

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第1期

Vol.34 No.1

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

长三角背景地区秋冬季节大气气态总汞含量特征研究	窦红颖,王书肖,王龙,张磊,郝吉明 (1)
厦门城区大气颗粒物 PM ₁₀ 中有机酸源谱特征分析	杨冰玉,黄星星,郑桢,刘碧莲,吴水平 (8)
兴隆大气气溶胶中水溶性无机离子分析	李杏茹,宋爱利,王英锋,孙颖,刘子锐,王跃思 (15)
气相组分对氨吸收同步脱除模拟烟气 SO ₂ 和 NO _x 的影响	王鸿,朱天乐,王美艳 (21)
麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较	汪军,王德建,张刚,王远 (27)
单光子/光电子在线质谱实时分析聚氯乙烯热分解/燃烧产物	陈文东,侯可勇,陈平,李芳龙,赵无垠,崔华鹏,花磊,谢园园,李海洋 (34)
碱性活性炭表面特征及其吸附甲烷的研究	张梦竹,李琳,刘俊新,孙永军,李国滨 (39)
夏季黄渤海表层海水中二甲亚砜 (DMSO) 的浓度分布	王敏,张洪海,杨桂朋 (45)
2010年秋季长江口口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析	闫丽红,陈学君,苏荣国,韩秀荣,张传松,石晓勇 (51)
基于集合均方根滤波的太湖叶绿素 a 浓度估算与预测	李渊,李云梅,王桥,张卓,郭飞,吕恒,毕坤,黄昌春,郭宇龙 (61)
基于 HJ1A-CCD 数据的高光谱影像重构研究	郭宇龙,李云梅,朱利,徐德强,李渊,檀静,周莉,刘阁 (69)
重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究	徐尚全,杨平恒,殷建军,毛海红,王鹏,周小萍 (77)
区域点源和非点源磷入河量计算的二元统计模型	陈丁江,孙嗣畅,贾颖娜,陈佳勃,吕军 (84)
秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征	李跃飞,夏永秋,李晓波,熊正琴,颜晓元 (91)
湘江沉积物铜和汞质量基准的建立及其应用	蒋博峰,桑磊鑫,孙卫玲,郝伟,李丽,邓宝山 (98)
丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价	张雷,秦延文,郑丙辉,时瑶,韩超男 (108)
汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布	李晋昌,张红,石伟 (116)
黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估	张妍,李发东,欧阳竹,赵广帅,李静,柳强 (121)
胶州湾、套子湾及四十里湾表层沉积物中有机氯农药的含量和分布特征	刘艺凯,钟广财,唐建辉,潘晓辉,田崇国,陈颖军 (129)
基于干扰梯度的钦江流域底栖动物完整性指数候选参数筛选	卢东琪,张勇,蔡德所,刘朔孺,陈燕海,王备新 (137)
海洋细菌 <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 分离鉴定及对中肋骨条藻的化感作用	王洪斌,陈文慧,李信书,李士虎,阎斌伦 (145)
水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响	苏文,孔繁翔,于洋,贾育红,张民 (150)
化感物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响	高李李,郭沛涌,苏光明,魏燕芳 (156)
无负压供水模式下管网水力模拟与安全评价分析	王欢欢,刘书明,姜帅,孟凡琳,白璐 (163)
天然有机物的相对分子质量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响	胡孟柳,林洁,许光红,董秉直 (169)
不同基质条件下透性处理对脱硫弧菌硫酸盐还原活性的影响	徐慧伟,张旭,李立明,郑光洁,李广贺 (177)
基于零价铁的双金属体系对六氯苯还原脱氯研究	曾宪委,刘建国,聂小琴 (182)
负载型 TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿的动力学研究	张小娜,周少奇,周晓 (188)
污水厂微曝气系统工况下充氧性能测试与分析	吴媛媛,周小红,施汉昌,邱勇 (194)
微气泡及其产生方式对活性污泥混合液性质的影响	刘春,马锦,张磊,张静,张明,吴根 (198)
不同氮浓度冲击对颗粒污泥脱氮过程中 N ₂ O 产生量的影响	韩雪,高大文 (204)
模拟电镀污泥重金属浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	谢鑫源,孙培德,楼菊青,郭茂新,马王钢 (209)
嗜麦芽窄食单胞菌对铜的吸附特性与离子交换	白洁琼,尹华,叶锦韶,彭辉,唐立楠,何宝燕,李跃鹏 (217)
阴离子表面活性剂改性水滑石吸附硝基苯的特性研究	夏燕,朱润良,陶奇,刘汉阳 (226)
活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究	孟文娜,谢杰,吴德意,张振家,孔海南 (231)
北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析	杨维,赵文吉,官兆宁,赵文慧,唐涛 (237)
北京市市售鸡蛋和鸭蛋中全氟化合物的污染水平研究	齐彦杰,周珍,史亚利,孟昭福 (244)
北京市场常见淡水食用鱼体内农药残留水平调查及健康风险评估	于志勇,金芬,孙景芳,原盛广,郑蓓,张文婧,安伟,杨敏 (251)
多效应残差法 (MERA) 表征二甲亚砜-农药二元混合物毒性相互作用	霍向晨,刘树深,张晶,张瑾 (257)
利用 DGGE-菌落原位杂交法分离土壤中精喹禾灵降解菌	吕欣,彭霞薇,呼庆,马安周,江泽平,魏远 (263)
不同白腐真菌复配方式对产酶的影响	孟瑶,梁红,高大文 (271)
不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响	张瑞,张贵龙,姬艳艳,李刚,常泓,杨殿林 (277)
垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响	霍莉莉,邹元春,郭佳伟,吕宪国 (283)
黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征	董洪芳,于君宝,管博 (288)
丘陵林地土壤酸化改良剂的集中施用-自然扩散修复技术研究	方熊,刘菊秀,尹光彩,赵亮,刘世忠,褚国伟,李义勇 (293)
重度滴滴涕污染土壤低温等离子体修复条件优化研究	陈海红,骆永明,滕应,刘五星,潘澄,李振高,贾玉娟 (302)
无定形 Fe(OH) ₃ 和 Fe ₃ O ₄ 共沉淀态 As 的化学提取	陈义萍,王少峰,黄永锋 (308)
铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响	李华,黄建国,袁玲 (315)
污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究	段妮娜,董滨,李江华,戴翎翎,戴晓虎 (321)
高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能	李坤权,李焯,郑正,桑大志 (328)
基于情景分析的浙江沿海地区环境污染防治战略研究	田金平,陈吕军,杜鹏飞,钱易 (336)
微生物全细胞传感器在重金属生物可利用度监测中的研究进展	侯启会,马安周,庄绪亮,庄国强 (347)
2012 城市生态学术研讨会会议论文	
北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征	何小艳,顾培,李叙勇,赵洪涛 (357)
北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征	唐荣莉,马克明,张育新,毛齐正 (364)
北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析	任玉芬,王效科,欧阳志云,侯培强 (373)
洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析	虎博,王铁宇,吕永龙,杜立宇,罗维 (379)
低碳交通电动汽车减排潜力及其影响因素分析	施晓清,李笑诺,杨建新 (385)
北京市社区生活垃圾分类收集实效调查及其长效管理机制研究	邓俊,徐琬莹,周传斌 (395)
人工湿地在应用中存在的问题及解决措施	黄锦楼,陈琴,许连煌 (401)
《环境科学》征订启事 (26)	《环境科学》征稿简则 (68)
信息 (76,144,301,400)	专辑征稿通知 (394)

