

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第1期

Vol.33 No.1

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

30年来中国民航运输行业的大气污染物排放	何吉成(1)
北京上甸子站气相色谱法大气CH ₄ 和CO在线观测方法研究	汪巍,周凌晔,方双喜,张芳,姚波,刘立新(8)
2010年1月北京城区大气消光系数重建及其贡献因子	朱李华,陶俊,陈忠明,赵岳,张仁健,曹军骥(13)
广东东江流域多氯萘的大气沉降研究	王琰,李军,刘向,成志能,张瑞杰,张干(20)
塔克拉玛干沙尘暴源区空气微生物群落的代谢特征	段魏魏,娄恺,曾军,胡蓉,史应武,何清,刘新春,孙建,晁群芳(26)
紫外光降解对生物过滤塔去除氯苯性能的影响机制研究	王灿,席劲瑛,胡洪营,姚远(32)
春季黄渤海溶解有机碳的平面分布特征	丁雁雁,张传松,石晓勇,商荣宁(37)
春季胶州湾海水汞的形态研究	许廖奇,刘汝海,王金玉,汤爱坤,王舒(42)
丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素	蒲焘,何元庆,朱国锋,张蔚,曹伟宏,常丽,王春风(48)
塔里木河下游输水间歇地下水埋深及化学组分的变化	陈永金,李卫红,董杰,刘加珍(55)
某危险废物填埋场地下水污染预测及控制模拟	马志飞,安达,姜永海,席北斗,李定龙,张进保,杨昱(64)
北京市城市降雨径流水质评价研究	侯培强,任玉芬,王效科,欧阳志云,周小平(71)
重庆市路面降雨径流特征及污染源解析	张千千,王效科,郝丽岭,侯培强,欧阳志云(76)
沉水植物床-固定化微生物技术在水源地修复中的应用研究	陈祈春,李正魁,王易超,吴凯,范念文(83)
Pd/TiO ₂ 对水体中2,4-二氯酚的催化加氢脱氯研究	张寅,邵芸,陈欢,万海勤,万玉秋,郑寿荣(88)
pH值对纳米零价铁吸附降解2,4-二氯苯酚的影响	冯丽,葛小鹏,王东升,汤鸿霄(94)
给水管网中耐氯性细菌的灭活特性研究	陈雨乔,段晓笛,陆品品,王茜,张晓健,陈超(104)
安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价	宋大平,庄大方,陈巍(110)
染整废水深度处理纳滤工艺膜污染成因分析	曹晓兵,李涛,周律,杨海军,王晓(117)
间歇式气水联合反冲洗生物炭池的试验研究	谢志刚,邱雪敏,赵燕玲(124)
pH及表面活性剂对诺氟沙星在海洋沉积物上吸附行为的影响	庞会玲,杨桂朋,高先池,曹晓燕(129)
硅在湖泊沉积物上的吸附特征及形态分布研究	吕昌伟,崔萌,高际玫,张细燕,万丽丽,何江,孟婷婷,白帆,杨旭(135)
农作物残体制备的生物质炭对水中亚甲基蓝的吸附作用	徐仁扣,赵安珍,肖双成,袁金华(142)
高分子固体废物基活性炭对有机染料的吸附解吸行为研究	廉菲,刘畅,李国光,刘一夫,李勇,祝凌燕(147)
活性污泥对四环素的吸附性能研究	陈瑞萍,张丽,于洁,陶芸,张忠品,李克勋,刘东方(156)
加油站油类污染物自然衰减现场试验研究	贾慧,武晓峰,胡黎明,刘培斌(163)
生物质炭对土壤中氯苯类物质生物有效性的影响及评价方法	宋洋,王芳,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,谢祖彬,蒋新(169)
利用第二缺氧段硝酸盐氮浓度作为MUCT工艺运行控制参数	王晓玲,尹军,高尚(175)
数学模拟好氧颗粒污泥的形成及水力剪切强度对颗粒粒径的影响	董峰,张捍民,杨凤林(181)
不同污泥停留时间对城市污泥生物沥浸推流式运行系统的影响	刘奋武,周立祥,周俊,姜峰,王电站(191)
间歇曝气生物滤池生物除磷性能研究	曾龙云,杨春平,郭俊元,罗胜联(197)
鸡粪与互花米草沼渣混合发酵产甲烷的研究	陈广银,常志州,叶小梅,杜静,徐跃定,张建英(203)
北京市生活垃圾填埋场产甲烷不确定性定量评估	陈操操,刘春兰,李铮,王海华,张妍,王璐(208)
外加酶强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性的研究	杨慧,刘志华,李小明,杨麒,方丽,黄华军,曾光明,李硕(216)
赤潮藻电致化学发光分子探针检测系统的构建	朱霞,甄毓,米铁柱,池振明,徐晓春(222)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻的抑制机制研究	别聪聪,李锋民,王一斐,王昊云,赵雅茜,赵薇,王震宇(228)
纳米TiO ₂ 对短裸甲藻的毒性效应	李锋民,赵薇,李媛媛,田志佳,王震宇(233)
苏州河底泥3种内分泌干扰物的空间分布及环境风险	李洋,胡雪峰,王效举,茂木守,大塚宜寿,细野繁雄,杜艳,姜琪,李珊,冯建伟(239)
电子废物拆解区农业土壤中PCNs的污染水平、分布特征与来源解析	王学彤,贾金盼,李元成,孙阳昭,吴明红,盛国英,傅家谟(247)
洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险	刘德鸿,王发园,周文利,杨玉建(253)
湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价	刘春早,黄益宗,雷鸣,郝晓伟,李希,铁柏清,谢建治(260)
广西铅锡矿冶炼区土壤剖面及孔隙水中重金属污染分布规律	项萌,张国平,李玲,魏晓飞,蔡永兵(266)
缺氧条件下土壤砷的形态转化与环境行为研究	吴锡,许丽英,张雪霞,宋雨,王新,贾永锋(273)
可渗透反应复合电极法对铬(VI)污染土壤的电动修复	付融冰,刘芳,马晋,张长波,何国富(280)
胡敏酸对汞还原能力的测定和表征	江韬,魏世强,李雪梅,卢松,李梦婕,罗畅(286)
Zn(II)对生物质碳源处理酸性矿山排水中厌氧微生物活性影响	黎少杰,陈天虎,周跃飞,岳正波,金杰,刘畅(293)
油气田土壤样品中可培养丁烷氧化菌多样性研究	张莹,李宝珍,杨金水,汪双清,袁红莉(299)
利用PCR-DGGE分析未开发油气田地表微生物群落结构	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(305)
黄土高原六道沟流域8种植物根际细菌与AMF群落多样性研究	封晔,唐明,陈辉,丛伟(314)
鸡粪与猪粪所含土霉素在土壤中降解的动态变化及原因分析	张健,关连珠,颜丽(323)
杂质对废塑料裂解产物及污染物排放的影响	赵磊,王中慧,陈德珍,马晓波,栾健(329)
《环境科学》征稿简则(7)	
《环境科学》征订启事(19)	
信息(47,70,202,304)	

邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻的抑制机制研究

别聪聪¹, 李锋民^{1*}, 王一斐¹, 王昊云², 赵雅菡¹, 赵薇¹, 王震宇¹

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 天津出入境检验检疫局化矿金属材料技术中心, 天津 300457)

摘要: 为揭示化感物质邻苯二甲酸二丁酯(dibutyl phthalate, DBP)对短裸甲藻(*Gymnodinium breve*)的抑制机制, 研究了DBP对短裸甲藻丙二醛(malonaldehyde, MDA)含量、亚显微结构、不同超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)的影响。结果表明, DBP引起了细胞MDA的积累, 3 mg·L⁻¹的DBP处理组在72 h处出现最大值, 为0.34 μmol·(10⁹ cells)⁻¹, 是对照组的2.3倍; 细胞膜出现大量突起, 细胞内形成大量液泡, 膜结构解体最终空洞、死亡。CuZn-SOD位于藻细胞质, 在DBP影响下, 活性升高, 表明藻细胞质(包括细胞膜)内积累的ROS诱导了酶的活性; 而位于线粒体的Mn-SOD活性降低, 可能是由于ROS在线粒体内积累过度导致其失活, DBP可能通过作用于短裸甲藻线粒体和细胞膜, 从而引起藻细胞氧化损伤, 最终导致细胞空洞化死亡。该结果对赤潮化感抑制剂的实际应用具有理论指导作用。

关键词: 化感物质; 邻苯二甲酸二丁酯; 短裸甲藻; 抑制机制

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)01-0228-05

Mechanism of the Inhibitory Action of Allelochemical Dibutyl Phthalate on Algae *Gymnodinium breve*

BIE Cong-cong¹, LI Feng-min¹, WANG Yi-fei¹, WANG Hao-yun², ZHAO Ya-han¹, ZHAO Wei¹, WANG Zhen-yu¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Technology Center of Chemical Mine Metal Material, Tianjin Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Tianjin 300457, China)

Abstract: The aim of this study was to investigate the mechanism of inhibitory action of dibutyl phthalate (DBP) on red tide algae *Gymnodinium breve*. The effects of DBP on malonaldehyde, subcellular structure and superoxide dismutase (SOD) isoforms were investigated. The results showed that MDA accumulated in the algae cell under DBP exposure, and for the 3 mg·L⁻¹ DBP treated algae culture a peak value of 0.34 μmol·(10⁹ cells)⁻¹ occurred at 72 h, which was about 2.3 times than that of the control. TEM pictures showed the disruption of DBP on the subcellular structure of *G. breve*. A morphological phenomenon appeared that the algae cell was commonly found small tubules or apical parts around the cell membrane, and almost all normal cell organelles were indistinguishable finally. The activity of CuZn-SOD (main cytoplasm located isoform with little in chloroplast) under DBP exposure was higher than that of the control, and no significant difference was observed on Fe-SOD (chloroplast located isoform) activity, but for the Mn-SOD (mitochondrial isoform), the activity was significantly inhibited. These results indicated that DBP might inhibit the algae growth from the plasma membrane and the mitochondria, resulting in oxidative damage in algae cell and a final death. This paper will give a theoretical support to the practical usage of the allelochemical on red tide algae.

