et al.* Effects of endocrine-disrupting chemicals on expression of ubiquitin C-terminal hydrolase mRNA in testis and brain of the Japanese common goby[J]. Aquatic Toxicology, 2004, **70**(2): 123-136.
- [15] Wheeler J R, Grist E P M, Leung K M Y, *et al.* Species sensitivity distributions: data and model choice [J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, **45**(1-12): 192-202.
- [16] 孟伟, 吴丰昌. 水质基准的理论与方法学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 28-33.
- [17] European Commission. Technical guidance document on risk assessment (Part III)[R]. Italy: European Commission, 2003. 98.
- [18] Crain D A, Eriksen M, Iguchi T, *et al.* An ecological assessment of Bisphenol-A: Evidence from comparative biology [J]. Reproductive Toxicology, 2007, **24**(2): 225-239.
- [19] Helsel D R. Less than obvious statistical treatment of data below the detection limit[J]. Environmental Science and Technology, 1990, **124**(12): 1766-1774.
- [20] USEPA. Data quality assessment: Statistical methods for practitioners [S]. EPAQA/G- 9S, EPA/240/B- 06/003. Washington: US EPA, 2006.
- [21] 郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 等. 中国地表水体多环芳烃含量分布特征及其生态风险评价[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2012, **42**(5): 680-691.
- [22] 冯承莲, 雷炳丽, 王子健. 中国主要河流中多环芳烃生态风险的初步评价[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(6): 583-588.
- [23] Zolezzi M, Cattaneo C, Tarazona J V. Probabilistic ecological risk assessment of 1, 2, 4-trichlorobenzene at a former industrial contaminated site[J]. Environmental Science and Technology, 2005, **39**(9): 2920-2926.
- [24] WERF (Water Environment Research Foundation). Aquatic ecological risk assessment: a multi-tiered approach: Project 91-AER- 1 [M]. Alexandria: Water Environment Research Foundation, 1996.
- [25] 郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 等. 太湖梅梁湾、贡湖湾和胥口湾水体 PAHs 的生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(12): 2804-2813.
- [26] Wang X L, Tao S, Dawson R W, *et al.* Characterizing and comparing risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in a Tianjin wastewater-irrigated area [J]. Environmental Research, 2002, **90**(3): 201-206.
- [27] Oehlmann J, Schulte-Oehlmann U, Bachmann J, *et al.* Bisphenol A induces superfeminization in the ramshorn snail *Marisa cornuarietis* (Gastropoda: Prosobranchia) at environmentally relevant concentrations [J]. Environmental Health Perspectives, 2006, **114**(1): 127-133.
- [28] Lahnsteiner F, Berger B, Kletzl M, *et al.* Effect of Bisphenol A on maturation and quality of semen and eggs in the brown trout, *Salmo trutta f. fario* [J]. Aquatic Toxicology, 2005, **75**(3): 213-224.
- [29] Yang F X, Xu Y, Wen S. Endocrine-disrupting effects of Nonylphenol, Bisphenol A, and *p,p'*-DDE on *Rana nigromaculata* tadpoles [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2005, **75**(6): 1168-1175.
- [30] Levy G, Lutz I, Krüger A, *et al.* Bisphenol A induces feminization in *Xenopus laevis* tadpoles [J]. Environmental Research, 2004, **94**(1): 102-111.
- [31] 杨君, 张育辉, 王宏元, 等. 双酚 A 对中国林蛙精巢芳香化酶和雌激素受体的影响[J]. 陕西师范大学学报 (自然科学版), 2011, **39**(4): 69-74.
- [32] Aarab N, Lemaire-Gony S, Unruh E, *et al.* Preliminary study of responses in mussel (*Mytilus edulis*) exposed to Bisphenol A, diallyl phthalate and tetrabromodiphenyl ether [J]. Aquatic Toxicology, 2006, **78**(S1): 86-92.