化感物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响

高李李, 郭沛涌*, 苏光明, 魏燕芳

(华侨大学化工学院环境科学与工程系, 厦门 361021)

摘要: 探讨了肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响, 从叶绿素 a 含量, 抗氧化酶活性, 活性氧自由基 (ROS) 水平, 丙二醛 (MDA) 含量以及光合活性的变化研究了其抑藻的生理生化机制。结果表明, 肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻具有快速抑制效应, 随着浓度的增加抑制效果越明显。其 96 h 半效应浓度 EC_{50} 值为 $5.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。肉桂酸乙酯引起细胞内叶绿素 a 含量下降, 活性氧 (ROS) 的过度累积和 MDA 含量的增加。由此, 说明肉桂酸乙酯通过引起活性氧的过度产生, 导致膜脂过氧化, 引起藻细胞膜系统受损, 代谢发生紊乱。为了清除 ROS, 细胞通过提高抗氧化酶的活性来保护其免受氧化损伤。肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻细胞光合系统 II 的最大光化学量子产量和潜在活性具有一定的急性毒性效应, 但随着时间的延长藻细胞可以通过自身调节在一定程度上恢复其光合活性。

关键词: 肉桂酸乙酯; 蛋白核小球藻; 生理特性; 光合活性; 除藻剂

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0156-07

Effects of Allelochemicals Ethyl Cinnamate on the Growth and Physiological Characteristics of *Chlorella pyrenoidosa*

GAO Li-li, GUO Pei-yong, SU Guang-ming, WEI Yan-fang

(Department of Environmental Science and Engineering, College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The effects of ethyl cinnamate on the growth and physiological characteristics of *Chlorella pyrenoidosa* were studied. The allelopathic mechanisms were explored, from views of chlorophyll a content, antioxidant enzyme activities, reactive oxygen species (ROS) level, malondialdehyde (MDA) content and photosynthetic activity. The results revealed that ethyl cinnamate had acute inhibitory effects on the growth of *Chlorella pyrenoidosa*, and the inhibited degree tended to increase with increased concentrations. The effective concentration causing a 50% inhibition at 96 h was $5.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Ethyl cinnamate induced the decrease of chlorophyll a, the over-accumulation of ROS and the increase of MDA. Therefore, it suggested that ethyl cinnamate could lead to the damage of cell membrane system and metabolic disorder through inducing lipid peroxidation via initiating ROS overproduction. And for scavenging ROS, the algae cells were protected from oxidative damages through increasing the activity of antioxidant enzymes. The results demonstrated ethyl cinnamate had acute inhibition to the maximum quantum yield and the potential activity of photosystem II of *Chlorella pyrenoidosa*, however, the photosynthetic activity could recover to some extent through self-regulation after some time.

Key words: ethyl cinnamate; *Chlorella pyrenoidosa*; physiological characteristics; photosynthetic activity; algacide

目前,全球由水体富营养化引起的藻类水华频频暴发,造成水生生物大量死亡,给渔业、生态环境及人类健康造成严重危害。如何有效控制富营养化水体中的藻类生长,防止水华发生成为目前水环境领域的研究热点之一^[1,2]。常用的灭藻剂大多为氧化型灭藻剂,如氯气、次氯酸钠等,虽然效率高、价廉,但产生二次污染,且腐蚀性强,因此,寻找高效、安全、经济与环境友好型灭藻剂是当务之急^[3,4]。利用化感作用抑制藻类的生长因可生物降解性和生态安全性而日益受到学者的重视^[5~8]。许多研究者从植物中分离鉴定出脂肪酸类、多酚类等化感物质,它们对一些水华蓝藻有一定的抑制作用。例如从凤眼莲中分离出 *N*-苯基-2-萘胺和亚油酸甘油

酯^[9], 马蹄莲中 α -亚麻酸和亚油酸^[10], 芦苇中 2-甲基乙酰乙酸乙酯^[11]。国外学者从穗花狐尾藻中分离出多种酚酸类化感物质(如鞣花酸、没食子酸等),并证实其对铜绿微囊藻的生长有不同程度的抑制作用^[12]。从目前的研究结果来看,当前利用水生植物控制藻类,主要集中于沉水植物^[13~15],挺水植物^[11,16]和浮水植物等^[17,18]。但对陆生植物尤其是大型木本植物化感抑藻的研究相对较少,与水生

收稿日期: 2012-04-03; 修订日期: 2012-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(20777021); 教育部科学技术研究重点项目(210253); 福建省自然科学基金项目(2010J01043); 华侨大学科研基金项目(10HZR11)

作者简介: 高李李(1987~),女,硕士,主要研究方向为环境生物修复, E-mail: gllcool2009@163.com

* 通讯联系人, E-mail: guopeiyong@sina.com

植物相比,陆生植物具有材料来源广、数量大、生长稳定,用于萃取抑藻物质的原材料可以得到保障。因此,研究大型木本植物对藻类的化感作用具有很重要的理论与现实意义。笔者前期以大型木本植物柳树为对象,分离鉴定出含量较多的化感抑藻物质肉桂酸乙酯,它属于酚酸类衍生物,一种常见的合成香料,具有水果或花香的特殊香味,是食用香精和日用香精的常用配料。本研究以肉桂酸乙酯为抑藻剂,分析了其对蛋白核小球藻生长、叶绿素 a 含量、丙二醛(MDA)含量、抗氧化酶活性以及光合活性的影响,揭示其制藻机制,以期为陆生植物化感物质用于藻类控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)购自中国科学院武汉水生所淡水藻种库,采用 SE 培养基培养。肉桂酸乙酯购自上海思域化工科技有限公司,分析纯,纯度 98%。

1.2 实验方法

1.2.1 蛋白核小球藻培养

实验前一周,将藻分别接种于装有 100 mL SE 培养基的 250 mL 锥形瓶中,进行扩大培养,培养条件为:温度 25℃,光照强度 3 000 ~ 4 000 lx,光暗比 14 h: 10 h,每天摇动 3 ~ 4 次,同时随机调换三角瓶放置位置,待达到指数生长期时(藻密度约为 $5 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5$ cells·mL⁻¹)用于进一步实验。采用二甲基亚砜作为助溶剂将肉桂酸乙酯配成母液待用,然后将其加入到 SE 培养基中,使肉桂酸乙酯的终浓度分别为 0、2、4、8、10 mg·L⁻¹,每组设 3 个平行,所有操作均在无菌条件下进行,以排除微生物的干扰。受试藻液中二甲基亚砜的最终含量低于 0.2%,以排除二甲基亚砜的干扰。

