

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫衰减系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑菌活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

虹鳟鱼鳃及肝脏多种 CYP1 基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况

高锴^{1,2,3}, 闫佩¹, 檀翠玲¹, 罗彦鹤¹, 孙静¹, Maria E. Jönsson², Ingvar Brandt², 唐运平^{1*}

(1. 天津市环境保护科学研究院, 天津 300191; 2. 瑞典乌普萨拉大学进化生物学中心环境毒理学系, 瑞典 SE-752 36; 3. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300092)

摘要: 以虹鳟鱼为受试生物, 以鳃与肝脏多种 CYP1 基因为生物标志物, 在天津境内开展了野外监测实验, 分析多种 CYP1 转录物的表达量变化及它们在不同监测位点的表达模式. 实验通过鱼类吊网在特定水域进行野外监测. 结果表明, 葛沽与海河入海口的 6 种 CYP1 基因表达模式很相近, 但表达量不同, 表明两地的污染成分相近但水中污染物负荷不同. 除了在马厂减河外, CYP1C1/IC3 在葛沽与入海口受到明显诱导作用, 表明马厂减河中存在的污染物种类不同于其它监测位点. 因此, 利用虹鳟鱼鳃与肝脏中多种 CYP1 基因表达模式作为生物标志物监测污染物有着很好的前景, 不仅可以作为研究环境污染物对水环境和鱼类健康影响的重要手段, 还可以为进一步解释化学混合物成分与多种生物反应之间关系提供理论基础.

关键词: 细胞色素 P4501; 生物标记物; 虹鳟鱼; 海河; 环境毒理学

中图分类号: X832 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3878-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.10.043

Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring

GAO Kai^{1,2,3}, YAN Pei¹, TAN Cui-ling¹, LUO Yan-he¹, SUN Jing¹, Maria E. Jönsson², Ingvar Brandt², TANG Yun-ping^{1*}

(1. Tianjin Academy of Environmental Sciences, Tianjin 300191, China; 2. Environmental Toxicology of Evolutionary Biology Center, Uppsala University, Uppsala SE-752 36, Sweden; 3. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300092, China)

Abstract: CYP1 subfamily genes in gills and liver of rainbow trout as biomarkers were studied to establish methods for quantitative mRNA expression analysis of these genes and to determine their expression pattern. Fish caged in various waters in the Haihe River (Tianjin) were analyzed. The mRNA expression patterns observed in Machangjian River and estuary site of Haihe River were markedly similar but at different levels, reflecting that those sites shared the similar pollution components but with different local pollution load. CYP1C1 and IC3 were only induced at Gegu site and estuary site of Haihe River, indicating different types of CYP1 agonists in Machangjian River. Response patterns of multiple CYP1 genes in gills and liver could be applied in the monitoring strategy. The response patterns of CYP1 genes could be used for better understanding the relationship between complex mixtures of pollutants and biological response of organisms in aquatic environments.

Key words: cytochrome P4501; bio-monitoring; *Oncorhynchus mykiss*; Haihe River; environmental toxicology

CYP1A 是细胞色素 P450 (cytochrome P450, CYP) 家族中的重要成员, 主要和芳基烃受体 (AhR) 调控的信号途径有关; 在生物体对多环芳烃 (PAHs)、多氯联苯 (PCBs) 和二噁英 (Dioxins) 等有机污染物的代谢和脱毒作用中起重要作用^[1~3]. CYP1A 被外源化合物诱导的机制主要是通过诱导剂与细胞内的芳香烃受体 (AhR) 结合, 进而通过一系列反应结合、转位而与 CYP1A 靶基因的启动区的反应元件结合, 从而启动 CYP1A 的转录. 当有机污染物配体与胞浆中的 AhR 结合, 使 AhR 定位到细胞核内, 与芳烃受体核转录因子 (ARNT) 蛋白结合后, 这种配体-AhR-ARNT 复合体能够与 CYP1A

上游的外化物反应元件 (XREs) 结合, 从而最终激活 CYP1A 基因的表达^[1, 4, 5]. 由于生物暴露于 PAHs、PCBs 等污染物的水平与体内 CYP1A1 表达水平具有显著相关性, 其表达水平甚至以几何级数增加; 因此, 在对水生系统污染监测中, 检测鱼类 CYP1A 基因的诱导表达已经被作为一种灵敏的早期预警手段^[6, 7].

