

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

**2012**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究 ..... 郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)

基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究 ..... 罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)

湿地水环境健康评价方法及案例分析 ..... 李玉凤, 刘红玉, 郝敬锋, 郑因, 曹晓 (346)

北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价 ..... 单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)

漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别 ..... 徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)

黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用 ..... 安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)

沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响 ..... 李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)

沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响 ..... 王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)

长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 ..... 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)

洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究 ..... 张文斌, 余辉 (399)

降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析 ..... 彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)

浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响 ..... 刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)

基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数  $K_d$  (490) 估算及其遥感反演 ..... 刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)

基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究 ..... 张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)

好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化 ..... 李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)

邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响 ..... 别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)

Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究 ..... 蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)

羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究 ..... 白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)

天然菱铁矿改性及强化除砷研究 ..... 赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)

零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究 ..... 廖娣劫, 杨琦, 李俊琦 (469)

水体中氧氟沙星的光化学降解研究 ..... 邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)

阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究 ..... 季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)

吡啶在紫外光辐射下的生物降解 ..... 方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)

蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化 ..... 朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)

$\epsilon$ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究 ..... 曹玉娟, 张扬, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)

丝状菌污泥致密过程的强化条件研究 ..... 李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)

亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究 ..... 罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄毓, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)

我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究 ..... 李东玲, 吴焯, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)

北京市  $PM_{10}$  自动监测网络优化研究 ..... 齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)

道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究 ..... 徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)

$Fe^{II}$  (EDTA) 络合协同 RDB 去除  $NO$  废气效能及过程分析 ..... 陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)

UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响 ..... 宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)

干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性 ..... 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)

九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究 ..... 郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)

秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统  $CH_4$  通量特征及影响因素研究 ..... 姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)

我国典型非木浆造纸二噁英排放研究 ..... 王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)

典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布 ..... 邱孟德, 邓代永, 余乐洹, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)

电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征 ..... 王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)

北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险 ..... 彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)

上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价 ..... 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)

海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价 ..... 尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)

三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价 ..... 王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)

超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析 ..... 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)

大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究 ..... 赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)

不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究 ..... 尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)

应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测 ..... 朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)

软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化 ..... 王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)

固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素 ..... 洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)

五氟酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究 ..... 金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)

建筑陶瓷碳计量与优化模型研究 ..... 彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)

《环境科学》征订启事 (447) 《环境科学》征稿简则 (475) 信息 (524, 586, 605, 624)

# 邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响

别聪聪, 李锋民\*, 李媛媛, 王震宇

(中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100)

**摘要:** 为揭示邻苯二甲酸二丁酯(dibutyl phthalate, DBP)对短裸甲藻(*Gymnodinium breve*)的抑制机制, 采用荧光探针法和比色法研究了DBP对短裸甲藻活性氧(reactive oxygen species, ROS)、羟自由基·OH和过氧化氢 $H_2O_2$ 含量以及超氧阴离子自由基 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率的影响, 同时观察了电子传递链抑制剂对DBP诱导ROS能力的影响. 结果表明DBP诱导了短裸甲藻ROS的积累. 随浓度的增大, DBP促进了·OH、 $H_2O_2$ 的积累, 如 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的DBP处理组, 培养至48 h时·OH出现一个极大峰值 $33\text{ U}\cdot\text{mL}^{-1}$ , 约为对照组的2.4倍;  $H_2O_2$ 含量培养至72 h出现最大值, 约为 $250\text{ nmol}\cdot(10^7\text{ cells})^{-1}$ , 约为对照组的5倍; 但是DBP对 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率的影响并没有显示出规律性. 电子传递链选择性抑制实验表明DBP可能影响了藻细胞线粒体和细胞膜2个位点上电子传递, 使·OH、 $H_2O_2$ 含量和 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率受到了不同的影响, 最终诱导了短裸甲藻总ROS的积累. 可见, DBP导致ROS的过量积累是其抑制藻细胞生长的主要机制. 本研究结果对揭示化感物质抑制藻类的机制提供了科学依据.