Key words: allelochemical; dibutyl phthalate (DBP); *Gymnodinium breve*; inhibitory mechanism

赤潮肆虐于世界各国沿海,造成了巨大的经济损失,已成为国际社会共同关注的重大海洋生态环境灾害^[1]。在各种治理方法中,利用大型海藻化感物质进行赤潮防治受到关注,并凸显出一些优点:如化感作用的专一性抑制特点、作为原材料的大型海藻产量大易获得等。我国研究人员近年来在这一领域相当活跃,从早期对大型水生植物对藻类的抑藻现象观察,到目前研究已经更多地集中到从大型水生植物中提取、分离、鉴定化感物质以及抑制机制的分析^[2]。

对于化感物质抑藻机制,研究结果表明同其它环境胁迫因子类似,化感抑制作用往往与氧化胁迫相关联^[3,4],在此基础上不同的研究者研究了化感

物质引起的氧化胁迫对藻酶活性^[5,6]、细胞膜完整性^[7]等的影响,也有学者试图往更深入的方向研究,如Srivastava等^[8]研究的化感物质Fischerellin A对莱茵衣藻 *Chlamydomonas reinhardtii* 光系统II的影响, Wu等^[9]研究的粉绿狐尾藻 *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc. 化感物质对铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa* 光系统II藻胆蛋白中心的影响。可以看出研究化感物质引起藻细胞氧化胁迫的

收稿日期: 2011-04-05; 修订日期: 2011-05-25

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); 教育部科学研究重大项目(308016)

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

靶器官或者作用位点,对揭示化感物质作用机制、指导化感物质应用于藻华控制具有重要的作用。

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的一种对短裸甲藻(*Gymnodinium breve*)具有高抑制能力的化感物质^[10],本研究分析了 DBP 对短裸甲藻丙二醛(malonaldehyde, MDA)含量、亚显微结构、不同超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)的影响,探究其作用位点,以期揭示化感物质抑藻机制提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

短裸甲藻:取自中科院海洋研究所,采用海水 f/2 培养基,于人工智能光照培养箱中培养。培养条件:光暗比为 14 h:10 h,昼夜温度为 24℃:20℃,白天光照强度为 8 000 lx。实验前预培养至指数增长期。

DBP(国药集团化学试剂有限公司);DBP 溶解在丙酮中,为排除溶剂对短裸甲藻生长的影响,设置生长影响实验,确定丙酮对短裸甲藻最大无明显生长影响的浓度(图表未列出)。在后续的实验中,丙酮的最大添加浓度低于 0.5 mL·L⁻¹。

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灭菌(121℃,20 min)的海水 f/2 培养基以体积比 1:3 的比例混合、摇匀。准确移取藻液到 500 mL 的已灭菌锥形瓶中。

添加不同体积的 DBP 丙酮溶液,藻液最终体积为 300 mL,每个 DBP 浓度设置 3 个重复。每隔 24 h 取样并计数藻密度,DBP 处理组同时测定藻细胞 MDA 含量、SOD 活性。

DBP 对短裸甲藻亚显微结构的影响,准确移取藻液到体积为 5 L 的已灭菌锥形瓶中,添加不同浓度的 DBP 丙酮溶液,藻液最终体积为 3 L,DBP 浓度设置为 0、3 mg·L⁻¹,连续培养 24 h。

1.3 分析测试方法

1.3.1 短裸甲藻生长密度的检测

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。

1.3.2 藻细胞 MDA 含量、SOD 活性的测定

离心(3 800 r·min⁻¹,4 min)收集藻细胞,加 5 mL 于 4℃ 冰箱中预冷的 0.05 mol·L⁻¹磷酸缓冲液

(pH 7.8),于超声波细胞破碎仪中超声破碎 5 min(5×30 s),此为待测样品。

MDA 含量的测定参考文献[11]。MDA 在藻细胞中的相对含量 c_2 [$\mu\text{mol} \cdot (10^9 \text{ cell})^{-1}$] = $\frac{c_1 \cdot V_{\text{反应液}}}{V_{\text{藻}} \cdot \rho_{\text{藻}}}$,式中, $V_{\text{藻}}$ 为藻培养液的取样体积(mL), $\rho_{\text{藻}}$ 为藻的生长密度(个·mL⁻¹)。

总 SOD 的活性测定采用氮蓝四唑光还原法^[11]。不同 SOD 活性的测定按照试剂盒(碧云天,上海)的操作说明进行,反应液在酶标仪(Thermo Fi-01621,芬兰)450 nm 波长上测定吸光度。