在鱼类 CYP1 家族当中, 除了 CYP1A 之外, 还

收稿日期: 2015-04-16; 修订日期: 2015-05-28

基金项目: 天津市应用基础与前沿技术研究计划项目 (14JCYBJC43800)

作者简介: 高锴 (1984 ~), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为环境毒理学, E-mail: kaigao123@sina.cn

* 通讯联系人, E-mail: 13652097098@163.com

有其它 3 种 *CYP1* 亚家族成员,包括 *CYP1B*、*1C* 及 *1D*^[8~10]。在斑马鱼中,PCB126 与 TCDD 均可以诱导 *CYP1A*、*1B* 及 *1C* 基因的表达,但不能诱导 *CYP1D*^[10, 11]。在虹鳉鱼中,*CYP1* 基因包括 *CYP1As* 基因(*1A1* 与 *1A3*)、*CYP1B1* 及 *CYP1Cs*(*1C1*、*1C2* 与 *1C3*)^[12, 13]。此前已有许多报道叙述了不同 *CYP1* 基因可诱导性,Denison 等^[14]曾报道过,很多 AhR 激动剂可以诱导 *CYP1A* mRNA 与蛋白的表达;另外,在鱼胚胎发育及成鱼期,*CYP1B1* 与 *CYP1Cs* 基因也可以受 AhR 激动剂的诱导^[11, 15~17]。另据报道,在斑马鱼、鲮鱼(*Fundulus heteroclitus*)及非洲爪蟾(*Xenopus tropicalis*)体内新发现的 *CYP1D1* 基因在转录水平没有出现被典型 AhR 激动剂(如 TCDD、PCB-126 等)诱导的现象,表明 *CYP1D1* 不是受 AhR 途径介导的^[10, 17, 18]。考虑到对污染物反应效果强弱的不同,鱼类 *CYP1A*、*1B*、*1C* 基因表达反应模式可作为评价其所处水环境污染程度的重要生物标记物。

目前我国鱼类 *CYP1* 在水环境污染及其效应监测中的应用研究还处于起步阶段,研究利用鱼鳃 *CYP1* 基因表达模式监测海洋污染更是鲜见报道。因此,针对我国水环境污染状况,建立与国际先进技术相接轨的生物标志物监测技术体系迫在眉睫。本研究旨在利用实时荧光定量核酸扩增检测系统(qPCR)对模式生物虹鳉鱼(*Oncorhynchus mykiss*)进行分析,通过在天津市内不同流域现场点位监测实验,考察多种 *CYP1* 活性与水环境污染程度的相关性,及根据不同基因表达模式及其生物效应的可行性,探讨该方法在实际监测中应用的可能性。

1 材料与方法

1.1 材料

虹鳉鱼(*Oncorhynchus mykiss*)购于北京顺通虹鳉鱼养殖中心,体重 $126 \text{ g} \pm 23 \text{ g}$,体长 $21 \text{ cm} \pm 1.3 \text{ cm}$ 。每日用充气机连续充气,投喂人工饵料,每天更换新鲜,暂养期间水温 $10 \sim 11^\circ\text{C}$, pH 7.9,暂养 5 d 后选取对鱼随机分组进行野外监测实验。

1.2 野外监测实验

为使外部条件(天气、河水温度等)对实验影响最小化,实验时间选取在 3 月中旬,虹鳉鱼孵化场、暂存实验室、及待放置河水温度温差小(具体参数见表 1)。

将 3 组置于笼子($55 \text{ cm} \times 55 \text{ cm} \times 55 \text{ cm}$)中实验动物($N=6$)分别放置于天津境内 3 个不同位置,

