

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

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

基于过氧化物的消毒技术研究进展	习海玲, 赵三平, 周文 (1645)
环境损害评估: 国际制度及对中国的启示	张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)
不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示	徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)
蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展	张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)
基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究	刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)
我国东北地区地表水酸化现状	徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)
西安市对渭河水质的影响分析	于婕, 李怀恩 (1700)
极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究	叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)
应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准	韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)
长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法	蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)
温州城市降雨径流中BOD ₅ 和COD污染特征及其初始冲刷效应	王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)
影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究	余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)
香溪河库湾春季pCO ₂ 与浮游植物生物量的关系	袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)
紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究	雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 朱芳 (1761)
高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究	马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)
纳米Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ 非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚	何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)
水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究	马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锐, 周丽华, 谢成屏 (1782)
酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究	康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)
镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究	柳王荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)
基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法	金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)
不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究	万金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)
壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果	张聪璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)
城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究	孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)
倒置A ² /O-MBR处理城市污水的中试研究	张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)
不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究	袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)
短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N ₂ O释放特性	梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)
基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化	张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)
多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响	陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)
浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价	徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)
苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应	赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)
四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征	邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)
咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究	赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)
宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征	樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)
内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征	郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)
福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究	郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)
重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究	王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)
丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响	郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)
海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)
1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究	刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)
1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性	蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)
2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解	张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)
养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性	裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)
1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析	陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)
黄山降水酸度及电导率特征分析	石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)
夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析	文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)
广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征	谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)
福建省三大城市冬季PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)
上海市含碳大气颗粒物的粒径分布	袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘遂庆 (1995)
上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算	崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)
沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义	钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)
厦门秋季近郊地面CO ₂ 浓度变化特征研究	李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)
GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b	郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)
城市居家环境空气真菌群落结构特征研究	方治国, 欧阳志云, 刘芃, 孙力, 王小勇 (2031)
城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究	郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)
内河多点分散码头大气污染叠加影响特征	刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)
义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究	刘瑞卿, 王钧伟 (2051)
基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究	谢元博, 李巍 (2057)
《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)	

多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响

陈春¹, 刘潇威¹, 郑顺安¹, 周启星^{2*}, 李松³

(1. 农业部环境保护科研监测所农业部产地环境与农产品安全重点开放实验室, 天津市农业环境与农产品安全重点开放实验室, 天津 300191; 2. 南开大学环境科学与工程学院环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室, 天津 300071; 3. 中国石油冀东油田公司油气集输公司, 唐山 063004)

摘要: 为了探讨蚯蚓特异性蛋白基因表达在监测多环麝香低水平长期暴露污染中的应用, 选择蚯蚓热休克蛋白(HSP70)、钙网蛋白(CRT)、亲环素 A(cyPA)、翻译控制肿瘤蛋白(TCTP)等代表性蛋白基因作为供试基因。采用自然土壤污染模拟实验, 基于 mRNA 表达分子水平, 研究吐纳麝香(AHTN)与佳乐麝香(HHCB)长期(28 d)污染胁迫对以上各特异性蛋白基因响应表达的影响。通过序列同源性比较与荧光定量 PCR 熔解曲线结果分析, 表明设计的引物适合供试基因 mRNA 表达水平的检测。染毒暴露 28 d 后, 当 AHTN 染毒浓度小于 $30 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 或 HHCB 浓度小于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 时, 蚯蚓 HSP70 基因表达水平无显著变化, 而 AHTN 浓度等于或大于 $30 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 HHCB 浓度等于或大于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 时, HSP70 基因表达水平呈显著下调趋势; 而各 AHTN 或 HHCB 浓度处理组中蚯蚓 CRT 基因显著上调表达; cyPA 和 TCTP 基因表达水平与对照组比较均无呈现显著性差异。研究结果表明, HSP70 与 CRT 等基因的响应表达有望成为表征多环麝香土壤污染暴露水平及生态毒理效应的潜在生物标志物。

关键词: 特异性蛋白; 基因表达; 吐纳麝香; 佳乐麝香; 赤子爱胜蚓

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1857-07

Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm *Eisenia fetida*

CHEN Chun¹, LIU Xiao-wei¹, ZHENG Shun-an¹, ZHOU Qi-xing², LI Song³

(1. Key Laboratory of Production Environment and Agro-product Safety (Ministry of Agriculture), Tianjin Key Laboratory of Agro-environment and Agro-product Safety, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 2. Key Laboratory of Environmental Pollution Process and Criteria (Ministry of Education), Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3. Petrochina Jidong Oilfield Company, Tangshan 063004, China)