**关键词:** 化感物质; 邻苯二甲酸二丁酯; 短裸甲藻; 抑制机制; 活性氧

**中图分类号:** X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)02-0442-06

## Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on *Gymnodinium breve* Reactive Oxygen Species

BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, WANG Zhen-yu

(College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The purpose of this study was to investigate the mechanism of inhibitory action of dibutyl phthalate (DBP) on red tide algae *Gymnodinium breve*. Reactive oxygen species (ROS) level, contents of ·OH and  $H_2O_2$ , and  $O_2^{\cdot-}$  production rate were investigated, and also for the effects of electron transfer inhibitors on the ROS induction of DBP. The results showed that DBP triggered the synthesis of reactive oxygen species ROS, and with the increase of concentration of DBP, ·OH and  $H_2O_2$  contents in cells accumulated, as for the  $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  DBP treated algae cultures, ·OH showed a peak of  $33\text{ U}\cdot\text{mL}^{-1}$  at 48 h, which was about 2.4 times higher than that in the controlled, and  $H_2O_2$  contents was about  $250\text{ nmol}\cdot(10^7\text{ cells})^{-1}$  at 72 h, which was about 5 times higher and also was the highest during the whole culture. Rotenone (an inhibitor of complex I in the mitochondria electron transport chain) decreased the DBP induced ROS production, and dicumarol (an inhibitor of the redox enzyme system in the plasma membrane) stimulated the DBP induced ROS production. Taken all together, the results demonstrated DBP induced over production of reactive oxygen species in *G. breve*, which is the main inhibitory mechanism, and mitochondria and plasma membrane seem to be the main target site of DBP. These conclusions were of scientific meaning on uncovering the inhibitory mechanism of allelochemical on algae.

**Key words:** allelochemical; dibutyl phthalate (DBP); *Gymnodinium breve*; inhibitory mechanism; reactive oxygen species (ROS)

随着人类工农业活动对海洋环境破坏的加剧, 近年来有害赤潮频繁发生、规模不断扩大, 造成了巨大的经济损失并威胁着人类的生存. 化感作用和化感物质作为一种新型且生态安全的环境友好型赤潮抑制方法在赤潮的防治研究中独树一帜, 引起了大量学者的关注<sup>[1]</sup>, 一些化感物质被分离鉴定<sup>[2]</sup>. 然而, 化感物质抑藻机制的复杂性和不确定性却限制了新型化感抑藻剂的研发和使用. 目前化感物质对藻的抑制机制研究大多关注化感物质产生作用后的结果表现, 如酶活性的变化<sup>[3]</sup>、氧化胁迫的产生<sup>[4,5]</sup>等. 尤其是氧化胁迫, 因为其易与多种外界影响因子的偶联而被关注, 但是化感物质是作用于某种蛋白质或络合了细胞物质, 还是直接影响了电子在线粒

体、叶绿体、膜等的传递而引起氧化胁迫, 这些并没有被进一步的探究. 总之, 化感物质抑藻机制的研究进展与化感物质抑藻剂实际应用之间的要求还相距甚远.

邻苯二甲酸二丁酯(dibutyl phthalate, DBP)是课题组在前期实验中从大型海藻孔石莼中分离鉴定出来的一种具有较强抑藻能力的化感物质, 其对短裸甲藻的半效应浓度值为 $1.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[6]</sup>. 短裸甲藻

收稿日期: 2011-04-06; 修订日期: 2011-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(40906053); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07010-008, 2009ZX07010-009)

作者简介: 别聪聪(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋环境生态学, E-mail: biecc@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: lfm01@ouc.edu.cn

是一种典型的有毒赤潮藻,能产生神经性贝毒导致人类中毒<sup>[7]</sup>.前期研究结果显示,DBP诱导了活性氧(reactive oxygen species, ROS)的积累,对藻细胞不同器官中的不同超氧化物歧化酶产生了不同的影响(已另文讨论),但是区分DBP诱导的氧化胁迫是原发性(直接影响了电子传递促进了ROS的积累)还是继发性(通过影响酶的结构或破坏酶的表达基因而影响酶的活性,打破了清除自由基的平衡体系)影响,对赤潮藻化感抑制剂的实际应用有十分重要的意义.因此本研究具体分析了DBP对不同ROS及ROS产生途径的影响,揭示DBP对短裸甲藻生长抑制的机制,以期为化感抑藻剂的应用提供理论基础和依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

短裸甲藻(*Gymnodinium breve*):自中国科学院海洋研究所获得,采用海水f/2培养基,于人工智能光照培养箱培养.培养条件:光暗比为14 h:10 h,昼夜温度为24℃和20℃,白天光照强度为8 000 lx.实验前预培养至指数生长期.

邻苯二甲酸二丁酯(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)、鱼藤酮(分析纯,美国Sigma-Aldrich)、敌草隆(分析纯,美国Sigma-Aldrich)采用丙酮溶解,双香豆素(分析纯,美国Sigma-Aldrich)采用三氯甲烷溶解.

