

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第3期

Vol.33 No.3

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

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究	陈颖军,蔡伟伟,黄国培,李军,张干(673)
天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究	王圣杰,张明军,王飞腾,李忠勤(679)
兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究	赵素平,余晔,陈晋北,刘娜,何建军(687)
不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征	杨柳,吴焯,宋少洁,郝吉明(694)
南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析	王红磊,朱彬,沈利娟,康汉青,刁一伟(701)
西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送	李小飞,张明军,李亚举,王圣杰,黄小燕,马潜,马雪宁(711)
海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化	曹秀红,任景玲,张桂玲,张金娥,杜金洲,朱德弟(720)
大辽河口痕量元素砷的河口混合行为	简慧敏,姚庆祯,于立霞,田琳(727)
渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价	徐亚岩,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁(732)
青岛近岸表层海水中 PAHs 的分布特征及物源初步解析	李先国,邓伟,周晓,唐旭利,魏新运,王岩(741)
广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降	孔祥胜,祁士华,黄保健,张原,李杰(746)
上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别	董辰寅,张卫国,王冠,马鸿磊,刘圆,刘莹,叶雷平,俞立中(754)
溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用	王树芳,王丽亚,王晓红,林沛,刘久荣,辛宝东,贺国平(760)
地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(771)
用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究	高清端,张薛,赵璇,赵刚(777)
菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响	邓可,刘素美,张桂玲,陆小兰,张经(782)
南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响	胡和兵,刘红玉,郝敬峰,安静(794)
上海都市农业村域地表水非点源氮素的时空分异特征	王楠,毛亮,黄海波,张进忠,周培(802)
不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化	何小艳,赵洪涛,李叙勇,连宾,王小梅(810)
新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究	何丽君,马邕文,王金泉,李东亚,王艳(817)
改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制	李宇,刘贤君,张兴旺,雷乐成(825)
卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究	江涛,吴霓,钟艳,江天久(832)
芽孢杆菌 B1 胞外活性物质对球形棕囊藻的溶藻特性研究	李蕾,赵玲,尹平河(838)
底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究	储昭升,张玉宝,金相灿,徐颖,杨红君(844)
新型无极准分子光源深度处理水相中含 N-杂环化合物	叶招莲,汪斌,路娟娟,李峰,张仁熙(849)
La/Ce 掺杂钛基二氧化铅电极的制备及电催化性能研究	郑辉,戴启洲,王家德,陈建孟(857)
DTT 对三苯基甲染料脱色的研究	潘涛,刘大伟,任随周,郭俊,孙国萍(866)
pH 及络合剂对亚铁活化 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 氧化去除活性艳蓝的影响研究	张成,王金泉,马邕文,王艳,黄明智,兰明(871)
臭氧降解高浓度腐殖酸动力学	郑可,周少奇,杨梅梅(879)
采用体积信息熵表征颗粒污泥系统稳定性及其稳定机制	李志华,姬晓琴,李胜,谢磊,赵海龙,王晓昌(885)
活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系	李婷,王毅力,冯晶,徐萌(889)
不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究	周曼,杨昌柱,濮文虹,罗应东,龚建宇(896)
颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响	李志华,曾金锋,李胜,姬晓琴,王晓昌(903)
氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较	郭昌梓,彭党聪,陈雪梅,王丹(910)
生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响	朱海风,周立祥,王电站(916)
2 种不同生物接触氧化工艺性能差异的微生物生态研究	钱殷,全向春,裴元生,马景赞,陶锬(922)
微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响	范分良,黄平容,唐勇军,李兆君,梁永超(932)
干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征	贾晓红,李新荣,周玉燕,李元寿(938)
密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究	王淑芳,王效科,欧阳志云(946)
外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响	莫艳华,汤佳,张仁铎,李方舟(952)
低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素的吸附作用	姚佳佳,康福星,高彦征(958)
液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响	吴威,姜林,陈家军,彭胜(965)
基于 PPI 的土地利用优化研究	武晓峰,李婷(971)
若尔盖高原湿地藻类多样性研究	陈曦,刘如钢,王艳芬,张洪勋(979)
3 种杀真菌剂对 AM 真菌侵染和黄芩生长的影响	贺学礼,王平,马丽,孟静静(987)
崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征	郑艳玲,侯立军,陆敏,谢冰,刘敏,李勇,赵慧(992)
厌氧条件下 2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解	卢晓霞,陈超琪,张姝,欧阳,尹力,吴蔚(1000)
重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响	熊士昌,尹华,彭辉,何宝燕,龙焰,叶锦韶,张娜,彭素芬(1008)
有机农药滴滴涕和毒死蜱生物降解机制的分子模拟研究	林玉珍,曾光明,张斌,陈明,蒋敏,张嘉超,鲁伦慧,刘利锋(1015)
高效木薯渣分解复合菌群 RXS 的构建及其发酵特性研究	何江,毛忠贵,张庆华,张建华,唐蕾,张宏建(1020)
四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征	童子林,刘元璐,胡真虎,袁守军(1028)
上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究	陈闯,邓良伟,信欣,郑丹,刘刈,孔垂雪(1033)
《环境科学》征稿简则(878) 《环境科学》征订启事(1007) 信息(759, 770, 870, 1027)	

卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究

江涛¹, 吴霓¹, 钟艳², 江天久^{1,2*}

(1. 暨南大学赤潮与水环境研究中心, 广州 510632; 2. 华南师范大学生命科学学院, 广州 510630)

摘要: 研究了卵圆卡盾藻香港株 (*Chattonella ovata*, Hong Kong strain, COHK) 在不同生长期、盐度和营养盐条件下的生长及过氧化氢 (H_2O_2) 的产生特点。结果表明, 过氧化氢浓度峰值出现在 COHK 对数生长期 (4~8 d), 以第 6 d 达到最大, 为 $2.91 \times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$ 。在 N:P 为 16:1、32:1 和 64:1 的情况下, COHK 生长较快, 以 32:1 时生长速率最快 ($0.58 \text{ div} \cdot \text{d}^{-1}$)。COHK 产生 H_2O_2 的量与藻类生长呈相反趋势, 在 N:P 为 4:1 和 8:1 的情况下, 藻细胞生长率较低, 但单位藻细胞 H_2O_2 浓度较高。单位藻细胞 H_2O_2 浓度在 N:P 为 4:1 时最大, 达到 $1.26 \times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$ 。COHK 在盐度为 20 和 25 时生长率较高, 在盐度为 10、15 和 30 时生长率较低, 表明低盐和高盐条件均不利于 COHK 的生长。低盐度和高盐度均有利于 COHK 过氧化氢的产生, 在盐度为 10 时, 单位藻细胞的 H_2O_2 量最高, 达到 $2.2 \times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$; 但盐度在 15~25 范围内, 单位藻细胞 H_2O_2 量相差不大 ($0.7 \times 10^{-4} \sim 0.9 \times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$)。Fe³⁺ 可显著影响 COHK 的生长, Fe³⁺ 浓度范围为 $0.2 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, COHK 生长率较高。缺铁条件下 (Fe³⁺ 浓度为 0), COHK 生长率最低 ($0.1 \text{ div} \cdot \text{d}^{-1}$), 而 Fe³⁺ 浓度较高时 ($5 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 藻细胞生长率也有所降低。缺铁以及高铁条件下, 卵圆卡盾藻的 H_2O_2 产量增加, H_2O_2 浓度分别为 0.97×10^{-4} 和 $0.95 \times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$ 。

关键词: 卵圆卡盾藻; 过氧化氢; 活性氧; 氮限制; 磷限制

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-0832-06

Production of Peroxide Hydrogen in *Chattonella ovata* Hong Kong Strain

JIANG Tao¹, WU Ni¹, ZHONG Yan², JIANG Tian-jiu^{1,2}

(1. Research Center for HABs and Aquatic Environment, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510630, China)

Abstract: The growth characteristics of *Chattonella ovata* Hong Kong strain (COHK) under different salinity and nutrient conditions and production of peroxide hydrogen (H_2O_2) in different growth phase were investigated in laboratory unialgal culture experiment. The results showed that high concentration of H_2O_2 was reached during the logarithmic phase from 4th to 8th days, corresponding to the maximum value of $2.91 \times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$ on the 6th day. When the N:P ratios were 16:1, 32:1 and 64:1, COHK possessed the relatively high growth rate and cell concentration, however, growth rate of COHK was lower with the N:P ratios of 4:1 and 8:1. The H_2O_2 concentration reached the highest ($1.26 \times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$) with the N:P ratio of 4:1, which suggested that production of H_2O_2 was reversely related to the growth of COHK. The optimum salinities for COHK were 20 and 25. When the salinities were 10, 15 and 30, the growth rate of COHK was lower, showing lower and higher salinities inhibited the growth of COHK. Salinity also influenced the production of H_2O_2 . The highest concentration of H_2O_2 among the experiments, $2.2 \times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$, was observed at the salinity of 10, while there was no significant difference of H_2O_2 concentration from the salinity range of 15 to 30. The optimal Fe³⁺ concentration for the growth of COHK was from 0.2×10^{-8} to $1 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, where growth rate were relatively higher. Growth rate of COHK was depressed in absence (0 mol·L⁻¹) and high concentration of Fe³⁺ ($5 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), with which H_2O_2 concentration was 0.97×10^{-4} and $0.95 \times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$, respectively.