Abstract: To investigate the changes in gene expression of earthworm specific proteins following long-term exposure to low-dose polycyclic musks in soil, the mRNA expression levels of the four representative protein-coding genes (HSP70, CRT, cyPA, TCTP) were examined in earthworm *Eisenia fetida* exposed to polycyclic musks using real-time quantitative PCR (RT-qPCR). The purpose of this study was to investigate mRNA expression profiles of test protein genes in response to sublethal galaxolide (HHCB) and tonalide (AHTN) for 28 d exposure. The analysis results of both sequence alignment and melting curves of RT-qPCR reactions showed that the selected primers were appropriately qualified for quantitative mRNA analysis. mRNA expressions of HSP70 gene were not significantly changed in *Eisenia fetida* exposed to low concentrations of AHTN (less than $30 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) and HHCB (less than $50 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). But HSP70 gene expressions were significantly down-regulated at concentrations of AHTN or HHCB equal to or greater than 30 or 50 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. However, up-regulation of CRT gene expressions was induced in response to all test concentrations of AHTN and HHCB. Both cyPA and TCTP gene expressions were not varied compared to control groups after 28 days of exposure. Overall, the results indicated that HSP70 and CRT genes expression patterns might be potential early molecular biomarkers for predicting the harmful exposure level and ecotoxicological effects of polycyclic musks contaminated soil.

Key words: specific proteins; gene expression; tonalide (AHTN); galaxolide (HHCB); *Eisenia fetida*

多环麝香作为天然麝香的廉价替代物被广泛应用于日用化工行业, 由于它们持续不断地释放至环境中, 其产生的生态风险已引起各国政府和科学界的高度重视。其中, 吐纳麝香(AHTN)和佳乐麝香(HHCB)作为目前市场占有份额与使用量最多的两种多环麝香, 近年来在海洋哺乳动物、鱼类以及虾贝类等水生生物体内被陆续检测出^[1,2]。研究已发

现多环麝香对水生生物具有亚急性毒性、弱雌激素与抗雌激素效应、以及抑制多种药物/多种异型生

收稿日期: 2012-08-19; 修订日期: 2012-10-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(21037002); 高等学校科技创新工程重大项目培育资金(707011)

作者简介: 陈春(1980~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为环境化学与环境毒理学, E-mail: chennchun@yahoo.com

* 通讯联系人, E-mail: zhouqx@nankai.edu.cn

物质的外向转运蛋白效应等毒性效应^[3,4]。

众所周知,土壤不仅是生态环境的重要组成部分,也是环境污染物的主要受体。AHTN 和 HHCB 等多环麝香类物质可通过污水灌溉、污泥农田施用等多种途径不断输入土壤中,从而加剧其对土壤生物的污染暴露水平;并且由于多环麝香亲脂性较强,可持久性存在于土壤^[5]。但是,多环麝香土壤生态毒理效应的研究还仅局限于急性与亚急性毒性等^[6,7]。蚯蚓作为土壤生态系统食物链传递最底端生物,通常被选择为土壤生态毒理学领域中的优先指示物种,并且蚯蚓毒理学响应可用于表征和评估环境污染物的暴露水平及其土壤生态风险^[8]。

热休克蛋白(heat shock protein, HSP)是一种普遍存在于所有生物体中高度保守的应激表达蛋白,在防御蛋白质降解、恢复损伤蛋白质和细胞保护抗凋亡等方面发挥着主要功能。其中 HSP70 是 HSP 家族中最保守和最重要的一类应激蛋白,其自身表达水平与生物体受环境胁迫时细胞组织损伤及自身防御能力关系密切^[9]。钙网蛋白(calretuculin, CRT)是动物和高等植物体内普遍存在且高度保守的一种内质网钙结合蛋白,具有维系细胞 Ca^{2+} 稳态、调节蛋白质折叠和细胞凋亡等多种生物学功能^[10]。Šilerová 等^[11]首次克隆蚯蚓 *Eisenia fetida* 的 CRT 基因并鉴定其生物功能。亲环素 A(cyclophilin A, cyPA)作为一类具有肽基脯氨酸顺反异构酶活性的免疫亲和素,主要参与免疫调节和信号转导,并发挥细胞因子的功能,在细胞生命活动中发挥重要作用,且对生物体炎症的发生、细胞凋亡等具有调控作用。翻译控制肿瘤蛋白(translationally controlled tumor protein, TCTP)最初发现于肿瘤组织,被认为是一个在翻译水平受到抑制的肿瘤相关蛋白,而后被发现是一种普遍存在并且大量表达的蛋白,在进化上高度保守,主要参与细胞周期的调控,对肿瘤细胞增殖和凋亡具有双重作用。目前,关于外源污染物暴露胁迫下蚯蚓特异性蛋白基因表达的研究还较为缺乏。鉴于污染物与生物体之间的相互作用始于分子水平^[12,13],因此,有必要开展分子水平上多环麝香土壤污染胁迫蚯蚓特异性蛋白基因响应表达的研究。

本研究以蚯蚓 HSP70、CRT、cyPA、TCTP 等胁迫蛋白类基因为主要对象,通过检测分析低剂量 AHTN 或 HHCB 长期暴露胁迫下各特异性蛋白基因在转录水平上的表达量,以期筛选出敏感分子生物标志物,应用于多环麝香污染土壤中亚急性毒性