1.2.2 藻细胞密度测定

采用血球计数板显微技术法测定藻细胞密度,并于 680 nm 波长处测定其吸光度,得到蛋白核小球藻细胞密度($Y = 5 \times 10^4$ cells·mL⁻¹)与藻液吸光度 D_{680} (X) 的关系: $Y = 357.37X + 0.2904$ ($R^2 = 0.9992$)。两者相关性较好,所以每天定时测定藻液的光密度值(D 值)来反映藻生长情况。

1.2.3 抗氧化酶活性的测定

藻液处理 96 h 后,离心收集藻细胞,并迅速放入冰浴中,加入 50 mmol·L⁻¹ 磷酸缓冲液(pH 7.8)用超声细胞破碎仪破碎(功率 500 W),处理 20 min

后,4℃ 12 000 r·min⁻¹ 离心 15 min,上清液即为粗酶提取液,低温保存待用。超氧化物歧化酶(SOD)采用邻苯三酚自氧化法测定。过氧化氢酶(CAT)采用过氧化氢法测定。

1.2.4 活性氧自由基(ROS)水平的测定

藻液处理 24 h 后,离心收集藻细胞,重悬浮于无血清培养液中,加入荧光探针 DCFH-DA,37℃ 孵育 20 min。然后用无血清培养液将藻细胞洗涤至少 3 次,以除去细胞外残留的荧光染料。最后,激光共聚焦显微镜(LSM710,德国 Zeiss 公司)镜检拍照。

1.2.5 丙二醛(MDA)含量的测定

过氧化脂质降解产物中的丙二醛可与硫代巴比妥酸(TBA)缩合,形成红色产物,在 532 nm 处有最大吸收峰。采用硫代巴比妥酸法测定藻细胞中 MDA 含量。

1.2.6 叶绿素荧光参数的测定

叶绿素的含量及其荧光参数采用浮游植物分析仪(Phyto-PAM Phytoplankton Analyzer,德国 Walz 公司)进行测定。测定方法参考文献[19]并略有改动。

1.3 数据处理

肉桂酸乙酯对藻细胞生长的抑制率计算公式为:

$$IR = (1 - N/N_0) \times 100\%$$

式中,IR 为抑制率; N 为处理组藻细胞密度; N_0 为对照组藻细胞密度。

半效应浓度 EC_{50} 的计算用生长面积法计算 96 h EC_{50} :

$$A = \frac{(N_1 - N_2)}{2} \times t_1 + \frac{(N_1 + N_2 - 2N_0)}{2} \times (t_2 - t_1) + \dots + \frac{(N_{n-1} + N_n - 2N_0)}{2} \times (t_n - t_{n-1})$$

式中, A 为生长曲线以下面积; N_n 为 t_n 时刻细胞密度; t_n 为实验开始后第 n 次计数时间; I_A 为生长抑制百分率, $I_A = (A_c - A_t)/A_c \times 100\%$; A_c 为空白组生长曲线以下面积; A_t 为受试浓度生长曲线以下面积。以 I_A 为纵坐标,以浓度对数为横坐标作图, I_A 值为 50% 所对应的浓度即为 EC_{50} 值。

数据采用 SPSS 18.0 软件包进行统计分析,利用 Origin 8.0 进行作图。对照组与处理组采用单因素方差分析, $P < 0.05$ 表示有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长的影响

图1为不同浓度肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长曲线和抑制率的变化情况. 从中可知, 当肉桂酸乙酯浓度 $\leq 2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 蛋白核小球藻的生长都受到一定的抑制作用, 且抑制率与投加浓度呈正相关. 浓度为2、4、8和 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组, 在处理前4 d的平均抑制率分别为10.7%、30.6%、57.3%和74.6%. 可

见, 浓度为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组的抑制作用最大, 且随着处理时间的延长抑制率逐渐增大, 在第2 d时抑制率达到72.6%, 表现出快速抑制效应. 此外, 在2~8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度范围内, 处理第2 d后抑制率呈现逐渐下降的趋势. 通过计算得出肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻96 h半致死浓度 EC_{50} 为 $5.45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

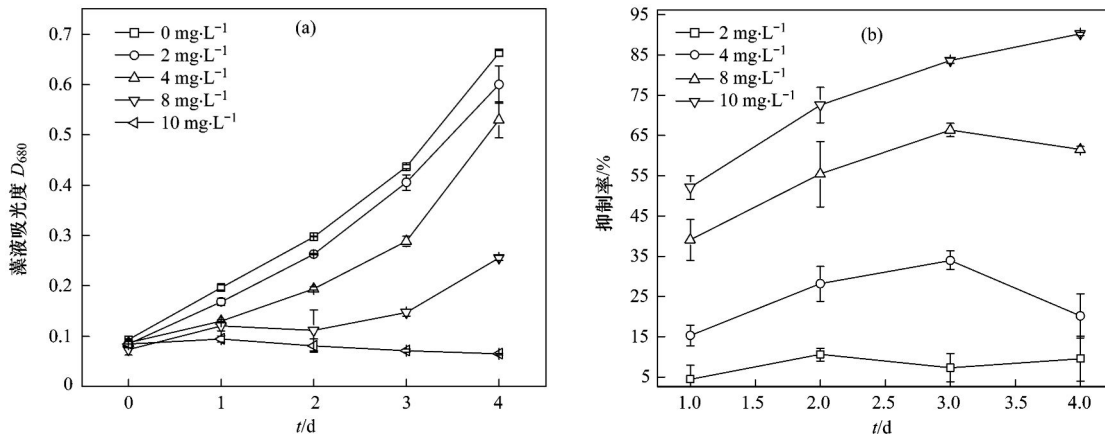


图1 肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长的影响

Fig. 1 Effects of ethyl cinnamate on the growth of *Chlorella pyrenoidosa*

2.2 肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻叶绿素 a 含量的影响

肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻叶绿素 a 含量的影响见图2. 4、8和 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度处理组的叶绿素 a 含量则呈现先下降后上升的趋势, 这与生长抑制率曲线相对应, 且与对照组对比, 均呈现显著性差异 ($P < 0.05$), 表现出明显的剂量-效应关系. 与藻细胞密度变化趋势相似, 浓度为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时抑制作用最大, 在第3 d 叶绿素 a 含量仅为对照组的1.4%.

2.3 肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻抗氧化酶活性的影响

生物体内存在可以清除自由基的抗氧化体系酶类, 如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT), 在机体受到逆境胁迫时可以维持代谢平衡, 保护细胞免受氧化损伤. 不同浓度肉桂酸乙酯对四尾栅藻SOD、CAT活性的影响如图3所示. 各浓度处理组藻细胞的SOD和CAT活性与对照组相比都显著升高 ($P < 0.05$). 浓度为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组的SOD活性达到最高, 是对照组的54.8倍. 表明蛋白核小球藻细胞内产生了较多的活性氧自由基, 为了清除有害的自由基细胞内SOD和CAT活性显著增加.