Key words: *Chattonella ovata*; peroxide hydrogen; reactive oxygen species (ROS); N limitation; P limitation

卵圆卡盾藻 (*Chattonella ovata*) 属于针胞藻门 (Rhaphidophyceae), 卡盾藻属 (*Chattonella*), 为单细胞藻类。卵圆卡盾藻是典型的鱼毒性赤潮原因种, 首次记载的卵圆卡盾藻赤潮发生于 2001 年 4 月我国大鹏湾盐田海域^[1], 2004 年 6 月该藻在日本再次暴发赤潮, 并造成了较大的渔业损失^[2]。Hiroishi 等^[3]通过室内毒性试验证明, 卵圆卡盾藻对鱼具有较强的毒性, 并推测其毒性可能与该藻产生的活性氧 (reactive oxygen species, ROS) 有关。ROS 是正常细胞光合作用过程中的产物, 包括超氧化阴离子自由

基 ($O_2^{\cdot-}$)、过氧化氢 (H_2O_2) 和羟自由基 ($\cdot OH$) 等。

针胞藻门赤潮藻均能产生 ROS, 其中卡盾藻属 ROS 产生效率最高^[4]。由于海洋卡盾藻 (*C. marina*) 和古老卡盾藻 (*C. antiqua*) 在世界范围内多

收稿日期: 2011-05-15; 修订日期: 2011-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41106090); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2010CB428702); 中央高校基本科研业务费专项 (11610425 & 21610103); 教育部科学技术研究重点项目 (210259); 广东 908 赤潮灾害专项 (GD908-02-14)

作者简介: 江涛 (1978~), 博士, 助理研究员, 主要研究方向为海洋环境化学, E-mail: jiangtaojnu@163.com

* 通讯联系人, E-mail: tjiaogtj@jnu.edu.cn

次暴发赤潮,并造成了较大的渔业损失,所以有关这 2 种藻类产生活性氧的研究较多^[4~8]. 海洋卡盾藻和古老卡盾藻 ROS 的产生受藻类生长阶段和新陈代谢状态、水体营养状况等条件影响^[5~7]. Oda 等^[6]研究表明,海洋卡盾藻向水体中释放 H_2O_2 的量和藻细胞内 H_2O_2 浓度及生长阶段均存在一定的关系,以对数生长期 H_2O_2 产量最大,水体中氮限制和磷限制均能促进海洋卡盾藻 H_2O_2 的产生^[7]. 有关卵圆卡盾藻 ROS 产生的影响因素研究较少^[3,9]. Kim 等^[9]对卵圆卡盾藻 ROS 产生的机制进行了研究,结果表明,卵圆卡盾藻细胞表面的烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(NADPH)氧化酶可能与 $O_2^{\cdot-}$ 的生成有关,但 H_2O_2 的产生却与 $O_2^{\cdot-}$ 不同,可能来自于细胞内部. 但有关卵圆卡盾藻过氧化氢产生的影响因素研究鲜见报道. 本研究分析了卵圆卡盾藻(香港株)在不同营养条件、盐度和生长阶段下过氧化氢的产生特点,以期为卵圆卡盾藻赤潮灾害的预防和控制提供参考.

1 材料与方法

1.1 仪器和试剂

实验所需仪器主要包括: 荧光分光光度计(Varian Technologies, USA).

实验所需试剂主要包括: 30% 过氧化氢溶液(生化试剂, International Lab, USA), 对羟基苯甲酸(Alfa, USA), 辣根过氧化物酶(Sigma, USA), 过氧化氢酶(5 000 U·mg⁻¹, Sigma, USA), 95% 4-甲氧基苯甲醛(上海试剂一厂), 其他试剂均为国产分析纯.

辣根过氧化物酶溶液(1 000 U·mg⁻¹): 取辣根过氧化物酶 5.0 mg, 溶于 1 mL 超纯水中, 4℃ 避光保存.