效应的早期分子诊断和生态风险评价中。

1 材料与方法

1.1 供试污染物和供试动物

吐纳麝香(7-乙酰基-1,1,3,4,4,6-六甲基-1,2,3,4-四氢萘,AHTN)购自上海力智生化科技有限公司,纯度 99%;佳乐麝香(1,3,4,6,7,8-六氢-4,6,6,7,8,8-六甲基环五-γ-2-苯并吡喃,HHCB)购自天津中科健化工有限公司,纯度 99%。

毒理实验中采用的蚯蚓为赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*),是国际标准毒理试验模式生物之一,购自南开大学教研基地天津芦台贾立明蚯蚓养殖场。选择 2~3 个月龄、有明显生殖环带、体重为 400~450 mg 的已筛选驯化后的成年蚯蚓作为供试受体生物。

1.2 实验方法

1.2.1 蚯蚓特异性蛋白基因 mRNA 表达的 RT-qPCR 检测

按照试剂盒说明书 Trizol 法提取蚯蚓总 RNA^[14]。取 1 μg 总 RNA,采用逆转录酶 ReverTra Ace-a-(Toyobo,日本)合成 cDNA。根据 GenBank 已发表的蚯蚓 HSP70、CRT、TCTP、cyPA 等基因 cDNA 序列信息,采用 Primer Express 3.0 设计 RT-qPCR 扩增引物(表 1)。RT-qPCR 扩增反应体系为 20 μL ,其中 SYBR Green I Mix (Bio-rad,美国)10 μL , ddH_2O 6.4 μL ,上下游引物(10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)各 0.8 μL ,cDNA 2.0 μL 。反应条件为 95 $^{\circ}\text{C}$ 预变性 2 min,45 个循环(95 $^{\circ}\text{C}$ 变性 15 s,55 $^{\circ}\text{C}$ 退火 30 s,72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸采集荧光信号 30 s)。PCR 反应结束后熔解曲线分析:95 $^{\circ}\text{C}$ 1 min;60 $^{\circ}\text{C}$ 1 min,60 $^{\circ}\text{C}$ 30 s 后,温度 0.5 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 递升至 95 $^{\circ}\text{C}$ 结束。PCR 产物经纯化、连接转化、克隆筛选等操作步骤,任选 3 个重组质粒由北京华大基因公司测序。采用 NCBI 数据库中 Blast X 程序将供试基因与已发表基因间序列进行同源性比较。

1.2.2 AHTN 或 HHCB 28 d 暴露胁迫下蚯蚓特异性蛋白基因表达

供试自然土壤取自天津塘沽森林公园,为未受工农业污染的洁净表层土壤(0~20 cm),风干后过 2 mm 筛待用,土壤理化性状、污染物土壤背景值以及土壤染毒与配制具体方法见笔者前期研究^[7]。根据 AHTN 与 HHCB 土壤亚急性毒性的效应浓度^[7],土壤长期暴露实验染毒浓度设置 5 个梯度水平,分别为 3、10、30、50 和 100 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。早期研究表明^[17],丙酮经过充分挥发后对蚯蚓几乎无毒性影

表 1 供试基因 PCR 引物序列及目的序列片段大小
Table 1 Primers sequences and lengths of amplified fragments

基因	登录号	上游引物	下游引物	PCR 产物大小/bp
β-actin ¹⁾	GU177854	TCCATCGTCCACAGAAAG	AAATGTCCTCCGCAAGCT	149
HSP70 ¹⁾	GU177858	CCAAGGACAACAACCTGCTC	CGGCGTTCTTCACCATTC	219
CRT ²⁾	GU177862	GCCGAACCGACTACCTAC	GGCTGAGATGCCGTAAAA	186
cyPA ³⁾	GU177861	CGATGGAAGTGGTGAAA	GCGGTGCAGATGAAGAAC	141
TCTP ¹⁾	GU177860	TCGAATATGCCCTCAGCA	TGGACTCGCCACAGAAGA	183

1) 引物设计参考文献[15]; 2) 引物设计参考文献[11]; 3) 引物设计参考文献[16]

响,而且去离子水与丙酮对照组中基因表达水平无差异变化,因此,本研究仅设置丙酮试剂空白作为对照组. 每个浓度处理组与对照组均设置 4 个平行. 暴露 28 d 结束后,分别于各处理组中任意挑选 4 条蚯蚓,即每条蚯蚓作为一个待测样品,重复 4 次,进行基因表达水平的定量分析.

1.2.3 数据处理与分析

以 β-actin 作为持家基因,对各供试目的基因 mRNA 表达水平进行定量分析,具体方法采用基因表达值法 (gene expression ratio) [18]:

$$R = \frac{(E_{tar})^{C_{i tar}}}{(E_{ref})^{C_{i ref}}}$$

式中, C_i 值为荧光信号达到设定阈值时所经历的循环数; E_{ref} 、 E_{tar} 分别为持家基因与目的基因的 PCR 扩增效率. R 为处理组中目的基因经校正后的表达比值 (expression ratio), 即基因表达水平的相对定量结果. 将暴露 0 h 丙酮对照组中各目的基因的表达水平设为 1.0, 处理组中基因 mRNA 表达量均以相对于对照组的倍数表示.