2.4 肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻 ROS 水平和MDA含量的影响

在外界胁迫下, 植物体内活性氧自由基的产量会升高, 活性氧自由基的毒害会发生膜脂过氧化作用, 产生丙二醛(MDA), 严重损伤细胞膜系统. 图4所示, 对照组和 $8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 肉桂酸乙酯处理24 h后收集藻细胞, 装载ROS测定荧光探针后拍照的结果, $8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组细胞内ROS水平明显高于对照组, 这与2.3节结果相对应. 可见, 肉桂酸乙酯可以引起蛋白核小球藻细胞内ROS的积累, 导致氧化损伤. 不同浓度肉桂酸乙酯处理的蛋白核小球藻细胞内MDA含量见图5. 当肉桂酸乙酯浓度高于 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 各处理组细胞内MDA含量都显著升高 ($P < 0.05$). MDA含量的变化与ROS的积累相对应. 当

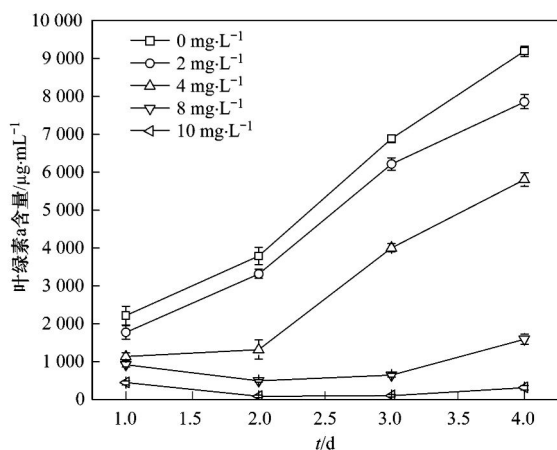


图2 肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻叶绿素 a 含量的影响

Fig. 2 Effects of ethyl cinnamate on the chlorophyll a content of *Chlorella pyrenoidosa*

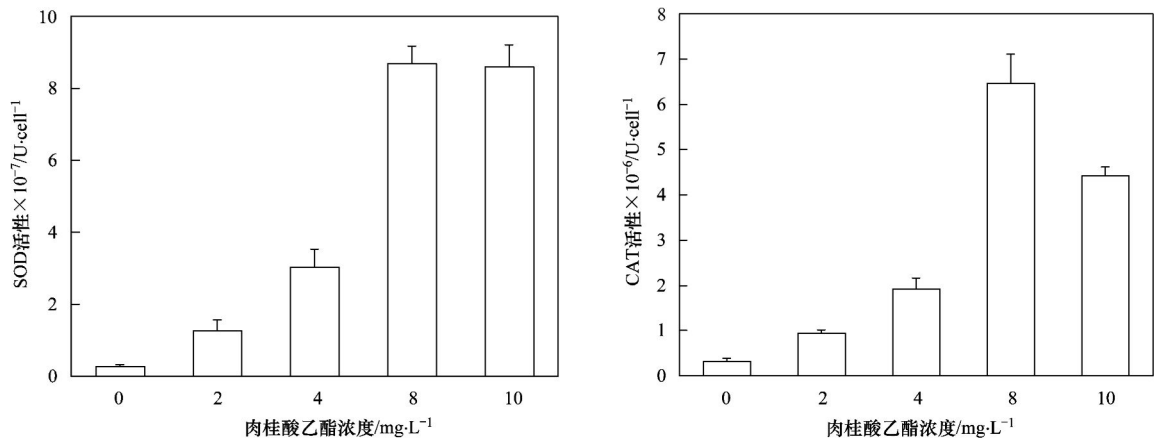


图3 肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻 SOD 和 CAT 酶活性的影响

Fig. 3 Effects of ethyl cinnamate on SOD and CAT activities of *Chlorella pyrenoidosa*

浓度达到 8 mg·L⁻¹ 时, MDA 含量达到最高, 而 10 mg·L⁻¹ 处理组 MDA 含量相对较少, 这可能是由于肉桂酸乙酯浓度过高, 藻细胞膜受到严重氧化损伤, 细胞膜破裂, 内含物溢出。

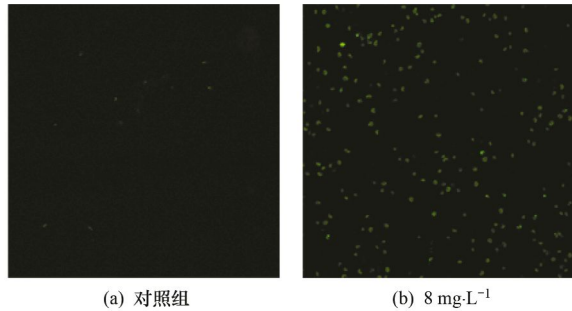


图4 肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻 ROS 水平的影响

Fig. 4 Effects of ethyl cinnamate on ROS level in *Chlorella pyrenoidosa*

2.5 肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻光合参数的影响

光合系统 II 的最大光化学量子产量 (F_v/F_m), 反映 PS II 反应中心内禀光能转换效率或称最大 PS II 的光能转换效率。在非胁迫条件下该参数的变化

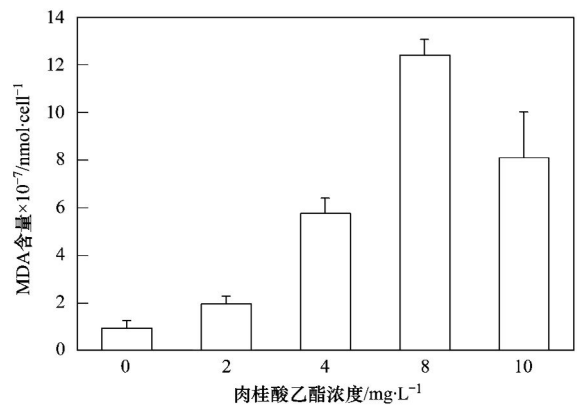
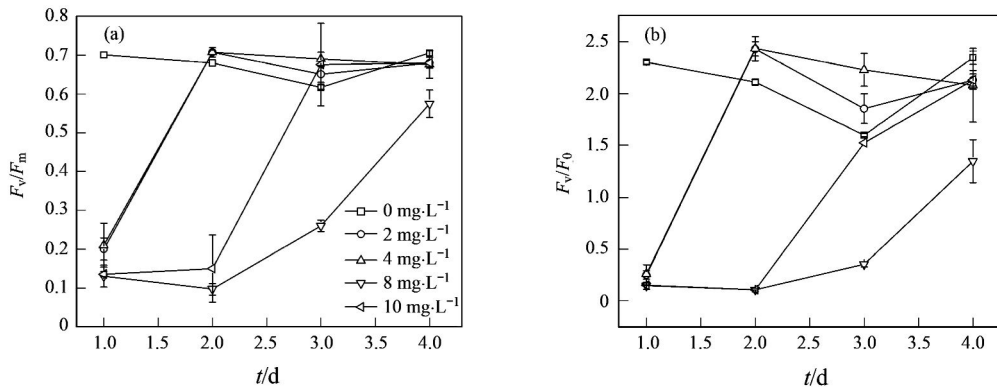


