

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

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

16 届亚运会期间广州城区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响	陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)
北京地区秋季雾霾天 PM _{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析	赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究	王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)
杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征	谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别	李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究	周变红, 张承中, 王格慧 (448)
华东区域高山背景点 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 背景值及污染特征	苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估	田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征	张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究	徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究	欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素	刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)
降尘收集方法对降尘效率的影响	张正偲, 董治宝 (499)
海河流域水生生态功能一级二级分区	孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究	时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究	黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响	邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究	张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制	周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征	崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析	董雯, 李怀恩, 李家科 (561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果	任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究	郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用	李三华, 张奇亚 (583)
水生植物热解生物油对中肋骨藻抗氧化酶活性的影响	姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)
TiO ₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学	张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究	王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究	谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究	杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 培养研究	嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响	陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH ₄ 的影响	姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征	青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)
区域地下水污染风险评价方法研究	杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范	王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究	朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应	骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响	张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究	罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)
外源 Cr(III) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究	郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征	潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析	刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征	姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定	吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析	姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究	王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性	倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究	厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响	唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性	刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响	刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)
筒青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征	沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究	杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响	王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究	李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化	吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)
《环境科学》征订启事 (447)	《环境科学》征稿简则 (493)
信息 (508, 588, 610, 731)	专辑征稿通知 (788)

水生植物热解生物油对中肋骨条藻抗氧化酶活性的影响

姚远¹, 李锋民^{1*}, 李媛媛¹, 单时¹, 李杰², 王震宇¹

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100; 2. 山东电力集团威海供电公司海源电力勘测设计有限公司, 威海 264200)

摘要: 为揭示水生植物生物油抑藻机制, 研究了芦竹 300℃、芦苇 400℃ 以及香蒲 400℃ 这 3 种生物油对中肋骨条藻丙二醛含量变化及抗氧化酶系统 (SOD、POD、CAT) 活性的影响。结果表明, 在这 3 种生物油作用下, 生物油浓度越高 MDA 含量越高, 当生物油浓度为 10 mg·L⁻¹ 时, 中肋骨条藻丙二醛 (MDA) 含量随着作用时间的延长而升高; 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性随生物油添加浓度的升高而升高, 在芦竹 300℃ 及香蒲 400℃ 生物油作用下随时间延长呈先升高后降低趋势, 均在 24 h 时达到最大值, 分别为 93.6 U·(10⁷ cells)⁻¹、8.23 U·(10⁷ cells)⁻¹, 而在芦苇 400℃ 生物油作用下 72 h 内始终保持升高趋势; 过氧化物酶 (POD) 活性同样也随生物油浓度的增加而升高, 芦竹 300℃、芦苇 400℃ 生物油作用下 POD 活性先升后降, 香蒲 400℃ 作用下则呈波动上升趋势; 过氧化氢酶 (CAT) 活性在这 3 种生物油作用下随培养时间的延长均呈现先升高后降低的趋势, 且生物油浓度越大, CAT 活性越高。生物油引起抗氧化酶活性升高, 导致藻细胞内产生氧化胁迫, 可能是其抑制藻类的主要机制。

关键词: 水生植物; 热解生物油; 中肋骨条藻; 抗氧化酶; 抑制机制

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301 (2013) 02-0589-07

Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on *Skeletonema costatum* Antioxidant Enzyme Activities

YAO Yuan¹, LI Feng-min¹, LI Yuan-yuan¹, SHAN Shi¹, LI Jie², WANG Zhen-yu¹

(1. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Weihai Power Supply Company, Shandong Electric Power Corporation, Weihai 264200, China)

Abstract: In order to reveal the preliminary inhibition mechanisms of aquatic plants bio-oils on *Skeletonema costatum*, effects of *Arundo donax* L. 300℃, *Ph. australis* Trin. 400℃ and *Typha orientalis* Presl 400℃ bio-oils on the concentration change of malondialdehyde (MDA) and the activity of antioxidant enzymes system (SOD, POD and CAT) were evaluated. The results showed that the higher the Bio-oil concentrations, the higher the MDA contents in *Skeletonema costatum* was, and when the Bio-oil concentration was 10 mg·L⁻¹, the MDA concentration increased with the reaction time. Superoxide dismutase (SOD) activity also increased with the increase of bio-oil concentration. For *Arundo donax* L. 300℃ and *Typha orientalis* Presl 400℃ bio-oil, when the reaction time was longer, the SOD activity of *Skeletonema costatum* first increased and then decreased, and in both cases the maximum SOD activity was measured at 24 h, reaching 93.6 U·(10⁷ cells)⁻¹ and 8.23 U·(10⁷ cells)⁻¹, respectively. For *Ph. australis* Trin 400℃ bio-oil, the SOD activity kept increasing within 72 h. The peroxidase (POD) activity of *Skeletonema costatum* also increased with the increase of bio-oil concentrations. In the presence of *Arundo donax* L. 300℃ and *Ph. australis* Trin 400℃ bio-oil, the POD activity of *Skeletonema costatum* first increased and then decreased, while with *Typha orientalis* Presl 400℃ bio-oil the POD activity increased with fluctuations. For all the three bio-oils, the catalase (CAT) activities increased first and then decreased when the reaction time was prolonged, and the higher the bio-oils concentration, the greater the CAT activity was. Pyrolysis bio-oils enhance the activity of antioxidant enzymes, leading to intracellular oxidative stress in the algae, which seems to be the main inhibitory mechanism for algae.