分别是海河干流葛沽 G(位于民俗文化中心河口处, $\text{N}38.995\ 010^\circ$, $\text{E}117.507\ 866^\circ$),海河入海口处 H(位于航一路天津市水运工程材料试验检测中心旁, $\text{N}38.999\ 060^\circ$, $\text{E}117.701\ 841^\circ$),马厂减河桥下 M(马厂减河桥与天津大道交汇处, $\text{N}38.979\ 850^\circ$, $\text{E}117.548\ 699^\circ$)。实验周期为 1 d,暴露实验后,剪断鳃弓,放出血液,立即打开腹腔,取出完整鳃弓与肝脏组织,用滤纸擦净表面血污后放入 RNA 稳定溶液 RNeasy(购于 Ambion 公司)中。回到实验室后,将样品置于 4°C 冰箱保存。实验期间,全部实验动物未发现明显不适或死亡现象。暂存实验室虹鳉鱼设定为实验对照组。

表 1 受试生物在不同监测点位的水环境指标

Table 1 Aquatic parameters at different caging sites

位置	水温 / $^\circ\text{C}$	溶解氧 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	电导率 / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
孵化场	10.8	6.24	7.9	532
实验室	11	7.84	7.9	513
葛沽	10.6	7.06	8.0	9900
马厂减河	10.9	5.8	8.43	7920
海河入海口	11	7.1	8.2	975

1.3 总 RNA 提取

使用总 RNA 脂肪和纤维组织试剂盒与 DNase 酶(购自美国伯乐公司)提取总 RNA,提取产物经紫外分光光度计(微量核酸蛋白测定仪,ND1000)检测,260/280 与 260/230 吸光值比率在 $2 \sim 2.1$ 范围内。经 1% 的琼脂糖凝胶电泳后(TAE 缓冲液 EDTA,购自 Sigma 公司),显示总 RNA 样品没被降解,完整性好。严格按 cDNA 合成试剂盒(iScript cDNA 合成试剂盒,购自 Biorad 伯乐公司)操作规范进行操作合成 cDNA。

1.4 qPCR 分析

虹鳉鱼靶基因定量 PCR 引物(qPCR 产物长度在 $75 \sim 150 \text{ bp}$ 之间)由 Sigma 公司合成(mRNA 序列见表 2)。使用 iQ SYBR Green Supermix 试剂盒(购于 Bio-Rad 公司)及 Rotor-Gene 6000 荧光实时定量 PCR 仪(Qiagen 公司)进行定量 PCR 检测分析。cDNA 定量分析操作过程严格按照规范进行,具体过程如下: cDNA 样品同时进行二孔平行分析,程序首先为 $95^\circ\text{C} 10 \text{ min}$,然后进入 $95^\circ\text{C} 15 \text{ s}$, $62^\circ\text{C} 15 \text{ s}$ 的 35 个循环反应,最后溶解曲线分析阶段(温度从 $55 \sim 95^\circ\text{C}$,从低至高,温度每 5 s 提高 1°C)。

实验使用 $E^{\Delta\Delta\text{CT}}$ 法分析计算相对 mRNA 的表达量^[19, 20]。PCR 扩增效率通过 LinRegPCR 程序进行分析^[21, 22],所得效率值在 $1.85 \sim 1.95$ 之间。

实验选取 *ER1α*、*l13* 与 *β-actin* 作为内源参照基因来确定鱼鳃与肝脏内目标基因的相对表达量；由于 *ER1α* 在不同组织间稳定性高且基因表达量不受实验影响, *ER1α* 被最终确定为最佳参照基因。

表 2 实时定量 PCR 分析基因表达所用的引物 (5'-3')

转录物	上游引物	下游引物
<i>CYP1A1</i>	GGAACTAGATGAGAACGCCAACA	GTACACAACAGCCCATGACAG
<i>CYP1A3</i>	GAAACTAGATGAGAACGCCAACG	CTGATGGTGTCAAAACCTGCC
<i>CYP1B1</i>	CATTCTGATACTTGTGAGGTTTCC	CAACTGAGACTGGTCTTCCAT
<i>CYP1C1</i>	GCAGCACAGAGAAACCTTCAAC	GTCCTTTCCGTGCTCAATCACA
<i>CYP1C2</i>	GAGCACAGGGAGACATTTGAC	GGTACTACTGTCCGCCTTG
<i>CYP1C3</i>	CATGAGTGATGCCATCATTAAACGC	AGGTCTGTGACTGTTCTTCAACAA
<i>EF1α</i>	GCAGGTACTACGTCACCATCAT	CACAATCAGCCTGAGATGTACC