基因表达数据以平均值 ± 标准偏差 (mean ± SD) 的方式表示. 数理统计均采用 SPSS 13.0 软件包分析. 不同处理组间的比较采用单因素方差分析 (ANOVA), 多重比较采用 Duncan 法, 显著性差异水平为 $P < 0.05$.

2 结果与分析

2.1 蚯蚓总 RNA 的纯度与完整度

由图 1 可见,蚯蚓总 RNA 完整性较好,其 28 S 与 18 S 条带清晰; 并且 RNA 的 A_{260}/A_{280} 比值均在 1.8 ~ 2.0 之间,表明抽提的总 RNA 纯度较高. 因此,Trizol 法提取 RNA 可满足 cDNA 合成和 RT-qPCR 反应需求.

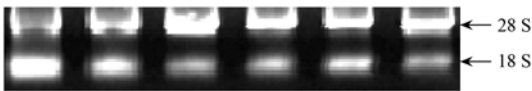


图 1 蚯蚓总 RNA 电泳图谱

Fig. 1 Electrophoresis image of total RNA extracted from earthworms

2.2 RT-qPCR 引物设计合理性的验证

通过测序比对结果可知 (表 2), 供试基因分别与已收录的 HSP70、CRT、cyPA 和 TCTP 基因序列信息高度相似,表明 RT-qPCR 引物的设计可满足目的供试基因片段扩增检测要求. 各供试基因的熔解曲线皆为特异的单个峰 (图 2), 没有出现引物二聚体与非特异性扩增,更加说明本研究引物设计以及 RT-qPCR 反应体系条件的建立适用于供试基因的特异性检测.

2.3 AHTN、HHCB 28 d 暴露胁迫下蚯蚓特异性蛋白基因 mRNA 的响应表达

表 2 供试基因与 NCBI 已发表的蚯蚓基因或其他物种基因的同源性比较

Table 2 Homology search result by BlastX algorithm of NCBI for cDNA fragments obtained by RT-PCR with gene specific primers

基因	物种	比对序列信息	一致性/%	相似性/%
HSP70 (GU177858)	蚯蚓 <i>Lumbricus terrestris</i>	HSP70 (DQ286711)	100	100
	蚯蚓 <i>Lumbricus terrestris</i>	HSP 70 (EU407499)	99	100
	蚯蚓 <i>Lumbricus rubellus</i>	HSP 70 (EU407493)	99	100
CRT (GU177862)	蚯蚓 <i>Eisenia fetida</i>	CRT (DQ887090)	95	100
cyPA (GU177861)	欧洲医蛭 <i>Hirudo medicinalis</i>	cyPA (U36797)	96	96
TCTP (GU177860)	蚯蚓 <i>Lumbricus rubellus</i>	TCTP (Y08158)	100	100
	蚯蚓 <i>Lumbricus terrestris</i>	TCTP (EU407498)	98	100
	蚯蚓 <i>Eisenia fetida</i>	CAT (DQ286721)	98	98