### 1.2 研究方法

取生长状况良好、处于指数生长期的短裸甲藻液与已灭菌(121℃,20 min)的海水f/2培养基以体积比1:3混合摇匀.准确移取藻液到体积为500 mL的已灭菌锥形瓶中.

添加不同浓度的丙酮、三氯甲烷、抑制剂(鱼藤酮、敌草隆、双香豆素),藻液最终体积为300 mL,每个浓度设置3个重复.每隔24 h,取样计数藻密度,连续培养96 h,测定其对短裸甲藻的生长影响.

单独添加DBP、抑制剂或者提前加入抑制剂后再添加DBP,藻液最终体积为300 mL,每个浓度设置3个重复.测定藻细胞活性氧水平,同时计数藻密度.

### 1.3 分析测试方法

#### 1.3.1 丙酮、三氯甲烷、抑制剂对短裸甲藻生长的影响

每24 h采样1 mL,经Lugol's试剂固定后,用血球计数板在光学显微镜下(Nikon, YS-100)计数藻

细胞数量的变化.抑制率计算公式: $IR(\%) = (1 - N/N_0) \times 100\%$ ,式中 $N_0$ 为微藻单独培养时细胞密度(对照组), $N$ 是投加溶剂或抑制剂后的细胞密度(处理组).

#### 1.3.2 藻细胞ROS的测定

参照文献[8],按照活性氧检测试剂盒使用指导,采用分子荧光分光光度计(日立F4600,日本)在488 nm激发波长、525 nm发射波长的条件下测定荧光强度.荧光探针二氯荧光素双醋酸盐(DCFH-DA)本身无荧光,可以自由穿过细胞膜,进入细胞后,被酯酶水解生成还原型二氯荧光素(DCFH),而DCFH不能通透细胞膜,从而使探针很容易被装载到细胞内.细胞内的ROS可以氧化无荧光的DCFH生成有荧光的氧化型二氯荧光素(DCF).检测DCF的荧光强度就可以知道细胞内总ROS的水平.

#### 1.3.3 藻细胞羟自由基、过氧化氢和超氧阴离子自由基产生速率的测定

离心(3 381 g,4 min)收集藻细胞,加5 mL于4℃冰箱中预冷的 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲液(pH 7.8)(过氧化氢 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的测定加入丙酮),于超声波细胞破碎仪中超声破碎5 min(或 $10 \times 30 \text{ s}$ ),此为待测样品.

短裸甲藻细胞羟自由基·OH按照羟自由基测定试剂盒使用标准(南京建成)测定.每mL内 $10^6$ 个细胞使反应液中 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的浓度增加 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 为一个产生·OH能力单位.

短裸甲藻细胞超氧阴离子自由基 $\text{O}_2^-$ 产生速率的测定参照文献[9], $\text{O}_2^-$ 的产生速率 $[\text{nmol} \cdot (\text{min} \cdot \text{cell})^{-1}] = \frac{n}{0.5} \cdot \frac{V_{\text{提取液}}}{t} \cdot \frac{1000}{N_{\text{cells}}}$ ,式中 $n$ 为 $\text{O}_2^-$ 的物质的量, $V_{\text{提取液}}$ 为样品提取液的体积, $N_{\text{cells}}$ 为藻细胞数量.

短裸甲藻细胞过氧化氢 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的测定参照文献[9], $\text{H}_2\text{O}_2$ 表征为每 $10^7$ 个藻细胞中 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的含量.

#### 1.3.4 数据分析

数据统计分析使用Microsoft Excel 2003和PASW Statistics 18.0统计软件完成,差异显著性分析 $P < 0.05$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 丙酮、三氯甲烷、抑制剂对短裸甲藻生长的影响

为排除丙酮、三氯甲烷以及抑制剂鱼藤酮、敌草隆和双香豆素对短裸甲藻生长的影响,分别进行了生长抑制实验(数据未列出),根据实验结果,确定

丙酮和三氯甲烷的最大添加浓度(体积分数)分别低于  $0.5 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.2 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ , 鱼藤酮、敌草隆和双香豆素的投加浓度分别设为  $5$ 、 $1.25$  和  $5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、培养时间  $12 \text{ h}$ 。