1.5 数据分析

为使变量保持正态分布,实验数据首先经过对数变换,然后利用参数检验方法进行统计学分析.实验数据以平均值 ± 标准偏差 (mean ± SD) 表示并采用 GraphPad Prism5 软件的 Student's *t* test 与 One-way ANOVA 进行方差分析与显著性检验,若 *P* < 0.05 (以 * 表示),表示有显著性差异,若 *P* < 0.001 (以 *** 表示),表示有极显著性差异.

2 结果与分析

在野外实验中,不同位置河水对鱼鳃 *CYP1* 基因表达有明显诱导作用(图 1、2). 诱导性最强的是

CYP1A3,最弱的是 *CYP1C2*. 与实验对照组相比, *CYP1A1*、*1A3*、*1B1* 表达明显增加,差异均有显著性 (* * * *P* < 0.001). 比较鱼鳃 *CYP1* mRNA 表达模式在不同实验笼放置位置,葛沽与入海口有相似的表达模式,除了入海口 *CYP1C2* 没有产生诱导反应;虽然表达模式相近似,但是反应级别有所不同,在葛沽检测位置 *CYP1* mRNA 表达低于入海口位置. 在葛沽的反应模式与入海口、马厂减河存在部分相似. 与其他位置相比较,马厂减河 *CYP1C* 没有受暴露实验而产生的诱导作用. 为了明确数据是否受到运输过程影响,实验比较了虹鳟鱼运输前后(在虹鳟鱼孵化场及暂存实验室) *CYP1* 基因表达量变化;

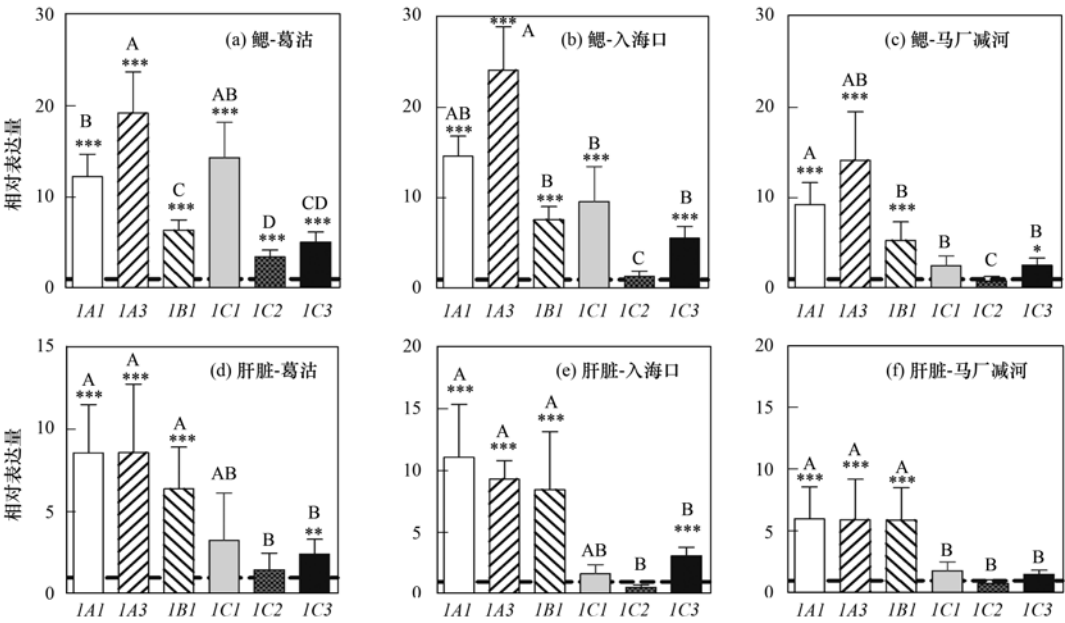
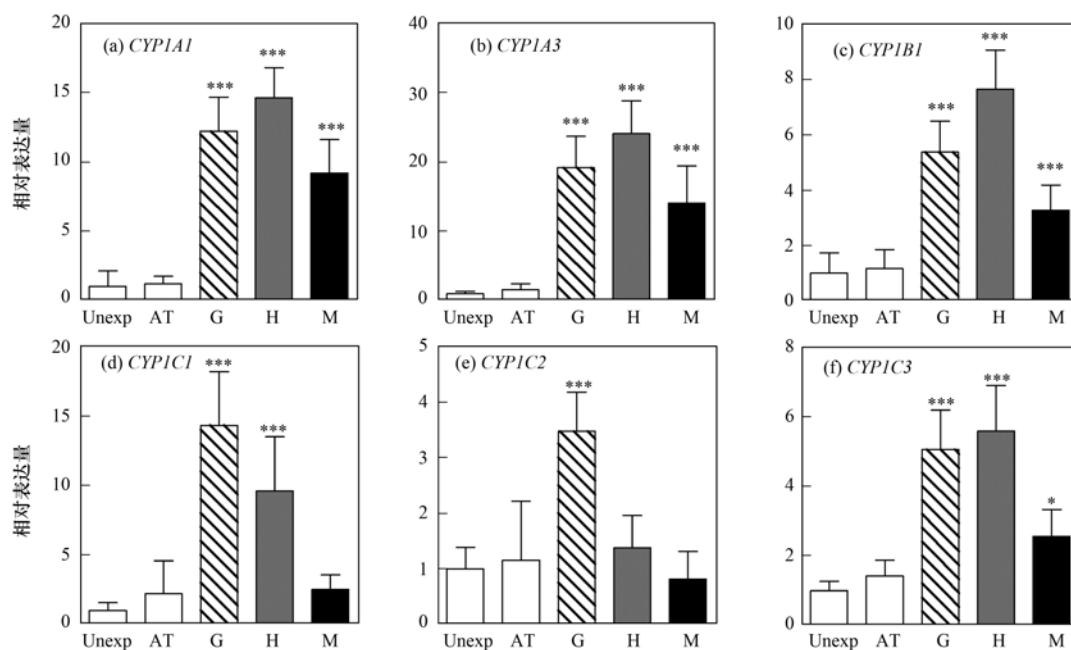