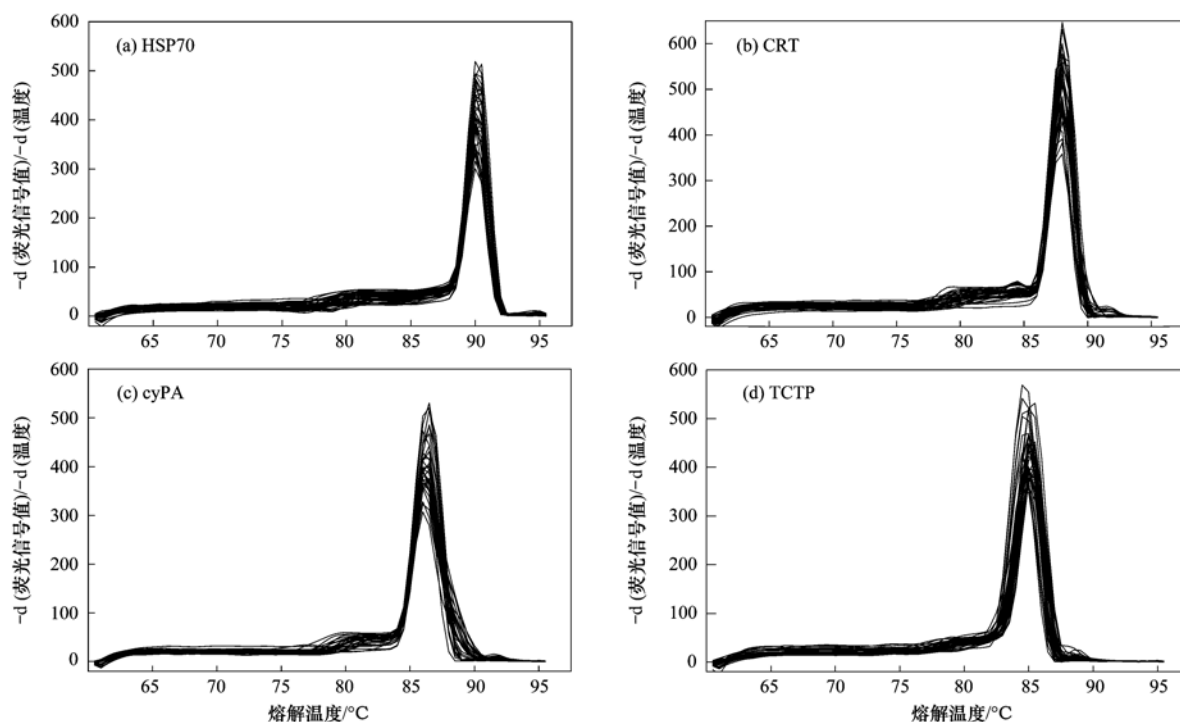


图2 目的基因 HSP70、CRT、cyPA 和 TCTP 的 RT-qPCR 的熔解曲线分析

Fig. 2 Melt curve analysis of the RT-qPCR products of target genes HSP70, CRT, cyPA and TCTP

暴露于 AHTN 或 HHCB 污染土壤 28 d 后,蚯蚓各目的基因 HSP70、CRT、cyPA 和 TCTP mRNA 表达变化趋势如图 3 所示. 当蚯蚓暴露于较低染毒剂量的 AHTN ($3 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $10 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 或 HHCB (3 、 10 和 $30 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 处理组时,其 HSP70 基因表达水平无明显变化;而暴露于较高浓度 AHTN (30 、 50 和 $100 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 或 HHCB ($50 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $100 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 处理组时,HSP70 基因表达水平分别较对照组水平显著下调 ($P < 0.05$). 总体而言,AHTN 或 HHCB 长期污染对 HSP70 基因表达水平均有显著下调抑制作用 ($P < 0.01$). 且 HSP70 基因表达水平与 AHTN 或 HHCB 暴露浓度呈负相关关系 (AHTN: $r = -0.829$; HHCB: $r = -0.717$, $P < 0.01$).

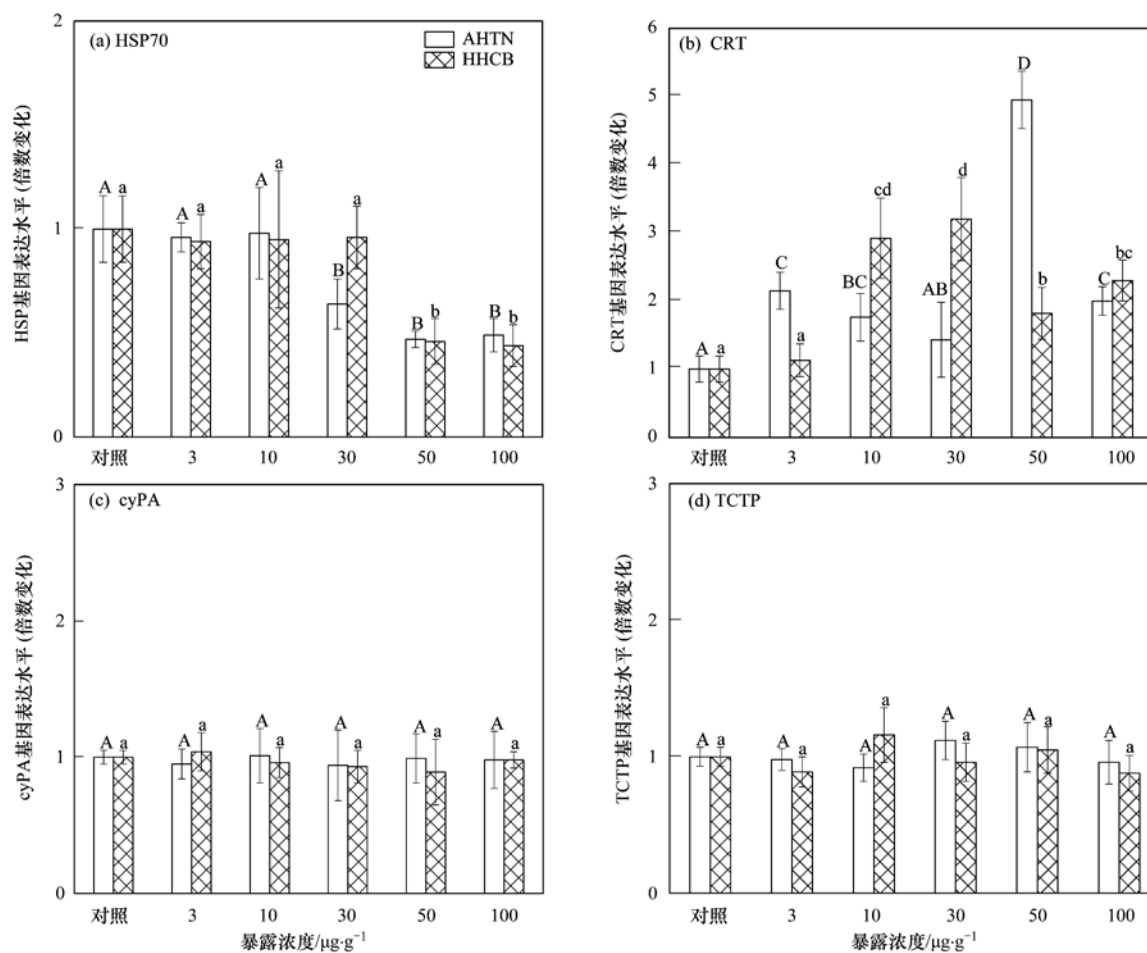
当蚯蚓暴露于 3 、 10 、 50 和 $100 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的 AHTN 污染土壤 28 d 后,CRT 基因表达量较对照组均显著性上调 ($P < 0.05$),分别为对照组水平的 2.2 、 1.8 、 5.0 和 2.0 倍. 10 、 30 、 50 和 $100 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ HHCB 暴露处理组中的 CRT 基因表达水平也均显著性上调 ($P < 0.05$),分别为对照组的 2.9 、 3.2 、 1.8 和 2.3 倍.