图5 肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻 MDA 含量的影响

Fig. 5 Effects of ethyl cinnamate on MDA content of *Chlorella pyrenoidosa*

极小, 不受物种和生长条件的影响, 但在生物和非生物因素胁迫条件下该参数明显下降^[20,21]. F_v/F_0 表示 PS II 的潜在活性. 图6 分别为不同浓度肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻光合系统 II 最大量子产量和潜在活力的变化情况. 由图6(a)可知, 肉桂酸乙酯各浓度处理组藻细胞 F_v/F_m 值在第 1 d 都显著降低 (P

图6 肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻 F_v/F_m 和 F_v/F_0 值的影响Fig. 6 Effects of ethyl cinnamate on F_v/F_m and F_v/F_0 of *Chlorella pyrenoidosa*

< 0.05), 且下降幅度较大, 但在处理第 2 d, $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组骤升到对照组水平, $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度组 F_v/F_m 值分别在第 4 d 和第 3 d 恢复到正常水平, 与对照组无显著性差异 ($P > 0.05$). 表明肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻细胞光合系统 II 的最大光能转化效率具有一定的急性抑制效应, 但随着时间的延长藻细胞可以通过自身调节恢复其光合活性. 由图 6(b) 可知, 肉桂酸乙酯各浓度处理组 F_v/F_0 值的变化趋势与 F_v/F_m 值相似, 在处理第 1 d 均显著减少, 2、4、8 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组在第 4 d 分别恢复到对照组的 90.8%、88.6%、57.5% 和 90.8%. 表明藻细胞的潜在光合活性逐渐恢复.

3 讨论

目前, 利用植物的化感物质来抑制藻类生长的研究较为活跃, 并且分离鉴定出多种化感抑藻物质, 如倍半萜烯内酯, 有机酸类, 酚类等, 其中酚酸类物质及其衍生物是一类活性较强的化感物质^[14, 22~24]. 本实验研究了一种酚酸类物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻的抑制作用. 研究发现, 肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻具有一定的抑制效应, 且随着浓度的增加抑制效果越明显. 另外随着时间的延长, 肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻的抑制率呈现先增大后减小的趋势. 类似的现象也有报道, 如 Qian 等^[25] 研究发现壬基苯酚在投加初期对普通小球藻具有强抑制作用, 24 h 后抑制作用开始下降. 以上研究表明, 为了应对高浓度肉桂酸乙酯的毒性, 藻细胞通过延长迟缓期以适应胁迫环境, 这是细胞面对新环境所具有的自我调节能力^[26]. 所以肉桂酸乙酯的毒性作用发生在藻细胞的迟缓期, 待迟缓期过后, 藻细胞又可以恢复一定的生长能力, 遂使抑制率出现下降. 另外, 肉桂酸乙酯加入培养基后, 可能被藻细胞产生的抗性物质降解, 或作为碳源被藻细胞吸收代谢. 而且, 肉桂酸乙酯属于酚酸类衍生物又是一种挥发性的香料, 既有酚酸类物质不稳定、易降解的性质, 又有香料易挥发的特性, 随着培养时间的延长, 其在培养基中的浓度势必会逐渐下降, 当降低到一定浓度时则不能有效抑制藻细胞生长, 致使抑制率下降^[27~29]. 研究结果表明, 与其它酚酸相比, 肉桂酸乙酯具有较强抑制作用, 且效果快, 有一定的挥发性, 通过进一步的室外实验和生态安全评价, 可望开发成生物除藻剂.

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素, 在光

合作用的光吸收中心起核心作用, 叶绿素含量的减少可能会导致光合作用受阻. 由结果可知, 随着肉桂酸乙酯浓度的增加各处理组叶绿素 a 含量逐渐下降, 且随着时间的延长呈现先下降后增加的趋势, 与生长抑制率相对应. 叶绿素为镁卟啉化合物, 不稳定, 酸、碱、氧化剂等都会使其分解. 在肉桂酸乙酯胁迫下, 藻细胞内的叶绿素 a 发生分解, 导致叶绿素 a 含量下降, 影响光能的捕获, 造成藻细胞的光合活性降低^[30].

许多研究表明, 有机物污染物可以引起生物体内活性氧 (ROS) 的过度产生, 对细胞产生氧化损伤^[31, 32]. 丙二醛是膜脂过氧化的产物, 其含量能反映细胞膜结构损伤程度^[33]. 在正常情况下, 植物可以通过自身保护机制, 使细胞内活性氧的产生和消除处于平衡状态, 不易导致氧化损伤. 实验结果显示, 肉桂酸乙酯可以引起蛋白核小球藻细胞内 ROS 的大量累积, 并且引起 MDA 含量显著增加. 这可能是由于肉桂酸乙酯胁迫下, 藻细胞内 ROS 的产生与清除失去平衡, 造成其过度积累, 引发膜脂的过氧化作用, 造成藻细胞膜系统和功能受到损伤、膜通透性增加, 干扰细胞的光合、呼吸及其他代谢过程, 严重时导致细胞死亡^[34]. 另外, 肉桂酸乙酯是具有酚羟基结构的化合物, 其羟基能与培养基中的 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 等过渡金属离子发生自氧化, 产生 H_2O_2 , 可能直接对 DNA 产生氧化损伤, 诱导细胞程序性死亡^[35~37]. 如 Zhang 等^[38] 研究发现农药氟草烟胁迫下, 莱茵衣藻 DNA 出现降解. ROS 除了可以对细胞造成氧化损伤外, 也可以作为信号分子引发细胞内发生级联效应, 最后导致细胞程序性死亡^[39]. 植物在外界胁迫下 ROS 水平升高, 为了维持平衡细胞内的自由基清除剂含量会随之升高^[40]. 抗氧化酶系是机体内防御氧化损伤的重要酶系. 实验中较高浓度处理组 SOD、CAT 酶活性都明显升高, 浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 酶活性有所降低. 这是由于肉桂酸乙酯胁迫下藻细胞内活性氧 (ROS) 大量积累, 为了清除过多的 ROS, 藻细胞通过提高抗氧化系酶的活性来保护其免受氧化损伤. 然而, 当肉桂酸乙酯浓度较高时, 细胞内 ROS 浓度超出一定的阈值时, 细胞不能及时将其清除, 导致细胞损伤不能被及时修复, 引起酶活性降低^[41].