1.3.3 短裸甲藻亚显微结构的观察

离心(3 800 r·min⁻¹,4 min)收集藻细胞,参照文献[12]的方法固定样品,制作切片。在透射显微镜(JEOL,JEM-1200EX)下观察,拍照。

1.4 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 DBP 对短裸甲藻 MDA 含量的影响

不同浓度的 DBP 对短裸甲藻细胞 MDA 含量的影响不同,如图 1。与对照组相比,低浓度(0.5 mg·L⁻¹)DBP 在培养周期内没有对短裸甲藻细胞 MDA 的含量产生显著的影响。随着培养时间的增加,24 h 时,对照组及 0.5、1 mg·L⁻¹DBP 处理组藻细胞内的 MDA 含量出现峰值,之后随着培养时间的加长,MDA 含量呈下降的趋势。但是高浓度处理组(3 mg·L⁻¹)与此不同,随培养时间的增加,藻细胞 MDA 的含量逐渐增大,3 mg·L⁻¹的 DBP 处理组在 72 h 处出现最大值,为 0.34 $\mu\text{mol} \cdot (10^9 \text{ cells})^{-1}$,是对照组的 2.3 倍。

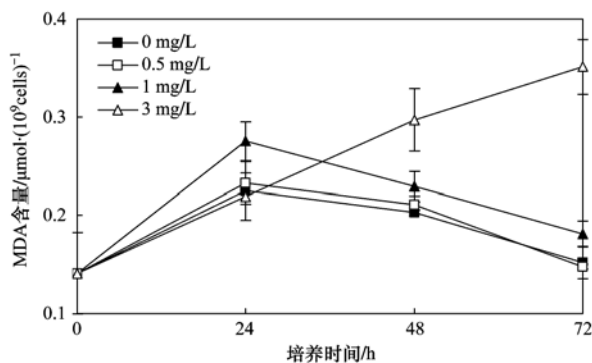


图1 DBP 对短裸甲藻细胞 MDA 含量的影响

Fig. 1 Effect of DBP on MDA content in *G. breve*

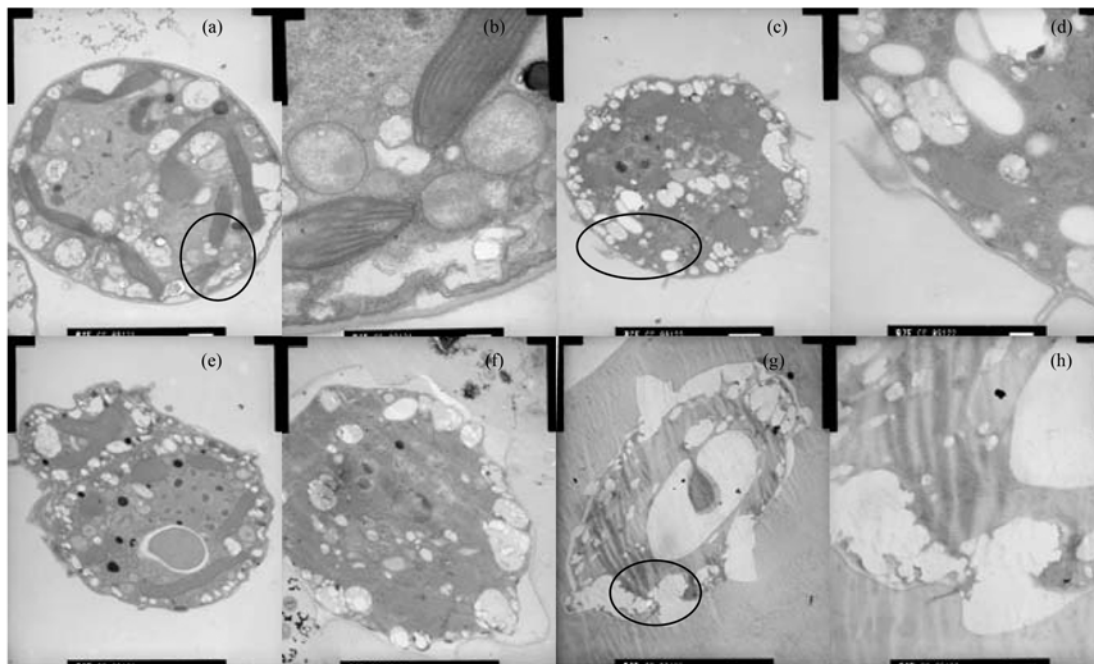
细胞在生理生化过程中产生的自由基,能氧化生物膜的多不饱和脂肪酸,形成脂质过氧化物如 MDA,引发细胞膜组成的变化,导致细胞膜流动性、离子通道及膜蛋白性质等的变化,最终引起细胞损伤.因此细胞 MDA 的含量通常被作为 ROS 积累、脂质氧化的标志物.张庭廷等^[5]发现化感物质对羟基苯甲酸和阿魏酸使水华鱼腥藻 *Anabaena flosaquae* 和蛋白核小球藻 *Chlorella pyrenoidosa* 的 MDA 含量呈现先升高后降低的趋势,认为化感物质引起了氧自由基的积累,导致藻细胞膜脂过氧化增加,而随着培养的进行,细胞死亡,膜解体,藻细胞结构的严重损伤使得 MDA 的含量下降.本研究的结果表明,DBP 引起了藻细胞的氧化损伤,低浓度 ($0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的 DBP 处理组作用不明显,可能是由于细胞内其它抗氧化反应的平衡作用所致;而高浓度 DBP 可能对藻产生了更广泛、更彻底的氧化损伤,使得藻细胞 MDA 含量增加.