图 1 在不同监测点位虹鳟鱼鳃及肝脏相对 *CYP1A* mRNA 表达水平

Fig. 1 Relative *CYP1s* mRNA expression patterns in gills and liver of rainbow trout



虹鳟鱼 ($N=6$) 悬挂在不同点位进行野外监测实验选取 *ER1 α* 作为内源参照基因来确定鱼鳃目标基因的相对表达量, 暂存实验室虹鳟鱼 (实验对照组) 作为参照因子; 利用 one way ANOVA 进行差异显著性分析, 使用 Bonferroni's post hoc 算法比较不同基因与实验对照组相应基因的差异

图2 虹鳟鱼鳃 *CYP1A*、*CYP1B*、*CYP1C* 亚家族 mRNA 表达模式

Fig. 2 The mRNA expression patterns for *CYP1A*, *CYP1B*, *CYP1C* subfamily genes in gills of rainbow trout

结果显示, 所测基因表达量没有受到运输过程影响 (图2)。

在不同监测位置, 肝脏 *CYP1* 表达差异性不大 (图1)。与实验对照组相比, *CYP1A1*、*1A3*、*1B1* 表达明显增加, 但3种 *CYP1C* 基因没有受河水影响而产生诱导效应。与鱼鳃中 *CYP1* 的相对表达量比较, 肝脏 *CYP1* 表达量低于鱼鳃。

3 讨论

在以鱼类鳃 *CYP1A* 为生物标志物进行的野外监测实验中, 有两种方法被广泛应用, 一种是直接在实验海区采集受试鱼类, 这种方法有监测时间快的优点, 但存在捕获的鱼类种类、来源不确定性和个体、年龄大小难于统一的缺点。另外一种方法是将监测鱼类悬挂在特定污染海区进行野外监测实验, 这种方法需要购买和暂养监测鱼类, 但能够更好地反映特定监测海域的污染生物效应状况^[23]。本研究采用了后者的实验方法。