Key words: macrophytes; pyrolysis bio-oil; *Skeletonema costatum*; antioxidant enzymes; inhibitory mechanism

抗氧化酶系统是需氧生物防御过氧化损伤的活性氧清除系统。该系统主要包括超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶 (peroxidase, POD)、过氧化氢酶 (catalase, CAT) 等^[1-3]。可被清除的活性氧自由基则是指电子传递的生化过程中产生正常的代谢产物, 通常含有 2~3 个电子, 如超氧阴离子自由基 (O₂⁻)、羟自由基 (·OH)、过氧化氢 (H₂O₂) 等^[3-5]。活性氧自由基性

质活泼、氧化能力强, 主要来源于线粒体、叶绿体和一些酶促反应, 普遍存在于植物体内^[6,7]。正常情况下抗氧化酶系统会消除过量的活性氧自由基, 使

收稿日期: 2012-03-22; 修订日期: 2012-04-20

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 (2009ZX07010-009); 教育部科学研究重大项目 (308016)

作者简介: 姚远 (1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生物学, E-mail: 575002358@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: lfm01@ouc.edu.cn

体内的活性氧代谢处于一个动态的平衡中。但当植物体受到逆境胁迫时,大量的活性氧产生,为起到清除作用,抗氧化酶系统活性会上升,细胞内活性氧浓度超过一定范围抗氧化体系酶不能及时清除,过量的活性氧则可导致细胞内的过氧化反应,特别是脂质过氧化反应,破坏细胞内膜系统,防御系统遭到破坏,抗氧化酶活性降低,因此,抗氧化体系酶活性可以间接反映植物细胞内活性氧的浓度。活性氧的积累和损伤,最终则可导致细胞死亡。

自 20 世纪 60 年代末生物自由基伤害学说提出以来,已被广泛应用于需氧生物细胞毒害机制的研究。李锋民等^[9]从芦苇中分离出化感物质 2-甲基乙酰乙酸乙酯(Ethyl-2-methyl acetoacetate, EMA)在低浓度($0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)时提高了蛋白核小球藻和铜绿微囊藻 2 种藻类的超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶活性;高浓度的 EMA 显著降低了蛋白核小球藻的抗氧化体系酶活性,使普通小球藻的抗氧化体系酶活性提高了 3 倍以上;孟范平等^[10]发现 4 种海洋微藻的 SOD 和 CAT 对不同质量浓度的 2,2',4,4'-四溴联苯醚胁迫均呈现出一定的应激活性,以此降低 BDE-47 胁迫对藻细胞自身的危害;Hong 等^[11]研究发现 EMA 可以导致铜绿微囊藻细胞内活性氧水平显著提高, $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的浓度处理就可以使活性氧浓度达到对照组的 1.91 倍,同时脂质过氧化产物丙二醛(Malondialdehyde, MDA)的含量达到了约对照组的 3.5 倍。证实了化感物质 EMA 造成藻细胞胁迫损伤的原因是诱导活性氧产生,从而引起脂质过氧化造成藻细胞膜结构的破坏和代谢活性受损。

中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)是中国近海赤潮优势藻种之一,前期研究表明,水生植物生物油对中肋骨条藻有较强抑制作用,不同种类水生植物生物油对中肋骨条藻抑制强度不同^[12],为初步揭示水生植物生物油对藻类的抑制途径,本研究选择芦竹 300℃、芦苇 400℃ 以及香蒲 400℃ 这 3 种具有强抑藻能力的生物油,分析其对中肋骨条藻丙二醛(MDA)含量及抗氧化酶系统(SOD、POD、CAT)活性的影响,以期阐明水生植物生物油抑藻机制并应用于赤潮控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

水生植物生物油:依据前期研究^[12],选取对中肋骨条藻抑制作用较强的芦竹 300℃、芦苇 400℃

以及香蒲 400℃ 自制生物油为研究对象,分析其对中肋骨条藻抗氧化酶活性影响。

中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*):由中国科学院海洋研究所提供。藻类培养用 500 mL 玻璃三角瓶在 10% HCl 中浸泡 24 h 后,用蒸馏水冲洗 3 遍,121℃ 高压湿热灭菌 20 min。自然海水经 $0.45 \mu\text{m}$ 醋酸纤维素酯滤膜过滤,121℃ 高压湿热灭菌 20 min,室温冷却后按照灭菌海水:培养基母液 = 1 000:1 的比例加入 f/2 培养基。接种中肋骨条藻,接种所用中肋骨条藻在光照培养箱中预培养 3 d,处于指数生长期。培养箱光暗比为 12 h:12 h,白天光照强度为 4 000 lx,昼夜温度为 24/20℃。每天振荡 2 次,避免藻类贴壁生长。分别在 24、48 及 72 h 取样。

1.2 实验方法

(1) 水生植物热解生物油的制备 称取干燥水生植物段 100 g 放入真空管式炉(GSL-1300 型)刚玉管中,在氮气保护下以 $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的升温速度升至所需温度,热解 4 h,氮气流量为 $150 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,热解气冷凝收集,得生物油。

(2) 中肋骨条藻藻液处理 芦竹 300℃、芦苇 400℃ 以及香蒲 400℃ 生物油对中肋骨条藻的 EC_{50} 值分别为 1.29、0.82、0.85 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,设置 3 个浓度处理组分别为 0.1、1.0、10.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,并以不添加生物油,即零浓度为对照。每瓶藻液体积为 300 mL,初始藻细胞浓度为 $7 \times 10^7 \text{ mL}^{-1}$ 左右。每个浓度 9 瓶藻液,分 3 组,每组 3 瓶,放入培养箱中培养。