## 2.2 DBP 对短裸甲藻总 ROS 水平的影响

培养  $24 \text{ h}$ , DBP 对短裸甲藻细胞总 ROS 水平的影响如图 1 所示. 与对照组和添加阳性对照的处理组相比,  $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 DBP 处理组, 细胞 ROS 水平提高, DBP 诱导了 ROS 在藻细胞内的积累。

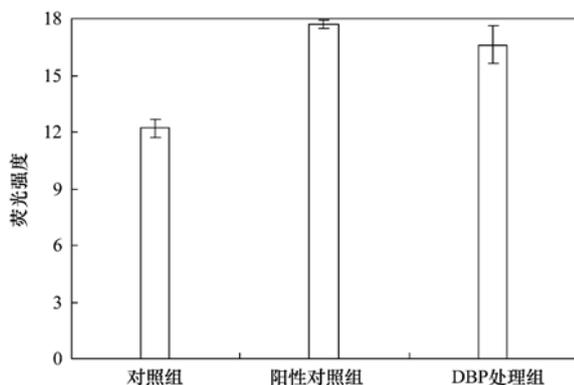


图 1 DBP 对短裸甲藻细胞总 ROS 的影响

(试剂盒自带阳性对照)

Fig. 1 Effect of DBP on ROS production in *G. breve*

(there is compound mixture in the assay kit for positive control)

环境胁迫因子如干旱、缺氧、病虫害、极端温度等对植物的损害往往与氧化损伤相关联, 化感物质也可能通过诱导 ROS 的产生而影响细胞生长<sup>[10]</sup>. 前期的研究结果显示 DBP 引起了短裸甲藻细胞丙二醛的积累, 显示了氧化胁迫的存在(已另文讨论). 但在 Liu 等<sup>[11]</sup>研究环境条件对海洋卡盾藻 *Chattonella marina* 的生长影响时发现, 氮源、氮磷比、光暗周期和盐度虽然影响了 *C. marina* 的生长, 但是并没有引起细胞内 ROS 水平的升高, pH 值和离子浓度却通过使细胞 ROS 增加而影响细胞的生长, 这说明 ROS 的积累并不是唯一影响藻细胞生长的原因. 同样尽管 DBP 引起了短裸甲藻 ROS 的积累并对其生长产生了抑制作用, 但 ROS 的积累是否是单一原因, 以及 ROS 的积累是否能被其它生物源或非生物源的物质影响甚至逆转仍需进一步的分析。

## 2.3 DBP 对短裸甲藻·OH、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 的影响

为进一步掌握 DBP 对短裸甲藻 ROS 生成的影响, 本研究观察了 DBP 作用下·OH、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 这 3 种主要 ROS 的变化. DBP 对短裸甲藻细胞内·OH

的影响如图 2 所示. 随着培养时间的增加, 细胞内·OH 含量逐渐升高, 至  $48 \text{ h}$  处出现最大值, 随后又降至较低甚至接近于  $0 \text{ U}\cdot\text{mL}^{-1}$  的水平. 与对照组相比, DBP 浓度的增加促进了藻细胞·OH 的积累.  $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 DBP 处理组, 培养至  $48 \text{ h}$  出现一个极大峰值  $33 \text{ U}\cdot\text{mL}^{-1}$ , 约为对照组的 2.4 倍, 该值同时为整个培养周期和浓度梯度中的最大值. 藻中·OH 的变化, 可能是由于藻本身就有·OH 的产生过程(对照组在  $48 \text{ h}$  处出现轻微增长趋势), 但是 DBP 在该基础上更加刺激了·OH 的产生, 但·OH 最终被应激反应性酶等清除或转化.·OH 是化学性质最活泼的活性氧, 它几乎与细胞内的每一类有机物如细胞可溶性糖、氨基酸、磷脂、核苷酸和有机酸等都能反应, 并且反应速度快, 破坏性很强. 目前有关藻·OH 的文献大多集中在藻的抗氧化能力即对·OH 抑制能力的研究上, 本研究是少数注意到·OH 在藻氧化胁迫中变化的研究之一。