与对照组相比较,蚯蚓暴露于 AHTN 或 HHCB 污染土壤 28 d 后,各浓度处理组的 cyPA 和 TCTP 基因表达水平均无显著性差异 ($P > 0.05$).

3 讨论

目前,由于暂时无法完全获知污染物胁迫毒性作用的早期反应及真正靶位,于是难以对污染物的环境暴露水平与生态毒性效应给予准确、及时的预测评估,而以特定污染物所致生物体表达谱(基因或蛋白质水平表达)的改变作为污染物专一暴露的分子生物标记物,可以更加灵敏准确地对环境一些持久性有机污染物的生态安全性做出早期预警和监测评价^[19].

本研究发现暴露于高浓度 AHTN 或 HHCB 污染土壤 28 d 后,蚯蚓 HSP70 基因表达水平受到显著抑制;与之前滤纸急性毒性试验结果相一致,高浓度 AHTN 或 HHCB 滤纸接触染毒 48 h 后,蚯蚓 HSP70 基因下调表达,主要是由活性氧自由基引起的氧化应激水平所诱导^[17]. 此外,在某些水生毒理学研究中也发现 HSP70 下调表达的现象. Lee 等^[20] 研究发现四氯化碳、杀螟硫磷、壬基苯酚等污染物可抑制水生生物摇蚊幼虫 *Chironomus tentans* 的 HSP70 基因表达. Rhee 等发现壬基酚、辛基酚等胁迫下 HSP70 基因表达表现为下调抑制,而双酚 A 暴露则会诱导 HSP70 基因上调表达,认为其原因是不同种类分泌干扰物暴露胁迫对 HSP70 基因表达方



不同大写字母表示 AHTN 暴露浓度处理组之间存在显著差异 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示 HHCB 暴露浓度处理组之间存在显著差异 ($P < 0.05$)

图3 AHTN 或 HHCB 污染暴露 28 d 对蚯蚓 HSP70、CRT、TCTP 和 cyPA 基因表达的影响

Fig. 3 Gene expression levels of HSP70, CRT, TCTP and cyPA in the control and AHTN or HHCB exposed earthworms after 28-day exposure

式可能存在差异^[21].

蚯蚓 CRT 基因表达水平在 AHTN 或 HHCB 土壤污染胁迫下表现为显著诱导上调,其原因可能是 CRT 为了行使“分子伴侣”的生理功能或维系机体内 Ca^{2+} 动态平衡而激发诱导 CRT 基因表达^[22]. CRT 基因的上调表达也是生物体应对氧化应激压力的响应方式,是为了防御或降低细胞氧化应激损伤效应. 多环麝香污染胁迫引起的蚯蚓体内活性氧自由基累积,可以起脂质过氧化并导致内质网的损伤,从而诱导蚯蚓机体内 Ca^{2+} 水平的迅速提升,而 CRT 作为 Ca^{2+} 的调控基因则表现位持续的上调表达^[23].

不同种类外源污染物暴露胁迫对 cyPA 基因表达方式并没有表现出一定的规律. Stürzenbaum 等^[24]研究发现暴露于 Cd、Pb、Zn、Cu 等混合重金属污染土壤 6 周后,蚯蚓 *L. rubellus* 的 cyPA 基因表

达水平显著增加;而 Brulle 等^[16]研究认为 Cd 土壤暴露 6 d 后,蚯蚓 *E. fetida* 的 cyPA 基因表达却被抑制显著下调. 本研究结果显示 AHTN 和 HHCB 长期 (28 d) 污染暴露对蚯蚓 cyPA 基因表达无显著性影响. 因此, cyPA 基因尚且不具备作为分子生物标志物的特征,不适合用于多环麝香生态毒理效应的分子诊断. Api 等^[25]早期研究认为,多环麝香 AHTN 或 HHCB 不具备遗传毒性致癌物的一些基本特性. 本研究也发现,在 AHTN 或 HHCB 污染土壤长期暴露下,蚯蚓翻译控制肿瘤蛋白基因 (TCTP) 的表达水平无显著性变化差异,从侧面说明了 AHTN 或 HHCB 没有显现可能致癌的特性.