(3) 生物油对中肋骨条藻丙二醛(MDA)含量的影响 间隔 24 h 取藻类培养液 300 mL,离心($4\,500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 10 min),弃上清液,加入 2 mL 0.5 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲溶液(pH 7.8),超声细胞破碎仪破碎 4 min,离心($8\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 10 min),上清液即为粗酶液。取上清液测 MDA 含量,每个处理 3 个重复。

(4) 生物油对中肋骨条藻抗氧化酶 SOD、POD、CAT 活性的影响 粗酶液制备同上,取粗酶液按分析测定方法测定酶活性。

1.3 分析测定方法

(1) 丙二醛(MDA)含量的测定 参照文献[13, 14]的方法。测定步骤如下:①在酶提取液中加入 5 mL 0.5% 硫代巴比妥酸溶液,摇匀。②将试管放入沸水浴中煮沸 10 min(自试管内溶液中出现小气泡开始计时)。到时后,立即将试管取出并放入冰水浴中。③待试管内溶液冷却后,离心($3\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 15 min),取上清液并量其体积。以 0.5% 硫代巴比妥酸溶液为空白测 532、600 和 450 nm 处的吸光值。丙

二醛(MDA)含量计算公式如下:

$$\text{MDA} [\text{mmol} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}] = [6.452 \times (A_{532} - A_{600}) - 0.559 \times A_{450}] \times (V_t/V_s)/N$$

式中, A_{532} 、 A_{600} 、 A_{450} 分别为样品液在 532、600、450 nm 波长处所测吸光度值; V_t : 提取液总体积(mL); V_s : 测定用提取液体积(mL); N : 藻细胞总数量(cells)由显微镜计数后计算得到。

(2) 超氧化物歧化酶 SOD 活性测定 采用 NBT 法^[15,16], 反应体系包括: 1 mL 磷酸缓冲溶液, 130 mmol·L⁻¹ 甲硫氨酸溶液 0.2 mL, 0.75 mmol·L⁻¹ 氮蓝四唑溶液 0.2 mL, 0.02 mol·L⁻¹ 核黄素溶液 0.2 mL, 0.1 mmol·L⁻¹ EDTA-Na 溶液 0.2 mL, 粗酶液 0.2 mL。

计算公式:

$$\text{SOD 活性} [U \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}] = [(A_0 - A_s)/(A_0 \times 50\%)] \times (V_t/V_s)/N$$

式中, A_0 : 对照管的吸光值; A_s : 样品测定管的吸光值; V_t : 提取液总体积(mL); V_s : 测定用提取液体积(mL); N : 藻细胞总数量(cells)由显微镜计数后计算得到。

(3) 过氧化物酶 POD 采用文献^[17]的方法, 反应体系为: 1 mL 2% H₂O₂, 1 mL 0.05 mol·L⁻¹ 愈创木酚, 1 mL 粗酶液, 加入粗酶液后, 立即于 37℃ 水浴中保温 15 min, 然后迅速转入冰水浴中, 加入 1 mL 20% 三氯乙酸终止反应, 25℃ 下测定 A_{470} 变化。

(4) 过氧化氢酶 CAT 碘量法测定 采用文献^[15]的方法, 空白及测定组加入 5 mL 粗酶液, 立即向空白组加入 5 mL 1.8 mol·L⁻¹ H₂SO₄, 终止酶活性, 各加 5 mL 0.2 mol·L⁻¹ H₂O₂, 摇匀, 记录时间 5 min 后, 测定组加入 5 mL 1.8 mol·L⁻¹ H₂SO₄, 向各组中加入 1 mL 20% KI 及 3 滴 (NH₄)₆Mo₇O₂₄, 摇匀加入 5 滴 1% 淀粉溶液, 用 0.01 mol·L⁻¹ Na₂S₂O₃ 滴定至蓝色恰好消失, 记录 Na₂S₂O₃ 消耗体积。

计算公式:

$$\text{CAT 含量} [\mu\text{g} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}] = [(V_{\text{空白}} - V_{\text{测定}}) \times 0.01 \times 17] \times (V_t/V_s)/N$$

式中, $V_{\text{空白}}$: 空白组滴定所用 Na₂S₂O₃ 体积; $V_{\text{测定}}$: 测定组滴定所用 Na₂S₂O₃ 体积; V_t : 提取液总体积(mL); V_s : 测定用提取液体积(mL); N : 藻细胞总数量(cells)由显微镜计数后计算得到。

(5) 中肋骨条藻细胞密度的变化情况用血球计数板在显微镜(Nikon YS100)下观察, 并以藻密度平均值 ± 标准偏差表示。单因素方差分析(one-way ANOVA)检验实验组和对照组之间的差异显著性。