- [33] 张晖, 孔繁翔, 王世和, 等. 双酚 A 与内源性雌激素联合作用的探讨[J]. 安全与环境工程, 2008, **15**(2): 13-17.
- [34] Brian J V, Harris C A, Scholze M, *et al.* Accurate prediction of the response of freshwater fish to a mixture of estrogenic chemicals [J]. Environmental Health Perspectives, 2005, **113**(6): 721-728.
- [35] Van den Belt K, Verheyen R, Witters H. Comparison of vitellogenin responses in zebrafish and rainbow trout following exposure to environmental estrogens [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2003, **56**(2): 271-281.
- [36] Mu X Y, Rider C V, Hwang G S, *et al.* Covert signal disruption: anti-ecdysteroidal activity of Bisphenol A involves cross talk between signaling pathways [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2005, **24**(1): 146-152.
- [37] 周群芳, 江桂斌. 双酚-A 对 Medaka 的类雌激素效应研究[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(11): 1550-1554.
- [38] 赵卫红. 日本沼虾 (*Macrobrachium nipponense*) 卵黄蛋白原代谢相关基因的克隆和表达研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011. 55-65.
- [39] Jobling S, Casey D, Rodgers-Gray T, *et al.* Comparative responses of molluscs and fish to environmental estrogens and an estrogenic effluent[J]. Aquatic Toxicology, 2003, **65**(2): 205-220.
- [40] Tatarazako N, Takao Y, Kishi K, *et al.* Styrene dimers and trimers affect reproduction of daphnid (*Ceriodaphnia dubia*)[J]. Chemosphere, 2002, **48**(6): 597-601.
- [41] Hoshi H, Kamata Y, Uemura T. Effects of 17 β -estradiol, Bisphenol A and tributyltin chloride on germ cells of *Caenorhabditis elegans* [J]. Journal of Veterinary Medical Science, 2003, **65**(8): 881-885.
- [42] Muncke J, Junghans M, Eggen R I L. Testing estrogenicity of known and novel (xeno-) estrogens in the MolDarT using developing zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Environmental Toxicology, 2007, **22**(2): 185-193.
- [43] Watts M M, Pascoe D, Carroll K. Survival and precopulatory behaviour of *gammarus pulex* (l.) exposed to two xenoestrogens [J]. Water Research, 2001, **35**(10): 2347-2352.
- [44] Rankouhi T R, Sanderson J T, Van Holsteijn I, *et al.* Effects of natural and synthetic estrogens and various environmental

- contaminants on vitellogenesis in fish Primary hepatocytes: comparison of bream (*Abramis brama*) and Carp (*Cyprinus carpio*) [J]. Toxicological Sciences, 2004, **81**(1): 90-102.
- [45] Thomas P, Sweatman J. Interference by atrazine and Bisphenol-A with progesterone binding to the ovarian progesterone membrane receptor and induction of oocyte maturation in Atlantic croaker [J]. Marine Environmental Research, 2008, **66**(1): 1-2.
- [46] Segner H, Navas J M, Schäfers C, *et al.* Potencies of estrogenic compounds in in vitro screening assays and in life cycle tests with zebrafish in vivo [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2003, **54**(3): 315-322.
- [47] Kashiwada S, Ishikawa H, Miyamoto N, *et al.* Fish test for endocrine-disruption and estimation of water quality of Japanese rivers [J]. Water Research, 2002, **36**(8): 2161-2166.
- [48] Lee S B, Choi J. Effects of Bisphenol A and ethinyl estradiol exposure on enzyme activities, growth and development in the fourth instar larvae of *Chironomus riparius* (Diptera, Chironomidae) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, **68**(1): 84-90.
- [49] Pascoe D, Carroll K, Karntanut W, *et al.* Toxicity of 17 α -Ethinylestradiol and Bisphenol A to the freshwater Cnidarian *Hydra vulgaris* [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2002, **43**(1): 56-63.