但是也有研究者认为脂质氧化并不完全对细胞

有害,如谢荣等^[13]研究发现细胞 MDA 在一定程度内的增加对细胞增殖有益,这也在一定程度上解释了本研究关于不同浓度 DBP 对细胞 MDA 的影响不同.低浓度 (0.5 、 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) DBP 处理组的藻细胞 MDA 含量在培养 24 h 处出现峰值,但是之后随培养时间的增加,细胞 MDA 的含量并未出现继续积累的趋势,这也可能是由于 MDA 的变化而刺激了细胞内有益的生理生化反应.

2.2 DBP 对细胞亚显微结构的影响

DBP 对短裸甲藻细胞亚显微结构的影响非常明显(如图 2).对照组[图 2(a)和 2(b)]藻细胞细胞核、叶绿体、线粒体、液泡等细胞器结构完整、界限清晰,细胞膜完整.与对照组相比,投加 DBP 的藻细胞[图 2(c)~2(h)]靠近细胞膜处出现了大量的小体积液泡,出现明显淀粉粒;同时,细胞膜出现大量的突起,关于这种突起,目前少有文献提及.具有严重损伤表现的藻细胞,细胞膜周围的液泡变大,线粒体、叶绿体等膜结构解体消失,细胞膜突起变大,细胞出现巨大的空洞、死亡.



(a)和(b)为对照组;(c)~(h)为 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ DBP 处理组;图(a)、(c)、(e)、(f)和(g)比例尺为 $1 \mu\text{m}$,图(b)、(d)和(h)比例尺为 $200 \mu\text{m}$

图 2 DBP 对短裸甲藻亚显微结构的影响

Fig. 2 Details of ultrastructures of the algae *G. breve* treated with DBP

细胞的亚显微结构观察常被用在研究外源性化合物对生物体的损伤机制研究中^[14,15],叶绿体、线粒体等都具有高度组织化的膜系统与其功能相适应^[16],DBP 对短裸甲藻细胞结构上的损伤必然会影

响细胞光合、呼吸作用等. Buchmann 等^[17]在研究绿藻 *Mesostigma viride* 的细胞液泡时发现,小液泡能融合成大液泡,这对本研究中发现有初期损伤表现的细胞周围出现小液泡,但是表现出严重损伤程度的

细胞周围的液泡数量减少而体积变大的现象,有一定的解释. 另外, Morlon 等^[12]研究的硒对单细胞绿藻 *Chlamydomonas reinhardtii* 毒性效应的文章中,该藻的亚显微结构照片显示在硒的影响下藻细胞膜也出现了突起,但作者没有提及这点、更没有解释具体原因. 本研究中细胞膜出现突起的原因,可能是跟细胞膜受到氧化、结构变化、流动性变大和细胞的分泌作用相关.

2.3 DBP 对短裸甲藻细胞 SOD 活性的影响

DBP 对藻细胞总 SOD 活性的影响如图 3 所示. 作用 72 h 之后,藻细胞内 SOD 活性随着 DBP 浓度的升高依次是 21.73、34.17 和 81.47 $\text{U} \cdot (10^7 \text{ cells} \cdot \text{h})^{-1}$. 在相同培养条件下, SOD 活性随着 DBP 浓度的增大而升高,这是由于为了消除藻细胞内过多的活性氧, SOD 便会应激发挥清除作用,以保持藻细胞内活性氧含量的平衡. 另外,当短裸甲藻在 1 和 3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ DBP 的作用下, SOD 活性都呈现出先升高后降低的变化趋势,但是二者的原因可能不同,中浓度 DBP (1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理的藻细胞内活性氧含量增多时,抗氧化酶便会应激消除过多的自由基,表现为酶活性的增大,当活性氧含量降低时,抗氧化酶活性也会随之降低,而高浓度 DBP (3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理组, SOD 活性表现出来的最终降低则可能是由于酶在逐渐积累的活性氧作用下部分失活所致.

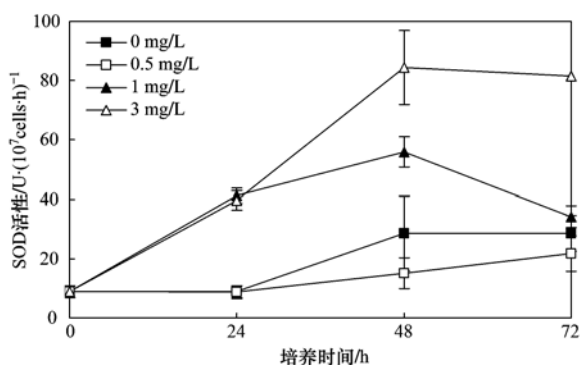


图3 DBP 对短裸甲藻总 SOD 酶活性的影响

Fig. 3 Effect of DBP on total SOD activity of *G. breve*

SOD 是细胞内清除活性氧的关键酶,按照结合的金属离子种类,植物体内的 SOD 可分为 Mn-SOD、Fe-SOD 和 CuZn-SOD. Mn-SOD 存在于线粒体中, Fe-SOD 存在于叶绿体中, CuZn-SOD 主要位于细胞质中^[18,19]. SOD 是一种高诱导酶,因此在 DBP 的短期 (12 h) 的暴露中,不同 SOD 活性的变化可以反映生物体内的应激机制. DBP 对短裸甲藻细胞总 SOD 和

各分型 Mn-SOD、Fe-SOD 和 CuZn-SOD 的活性影响如图 4 所示, Mn-SOD 的活性显著降低, Fe-SOD 的活性基本无影响,但 CuZn-SOD 的活性受到了显著的促进作用.