过氧化氢酶溶液: 取过氧化氢酶 10.0 mg, 溶于 1 mL 超纯水中, 4℃ 避光保存.

对羟基苯甲酸(PHPA)溶液(1.5 mmol·L⁻¹): 称取对羟基苯甲酸 0.023 g 溶解至 100 mL, 4℃ 避光保存.

过氧化氢溶液(0.1 mol·L⁻¹): 取 30% 过氧化氢溶液 1.0 mL, 稀释至 10.0 mL, 避光保存.

1.2 实验方法

1.2.1 藻种培养

卵圆卡盾藻香港株(*Chattonella ovata*, Hong Kong strain, COHK)于 2003 年从香港近岸水体中采集并在室内单种培养至今. 自然海水经 0.45 μm 微

孔滤膜过滤,在 120℃ 下高温灭菌 20 min,冷却到室温. COHK 以 f/2 培养液进行培养. 取对数生长末期的 COHK,以 1:4 的比例接种于三角瓶中,置于人工气候箱中(杭州雪中炭恒温技术有限公司, XT5107-ID150),培养温度 25℃,光照强度为 3 000 lx,光暗循环 L:D=12:12. 以下实验除注明外,培养条件与此相同.

1.2.2 过氧化氢的测定

过氧化氢测定方法采用对羟基苯甲酸法^[10]. 在辣根过氧化物酶和过氧化氢酶的催化下,过氧化氢将 PHPA 氧化成荧光二聚体 (PHPA)₂. 在激发波长 $E_x=320$ nm 下,对发射波长(E_m)范围 400~600 nm 内进行扫描,确定最大发射波长. 取 1 mL 藻细胞培养液于 10 mL 试管中,依次加入 2 mL 1.5 mmol·L⁻¹ 的 PHPA 溶液, 30 μL 辣根过氧化物酶溶液,在过氧化氢酶存在或缺少时分别测定 30 s 内荧光光谱.

1.2.3 卵圆卡盾藻香港株不同生长时期的过氧化氢产生曲线

将对数生长期的 COHK 重新接种(初始藻密度为 0.23×10^4 cells·mL⁻¹),每 2 d 取藻液用 0.1 mL 浮游植物计数框进行镜检计数. 藻液取样后进行过氧化氢的测定(方法见 1.2.2 节),并绘制过氧化氢的产生曲线.

1.2.4 盐度和不同营养条件对卵圆卡盾藻香港株的生长以及过氧化氢产生的影响

本研究设计了以下 3 组实验: ①设置 6 种不同的氮磷比(4:1、8:1、16:1、32:1、64:1 和 128:1),按照以上 6 种氮磷比配制相应的培养基; ②用超纯水将自然海水稀释成 10、15、20、25 和 30 等 5 个盐度梯度; ③设置 5 种不同的铁盐浓度(0 、 0.05×10^{-8} 、 0.2×10^{-8} 、 1×10^{-8} 和 5×10^{-8} mol·L⁻¹). 每组实验设置 3 个平行(藻细胞起始密度约为 1.0×10^3 cells·mL⁻¹). 每 2 d 对藻细胞进行计数(第 2、4、6、8、10 和 12 d),第 4、6 和 8 d 对藻细胞培养液取样测定过氧化氢浓度(方法见 1.2.2 节). 藻细胞比生长率的计算采用文献[12]的方法.

2 结果与分析

2.1 卵圆卡盾藻香港株不同生长时期过氧化氢的测定

COHK 在接种 4 d 后进入对数生长期,第 12 d 藻密度达到最大值(图 1). 过氧化氢浓度峰值出现在 COHK 对数期(4~8 d),以第 6 d 达到最大(图 2). COHK 在整个生长周期 H_2O_2 最高含量为 2.91

$\times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$. 为了减小随机误差,在随后的实验中(见第 1.2.4 节),均采用第 4、6 和 8 d 过氧化氢浓度的平均值进行比较.