2 结果与讨论

2.1 水生植物生物油对中肋骨条藻丙二醛(MDA)含量的影响

MDA 是膜脂过氧化的产物, 具有强交联性, 它可使蛋白质、核酸等交联成 Schiff 碱, 导致蛋白质分子及酶变性失活, 使 DNA 受到损伤, MDA 的积累常常可以反映机体胁迫损伤程度, 特别是膜结构破坏的程度^[18,19]。在胁迫条件下, 藻类体内过量的自由基与质膜反应, 导致脂质过氧化, MDA 含量便表现出上升趋势。图 1 ~ 3 分别为不同浓度芦竹 300℃、芦苇 400℃ 及香蒲 400℃ 生物油作用下中肋骨条藻 MDA 含量的变化情况。由图 1 可知, 加入芦竹 300℃ 生物油后, 中肋骨条藻 MDA 含量有不同程度的升高, 对照组 MDA 含量始终保持较低水平。当芦竹 300℃ 生物油添加浓度为 10 mg·L⁻¹, 作用 24 h 后 MDA 含量达 4.45 mmol·(10⁷ cells)⁻¹, 表明该浓度下, 作用 24 h 芦竹 300℃ 生物油加剧了中肋骨条藻藻细胞膜脂过氧化, 藻细胞氧化损伤较为严重。0.1 mg·L⁻¹ 和 1.0 mg·L⁻¹ 处理组藻液 MDA 含量比空白组略有升高但差异并不显著($P > 0.05$)。而在不同浓度芦苇 400℃ 生物油作用下(图 2), 当作用时间为 24 h 时, 各处理组藻液 MDA 含量并无显著差异, 但随着作用时间的延长, 添加浓度为 10 mg·L⁻¹ 时, 中肋骨条藻 MDA 含量逐渐上升, 藻细胞发生过氧化反应, 损伤逐渐加剧。作用 72 h 后, MDA 含量为 3.77 mmol·(10⁷ cells)⁻¹。图 3 为香蒲 400℃ 生物油对中肋骨条藻 MDA 含量的影响, 作用 24 h 后, 0.1、1.0 及 10.0 mg·L⁻¹ 处理组及空白组 MDA 含量并无显著差异($P > 0.05$), 而在 48 h 时, 1.0 mg·L⁻¹ 和 10.0 mg·L⁻¹ 处理组藻液 MDA 含量均有一定的升高, 分别达到 1.34 mmol·(10⁷ cells)⁻¹ 和 1.85 mmol·(10⁷ cells)⁻¹。当作用时间继续增加至

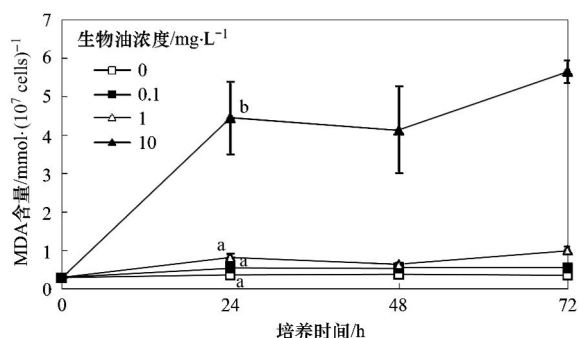


图 1 芦竹 300℃ 生物油对中肋骨条藻 MDA 含量的影响

Fig. 1 Effect of *Arundo donax* L. 300℃ bio-oil on the MDA content in *Skeletonema costatum*

72 h 时,MDA 含量并没有表现出进一步的升高,说明随作用时间的延长,香蒲 400℃ 生物油并没有引起藻类膜脂过氧化的进一步加强,分析原因可能是由于其对中肋骨条藻的氧化作用诱导了抗氧化酶系统活性,抗氧化酶及时清除了一定量的活性氧自由基,从而保护藻细胞免受进一步的氧化损伤。

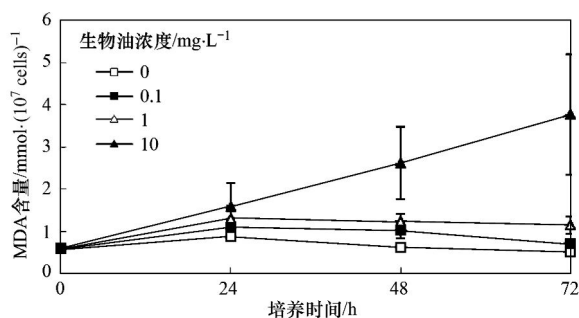


图2 芦苇 400℃ 生物油对中肋骨条藻 MDA 含量的影响

Fig. 2 Effect of *Ph. australis* Trin. 400℃ bio-oil on the MDA content in *Skeletonema costatum*

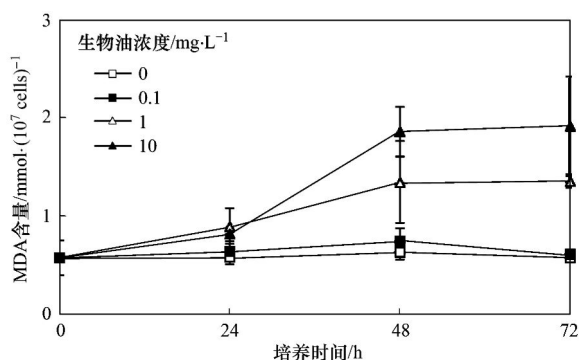


图3 香蒲 400℃ 生物油对中肋骨条藻 MDA 含量的影响

Fig. 3 Effect of *Typha orientalis* Presl 400℃ bio-oil on the MDA content in *Skeletonema costatum*

2.2 生物油对中肋骨条藻超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

超氧化物歧化酶(SOD)是抗氧化酶系统中唯一能清除活性氧自由基 $O_2^{\cdot-}$ 的酶,常被作为研究藻类生长受抑制机制指标.通过测定藻细胞内 SOD 的活性变化可考察 3 种水生植物生物油对中肋骨条藻藻细胞的作用情况。