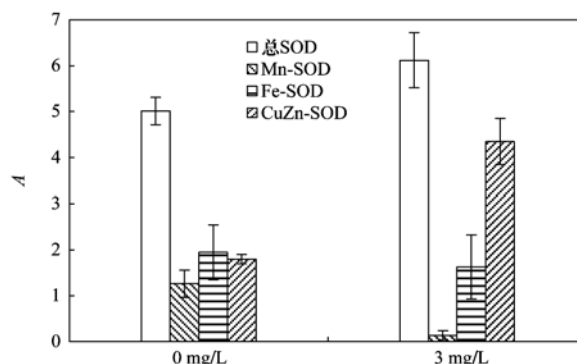


图4 DBP 对短裸甲藻细胞不同 SOD 酶活性的影响

Fig. 4 Effect of DBP on the activity of different SOD isoforms in *G. breve*

张楠^[20]发现篦齿眼子菜化感物质琥珀酸使得蛋白核小球藻 *Chlorella pyrenoidosa* 总 SOD 活性在实验的前 3 d 升高,并认为是由于 Fe-SOD 的作用;另一种化感物质棕榈酸使铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa* 的总 SOD 活性降低,其中 Fe-SOD 活性明显降低, Mn-SOD 活性有轻微的抗逆性反应. Zbigniew 等^[21]在研究外源化合物对斜生栅藻 *Scenedesmus subspicatus* 的抑制作用时,发现叶绿体中的 Fe-SOD 和线粒体中的 Mn-SOD 表现出了受促进作用,因此作者认为藻细胞叶绿体中的生化反应受到的影响更严重. 本研究中, CuZn-SOD 的变化表明藻细胞质 (包括细胞膜) 内积累的 ROS 诱导了酶活性;而 Mn-SOD 活性的降低,可能是由于 ROS 在线粒体内的过度积累导致酶失活. 综上, DBP 可能通过作用于线粒体和细胞膜,引起细胞 ROS 积累.

3 结论

DBP 投加到短裸甲藻液后,引起细胞 MDA 积累, 3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 DBP 处理组在 72 h 处, MDA 含量出现最大值,是对照组的 2.3 倍;细胞膜出现大量突起,细胞内形成大量液泡,膜结构解体,细胞空洞、死亡. DBP 作用下,位于细胞质中的 CuZn-SOD 和位于线粒体中的 Mn-SOD 受到了影响, DBP 可能通过作用于短裸甲藻线粒体和细胞膜,引起藻细胞氧化损伤,最终导致细胞空洞化死亡.

参考文献:

[1] 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.
- [2] 李寿田, 周健民, 王火焰, 等. 植物化感作用机理的研究进展 [J]. 农村生态环境, 2001, **17**(4): 52-55.
- [3] 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.
- [4] Hirata K, Yoshitomi S, Dwi S, *et al.* Generation of reactive oxygen species undergoing redox cycle of nostocine A; a cytotoxic violet pigment produced by freshwater cyanobacterium *Nostoc spongiaeforme* [J]. Journal of Biotechnology, 2004, **110**(1): 29-35.
- [5] 张庭廷, 吴安平, 何梅, 等. 酚酸类物质对水华藻类的化感作用及其机理 [J]. 中国环境科学, 2007, **27**(4): 472-476.
- [6] 花铭, 陈良燕, 尹大强. 邻苯三酚和咖啡酸对铜绿微囊藻的化感作用及其机理 [J]. 环境化学, 2008, **27**(3): 331-334.
- [7] 李锋民, 胡洪营, 种云霄, 等. 2-甲基乙酰乙酸酯对藻细胞膜和亚显微结构的影响 [J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1534-1538.
- [8] Srivastava A, Jüttner F, Strasser R J. Action of the allelochemical, fischerellin A, on photosystem II [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics, 1998, **1364**(3): 326-336.
- [9] Wu C, Chang X X, Dong H J, *et al.* Allelopathic inhibitory effect of *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc. on *Microcystis aeruginosa* and its physiological mechanism [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(6): 2595-2603.
- [10] 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.
- [11] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] Morlon H, Fortin C, Floriani M, *et al.* Toxicity of selenite in the unicellular green alga *Chlamydomonas reinhardtii*: Comparison between effects at the population and sub-cellular level [J]. Aquatic Toxicology, 2005, **73**(1): 65-78.
- [13] 谢荣, 唐学玺, 李永祺, 等. 活性氧对3种海洋微藻生长的影响 [J]. 海洋学报, 2001, **23**(1): 94-101.
- [14] Tukaj Z, Baścik-Remisiewicz A, Skowroński T, *et al.* Cadmium effect on the growth, photosynthesis, ultrastructure and phytochelatin content of green microalga *Scenedesmus armatus*: A study at low and elevated CO₂ concentration [J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, **60**(3): 291-299.
- [15] Nishikawa K, Onodera A, Tominaga N. Phytochelatins do not correlate with the level of Cd accumulation in *Chlamydomonas* spp. [J]. Chemosphere, 2006, **63**(9): 1553-1559.
- [16] Allen J F, Forsberg J. Molecular recognition in thylakoid structure and function [J]. Trends in Plant Science, 2001, **6**(7): 317-326.
- [17] Buchmann K, Becker B. The system of contractile vacuoles in the green alga *Mesostigma viride* (Streptophyta) [J]. Protist, 2009, **160**(3): 427-443.
- [18] Scandalios J G. Oxygen stress and superoxide dismutases [J]. Journal of Plant Physiology, 1993, **101**(1): 7-12.
- [19] 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.
- [20] 张楠. 用于高盐度再生水富营养化控制的菹齿眼子菜克藻效应与机理研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [21] Zbigniew T, Wojciech P. Individual and combined effect of anthracene, cadmium, and chloridazone on growth and activity of SOD isoforms in three *Scenedesmus* species [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2006, **65**(3): 323-331.