鱼鳃作为直接暴露于水环境的组织, 在石油类污染发生的第一时间与污染物直接接触, 而鳃丝中存在的 *CYP1* 酶对环境有机污染物反应灵敏, 可在短时间、低浓度的污染物暴露条件下就受到显著诱导^[7, 24, 25]。因此, 利用鱼类鳃丝 *CYP1* 的变化量检

测方法可应用于监测水质污染及其生化效应状况。例如, 在国际上, Abrahamson 等^[7, 26] 利用虹鳟和鲑鱼进行水环境 PAHs 污染监测和石油污染海区的实地监测。其研究结果显示: 虹鳟鳃丝 *CYP1A* 在污染水域暴露 1 d 后即可显著诱导, 在 PAHs 浓度较高的排污口附近水域挂养的受试虹鳟鳃丝 *CYP1A* 活性高于排污口上游水域 15 km 处对照组的酶活性; 挂养在离石油钻井平台较近海域的鲑鱼鳃丝 EROD 活性 (7-乙氧基异吩噻唑-O-脱乙基酶, 其活性表示可评价对 *CYP1A1* 的诱导作用) 则显著高于离钻井平台较远的实验组的活性。在我国, *CYP1A* 蛋白表达量及其活性的在水环境污染及其效应监测中的应用研究也受到广泛关注, 霍传林等^[27] 报道了利用鱼肝 EROD 活性监测海洋环境 PCBs 污染的作用; 张玉生等^[23] 报道了石油类及其 PAHs 污染对褐菖鲉 (*Sebastiscus marmoratus*) 肝 *CYP1A* 表达的影响; 余铭恩^[28] 探讨了利用鱼肝微粒体 EROD 活性监测海洋环境石油类污染的可行性等。由此可见, *CYP1A* 的诱导表达可作为指示海洋环境中石油类及其 PAHs 等有机污染物污染的有效而敏感的生物标志物。本研究的实验结果也表明, 在不同监测位置河水中存在引起虹鳟鱼代谢解毒系统响应的污染物, 造成一定的毒性效应, 应引起重视。

实验中还发现 *CYP1A* 在肝脏中的表达量比鱼鳃中要低,表明水中很可能含有容易被降解的物质,例如 PAHs。此前的实验证明一些 PAH 既是 *CYP1A/1B* 的诱导物也是其作用的底物。Jönsson 等^[25, 29]曾经证明虹鳟鱼吸收的苯并[a]芘在鳃组织中会产生首过效应,即只有一部分被鳃吸收苯并[a]芘可以到达肝脏组织。另一方面,Brummell 等^[30]曾调查了生产 PCB 工厂废水对虹鳟鱼的影响。结果发现,在肯塔基州泥河流域距离 PCB 工厂排污口 2 km 区域挂养的受试虹鳟鱼肝脏 *CYP1A1* 表达量比对照组显著升高,而鳃丝 *CYP1A1* 的表达量很低。可以看出,在泥河挂养的受试虹鳟鱼主要暴露于不易于降解的 PCB,而在乌普萨拉区域的受试虹鳟鱼主要暴露于 PAH,由此可以推断,鳃丝与肝脏中不同的反应模式是由诱导物的代谢难易差异造成的。

虹鳟鱼 *CYP1C* 基因是近年来发现细胞色素 P450 家族中的新成员,但相关领域的研究开展甚少,目前还不能明确其他 3 种被克隆的 cDNA 所编码的蛋白是否像 *CYP1A* 一样有着与 EROD 的高相关性。从野外监测实验的结果表明,鳃丝 *CYP1C1* 与 *CYP1A1* 的表达量有着很高的相近性。*CYP1C1* 与 *CYP1C3* 表达模式的相似性高于 *CYP1C1/C3* 与 *CYP1C2* 之间的相似性。Jönsson 等^[25]利用虹鳟鱼进行 PCB126 污染物水体暴露实验研究表明, *CYP1A* 与 *CYP1C1* 的表达模式非常相似;但进行野外监测实验时,发现不同 *CYP1C* 亚家族的表达模式有明显不同。本实验的结果表明,在不同监测位点中,葛沽与入海口的 6 种 *CYP1* 基因表达模式很相近,但表达量不同,有可能是由于水中污染物负荷不同造成,表明海河入海口的受污染程度更高。此外, *CYP1C1/C3* 在葛沽与入海口受到明显诱导作用,但在马厂减河却不然,表明马厂减河中存在的污染物种类不同于其它监测位点。