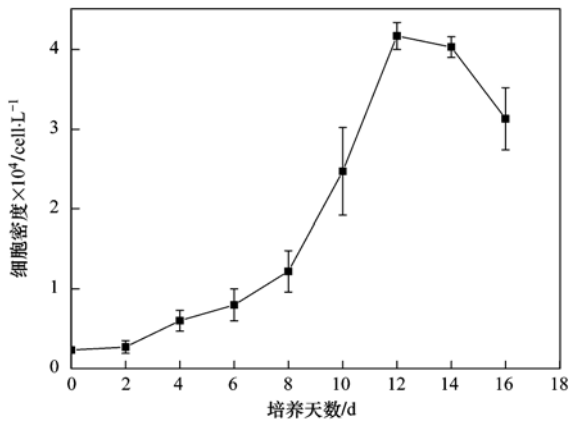


图 1 卵圆卡盾藻香港株的生长曲线

Fig. 1 Growth curve of COHK

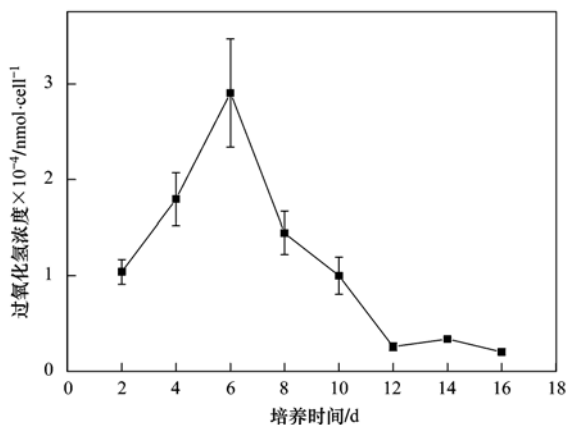


图 2 卵圆卡盾藻香港株过氧化氢的产生曲线

Fig. 2 Peroxide hydrogen production in COHK with time

2.2 氮磷比对卵圆卡盾藻香港株生长以及过氧化氢产生的影响

在 N:P 为 16:1、32:1 和 64:1 的情况下,COHK 生长率较高,以 N:P 为 32:1 时其生长率最高 ($0.58 \text{ div} \cdot \text{d}^{-1}$), N:P 为 4:1 时其生长率最低 ($0.36 \text{ div} \cdot \text{d}^{-1}$) (图 3). COHK 产生 H_2O_2 的量与藻类生长趋势相反,在 N:P 为 4:1 和 8:1 的情况下,藻细胞生长率低,但单位藻细胞 H_2O_2 浓度较高. 单位藻细胞 H_2O_2 浓度在 N:P 为 4:1 时最大,达到 $1.26 \times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$,约为 N:P 为 16:1 时其浓度 ($0.65 \times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$) 的 2 倍 (图 4).

2.3 盐度对卵圆卡盾藻香港株生长以及过氧化氢产生的影响

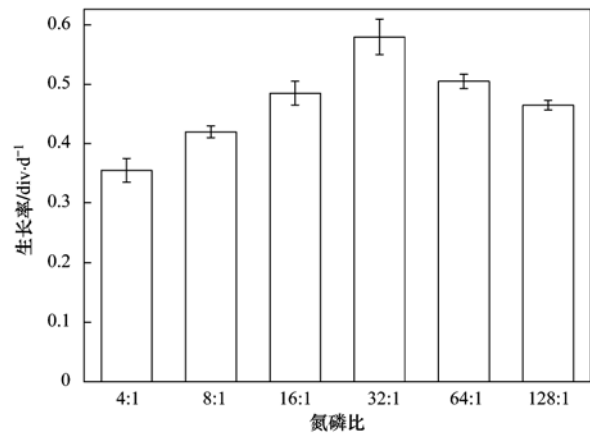


图 3 不同氮磷比条件下卵圆卡盾藻香港株的生长率(4~8 d)

Fig. 3 Effect of N/P ratio on the growth of COHK (4-8 d)