- [50] Lee Y M, Rhee J S, Kim I C, *et al.* Mining of Biomarker genes from expressed sequence tags and differential display reverse transcriptase-polymerase chain reaction in the self-fertilizing fish, *Kryptolebias marmoratus* and their expression patterns in response to exposure to an endocrine-disrupting alkylphenol, Bisphenol A [J]. Molecules and Cells, 2007, **23**(3): 287-303.
- [51] Watts M M, Pascoe D, Carroll K. Exposure to 17 α -ethinylestradiol and Bisphenol A: effects on larval moulting and mouthpart structure of *Chironomus riparius* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2003, **54**(2): 207-215.
- [52] Honkanen J O, Holopainen I J, Kukkonen J V. Bisphenol A induces yolk-sac oedema and other adverse effects in Landlocked Salmon (*Salmo salar m. sebago*) yolk-sac fry [J]. Chemosphere, 2004, **55**(2): 187-196.
- [53] 牛海岗, 王宏元, 张育辉. 双酚 A 对中国林蛙蝌蚪生长发育的毒性效应 [J]. 生态毒理学报, 2009, **4**(3): 408-414.
- [54] Brennan S J, Brougham C A, Roche J J, *et al.* Multi-generational effects of four selected environmental oestrogens on *Daphnia magna* [J]. Chemosphere, 2006, **64**(1): 49-55.
- [55] 庄惠生, 杨光. 双酚 A 对鲤鱼急性和亚急性毒性的研究 [J]. 环境化学, 2005, **24**(6): 682-684.
- [56] Mihaich E M, Friederich U, Caspers N, *et al.* Acute and chronic toxicity testing of Bisphenol A with aquatic invertebrates and plants [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, **72**(5): 1392-1399.
- [57] Kallivretaki E, Eggen R, Neuhauss S, *et al.* Aromatase in zebrafish: A potential target for endocrine disrupting chemicals [J]. Marine Environmental Research, 2006, **62**(S1): S187-S190.
- [58] Seo J S, Park T J, Lee Y M, *et al.* Small heat shock protein 20 gene (Hsp20) of the Intertidal Copepod *Tigriopus japonicus* as a possible biomarker for exposure to endocrine disruptors [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2006, **76**(4): 566-572.
- [59] Hirano M, Ishibashi H, Matsumura N, *et al.* Acute toxicity responses of two crustaceans, *Americamysis bahia* and *Daphnia magna*, to endocrine disruptors [J]. Journal of Health Science, 2004, **50**(1): 97-100.
- [60] Alexander H C, Dill D C, Smith L W, *et al.* Bisphenol A: acute aquatic toxicity [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1988, **7**(1): 19-26.
- [61] 刘红玲, 刘晓华, 王晓祎, 等. 双酚 A 和四溴双酚 A 对大型蚤和斑马鱼的毒性 [J]. 环境科学, 2007, **28**(8): 1784-1787.
- [62] 李睿, 刘玉, 谭凤仪, 等. 双酚 A 对微小环藻的毒性效应 [J]. 中山大学学报, 2006, **45**(3): 110-113.
- [63] 雷忻, 李宗强, 廉振民, 等. 双酚 A 和对硝基酚对泥鳅的急性毒性效应 [J]. 生态学杂志, 2009, **28**(11): 2257-2261.
- [64] 牛海岗. 双酚 A 对中国林蛙蝌蚪的毒性和隔代效应 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2009. 13-24.
- [65] 郭匿春, 谢平. 双酚 A 和壬基酚对隆线蚤和微型裸腹蚤的毒性 [J]. 水生生物学报, 2009, **33**(3): 492-497.
- [66] 雷炳莉, 骆坚平, 查金苗, 等. 温榆河沉积物中壬基酚和双酚 A 的分布 [J]. 环境化学, 2008, **27**(3): 314-317.