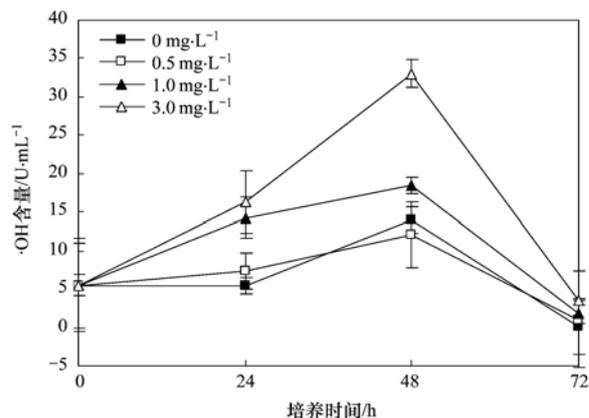


图 2 DBP 对短裸甲藻细胞·OH 含量的影响

Fig. 2 Effect of DBP on ·OH content in *G. breve*

DBP 对短裸甲藻细胞 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量的影响如图 3 所示. 对照组与中低浓度 ( $0.5$  和  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 处理组, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量在培养  $48 \text{ h}$  前随时间的变化无规律性. 随浓度的增大, 藻细胞 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的含量升高, 如在  $24 \text{ h}$  处,  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  处理组 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量约为  $160 \text{ nmol}\cdot(10^7 \text{ cells})^{-1}$ , 是对照组的 1.6 倍 ( $P = 0.002$ ), 约为  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  处理组的 1.5 倍 ( $P = 0.005$ ). 对于高浓度  $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的处理组, 藻细胞 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量从  $0 \text{ h}$  处的约  $110 \text{ nmol}\cdot(10^7 \text{ cells})^{-1}$  至培养  $72 \text{ h}$  处出现最大值, 约为  $250 \text{ nmol}\cdot(10^7 \text{ cells})^{-1}$ , 是对照组的 5 倍. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 被广泛的应用在生物氧化胁迫的指标体系中<sup>[12,13]</sup>, 它可以抑制 CO<sub>2</sub> 的固定、SOD 等酶的活性, 还可以使叶绿

素降解。H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 可以通过膜自由扩散<sup>[14]</sup>, 造成的损害不仅仅局限在其产生部位, 在一定的条件下, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 可以产生化学反应性更强的·OH<sup>[15]</sup>, 因此, 过量积累 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 对短裸甲藻细胞的损伤非常严重。

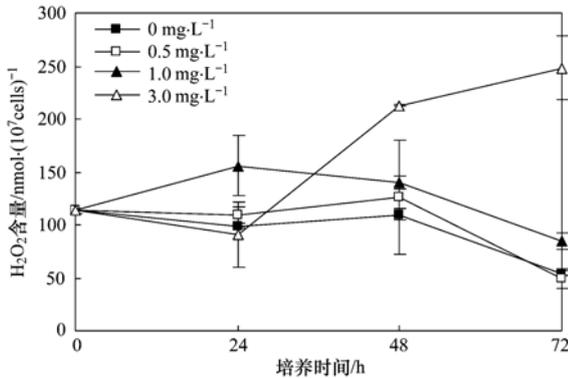


图3 DBP对短裸甲藻细胞H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量的影响

Fig. 3 Effect of DBP on H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> content in *G. brevis*

DBP对短裸甲藻细胞O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率的影响如图4所示。DBP浓度的增加,并没有刺激短裸甲藻细胞内O<sub>2</sub><sup>-</sup>的产生,相反,在整个培养周期内,0.5、1 mg·L<sup>-1</sup>的处理组细胞O<sub>2</sub><sup>-</sup>的产生速率还低于对照组。随着时间的增加,细胞的O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率在24 h处出现增大的趋势,但随后规律性消失,与上两种活性氧相比,O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率没有随DBP浓度的增大而出现规律性。Froemming等<sup>[16]</sup>研究了几种植物源的化学物质对U937细胞的影响,结果表明绿原酸、表儿茶素、甘草酸抑制该细胞O<sub>2</sub><sup>-</sup>的产生时呈现出剂量效应相关关系,而咖啡酸、姜黄素、栝精虽然也抑制细胞产生O<sub>2</sub><sup>-</sup>的能力,但是却没有呈现剂量效应相关性。总体来讲,DBP对短裸甲藻细胞O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率的影响并无规律性,目前已知相关文献没有讨论