研究结果表明, 肉桂酸乙酯胁迫下, 蛋白核小球藻光合系统 II 最大光化学量子产量 (F_v/F_m) 和潜在活力 (F_v/F_0) 在培养初期显著降低, 但随着时间的延长两者表现较大幅度的回升, 说明肉桂酸乙酯对

蛋白核小球藻细胞光合系统 II 的最大光化学量子产量和潜在活性具有一定的急性抑制效应,但随着时间的延长藻细胞可以通过自身调节在一定程度上恢复其光合活性。因此,肉桂酸乙酯可以使蛋白核小球藻 PS II 发生可逆性失活^[20]。间接证明了蛋白核小球藻 PS II 不是肉桂酸乙酯攻击的主要靶位,氧化损伤可能是藻细胞生长受到抑制的主要原因。

4 结论

(1) 肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻的生长具有一定的抑制作用,且随着浓度的增加抑制效果越明显。其 96 h 半效应浓度 EC_{50} 值为 $5.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。与其他酚酸相比,肉桂酸乙酯具有挥发性、强抑制、效果快的优点,具有开发成生物除藻剂的潜能。

(2) 随着肉桂酸乙酯浓度的增加各处理组叶绿素 a 含量逐渐下降,且随着时间的延长呈现先下降后增加的趋势,与生长抑制率相对应。肉桂酸乙酯引起细胞内叶绿素 a 含量下降,影响光能的捕获,造成藻细胞的光合活性降低可能是其抑藻机制之一。

(3) 肉桂酸乙酯可以引起蛋白核小球藻细胞内活性氧(ROS)的大量累积和 MDA 的含量显著增加,造成藻细胞膜系统和功能紊乱,从而导致细胞代谢生长缓慢。为了清除 ROS,细胞通过提高抗氧化系酶(SOD、CAT)的活性来保护其免受氧化损伤。

(4) 肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻细胞光合系统 II 的最大光化学量子产量和潜在活性具有一定的急性抑制效应,但随着时间的延长藻细胞可以通过自身调节在一定程度上恢复其光合活性。

参考文献:

- [1] Codd G A. Cyanobacterial toxins, the perception of water quality, and the prioritisation of eutrophication control [J]. Ecological Engineering, 2000, **16**(1): 51-60.
- [2] Codd G A, Morrison L F, Metcalf J S. Cyanobacterial toxins: risk management for health protection [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2005, **203**(3): 264-272.
- [3] 黄加东. 几种氧化性杀菌灭藻剂的应用效果比较[J]. 工业用水与废水, 2000, **31**(5): 7-9.
- [4] 张景媛,高惠明,李爱民,等. 经济杀菌灭藻剂 OACL 控制工业循环水中有害微生物的研究[J]. 应用生态学报, 1993, **4**(3): 308-312.
- [5] Barrett P R F, Littlejohn J W, Curnow J. Long-term algal control in a reservoir using barley straw [J]. Hydrobiologia, 1999, **415**: 303-309.
- [6] 孔垂华,胡飞. 植物化感作用及其应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [7] Vyvyan J R. Allelochemicals as leads for new herbicides and agrochemicals[J]. Tetrahedron, 2002, **58**(9): 1631-164.
- [8] Fitter A. Making allelopathy respectable [J]. Science, 2003, **301**(5): 1337-1338.
- [9] 杨善元,俞子文,孙文浩,等. 凤眼莲根系中抑藻物质分离与鉴定[J]. 植物生理学报, 1992, **18**(4): 399-402.
- [10] Greca M D, Ferrara M, Fiorentino A, et al. Antialgal compounds from zantedeschia aethiopica [J]. Phytochemistry, 1998, **49**(5): 1299-1304.
- [11] Li F M, Hu H Y. Isolation and characterization of a novel antialgal allelochemical from *Phragmites communis* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(11): 6545-6553.
- [12] Nakai S, Inoue Y, Hosomi M, et al. Myriophyllum spicatum-released allelopathic polyphenols inhibiting growth of blue-green algae *Microcystis aeruginosa* [J]. Water Research, 2000, **34**(11): 3026-3032.
- [13] Nakai S, Hosomi M. Allelopathic inhibitory effects of polyphenols-released by *Myriophyllum spicatum* on algal growth [J]. Allelopathy, 2002, **10**(2): 123-131.
- [14] Gross E M, Erhard D, Ivanyi E. Allelopathic activity of *Ceratophyllum demersum* L. and *Najas marina* ssp intermedia (Wolfgang) Casper [J]. Hydrobiologia, 2003, **506**(1-3): 583-589.
- [15] Mulderij G, Van Donk E, Roelofs J G M. Differential sensitivity of green algae to allelopathic substances from Chara [J]. Hydrobiologia, 2003, **491**(1-3): 261-271.
- [16] Hong Y, Hu H Y, Sakoda A, et al. Isolation and characterization of antialgal allelochemicals from *Arundo donax* L. [J]. Allelopathy, 2010, **25**(2): 357-367.
- [17] 俞子文,孙文浩,郭克勤,等. 几种高等水生植物的克藻效应[J]. 水生生物学报, 1992, **16**(1): 1-7.
- [18] Sun W H, Yu S W, Yang S Y, et al. Allelochemicals from root exudates of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) [J]. Acta Phytophysiological Sinica, 1993, **19**(1): 92-96.
- [19] GmbH H W. Phytoplankton Analyzer PHYTO-PAM [M]. Germany, 2003. 33-107.
- [20] 郭延平,周慧芬,曾光辉,等. 高温胁迫对柑橘光合速率和光合系统活性的影响[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(6): 867-870.
- [21] Macintyre H L, Kana T M, Anning T, et al. Photoacclimation of photosynthesis irradiance response curves and photosynthetic pigments in microalgae and cyanobacteria [J]. Journal of Phycology, 2002, **38**(1): 17-38.
- [22] Rice E L. Allelopathy [M]. New York: Academic Press, 1984.
- [23] Nakai S, Inoue Y, Hosomi M. Algal growth inhibition effects and inducement modes by plant-producing phenols [J]. Water Research, 2001, **35**(7): 1855-1859.
- [24] Kato-Noguchi H. Allelopathic substances in *Pueraria thunbergiana* [J]. Phytochemistry, 2003, **63**(5): 577-580.
- [25] Qian H F, Pan X J, Shi S T, et al. Effect of nonylphenol on response of physiology and photosynthesis-related gene transcription of *Chlorella vulgaris* [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **182**(1-4): 61-69.
- [26] Wang J X, Xie P, Guo N C. Effects of nonylphenol on the