在不同浓度 3 种生物油的作用下,藻细胞内 SOD 活性的变化如图 4~6 所示.图 4 为芦竹 300℃ 生物油作用下中肋骨条藻 SOD 的活性变化.当生物油添加浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,SOD 活性先增高后降低,并在 24 h 时达最高值 $93.6 \text{ U} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}$. $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度处理组中,SOD 活性与对照组相比并无显著变化 ($P > 0.05$),说明在低、中

浓度芦竹 300℃ 生物油作用下中肋骨条藻氧化损伤较弱,而高浓度生物油的胁迫则可能超过了藻类自身的调节范围,与之前测得 MDA 含量上升存在一致性.芦苇 400℃ 生物油作用下中肋骨条藻 SOD 活性变化如图 5, $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组 SOD 活性与空白组差异不大 ($P > 0.05$),而在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 芦苇 400℃ 生物油作用下,SOD 活性由 24 h 的 $11.53 \text{ U} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}$ 升至 48 h 的 $37.03 \text{ U} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}$,待培养至 72 h 时其活性为 $50.97 \text{ U} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}$,SOD 活性随作用时间的延长而升高,说明藻细胞在高浓度芦苇 400℃ 生物油作用下,SOD 活性可在 72 h 内始终保持升高趋势,以此清除藻细胞内产生的活性氧自由基防止过氧化损伤.图 6 为香蒲 400℃ 生物油对中肋骨条藻 SOD 活性的影响.生物油添加浓度越高 SOD 活性越高,各浓度处理组中,SOD 活性先升后降,当生物油添加浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 及 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,SOD 活性在 24 h 达到最高值,分别为 $8.23 \text{ U} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}$ 及 $2.37 \text{ U} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}$.浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,最高值出现在 48 h,为 $3.09 \text{ U} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}$.香蒲 400℃ 生物油作用下,中肋骨条藻 SOD 活性最大值均低于 10.0

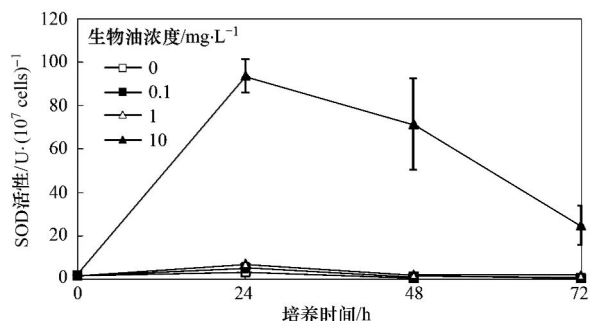


图4 芦竹 300℃ 生物油对中肋骨条藻 SOD 活性的影响

Fig. 4 Effect of *Arundo donax* L. 300℃ bio-oil on the SOD activity of *Skeletonema costatum*

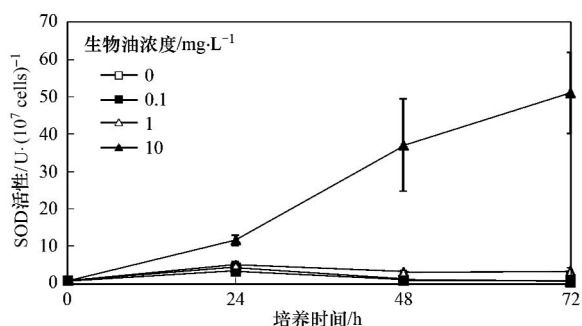


图5 芦苇 400℃ 生物油对中肋骨条藻 SOD 活性的影响

Fig. 5 Effect of *Ph. australis* Trin. 400℃ bio-oil on the SOD activity of *Skeletonema costatum*

$\text{U} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}$, 与芦苇 400℃ 及芦竹 300℃ 生物油相比活性较弱。

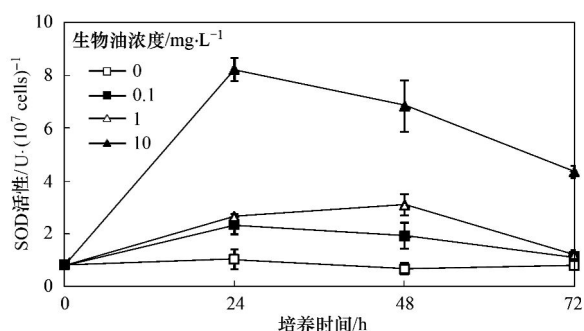


图6 香蒲 400℃ 生物油对中肋骨条藻 SOD 活性的影响

Fig. 6 Effect of *Typha orientalis* Presl 400℃ bio-oil on the SOD activity of *Skeletonema costatum*

2.3 生物油作用下中肋骨条藻过氧化物酶 (POD) 活性变化

SOD 催化 $\text{O}_2^{\cdot -}$ 与 H^+ 结合, 将 $\text{O}_2^{\cdot -}$ 还原成 H_2O_2 后, 需在过氧化物酶 (POD) 或过氧化氢酶 (CAT) 的催化下, 转变成无毒性的 H_2O 和 O_2 , 从而保护机体免受氧自由基的损害。在含不同浓度芦竹 300℃、芦苇 400℃ 和香蒲 400℃ 生物油培养液中, 中肋骨条藻 POD 活性随时间变化趋势如图 7~9 所示。

在浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 及 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 芦竹 300℃ 生物油作用下 (图 7), 随着时间的延长, 中肋骨条藻 POD 含量在 24 h 时达到最高值, 分别为 $203.94 \text{ U} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}$ 、 $97.72 \text{ U} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}$ 。分析原因可能是当浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 及 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 生物油对藻细胞产生氧化胁迫, 活性氧含量升高, 为及时地清除活性氧实现自我保护, POD 含量出现应激性升高, 活性氧清除到正常水平后 POD 含量恢复正常水平。浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 藻细胞 POD 活性比空白略有升高无显著差异 ($P > 0.05$)。与芦竹 300℃ 生物油作用不同, 芦苇 400℃ 生物油在浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 及 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 随着作用时间的延长, POD 含量在 48 h 时达到最高值, 分别为 $96.0 \text{ U} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}$ 、 $23.76 \text{ U} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}$ (图 8), 待培养至 72 h 时活性有所下降。24 h 时, 各浓度处理组藻细胞 POD 活性无显著差异 ($P > 0.05$), 图 9 为香蒲 400℃ 生物油不同浓度对中肋骨条藻 POD 活性影响。在各浓度香蒲 400℃ 生物油作用下, POD 活性随时间延长虽略有波动但均呈上升趋势, 且浓度越高 POD 活性越高。当添加浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 作用 24 h 后, POD 活性显著升高至 $41.78 \text{ U} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}$, 48 h 时下降至 $36.35 \text{ U} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}$, 之后活性又有所升高,

达到最大值 $48.11 \text{ U} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}$ 。 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 香蒲 400℃ 生物油作用下, POD 活性在 72 h 时达最大值 $26.28 \text{ U} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}$ 。当浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 藻细胞 POD 活性最大值为 72 h 的 $11.33 \text{ U} \cdot (10^7 \text{ cells})^{-1}$ 。整体来说, 香蒲 400℃ 生物油作用下藻细胞 POD 活性低于芦苇 400℃ 及芦竹 300℃ 生物油作用下藻细胞 POD 活性, 与之前所述 SOD 活性变化存在一定的一致性。

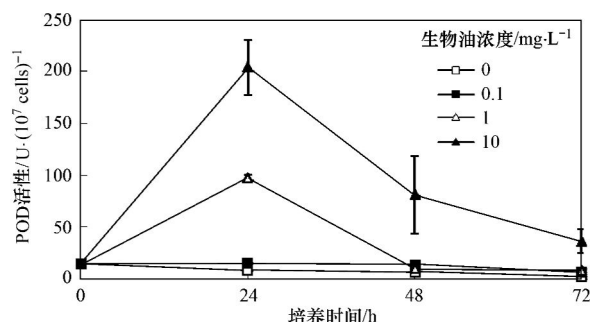


图7 芦竹 300℃ 生物油对中肋骨条藻 POD 活性的影响

Fig. 7 Effect of *Arundo donax* L. 300℃ bio-oil on the POD activity of *Skeletonema costatum*

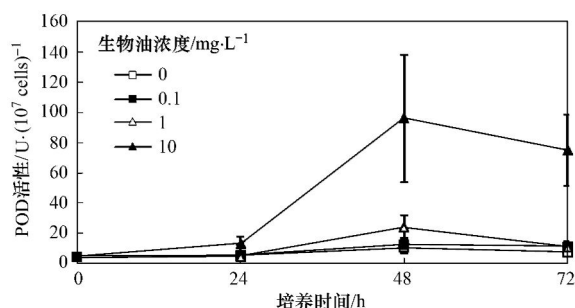


图8 芦苇 400℃ 生物油对中肋骨条藻 POD 活性的影响

Fig. 8 Effect of *Ph. australis* Trin. 400℃ bio-oil on the POD activity of *Skeletonema costatum*

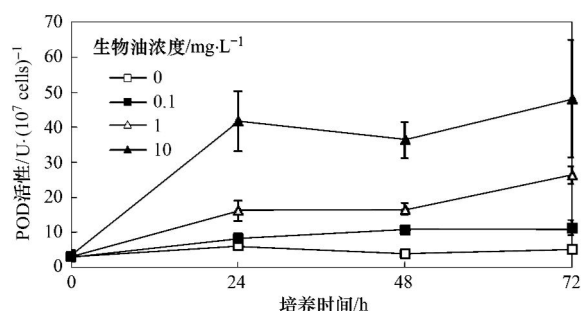


图9 香蒲 400℃ 生物油对中肋骨条藻 POD 活性的影响

Fig. 9 Effect of *Typha orientalis* Presl 400℃ bio-oil on the POD activity of *Skeletonema costatum*