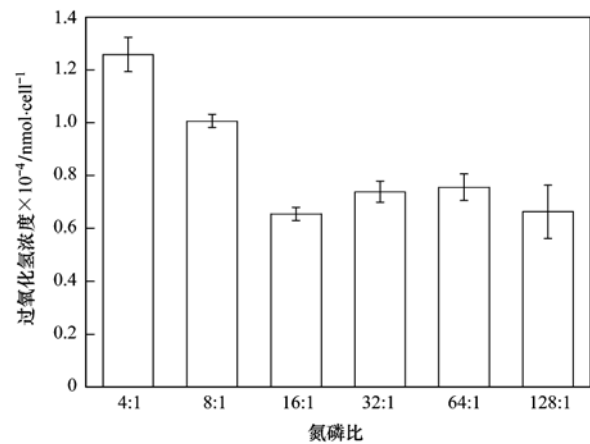


图 4 不同氮磷比条件下卵圆卡盾藻香港株的过氧化氢产量

Fig. 4 Production of hydrogen peroxide by COHK under different N/P ratios

COHK 在盐度为 20 和 25 时生长率较高,在盐度为 10、15 和 30 时生长率较低,表明 COHK 最适生长盐度为 20~25,低盐和高盐条件均不利于 COHK 的生长 (图 5). 低盐度和高盐度均对 COHK 过氧化氢的产生有一定的影响,在盐度为 10 时,单位藻细胞的 H_2O_2 量最高,达到 $2.2 \times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$; 其次为盐度 30 时,单位藻细胞的 H_2O_2 量为 $1.6 \times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$; 但盐度在 15~25 范围内,单位体积及单位藻细胞的 H_2O_2 量相差不大 (图 6).

2.4 Fe^{3+} 浓度对卵圆卡盾藻香港株生长以及过氧化氢产生的影响

培养基中 Fe^{3+} 能够显著影响 COHK 的生长,在 Fe^{3+} 浓度范围为 $0.2 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 内藻细胞生长率较高; 当 Fe^{3+} 浓度较高时 ($5 \times$

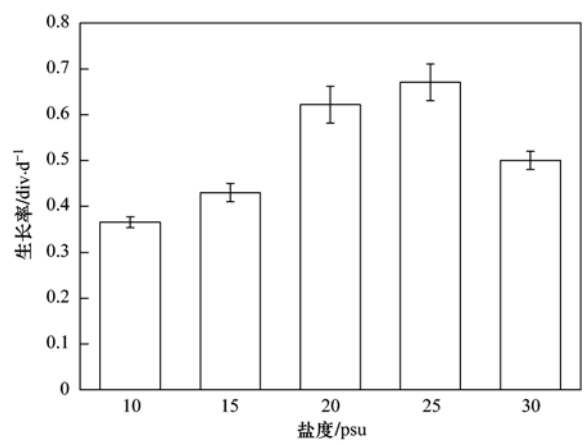


图 5 不同盐度条件下卵圆卡盾藻香港株的生长率(4~8 d)
Fig. 5 Effect of salinity on the growth of COHK(4-8 d)

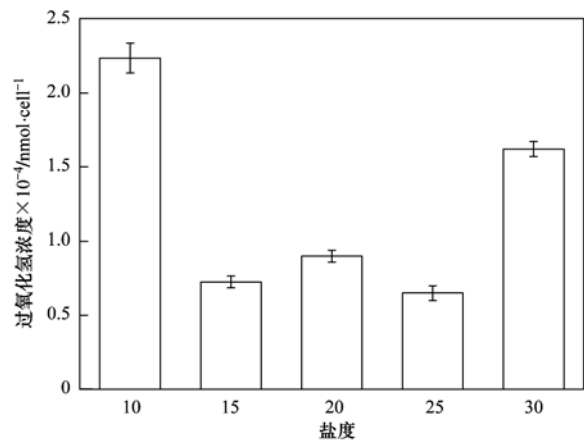


图 6 不同盐度条件下卵圆卡盾藻香港株的过氧化氢浓度
Fig. 6 Production of hydrogen peroxide by COHK under different salinities

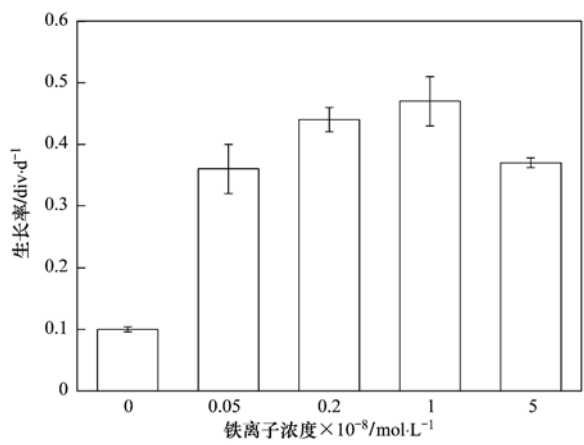


图 7 不同浓度铁离子条件下卵圆卡盾藻的生长速率(4~8 d)
Fig. 7 Division rate of *Chattonella ovata* under different salinities(4-8 d)

10⁻⁸ mol·L⁻¹),藻细胞生长率有所降低; 缺铁(Fe³⁺浓度为0)条件下 COHK 生长率最低

(0.1 div·d⁻¹)(图 7). 缺铁(Fe³⁺浓度为0)以及高铁条件(Fe³⁺浓度为5×10⁻⁸ mol·L⁻¹)下,卵圆卡盾藻的过氧化氢产量增加,过氧化氢浓度分别为0.97×10⁻⁴和0.95×10⁻⁴ nmol·cell⁻¹,明显高于其他浓度组(图 8).