综上所述, HSP70 mRNA 水平下调与 CRT mRNA 水平上调的响应表达是为了保护蚯蚓抵御自由基氧化应激损伤,两基因有望成为表征多环麝香土壤污染暴露水平及生态毒理效应的潜在生物标志

物. 考虑到分子毒理学研究中蚯蚓基因数据库信息相对较少, 对于具备潜在分子生物标志物特征的特异性基因, 还需要开展 cDNA 全序列克隆及其编码蛋白质的结构分析, 为丰富蚯蚓基因序列数据库和构建蚯蚓基因芯片检测平台奠定基础, 进而更有利于拓展多环麝香污染胁迫下高通量基因表达谱的研究. 今后, 还必须从生态毒理基因组学和蛋白质组学角度, 综合分析多环麝香污染物胁迫下蚯蚓特异性基因表达与调控的变化, 揭示多环麝香的毒理机制与毒性作用靶位, 从而构建多环麝香土壤污染早期预警的蚯蚓分子诊断技术体系.

4 结论

(1) RT-qPCR 引物的设计以及 PCR 反应体系条件的建立适用于各供试基因转录水平表达的特异性检测.

(2) AHTN 或 HHCB 土壤污染暴露胁迫下, 蚯蚓 HSP70 基因表达水平受到显著抑制, 而 CRT 基因表达水平显著诱导上调; cyPA 和 TCTP 基因表达水平无显著性变化.

(3) HSP70 与 CRT 两基因将有可能作为潜在生物标志物, 可应用于预测和评估土壤多环麝香污染水平及生态毒性效应.

参考文献:

- [1] Nakata H, Sasaki H, Takemura A, *et al.* Bioaccumulation, temporal trend, and geographical distribution of synthetic musks in the marine environment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(7): 2216-2222.
- [2] Wan Y, Wei Q W, Hu J Y, *et al.* Levels, tissue distribution, and age-related accumulation of synthetic musk fragrances in Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*): comparison to organochlorines [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(2): 424-430.
- [3] 周启星, 王美娥, 范飞, 等. 人工合成麝香的环境污染、生态行为与毒理效应研究进展[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(1): 1-11.
- [4] 李卓娜, 周群芳, 刘稷燕, 等. 多环麝香 (PCMs) 的环境行为及毒性效应[J]. *化学进展*, 2012, **24**(4): 606-615.
- [5] Litz N T, Muller J, Böhmer W. Occurrence of polycyclic musks in sewage sludge and their behaviour in soils and plants. Part 2: Investigation of polycyclic musks in soil and plants[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2007, **7**(1): 36-44.
- [6] Mori T, Morita F, Inokuchi A, *et al.* Ecotoxicological effect of polycyclic musks on *Caenorhabditis elegans* [J]. *Journal of Health Science*, 2006, **52**(3): 276-282.
- [7] 陈春, 周启星, 刘潇威, 等. 多环麝香对蚯蚓的急性和亚急性毒性效应[J]. *生态毒理学报*, 2012, **7**(4): 23-30.
- [8] 周启星, 王美娥. 土壤生态毒理学研究进展与展望[J]. *生态毒理学报*, 2006, **1**(1): 1-11.
- [9] 何珊, 梁旭方, 李观贵, 等. 鲢鱼、草鱼和尼罗罗非鱼热休克蛋白 70 基因 cDNA 全序列的克隆与分析[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(11): 2324-2330.
- [10] 洪超, 高晓明. 钙网蛋白的免疫生物学活性研究进展[J]. *生物物理学报*, 2012, **28**(8): 621-630.
- [11] Šilerová M, Kauschke E, Procházková P, *et al.* Characterization, molecular cloning and localization of calreticulin in *Eisenia fetida* earthworms[J]. *Gene*, 2007, **397**(1-2): 169-177.
- [12] 陈春, 周启星, 刘潇威. 抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2855-2861.
- [13] 程艳, 崔媛, 党志超, 等. 全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(6): 1865-1870.
- [14] 陈春, 周启星. 蚯蚓金属硫蛋白定量 PCR 检测方法及其分子诊断[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(8): 1377-1382.
- [15] Brulle F, Mitta G, Cocquerelle C, *et al.* Cloning and real-time PCR testing of 14 potential biomarkers in *Eisenia fetida* following cadmium exposure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(8): 2844-2850.
- [16] Brulle F, Mitta G, Leroux R, *et al.* The strong induction of metallothionein gene following cadmium exposure transiently affects the expression of many genes in *Eisenia fetida*: a trade-off mechanism? [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2007, **144**(4): 334-341.
- [17] Chen C, Zhou Q X, Liu S, *et al.* Acute toxicity, biochemical and gene expression responses of the earthworm *Eisenia fetida* exposed to polycyclic musks[J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(8): 1147-1154.
- [18] Quirós L, Piña B, Solé M, *et al.* Environmental monitoring by gene expression biomarkers in *Barbus graellsii*: laboratory and field studies[J]. *Chemosphere*, 2007, **67**(6): 1144-1154.
- [19] 戴家银, 王建设. 生态毒理基因组学和生态毒理蛋白质组学研究进展[J]. *生态学报*, 2006, **26**(3): 930-934.
- [20] Lee S M, Lee S B, Park C H, *et al.* Expression of heat shock protein and hemoglobin genes in *Chironomus tentans* (Diptera, chironomidae) larvae exposed to various environmental pollutants: a potential biomarker of freshwater monitoring[J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(6): 1074-1081.
- [21] Rhee J S, Raisuddin S, Lee K W, *et al.* Heat shock protein (Hsp) gene responses of the intertidal copepod *Tigriopus japonicus* to environmental toxicants [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2009, **149**(1): 104-112.
- [22] Luana W, Li F H, Wang B, *et al.* Molecular characteristics and expression analysis of calreticulin in Chinese shrimp *Fenneropenaeus chinensis* [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2007, **147**(3): 482-491.
- [23] Núñez M T, Osorio A, Tapia V, *et al.* Iron-induced oxidative stress up-regulates calreticulin levels in intestinal epithelial (Caco-2) cells[J]. *Journal of Cellular Biochemistry*, 2001, **82**