2.4 生物油作用下中肋骨条藻过氧化氢酶 (CAT) 活性变化

CAT 是植物体内清除过氧化氢的关键酶, 能够将代谢产生的对机体有害的 H_2O_2 分解成 H_2O 和

O_2 , 避免了 H_2O_2 在体内积累, 具有解毒作用. 在芦竹 $300^\circ C$ 生物油作用下 (图 10), 浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 藻细胞 CAT 活性急剧升高, 在 48 h 时达最大值 (以 H_2O_2 计, 下同) $394.63\text{ }\mu\text{g}\cdot(10^7\text{ cells})^{-1}$, 72 h 时下降至 $267.22\text{ }\mu\text{g}\cdot(10^7\text{ cells})^{-1}$, 与对照组差异显著 ($P < 0.05$). 而 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度处理组与对照相比无明显变化, CAT 活性始终保持较低水平. 表明芦竹 $300^\circ C$ 生物油在 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下可使藻细胞内产生大量过氧化氢, 为减少其在藻细胞内的积累, 中肋骨条藻 CAT 活性表现出显著提高. 而对于芦苇 $400^\circ C$ 生物油来说 (图 11), 当其浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, CAT 活性在 24 h 时达到最大值 $39.13\text{ }\mu\text{g}\cdot(10^7\text{ cells})^{-1}$, 之后随培养时间延长呈下降趋势. 其他浓度处理组 CAT 活性没有出现显著变化 ($P > 0.05$). 与芦竹 $300^\circ C$ 生物油作用存在一定差异. 香蒲 $400^\circ C$ 生物油作用下中肋骨条藻 CAT 活性 (图 12) 先升高后降低趋势极为明显, 在 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下, 24 h 时显著 ($P < 0.05$) 升高至 $39.23\text{ }\mu\text{g}\cdot(10^7\text{ cells})^{-1}$, 在 48 h 时又迅速下降至 $5.90\text{ }\mu\text{g}\cdot(10^7\text{ cells})^{-1}$, 表明藻细胞在香蒲生物油作用下短时间内便可能产生了一定量的过氧化氢, CAT 活性表现出应急性升高, 将过氧化氢清除之后又恢复到正常水平.

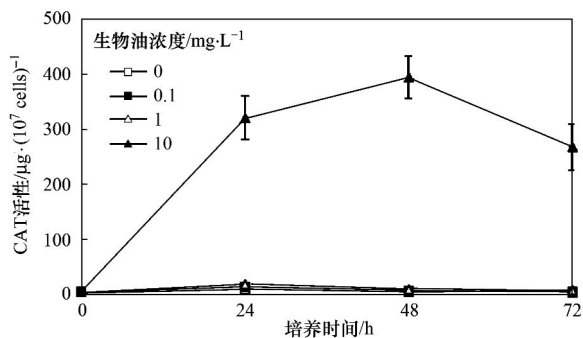


图 10 芦竹 $300^\circ C$ 生物油对中肋骨条藻 CAT 活性的影响

Fig. 10 Effect of *Arundo donax* L. $300^\circ C$ bio-oil on the CAT activity of *Skeletonema costatum*

有关化感物质及有害物质等作用机制的研究结果表明, 过氧化损伤是这些物质对藻细胞的主要作用机制. Li 等^[20] 发现化感物质 2-甲基乙酰乙酸乙酯可以降低铜绿微囊藻和蛋白核小球藻细胞抗氧化酶的活性, 张庭廷等^[21] 认为酚酸类化感物质能够引起水华鱼腥藻和蛋白核小球藻细胞内超氧阴离子 (O_2^-) 过度积累, 造成膜质过氧化而导致细胞死亡. 刘碧云等^[22] 研究发现在低浓度丙体六六六 ($\gamma\text{-HCH}$) 处理组中 ($< 0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 斜生栅

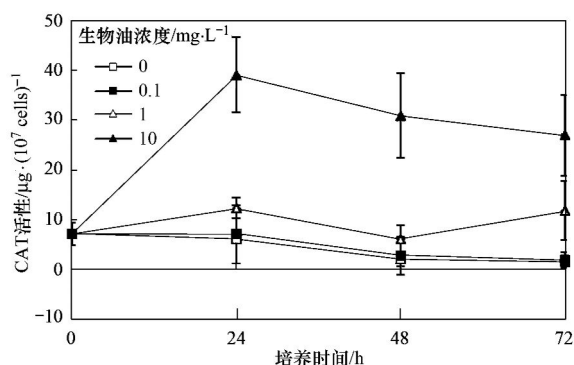


图 11 芦苇 $400^\circ C$ 生物油对中肋骨条藻 CAT 活性的影响

Fig. 11 Effect of *Ph. australis* Trin. $400^\circ C$ bio-oil on the CAT activity of *Skeletonema costatum*

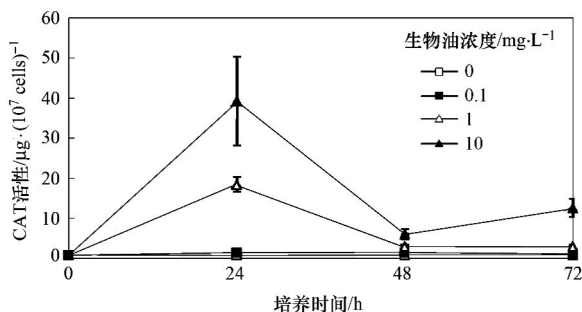


图 12 香蒲 $400^\circ C$ 生物油对中肋骨条藻 CAT 活性的影响

Fig. 12 Effect of *Typha orientalis* Presl $400^\circ C$ bio-oil on the CAT activity of *Skeletonema costatum*

藻 SOD 活性有一定升高, MDA 的含量变化不大, 细胞膜未受到较大伤害. 当 $\gamma\text{-HCH}$ 浓度为 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, SOD 含量有所下降, O_2^- 在藻体内积累, MDA 含量相应上升, 藻细胞膜脂过氧化加强. 过量自由基的产生和积累, 导致自由基攻击蛋白质、核酸等生物大分子, 使其结构和功能破坏, 进而加重细胞的伤害, 在 $\gamma\text{-HCH}$ 浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, SOD 活性仅有对照的 38.18%, MDA 却高出对照 158.8%, 其生长和色素含量也较其对照低. 本研究中 3 种水生植物热解生物油添加至培养基中后, 中肋骨条藻 MDA 含量均有所升高, 抗氧化酶活性也有一定的变化, 初步认为过氧化损伤是生物油对中肋骨条藻抑制作用的主要机制.