- [67] 张海峰, 胡建英, 常红, 等. SPE-LC-MS 法检测杭州地区饮用水水源及自来水中的双酚 A [J]. 环境化学, 2004, **23**(5): 584-586.
- [68] Zhang X, Gao Y J, Li Q Z, *et al.* Estrogenic compounds and estrogenicity in surface water, sediments, and organisms from Yundang Lagoon in Xiamen, China [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2011, **61**(1): 93-100.
- [69] Jin X L, Jiang G B, Huang G L, *et al.* Determination of 4-*tert*-octylphenol, 4-nonylphenol and Bisphenol A in surface waters from the Haihe River in Tianjin by gas chromatography-mass spectrometry with selected ion monitoring [J]. Chemosphere, 2004, **56**(11): 1113-1119.
- [70] 薛晓飞, 吴峰, 邓南圣. 关于武汉地区河流与湖泊中内分泌干扰物质的调查与分析 [J]. 洛阳大学学报, 2005, **20**(4): 33-36.
- [71] 张照韩, 冯玉杰, 高鹏, 等. 松花江内内分泌干扰物及雌激素活性调查 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, **43**(12): 58-62.
- [72] 李正炎, 傅明珠, 王馨平, 等. 冬季胶州湾及其周边河流中酚类环境激素的分布特征 [J]. 中国海洋大学学报, 2006, **36**(3): 451-455.
- [73] Wang L, Ying G G, Zhao J L, *et al.* Assessing estrogenic activity in surface water and sediment of the Liao River system in northeast China using combined chemical and biological tools [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(1): 148-156.
- [74] 龚剑, 冉勇, 杨余, 等. 珠江广州河段表层水中雌激素化合

- 物的污染状况[J]. 环境化学, 2008, **27**(2): 242-244.
- [75] 邵晓玲, 马军, 文刚, 等. 松花江流域某自来水厂中内分泌干扰物的调查[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2723-2728.
- [76] 张奎文, 叶赛, 那广水, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定环境水体中双酚 A、辛基酚、壬基酚[J]. 分析试验室, 2008, **27**(8): 62-66.
- [77] 马晓雁, 高乃云, 李青松, 等. 黄浦江原水及水处理过程中内分泌干扰物状况调查[J]. 中国给水排水, 2006, **22**(19): 1-4.
- [78] 赵艳红, 郭栋生. 黄河水中邻苯二甲酸二丁酯、壬基酚、双酚 A 含量的现状分析[J]. 中国环境监测, 2007, **23**(5): 19-21.
- [79] Yu F, Pan X J, Wang B. Determination of four phenolic endocrine disrupting chemicals in Dianchi Lake, China [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2007, **92**(13): 1532-1545.
- [80] 董军. 珠三角地区鱼塘水体中双酚 A 污染及其生态风险评估[J]. 中国生态农业学报, 2009, **17**(6): 1240-1244.
- [81] Cousins I T, Staples C A, Klecka G M, *et al.* A multimedia assessment of the environmental fate of Bisphenol A[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2002, **8**(5): 1107-1135.
- [82] Kawahata H, Ohta H, Inoue M, *et al.* Endocrine disrupter nonylphenol and bisphenol A contamination in Okinawa and Ishigaki Islands, Japan-within coral reefs and adjacent river mouths[J]. Chemosphere, 2004, **55**(11): 1519-1527.
- [83] Silva E, Rajapakse N, Kortenkamp A. Something from "Nothing"-eight weak estrogenic chemicals combined at concentrations below NOECs produce significant mixture effects [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(8): 1751-1756.
- [84] Wright-Walters M, Volz C, Talbott E, *et al.* An updated weight of evidence approach to the aquatic hazard assessment of Bisphenol A and the derivation a new predicted no effect concentration (Pnec) using a non-parametric methodology[J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(4): 676-685.

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation of the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Huai-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, GAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrained the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Phosphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototaxical Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