- growth and microcystin production of *Microcystis* strains [J]. Environmental Research, 2007, **103**(1): 70-78.
- [27] Hong Y, Hu H Y, Li F M. Physiological and biochemical effects of allelochemical ethyl 2-methyl acetoacetate (EMA) on cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, **71**(2): 527-534.
- [28] Poulson K L, Sieg R D, Prince E K, *et al.* Allelopathic compounds of a red tide dinoflagellate have species-specific and context-dependent impacts on phytoplankton[J]. Marine Ecology Progress Series, 2010, **416**: 69-78.
- [29] Jiang D, Huang L F, Lin S Q, *et al.* Allelopathic effects of euhalophyte *Salicornia bigelovii* on marine alga *Skeletonema costatum*[J]. Allelopathy, 2010, **25**(1): 163-172.
- [30] Bornman J F, Vogelmann T C. Effect of UV-B radiation on leaf optical-properties measured with fiber optics [J]. Experimental Botany, 1991, **42**(4): 547-554.
- [31] Zhang M, Kong F X, Xing P, *et al.* Effects of interspecific interactions between *Microcystis aeruginosa* and *Chlorella pyrenoidosa* on their growth and physiology [J]. International Review of Hydrobiology, 2007, **92**(3): 281-290.
- [32] Elbaz A, Wei Y Y, Meng Q, *et al.* Mercury-induced oxidative stress and impact on antioxidant enzymes in *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. Ecotoxicology, 2010, **19**(7): 1285-1293.
- [33] Panda S K, Singha L B, Khan M H. Does aluminium phytotoxicity induce oxidative stress in greengram (*Vigna radiata*)? [J]. Bulgaria Journal Plant Physiology, 2003, **29**(1-2): 77-86.
- [34] Alaiz M, Hidalgo F J, Zamora R. Effect of pH and temperature on comparative antioxidant activity of nonenzymatically browned proteins produced by reaction with oxidized lipids and carbohydrates[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, **47**(2): 748-752.
- [35] Slater A F G, Stefan C, Nobel I, *et al.* The role of intracellular oxidants in apoptosis [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Basis of Disease, 1995, **1271**(1): 59-62.
- [36] Ross C, Santiago-Vázquez L, Paul V. Toxin release in response to oxidative stress and programmed cell death in the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* [J]. Aquatic Toxicology, 2006, **78**(1): 66-73.
- [37] Džiga D, Suda M, Białczyk J, *et al.* The alteration of *Microcystis aeruginosa* biomass and dissolved microcystin-LR concentration following exposure to plant-producing phenols[J]. Environmental Toxicology, 2007, **22**(4): 341-346.
- [38] Zhang S, Qiu C B, Zhou Y, *et al.* Bioaccumulation and degradation of pesticide fluroxypyr are associated with toxic tolerance in green alga *Chlamydomonas reinhardtii* [J]. Ecotoxicology, 2011, **20**(2): 337-347.
- [39] Van Breusegem F, Dat J F. Reactive oxygen species in plant cell death[J]. Plant Physiology, 2006, **141**(2): 384-390.
- [40] Dat J, Vandenabeele S, Vranová E, *et al.* Dual action of the active oxygen species during plant stress responses[J]. Cellular and Molecular Life Sciences, 2000, **57**(5): 779-795.
- [41] Hejl A M, Koster K L. Juglone disrupts root plasma membrane H^+ -atpase activity and impairs water uptake, root respiration, and growth in soybean (*Glycine max*) and corn (*Zea mays*)[J]. Journal of Chemical Ecology, 2004, **30**(2): 453-471.