4 结论

综上所述,本实验利用虹鳟鱼鳃丝与肝脏多种 *CYP1* 基因的表达模式用于现场水域污染监测中,为水质混合污染物生物监测工作提出了一种新的方法。通过对虹鳟鱼的 6 个 *CYP1* 基因在不同监测区域 mRNA 的监测,发现所有基因均可被诱导,其中 *CYP1A1*、*1A3* 和 *1C1* 基因的反应最敏感,而基因最高诱导率出现在海河入海口处。在马厂减河水域中 *CYP1* mRNA 的反应规律显著不同于在其他两地得

到的结果,说明在这两处存在不同的 *CYP1* 诱导剂/抑制剂。下一步将建立并解释化学混合物成分与生物反应模式之间关系,对单体以及复合污染物产生的生物效应进行归纳,为不同水域污染早期评价方法提供基础理论依据。

参考文献:

- [1] Denison M S, Pandini A, Nagy S R, *et al.* Ligand binding and activation of the Ah receptor [J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2002, **141**(1-2): 3-24.
- [2] Williams T D, Wu H F, Santos E M, *et al.* Hepatic Transcriptomic and Metabolomic Responses in the Stickleback (*Gasterosteus aculeatus*) Exposed to Environmentally Relevant Concentrations of Dibenanthracene [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(16): 6341-6348.
- [3] 许友卿, 张青红, 张茜, 等. 对多氯联苯敏感的水生动物生物标志物 [J]. *水产科学*, 2015, **34**(1): 66-70.
- [4] Mandal P K. Dioxin: a review of its environmental effects and its aryl hydrocarbon receptor biology [J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 2005, **175**(4): 221-230.
- [5] Whitlock J P Jr. Induction of cytochrome p4501A1 [J]. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, 1999, **39**: 103-125.
- [6] 林茂, 杨先乐, 纪荣兴. 草鱼体外培养细胞中 β -萘黄酮对 *CYP1A* 基因表达的诱导 [J]. *水产学报*, 2010, **34**(6): 885-890.
- [7] Abrahamson A, Andersson C, Jönsson M E, *et al.* Gill EROD in monitoring of *CYP1A* inducers in fish-A study in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) caged in Stockholm and Uppsala waters [J]. *Aquatic Toxicology*, 2007, **85**(1): 1-8.
- [8] Leaver M J, George S G. A cytochrome P4501B gene from a fish, *Pleuronectes platessa* [J]. *Gene*, 2000, **256**(1-2): 83-91.
- [9] Godard C A J, Goldstone J V, Said M R, *et al.* The new vertebrate *CYP1C* family: Cloning of new subfamily members and phylogenetic analysis [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2005, **331**(4): 1016-1024.
- [10] Goldstone J V, Jönsson M E, Behrendt L, *et al.* Cytochrome P450 1D1: A novel *CYP1A*-related gene that is not transcriptionally activated by PCB126 or TCDD [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2009, **482**(1-2): 7-16.
- [11] Jönsson M E, Jenny M J, Woodin B R, *et al.* Role of AHR2 in the expression of novel cytochrome p450 1 family genes, cell cycle genes, and morphological defects in developing zebra fish exposed to 3, 3', 4, 4', 5-pentachlorobiphenyl or 2, 3, 7, 8-tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin [J]. *Toxicological Sciences*, 2007, **100**(1): 180-193.
- [12] Råbergh C M I, Vrolijk N H, Lipsky M M, *et al.* Differential expression of two *CYP1A* genes in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2000, **165**(3): 195-205.
- [13] Berndtson A K, Chen T T. 2 Unique *CYP1* genes are expressed in response to 3-methylcholanthrene treatment in rainbow trout