(4): 660-665.

- [24] Stürzenbaum S R, Morgan A J, Kille P. Characterisation and quantification of earthworm cyclophilins: identification of invariant and heavy metal responsive isoforms[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Gene Structure and Expression*, 1999,

1489(2-3): 467-473.

- [25] Api A M, Ford R A. Evaluation of the oral subchronic toxicity of HHCB (1, 3, 4, 6, 7, 8-hexahydro-4, 6, 6, 7, 8, 8-hexamethylcyclopenta- γ -2-benzopyran) in the rat[J]. *Toxicology Letters*, 1999, 111(1-2): 143-149.

第二届挥发性有机污染物(VOCs)检测分析、减排控制、 环境政策研究专辑征稿通知

挥发性有机物污染对生态、环境、健康产生了重要的影响,从国家层面上 VOCs 已经被列为重点控制的污染物,对挥发性有机污染物的减排与控制有着迫切的需求,有关挥发性有机污染的研究已经引起政府、地方、企业和科研人员密切的关注。

为了支持国家挥发性有机污染减排与控制,更好地促进与提高有关我国挥发性有机污染的科学研究,《环境科学》2011 年出版“挥发性有机污染物(VOCs)检测分析、减排控制、环境政策研究”专辑(中国科学院生态环境研究中心郝郑平研究员为专辑的特邀主编)。专辑出版后,引起了极大地反响和关注。

这一年多以来,我国挥发性有机污染的科学研究取得了一定进步与发展,不断有作者和相关部门希望能继续此专辑的编辑。为了继续支持我国未来 VOCs 减排和控制,进一步促进我国挥发性有机污染 VOCs 研究的发展和深入,《环境科学》计划 2013 年出版第二届挥发性有机污染物(VOCs)检测分析、减排控制、环境政策研究专辑(非增刊),邀请中国科学院生态环境研究中心郝郑平研究员为本专辑特邀主编,并开展挥发性有机污染 VOCs 研究优秀论文评选。现诚挚邀请国内外挥发性有机污染 VOCs 研究领域的专家、学者、技术人员踊跃投稿。

征文范围

- 1) 挥发性有机污染(VOCs)的监测与分析
- 2) 挥发性有机污染(VOCs)的排放与特征
- 3) 挥发性有机污染(VOCs)的控制与过程
- 4) 挥发性有机污染(VOCs)的控制技术与设备
- 5) 挥发性有机污染(VOCs)的反应与转化
- 6) 挥发性有机污染(VOCs)的减排模式与政策
- 7) 挥发性有机污染(VOCs)的其它研究内容

征文要求

- 1) 稿件参考《环境科学》已发表论文格式,文章以 Word 文档为附件发送至:hjkx@rcees.ac.cn,电子邮件主题为“VOCs 专辑+文章题目”。《环境科学》已发表文章范文可在网站 www.hjkx.ac.cn 首页点击下载。
- 2) 稿件参考文献后须注明通讯联系人和第一作者详细邮政地址,邮编,电话,手机,电子信箱等。
- 3) 只接受中文投稿文章;综述类文章,导师应为第一作者,不接受第一作者为学生的综述类投稿。
- 4) 特别说明:本专辑不是增刊,而是在《环境科学》2013 年下半年正刊上刊出。

重要日期

论文投稿截止日期:2013 年 7 月 1 日

联系方式

联系人:李老师

地址:北京市海淀区双清路 18 号生态中心《环境科学》编辑部

邮编:100085

电话:010-62941102

传真:010-62849343

E-mail:hjkx@rcees.ac.cn

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《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5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 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 行