3 结论

在芦竹 $300^\circ C$ 、芦苇 $400^\circ C$ 以及香蒲 $400^\circ C$ 生物油作用下, 中肋骨条藻生长受到一定抑制, 藻液中 MDA 含量随生物油添加浓度的增大而升高, 同时随着作用时间的延长也有明显的上升趋势. SOD、POD 及 CAT 这 3 种抗氧化酶活性均随生物油添加浓度

的升高而升高. SOD 活性在芦竹 300℃ 及香蒲 400℃ 生物油作用下随时间延长呈现先升高后降低的趋势, 在 24 h 时达最大值, 在芦苇 400℃ 生物油作用下 72 h 内 SOD 活性始终保持升高趋势. 随培养时间的延长在芦竹 300℃、芦苇 400℃ 生物油作用下 POD 活性先升后降, 香蒲 400℃ 作用下则波动上升. CAT 活性在 3 种生物油作用下均随培养时间的延长先升后降. 由活性氧过度积累而引起的脂质过氧化可能是生物油对藻细胞作用机制之一, 生物油对中肋骨条藻活性氧变化的影响需进一步研究.

参考文献:

- [1] Apel K, Hirt H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction [J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, **55**(1): 373-399.
- [2] Liu F, Pang S J. Stress tolerance and antioxidant enzymatic activities in the metabolisms of the reactive oxygen species in two intertidal red algae *Grateloupia turuturu* and *Palmaria palmate* [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2010, **382**(2): 82-87.
- [3] Lei J, Hong Y. Prometryne-induced oxidative stress and impact on antioxidant enzymes in wheat [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, **72**(1): 1687-1693.
- [4] Torresa M A, Barros M P, Campos S C, et al. Biochemical biomarkers in algae and marine pollution: a review [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2010, **71**(1): 1-15.
- [5] 王丽平, 郑丙辉, 孟伟. 荧蒽对两种海洋硅藻生长、SOD 活性和 MDA 含量的影响[J]. 海洋通报, 2008, **27**(4): 53-58.
- [6] Noreen Z, Ashraf M. Changes in antioxidant enzymes and some key metabolites in some genetically diverse cultivars of radish (*Raphanus sativus* L.) [J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, **67**(2): 395-402.
- [7] 利容千, 王建波. 植物逆境细胞及生理学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002. 2-10.
- [8] Ashraf M. Biotechnological approach of improving plant salt tolerance using antioxidants as markers [J]. Biotechnology Advances, 2009, **27**(1): 84-93.
- [9] 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.
- [10] 孟范平, 李卓娜, 赵顺顺, 等. BDE-47 对 4 种海洋微藻抗氧化酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(5): 1659-1664.
- [11] 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, 2007, **165**(12): 1264-1273.
- [12] 李锋民, 单时, 胡忻雨, 等. 水生植物热解生物油对中肋骨条藻的抑制作用[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(9): 1942-1948.
- [13] Rocchetta I, Mazzuca M, Conforti V, et al. Effect of chromium on the fatty acid composition of two strains of *Euglena gracilis* [J]. Environmental Pollution, 2006, **141**(2): 353-358.
- [14] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [15] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 178-179.
- [16] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006. 132-134.
- [17] Evans J J, Alldridge N A. The distribution of peroxidase in extreme dwarf and normal tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) [J]. Phytochemistry, 1965, **4**(3): 449-503.
- [18] 张庭延, 何梅, 吴安平, 等. 对羟基苯甲酸对铜绿微囊藻的化感效应以及对鲤鱼的毒性作用[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(9): 1887-1893.
- [19] 刘洁生, 陈兰芝, 杨维东, 等. 凤眼莲根系丙酮提取物抑制赤潮藻类生长的机制研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(5): 815-820.
- [20] Li F M, Hu H Y. Isolation and characterization of a novel anti-algal allelochemical from *Phragmites communis* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(11): 6545-6553.
- [21] 张庭延, 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.
- [22] 刘碧云, 周培疆, 李佳洁, 等. 丙体六六六对斜生栅藻生长及光合色素和膜脂过氧化影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(1): 204-207.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i>	(409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i>	(416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i>	(424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i>	(434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i>	(441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui	(448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun	(455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i>	(462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i>	(468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i>	(476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i>	(484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan	(494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao	(499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i>	(509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i>	(517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiang, <i>et al.</i>	(525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i>	(532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i>	(540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i>	(547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i>	(555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke	(561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i>	(570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i>	(576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya	(583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i>	(596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i>	(604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping	(611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i>	(616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i>	(622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i>	(629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i>	(635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen	(642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i>	(647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i>	(653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i>	(662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei	(668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i>	(676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i>	(685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i>	(692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i>	(698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i>	(705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i>	(712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i>	(718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i>	(732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i>	(740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i>	(746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i>	(753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i>	(760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i>	(767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i>	(773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i>	(781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i>	(789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i>	(795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i>	(804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-ben, <i>et al.</i>	(810)

《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2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 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