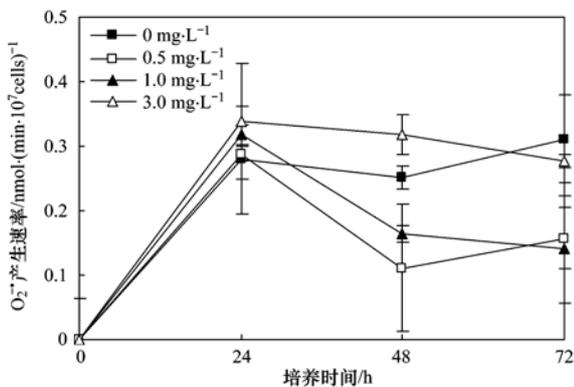


图4 DBP对短裸甲藻细胞O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率的影响

Fig. 4 Production rate of superoxide anions in *G. brevis* under DBP exposure

过类似内容,这可能是由于O<sub>2</sub><sup>-</sup>有多个产生器官、多条产生途径,其受DBP的影响并不一致所导致,也可能是由于O<sub>2</sub><sup>-</sup>寿命较其它自由基短,容易被转化和清除所致。

不同的受体生物在外源影响因子诱导的氧化胁迫中具体表现不同,如Contreras等<sup>[17]</sup>在铜引起萱藻*Scytosiphon lomentaria*氧化胁迫时,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和O<sub>2</sub><sup>-</sup>受到的影响却不相同。同样的,DBP对短裸甲藻3种ROS的影响也不一样。DBP使短裸甲藻细胞·OH含量、0.5 mg·L<sup>-1</sup>DBP使藻细胞H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量都出现了先增长后降低的变化规律。

#### 2.4 不同抑制剂与DBP对短裸甲藻细胞ROS的影响

藻细胞在经过鱼藤酮(5 μmol·L<sup>-1</sup>)、敌草隆(1.25 μmol·L<sup>-1</sup>)和双香豆素(5 μmol·L<sup>-1</sup>)30 min预处理后,再经过3 mg·L<sup>-1</sup>DBP暴露12 h;或者经上述抑制剂单独暴露12 h,细胞ROS的变化如图5所示。当用3种抑制剂预处理后,敌草隆没有显著的影响DBP诱导ROS的能力,鱼藤酮降低了DBP诱导ROS的能力,双香豆素促进了DBP对ROS的诱导,表明DBP影响了藻细胞线粒体和细胞膜上的电子传递。

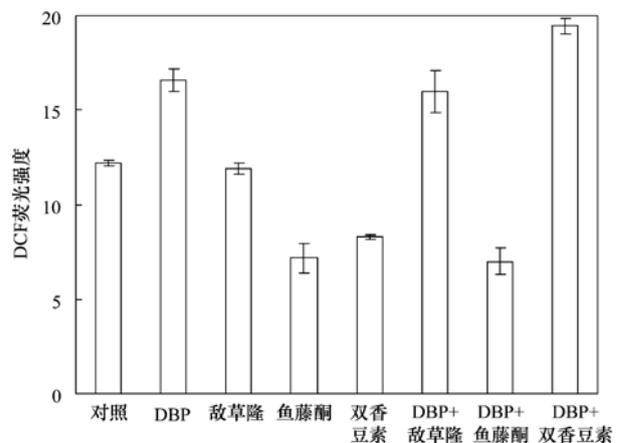


图5 敌草隆、鱼藤酮、双香豆素对DBP诱导短裸甲藻ROS的影响

Fig. 5 Effects of inhibitors on DBP induced ROS production

前期研究显示,DBP诱导了ROS的积累,对藻细胞不同器官中的SOD产生了不同的影响(已另文讨论),但DBP诱导的氧化胁迫是原发性(直接影响电子传递促进ROS的积累)还是继发性(通过影响抗氧化酶的结构或破坏酶的表达基因而影响酶的活性,打破了清除自由基的平衡体系)影响尚不明确。因此,本研究分析了电子传递链抑制剂对DBP诱导ROS的影响,探究了DBP对短裸甲藻的作用机制。

在绿色需氧植物中,产生 ROS 的主要途径有叶绿体光合电子传递链、线粒体电子传递链和细胞膜上的氧化还原反应<sup>[11]</sup>。鱼藤酮、敌草隆和双香豆素分别是作用于植物(包括藻)的线粒体电子传递链复合体 I<sup>[18]</sup>、光系统 II<sup>[19]</sup>、细胞膜氧化还原电子传递链的抑制剂<sup>[11]</sup>。