- [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1994, **310**(1): 187-195.
- [14] Denison M S, Nagy S R. Activation of the aryl hydrocarbon receptor by structurally diverse exogenous and endogenous chemicals [J]. Annual Review of Pharmacology and Toxicology, 2003, **43**(1): 309-334.
- [15] Jönsson M E, Orrego R, Woodin B R, *et al.* Basal and 3,3',4,4',5-pentachlorobiphenyl-induced expression of cytochrome P450 1A, 1B and 1C genes in zebrafish [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2007, **221**(1): 29-41.
- [16] Wang L, Scheffler B E, Willett K L. CYP1C1 messenger RNA expression is inducible by benzo[a]pyrene in *Fundulus heteroclitus* embryos and adults [J]. Toxicological Sciences, 2006, **93**(2): 331-340.
- [17] Zanette J, Jenny M J, Goldstone J V, *et al.* New cytochrome P450 1B1, 1C2 and 1D1 genes in the killifish *Fundulus heteroclitus*: Basal expression and response of five killifish *CYP1s* to the AHR agonist PCB126 [J]. Aquatic Toxicology, 2009, **93**(4): 234-243.
- [18] Uno Y, Uehara S, Murayama N, *et al.* *CYP1D1*, pseudogenized in human, is expressed and encodes a functional drug-metabolizing enzyme in cynomolgus monkey [J]. Biochemical Pharmacology, 2010, **81**(3): 442-450.
- [19] Livak K J, Schmittgen T D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta CT}$ Method [J]. Methods, 2001, **25**(4): 402-408.
- [20] Schmittgen T D, Livak K J. Analyzing real-time PCR data by the comparative C_T method [J]. Nature Protocols, 2008, **3**(6): 1101-1108.
- [21] Ramakers C, Ruijter J M, Deprez R H L, *et al.* Assumption-free analysis of quantitative real-time polymerase chain reaction (PCR) data [J]. Neuroscience Letters, 2003, **339**(1): 62-66.
- [22] Ruijter J M, Ramakers C, Hoogaars W M H, *et al.* Amplification efficiency: linking baseline and bias in the analysis of quantitative PCR data [J]. Nucleic Acids Research, 2009, **37**(6): e45.
- [23] 张玉生, 郑榕辉, 陈清福. 褐菖鲉肝 CYP 1A 作为生物标志物监测厦门海域石油污染状况 [J]. 生态学报, 2011, **31**(19): 5851-5859.
- [24] Mdegela R, Myburgh J, Correia D, *et al.* Evaluation of the gill filament-based EROD assay in African sharptooth catfish (*Clarias gariepinus*) as a monitoring tool for waterborne PAH-type contaminants [J]. Ecotoxicology, 2006, **15**(1): 51-59.
- [25] Jönsson E M, Abrahamson A, Brunström B, *et al.* Cytochrome P4501A induction in rainbow trout gills and liver following exposure to waterborne indigo, benzo[a]pyrene and 3,3',4,4',5-pentachlorobiphenyl [J]. Aquatic Toxicology, 2006, **79**(3): 226-232.
- [26] Abrahamson A, Brandt I, Brunström B, *et al.* Monitoring contaminants from oil production at sea by measuring gill EROD activity in Atlantic cod (*Gadus morhua*) [J]. Environmental Pollution, 2008, **153**(1): 169-175.
- [27] 霍传林, 王菊英, 韩庚辰, 等. 鱼体内 EROD 活性对多氯联苯类的指示作用 [J]. 海洋环境科学, 2002, **21**(1): 5-8.
- [28] 余铭恩. 褐菖鲉 (*Sebastiscus marmoratus*) 肝微粒体细胞色素 P-450 单加氧酶的研究——动力学反应条件、诱导和监测 [D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2003. 1-63.
- [29] Jönsson M E, Gao K, Olsson J A, *et al.* Induction patterns of new CYP1 genes in environmentally exposed rainbow trout [J]. Aquatic Toxicology, 2010, **98**(4): 311-321.
- [30] Brammell B F, McClain J S, Oris J T, *et al.* CYP1A expression in caged rainbow trout discriminates among sites with various degrees of polychlorinated biphenyl contamination [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2010, **58**(3): 772-782.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行