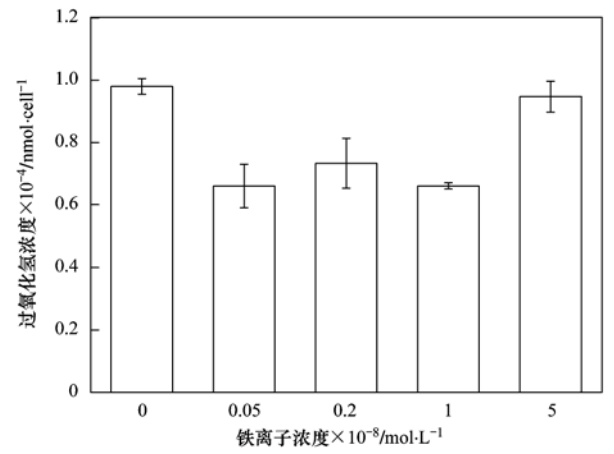


图 8 不同铁离子浓度条件下卵圆卡盾藻的过氧化氢产率
Fig. 8 Production of hydrogen peroxide by *Chattonella ovata* under different salinities

3 讨论

微量活性氧在藻类某些生理现象的调控中发挥着重要的作用,特别是在细胞内信号转导方面^[7]. 本研究表明,卵圆卡盾藻能够产生微量 H₂O₂(图 2、4、6 和 8). COHK 过氧化氢产量的峰值出现在对数生长前期,随后迅速降低(图 2). COHK 在对数生长期产生 H₂O₂ 可能与藻细胞本身的新陈代谢或者酶代谢有关^[9]. 过氧化物歧化酶(superoxide dismutase,SOD)和过氧化氢酶均能够显著抑制海洋卡盾藻的生长,从而推测 H₂O₂ 和 O₂ 是海洋卡盾藻生长过程中必需存在的产物^[6]. 研究表明,低浓度的活性氧能够显著地促进三角褐指藻(*Phaeodactylum tricornutum*)、杜氏藻(*Dunaliella* sp.)和青岛大扁藻(*Platymonas helgolandica*)等藻类的生长^[12],从而进一步验证了活性氧是某些微藻生长过程中必需的物质;但在高浓度活性氧的作用下,微藻的生长又受到明显的抑制,说明高浓度的活性氧对微藻生长产生完全相反的生物学效应^[12].

营养盐摩尔比通常被用来判定海水中浮游植物生长所需的营养限制元素. 海洋浮游植物氮、磷吸收比例基本上遵循 Redfield 值(N:P=16:1)^[13]. 当藻类生长受到营养限制时,某些次生代谢物(如藻毒素等)生成可能会增多,但不同限制因素对代谢物

合成的影响并不一致^[14~16]. 本研究结果表明, COHK 在氮限制(N:P值为4:1~8:1)条件下生长受到抑制,但 H_2O_2 产量却较高;而在非氮限制(N:P值为16:1~64:1)条件下,COHK 生长率较高,但 H_2O_2 产量较小(图3、4). 环境条件能够影响浮游植物细胞的化学组成,营养盐限制一般会导致细胞内营养的减少^[17]. Liu 等^[7]认为水体中 N:P 对海洋卡盾藻 H_2O_2 产率没有影响,而 Kim 等^[5]指出,古老卡盾藻产生 H_2O_2 与生长阶段的营养条件有关. 但有关营养盐限制影响赤潮藻产生 H_2O_2 的研究较少. 研究表明,氮限制可能会影响正常的细胞功能,如氮缺乏能降低植物的光合作用和呼吸作用,并且能增加氮还原酶、NADPH-谷氨酰胺脱氢酶和谷氨酰胺合成酶的活性^[17],这可能是导致 COHK 过氧化氢产量增加的原因,但有关其机制尚需进一步研究. 铁元素作为环境要素对该赤潮的形成起着决定性的作用^[18]. 江涛等^[19]研究发现,Fe 对海洋卡盾藻生长影响较大,在 Fe 限制的情况下,其对数生长期明显缩短,但溶血毒素的合成能力大大增强. 有关水体中铁元素对卵圆卡盾藻过氧化氢产量影响的研究很少. 本研究结果表明,缺铁(Fe^{3+} 浓度为0)以及高铁条件(Fe^{3+} 浓度为 $5 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)下,卵圆卡盾藻的过氧化氢产量增加(图8).