在陆生植物中,已有研究表明化感物质肉桂酸、 $\alpha$ -蒎烯、玉米花粉的乙醇提取液通过抑制线粒体电子传递影响受体的呼吸作用而产生化感作用<sup>[20,21]</sup>。生利霞等<sup>[22]</sup>认为低氧条件下樱桃砧木根系细胞线粒体电子传递链的泄露是其产生过量  $H_2O_2$  和过高  $O_2^-$  产生速率的原因,并因此使线粒体膜完整性受损最终引发呼吸损伤。Babu 等<sup>[23]</sup>研究发现浮萍 *Lemna gibba* 在受到蒎烯的作用时积累的过量  $O_2^-$  是叶绿体中电子从 PS II 到 PS I 的传递受到影响所致。本研究中,线粒体和细胞膜电子传递链抑制剂对 DBP 诱导藻细胞 ROS 的能力产生了影响,因此 DBP 可能的主要作用位点在线粒体和细胞膜,引起细胞 ROS 的积累,最终导致细胞的死亡,这与前期研究中不同 SOD 的应激反应结果表现出一致性。

### 3 结论

DBP 诱导了短裸甲藻 ROS 的积累,随浓度的增大,DBP 可促进藻细胞  $\cdot OH$ 、 $H_2O_2$  的积累,但是 DBP 对  $O_2^-$  产生速率的影响并无明显的规律性。鱼藤酮、双香豆素影响 DBP 对 ROS 的诱导,表明 DBP 可通过作用于线粒体和细胞膜电子传递的方式,使  $\cdot OH$ 、 $H_2O_2$  和  $O_2^-$  产生速率受到不同影响,最终诱导短裸甲藻 ROS 的积累,产生氧化损伤导致细胞死亡。

#### 参考文献:

[1] 王悠, 愈志明, 宋秀贤, 等. 大型海藻与赤潮微藻以及赤潮微藻之间的相互作用研究 [J]. 环境科学, 2006, **27**(2): 274-280.

[2] Li F M, Hu H Y. Isolation and characterization of a novel antifungal allelochemical from *Phragmites communis* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(11): 6545-6553.

[3] 李锋民, 胡洪营, 门玉洁, 等. 化感物质对小球藻抗氧化体系酶活性的影响 [J]. 环境科学, 2006, **27**(10): 2091-2094.

[4] Qian H F, Xu X Y, Chen W, et al. Allelochemical stress causes oxidative damage and inhibition of photosynthesis in *Chlorella vulgaris* [J]. Chemosphere, 2009, **75**(3): 368-375.

[5] Shao J H, Wu Z X, Yu G L, et al. Allelopathic mechanism of pyrogallol to *Microcystis aeruginosa* PCC7806 (Cyanobacteria): From views of gene expression and antioxidant system [J].

Chemosphere, 2009, **75**(7): 924-928.

[6] Wang Z Y, Tian Z J, Li F M, et al. Allelopathic effects of large seaweeds on red tide dinoflagellate *Gymnodinium breve* [J]. Allelopathy Journal, 2008, **22**(1): 181-188.

[7] 周名江, 朱明远, 张经. 中国赤潮的发生趋势和研究进展 [J]. 生命科学, 2001, **13**(2): 54-59.

[8] 耿予欢, 李国基, 魏东, 等. 荧光探针法测定极地雪藻自由基含量的研究 [J]. 现代食品科技, 2009, **24**(4): 381-383.

[9] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[10] Hong Y, Hu H Y, Xie X, et al. Responses of enzymatic antioxidants and non-enzymatic antioxidants in the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* to the allelochemical ethyl 2-methyl acetoacetate (EMA) isolated from reed (*Phragmites communis*) [J]. Journal of Plant Physiology, 2008, **165**(12): 1264-1273.

[11] Liu W H, Au D W T, Anderson D M, et al. Effects of nutrients, salinity, pH and light: dark cycle on the production of reactive oxygen species in the alga *Chattonella marina* [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2007, **346**(1-2): 76-86.

[12] Tian J Y, Yu J. Changes in ultrastructure and responses of antioxidant systems of algae (*Dunaliella salina*) during acclimation to enhanced ultraviolet-B radiation [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2009, **97**(3): 152-160.

[13] Lee T M, Shiu C T. Implications of mycosporine-like amino acid and antioxidant defenses in UV-B radiation tolerance for the algae species *Pterocladia capillacea* and *Gelidium amansii* [J]. Marine Environmental Research, 2009, **67**(1): 8-16.

[14] Barros M P, Granbom M, Colepicolo P, et al. Temporal mismatch between induction of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase correlates with high  $H_2O_2$  concentration in seawater from clofibrate-treated red algae *Kappaphycus alvarezii* [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2003, **420**(1): 161-168.