CONTENTS

Air Pollutant Emissions of Aircraft in China in Recent 30 Years	HE Ji-cheng (1)
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Atmospheric CH ₄ and CO by GC-FID Method at the Shangdianzi GAW Regional Station	WANG Wei, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (8)
Reconstructed Ambient Light Extinction Coefficient and Its Contribution Factors in Beijing in January, 2010	ZHU Li-hua, TAO Jun, CHEN Zhong-ming, <i>et al.</i> (13)
Atmospheric Deposition of Polychlorinated Naphthalenes in Dongjiang River Basin of Guangdong Province	WANG Yan, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (20)
Metabolic Characteristics of Air Microbial Communities from Sandstorm Source Areas of the Taklamakan Desert ...	DUAN Wei-wei, LOU Kai, ZENG Jun, <i>et al.</i> (26)
Mechanisms of UV Photodegradation on Performance of a Subsequent Biofilter Treating Gaseous Chlorobenzene ...	WANG Can, XI Jin-ying, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (32)
Distribution of Dissolved Organic Carbon in the Bohai Sea and Yellow Sea in Spring	DING Yan-yan, ZHANG Chuan-song, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (37)
Research on the Mercury Species in Jiaozhou Bay in Spring	XU Liao-qi, LIU Ru-hai, WANG Jin-yu, <i>et al.</i> (42)
Geochemistry of Surface and Ground Water in the Lijang Basin, Northwest Yunnan	PU Tao, HE Yuan-qing, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (48)
Variations in Depth and Chemistry of Groundwater in Interval of Water Delivery at the Lower Tarim River	CHEN Yong-jin, LI Wei-hong, DONG Jie, <i>et al.</i> (55)
Simulation on Contamination Forecast and Control of Groundwater in a Certain Hazardous Waste Landfill	MA Zhi-fei, AN Da, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i> (64)
Research on Evaluation of Water Quality of Beijing Urban Stormwater Runoff	HOU Pei-qiang, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (71)
Characterization and Source Apportionment of Pollutants in Urban Roadway Runoff in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (76)
Applied Study of the Submerged Macrophytes Bed-Immobilized Bacteria in Drinking Water Restoration	CHEN Qi-chun, LI Zheng-kui, WANG Yi-chao, <i>et al.</i> (83)
Catalytic Hydrodechlorination of 2,4-Dichlorophenol over Pd/TiO ₂	ZHANG Yin, SHAO Yun, CHEN Huan, <i>et al.</i> (88)
Effects of pH Value on the Adsorption and Degradation of 2,4-DCP by Nanoscale Zero-Valent Iron	FENG Li, GE Xiao-peng, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (94)
Inactivation of the Chlorine-resistant Bacteria Isolated from the Drinking Water Distribution System	CHEN Yu-qiao, DUAN Xiao-di, LU Pin-pin, <i>et al.</i> (104)
Risk Assessment of the Farmland and Water Contamination with the Livestock Manure in Anhui Province	SONG Da-ping, ZHUANG Da-fang, CHEN Wei (110)
Analysis of Membrane Fouling Genesis in Nanofiltration Process for Advanced Treatment of Dyeing and Finishing Wastewater	CAO Xiao-bing, LI Tao, ZHOU Lü, <i>et al.</i> (117)
Experimental Research on Combined Water and Air Backwashing Reactor Technology for Biological Activated Carbon	XIE Zhi-gang, QIU Xue-min, ZHAO Yan-ling (124)
Impacts of pH and Surfactants on Adsorption Behaviors of Norfloxacin on Marine Sediments	PANG Hui-ling, YANG Gui-peng, GAO Xian-chi, <i>et al.</i> (129)
Adsorption Characteristic and Form Distribution of Silicate in Lakes Sediments	LÜ Chang-wei, CUI Meng, GAO Ji-mei, <i>et al.</i> (135)
Adsorption of Methylene Blue from Water by the Biochars Generated from Crop Residues	XU Ren-kou, ZHAO An-zhen, XIAO Shuang-cheng, <i>et al.</i> (142)
Adsorption and Desorption of Dyes by Waste-Polymer-Derived Activated Carbons	LIAN Fei, LIU Chang, LI Guo-guang, <i>et al.</i> (147)
Study on the Sorption Behavior of Tetracycline onto Activated Sludge	CHEN Rui-ping, ZHANG Li, YU Jie, <i>et al.</i> (156)
<i>In situ</i> Experimental Research on Natural Attenuation of Oil Pollutants in a Gas Station	JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, <i>et al.</i> (163)
Influence and Assessment of Biochar on the Bioavailability of Chlorobenzenes in Soil	SONG Yang, WANG Fang, YANG Xing-lun, <i>et al.</i> (169)