CONTENTS

Characteristics of Total Gaseous Mercury Concentrations at a Rural Site of Yangtze Delta, China	DOU Hong-ying, WANG Shu-xiao, WANG Long, <i>et al.</i> (1)
Compositions of Organic Acids in PM ₁₀ Emission Sources in Xiamen Urban Atmosphere	YANG Bing-yu, HUANG Xing-xing, ZHENG An, <i>et al.</i> (8)
Analysis on Water-soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol of Xinglong	LI Xing-ru, SONG Ai-li, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (15)
Effects of Gaseous Compositions the on Simultaneous Removal of NO _x and SO ₂ from Simulated Flue Gas by Ammonia Absorption	WANG Hong, ZHU Tian-le, WANG Mei-yan (21)
Comparing the Ammonia Volatilization Characteristic of Two Typical Paddy Soil with Total Wheat Straw Returning in Taihu Lake Region	WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (27)
Real-Time Analysis of Polyvinyl Chloride Thermal Decomposition/Combustion Products with Single Photon Ionization/Photoelectron Ionization Online Mass Spectrometer	CHEN Wen-dong, HOU Ke-yong, CHEN Ping, <i>et al.</i> (34)
Surface Characteristics of Alkali Modified Activated Carbon and the Adsorption Capacity of Methane	ZHANG Meng-zhu, LI Lin, LIU Jun-xin, <i>et al.</i> (39)
Distribution of Dimethylsulfoxide(DMSO) in the Surface Water of the Yellow Sea and the Bohai Sea	WANG Min, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (45)
Resolving Characteristic of CDOM by Excitation-Emission Matrix Spectroscopy Combined with Parallel Factor Analysis in the Seawater of Outer Yangtze Estuary in Autumn in 2010	YAN Li-hong, CHEN Xue-jun, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (51)
Estimation and Forecast of Chlorophyll a Concentration in Taihu Lake Based on Ensemble Square Root Filters	LI Yuan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (61)
Research of Hyperspectral Reconstruction Based on HJ1A-CCD Data	GUO Yu-long, LI Yun-mei, ZHU Li, <i>et al.</i> (69)
Research on the Sensitivity of Geochemical of Underground River in Chongqing Xueyu Cave	XU Shang-quan, YANG Ping-heng, YIN Jian-jun, <i>et al.</i> (77)
Bivariate Statistical Model for Calculating Phosphorus Input Loads to the River from Point and Nonpoint Sources	CHEN Ding-jiang, SUN Si-yang, JIA Ying-na, <i>et al.</i> (84)
Temporal and Spatial Variations of Total Nitrogen and Total Phosphorus in the Typical Reaches of Qinhuai River	LI Yue-fei, XIA Yong-qiu, LI Xiao-bo, <i>et al.</i> (91)
Derivation and Application of Sediment Quality Criteria of Cd and Hg for the Xiangjiang River	JIANG Bo-feng, SANG Lei-xin, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (98)
Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil of Relocation Areas from the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (108)
Concentrations of Soil Heavy Metals and Their Spatial Distribution in the Surrounding Area of Fenhe Reservoir	LI Jin-chang, ZHANG Hong, SHI Wei (116)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals of Groundwaters in the Irrigation District of the Lower Reaches of Yellow River	ZHANG Yan, LI Fa-dong, OUYANG Zhu, <i>et al.</i> (121)
Concentrations and Distribution of Organochlorine Pesticides in the Surface Sediments of Jiaozhou Bay, Taozi Bay and Sishili Bay	LIU Yi-kai, ZHONG Guang-cai, TANG Jian-hui, <i>et al.</i> (129)
Choice of Macroinvertebrate Metrics for Constructing a Benthic-Index of Biotic Integrity Based on the Disturbance Gradients in the Qinjiang River Basin	LU Dong-qi, ZHANG Yong, CAI De-suo, <i>et al.</i> (137)
Isolation and Identification of <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 and Its Allelopathy on <i>Skeletonema costatum</i>	WANG Hong-bin, CHEN Wen-hui, LI Xin-shu, <i>et al.</i> (145)
Effects of the Rice Straw on <i>Microcystis aeruginosa</i> Analyzed by Different Physiological Parameters	SU Wen, KONG Fan-xiang, YU Yang, <i>et al.</i> (150)
Effects of Allelochemicals Ethyl Cinnamate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	GAO Li-li, GUO Pei-yong, SU Guang-ming, <i>et al.</i> (156)
Hydraulic Simulation and Safety Assessment of Secondary Water Supply System with Anti-Negative Pressure Facility	WANG Huan-huan, LIU Shu-ming, JIANG Shuai, <i>et al.</i> (163)
Effect of Relative Molecular Mass Distribution and Hydrophilicity/Hydrophobicity of NOM on Membrane Fouling in MF-combined Process	HU Meng-liu, LIN Jie, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (169)
Effect of Permeabilization on Sulfate Reduction Activity of <i>Desulfovibrio vulgaris</i> Hildenborough Cells in the Presence of Different Electron Donors	XU Hui-wei, ZHANG Xu, LI Li-ming, <i>et al.</i> (177)
Dechlorination of HCB by Bimetals Based on Zero Valent Iron	ZENG Xian-wei, LIU Jian-guo, NIE Xiao-qin (182)
Study on Kinetics of Photoelectrocatalytic Degradation of Supported TiO ₂ on Malachite Green	ZHANG Xiao-na, ZHOU Shao-qi, ZHOU Xiao (188)
Measurement and Analysis of Micropore Aeration System's Oxygenating Ability Under Operation Condition in Waste Water Treatment Plant	WU Yuan-yuan, ZHOU Xiao-hong, SHI Han-chang, <i>et al.</i> (194)
Influence of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge	LIU Chun, MA Jin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (198)
Impact of Different Nitrogen Concentrations on the N ₂ O Production in the Denitrification Process of Granular Sludge	HAN Xue, GAO Da-wen (204)
Effect of Simulated Heavy Metal Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	XIE Xin-yuan, SUN Pei-de, LOU Ju-qing, <i>et al.</i> (209)
Characteristic and Ion Exchanges During Cu ²⁺ and Cd ²⁺ Biosorption by <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	BAI Jie-qiong, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (217)
Sorption of Nitrobenzene to Anionic Surfactant Modified Layered Double Hydroxides	XIA Yan, ZHU Run-liang, TAO Qi, <i>et al.</i> (226)
Study on Phosphate Removal and Recovery by Activated Alumina	MENG Wen-na, XIE Jie, WU De-yi, <i>et al.</i> (231)
Spatial Distribution of Inhalable Particulate and Association with Respiratory Disease in Beijing City	YANG Wei, ZHAO Wen-ji, GONG Zhao-ning, <i>et al.</i> (237)
Pollution Levels of Perfluorochemicals in Chicken Eggs and Duck Eggs from the Markets in Beijing	QI Yan-jie, ZHOU Zhen, SHI Ya-li, <i>et al.</i> (244)
Residual Levels of Pesticides in Freshwater Fish from Beijing Aquatic Product Markets and Health Risk Assessment	YU Zhi-yong, JIN Fen, SUN Jing-fang, <i>et al.</i> (251)
Characterizing the Toxicity Interaction of the Binary Mixture Between DMSO and Pesticide by the Multi-Effect Residual Analysis (MERA)	HUO Xiang-chen, LIU Shu-shen, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (257)
Isolation of Quinolofop- <i>p</i> -ethyl-degrading Bacteria from Soil by DGGE-Colony <i>in situ</i> Hybridization	LÜ Xin, PENG Xia-wei, HU Qing, <i>et al.</i> (263)
White-Rot Fungi Combinations Impact on Enzyme Productions	MENG Yao, LIANG Hong, GAO Da-wen (271)
Effects of Different Fertilizer Application on Soil Active Organic Carbon	ZHANG Rui, ZHANG Gui-long, JI Yan-yan, <i>et al.</i> (277)
Effect of Reclamation on the Vertical Distribution of SOC and Retention of DOC	HUO Li-li, ZOU Yuan-chun, GUO Jia-wei, <i>et al.</i> (283)
Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Composition in <i>Suaeda salsa</i> Wetland in the Yellow River Delta	DONG Hong-fang, YU Jun-bao, GUAN Bo (288)
Study the Restoration Technology of Concentrated Application-Natural Diffusion about Amendments of Acidified Soil of Hilly Woodland	FANG Xiong, LIU Ju-xiu, YIN Guang-cai, <i>et al.</i> (293)
Optimizing Remediation Conditions of Non-thermal Plasma for DDTs Heavily Contaminated Soil	CHEN Hai-hong, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (302)
Chemical Extraction of Arsenic Co-precipitated with Amorphous Fe(OH) ₃ and Fe ₃ O ₄	CHEN Yi-ping, WANG Shao-feng, JIA Yong-feng (308)
Influence of Aluminum and Manganese on the Growth, Nutrient Uptake and the Efflux by Ectomycorrhizal Fungi	LI Hua, HUANG Jian-guo, YUAN Ling (315)
High-solids Anaerobic Co-digestion of Sludge and Kitchen Garbage Under Mesophilic Conditions	DUAN Ni-na, DONG Bin, LI Jiang-hua, <i>et al.</i> (321)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of High Surface Area Biomass-based Activated Carbons	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (328)
Study on Strategies of Pollution Prevention in Coastal City of Zhejiang Province Based on Scenario Analysis	TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (336)
Advance in the Bioavailability Monitoring of Heavy Metal Based on Microbial Whole-cell Sensor	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xiu-liang, <i>et al.</i> (347)
Characteristics of Heavy Metal Contamination in Street Dusts Along the Urban-Rural Gradient Around Beijing	HE Xiao-yan, GU Pei, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (357)
Content Trends of Pollutants in Street Dust of Beijing Along the Urban-Rural Gradient and Road Density Gradient	TANG Rong-li, MA Ke-ming, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (364)
Analysis of First Flush Effect of Typical Underlying Surface Runoff in Beijing Urban City	REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (373)
Temporal Variation of Water Quality and Driving Factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou	PANG Bo, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (379)
Research on Carbon Reduction Potential of Electric Vehicles for Low-Carbon Transportation and Its Influencing Factors	SHI Xiao-qing, LI Xiao-nuo, YANG Jian-xin (385)
Investigation of Waste Classification and Collection Actual Effect and the Study of Long Acting Management in the Community of Beijing	DENG Jun, XU Wan-ying, ZHOU Chuan-bin (395)
Problems and Countermeasures in the Application of Constructed Wetlands	HUANG Jin-lou, CHEN Qin, XU Lian-huang (401)

《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1月15日 34卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 1 Jan. 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

国内外公开发刊