[15] Lascano H R, Gómez L D, Casano L M, et al. Changes in glutathione reductase activity and protein content in wheat leaves and chloroplasts exposed to photooxidative stress [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 1998, **36**(4): 321-329.

[16] Froemming G R, O'Brien N M. U937 cells as a model to study the effect of phytochemicals on superoxide anion production [J]. Nutrition Research, 1997, **17**(7): 1091-1103.

[17] Contreras L, Mella D, Moenne A, et al. Differential responses to copper-induced oxidative stress in the marine macroalgae *Lessonia nigrescens* and *Scytosiphon lomentaria* (Phaeophyceae) [J]. Aquatic Toxicology, 2009, **94**(2): 94-102.

[18] 张帅, 曾鑫年, 骆悦. 线粒体复合体 I 呼吸抑制剂的研究 [J]. 植物保护, 2004, **30**(6): 11-14.

[19] McKim S M, Durmford D G. Translational regulation of light-harvesting complex expression during photoacclimation to high-light in *Chlamydomonas reinhardtii* [J]. Plant Physiology and

- Biochemistry, 2006, **44**(11-12): 857-865.
- [20] Peñuelas J, Ribas-Carbo M, Giles L. Effects of allelochemicals on plant respiration and oxygen isotope fractionation by the alternative oxidase [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1996, **22**(4): 801-806.
- [21] Ortega R C, Anaya A L, Ramos L. Effects of allelopathic compounds of corn pollen on respiration and cell division of watermelon [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1988, **14**(1): 71-86.
- [22] 生利霞, 冯立国, 束怀瑞. 低氧胁迫下钙对樱桃砧木根系抗氧化系统及线粒体功能的影响 [J]. *中国农业科学*, 2008, **41**(11): 3913-3919.
- [23] Babu T S, Marder J B, Tripuranthakam S, *et al.* Synergistic effects of a photooxidized polycyclic aromatic hydrocarbon and copper on photosynthesis and plant growth: evidence that in vivo formation of reactive oxygen species is a mechanism of copper toxicity [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2001, **20**(6): 1351-1358.

---

## 欢迎订阅 2012 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2012 年为 16 开本,70 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

## CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk .....	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> ( 337 )
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk .....	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> ( 342 )
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health .....	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> ( 346 )
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed .....	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> ( 352 )
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin .....	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> ( 359 )
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta .....	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> ( 370 )
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids .....	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> ( 379 )
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period .....	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> ( 385 )
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China .....	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> ( 393 )
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze .....	ZHANG Wen-bin, YU Hui ( 399 )
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution .....	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> ( 407 )
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake .....	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> ( 412 )
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model .....	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> ( 421 )
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm .....	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> ( 429 )
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands .....	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> ( 436 )
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species .....	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> ( 442 )
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae .....	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo ( 448 )
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals .....	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> ( 454 )
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic .....	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> ( 459 )
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron .....	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi ( 469 )
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution .....	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai ( 476 )
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution .....	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> ( 481 )
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation .....	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming ( 488 )
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i> .....	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> ( 495 )
Biosorption of Chromium (VI) by Waste Biomass of $\epsilon$ -Poly-L-lysine Fermentation .....	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> ( 499 )
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge .....	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> ( 505 )
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge .....	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> ( 511 )
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China .....	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> ( 518 )
Optimization of PM <sub>10</sub> Monitoring Network in Beijing .....	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong ( 525 )
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon .....	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi ( 532 )
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe <sup>II</sup> (EDTA) .....	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> ( 539 )
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China .....	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> ( 545 )
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley .....	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> ( 551 )
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It .....	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> ( 558 )
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn .....	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> ( 565 )
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China .....	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> ( 574 )
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area .....	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> ( 580 )
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area .....	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> ( 587 )
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing .....	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> ( 592 )
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai .....	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> ( 599 )
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China .....	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> ( 606 )
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir .....	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> ( 612 )
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment .....	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> ( 618 )
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir .....	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> ( 625 )
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil .....	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> ( 633 )
Detection of <i>Proocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe .....	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> ( 640 )
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid .....	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> ( 647 )
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography .....	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG YA-lei, <i>et al.</i> ( 652 )
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells .....	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> ( 658 )
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry .....	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> ( 665 )

# 《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)

2012年2月15日 33卷 第2期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 15, 2012

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@reeces. 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@reeces. 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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行