Control for MUCT Process Operation Using Nitrate Concentration in the Secondary Anoxic Zone	WANG Xiao-ling, JIN Yun, GAO Shang (175)
Modeling Formation of Aerobic Granule and Influence of Hydrodynamic Shear Forces on Granule Diameter	DONG Feng, ZHANG Han-min, YANG Feng-lin (181)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) on Municipal Sewage Sludge Bioleaching Continuous Plug Flow Reaction System	LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (191)
Biological Phosphorus Removal in Intermittent Aerated Biological Filter	ZENG Long-yun, YANG Chun-ping, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (197)
Methane Production by Anaerobic Co-digestion of Chicken Manure and <i>Spartina alterniflora</i> Residue After Producing Methane	CHEN Guang-yin, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, <i>et al.</i> (203)
Uncertainty Analysis for Evaluating Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfill in Beijing	CHEN Cao-cao, LIU Chun-lan, LI Zheng, <i>et al.</i> (208)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cells Enhanced by Additional Enzyme	YANG Hui, LIU Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (216)
Construction of Electrochemiluminescence System for Harmful Algae Detection	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (222)
Mechanism of the Inhibitory Action of Allelochemical Dibutyl Phthalate on Algae <i>Gymnodinium breve</i>	BIE Cong-cong, LI Feng-min, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (228)
Toxic Effects of Nano-TiO ₂ on <i>Gymnodinium breve</i>	LI Feng-min, ZHAO Wei, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (233)
Spatial Distribution of Three Endocrine Disrupting Chemicals in Sediments of the Suzhou Creek and Their Environmental Risks	LI Yang, HU Xue-feng, OH Kokyo, <i>et al.</i> (239)
Level, Distribution, and Source Identification of Polychlorinated Naphthalenes in Surface Agricultural Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, JIA Jin-pan, LI Yuan-cheng, <i>et al.</i> (247)
Heavy Metal Pollution in Street Dusts from Different Functional Zones of Luoyang City and Its Potential Ecological Risk	LIU De-hong, WANG Fa-yuan, ZHOU Wen-li, <i>et al.</i> (253)
Soil Contamination and Assessment of Heavy Metals of Xiangjiang River Basin	LIU Chun-zao, HUANG Yi-zong, LEI Ming, <i>et al.</i> (260)
Characteristics of Heavy Metals in Soil Profile and Pore Water Around Hechi Antimony-Lead Smelter, Guangxi, China	XIANG Meng, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (266)
Speciation Transformation and Behavior of Arsenic in Soils Under Anoxic Conditions	WU Xi, XU Li-ying, ZHANG Xue-xia, <i>et al.</i> (273)
Remediation of Chromium(VI) Contaminated Soils Using Permeable Reactive Composite Electrodes Technology	FU Rong-bing, LIU Fang, MA Jin, <i>et al.</i> (280)
Determination and Characterization on the Capacity of Humic Acid for the Reduction of Divalent Mercury	JIANG Tao, WEI Shi-qiang, LI Xue-mei, <i>et al.</i> (286)
Effect of Zn (II) on Microbial Activity in Anaerobic Acid Mine Drainage Treatment System with Biomass as Carbon Source	LI Shao-jie, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (293)
Diversity of Culturable Butane-oxidizing Bacteria in Oil and Gas Field Soil	ZHANG Ying, LI Bao-zhen, YANG Jin-shui, <i>et al.</i> (299)
Microbial Community Structure Analysis of Unexploited Oil and Gas Fields by PCR-DGGE	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (305)
Community Diversity of Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Rhizosphere of Eight Plants in Liudaogou Watershed on the Loess Plateau China	FENG Ye, TANG Ming, CHEN Hui, <i>et al.</i> (314)
Dynamics of Degradation of Oxytetracycline of Pig and Chicken Manures in Soil and Mechanism Investigation	ZHANG Jian, GUAN Lian-zhu, YAN Li (323)
Influence of Impurities on Waste Plastics Pyrolysis: Products and Emissions	ZHAO Lei, WANG Zhong-hui, CHEN De-zhen, <i>et al.</i> (329)

《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1月15日 33卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 1 Jan. 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@ 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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行