盐度能通过参与渗透调节而控制细胞生长,是影响微藻细胞形态的重要物理因子^[20]. 微藻对盐度有一定的耐受范围,较低和较高的盐度均不利于微藻生长. 先前研究表明,海洋卡盾藻澳大利亚株对盐度的耐受范围为15~50^[20],而海洋卡盾藻日本株对盐度的耐受范围为10~35^[4],最适宜生长的盐度为20~25^[19]. 本研究结果与 Yamaguchi 等^[21]相似,COHK 最适宜生长的盐度为20~25. 有关盐度影响卵圆卡盾藻过氧化氢产量的研究很少. 本研究结果表明,盐度在15~25范围内,单位体积藻液及单个藻细胞的 H_2O_2 量变化不明显,而低盐度(10)和高盐度(30)均能够刺激 H_2O_2 产生.

综上所述,卵圆卡盾藻 H_2O_2 产量与藻类生长阶段存在关系,环境胁迫能够促进 H_2O_2 产生,而 H_2O_2 被证实是导致鱼类死亡的关键因素之一^[4~8],所以本研究的结果将具有一定的环境意义. 卵圆卡盾藻 H_2O_2 产量以对数生长期最高,这表明该藻赤潮暴发初期能够产生较高浓度的 H_2O_2 ,所以该藻赤潮暴发前期对鱼类等水生动物可能具有较大的危害性. 营养盐限制条件能够促进卵圆卡盾藻 H_2O_2 的产生. 我国近岸海域浮游植物以磷限制为主,如北黄

海海域^[22]、南黄海近岸海域^[23]、东海近岸海域^[24]、大亚湾^[25]和珠江口近岸^[26]等海域都存在明显的磷限制,渤海就整体而言受无机氮限制(莱州湾为磷限制)^[27]. 本研究结果表明,COHK 在氮限制(N:P值为4:1~8:1)条件下 H_2O_2 产量却较高,而在非氮限制(N:P值为16:1~64:1)条件下, H_2O_2 产量较小(图3、4),这将意味着我国多数近岸海域氮磷结构将不利于卵圆卡盾藻 H_2O_2 产生,而渤海海域的氮限制则可能刺激该藻 H_2O_2 产生. 水体低盐度能够促进卵圆卡盾藻 H_2O_2 的产生,河口冲淡水区域或强降雨后海湾近岸海域的低盐度可能导致卵圆卡盾藻 H_2O_2 产量的增加. 但是,针胞藻门赤潮藻导致鱼类死亡的机制还存在一系列问题. 研究表明,海洋卡盾藻产生的活性氧达不到鱼类的致死浓度,其对鱼的毒性作用可能是2种或者多种有毒物质协同作用的结果^[28,29]. 另外,有关该类赤潮暴发时水体中的 ROS 含量和影响因素的研究缺乏,室内实验尚不能完全反映天然环境中赤潮藻的毒性. 有关针胞藻门赤潮藻的毒性机制尚需进一步的研究.

4 结论

(1)过氧化氢浓度峰值出现在 COHK 对数生长期(4~8 d),以第6 d 达到最大,为 $2.91 \times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$.

(2)COHK 产生 H_2O_2 的量与藻类生长呈相反趋势,在 N:P 为4:1和8:1的情况下,藻细胞生长率较低,但单位藻细胞 H_2O_2 浓度较高.

(3)低盐度和高盐度均有利于 COHK 过氧化氢的产生,在盐度为10时,单位藻细胞的 H_2O_2 量最高,达到 $2.2 \times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$,盐度在15~25范围内,单位藻细胞 H_2O_2 量相差不大($0.7 \times 10^{-4} \sim 0.9 \times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$).

(4)卵圆卡盾藻在缺铁(Fe^{3+} 浓度为0)以及高铁($5 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)条件下藻细胞生长率较低,但 H_2O_2 产量增加, H_2O_2 浓度分别为 0.97×10^{-4} 和 $0.95 \times 10^{-4} \text{ nmol} \cdot \text{cell}^{-1}$.

参考文献:

- [1] Lu S H, Hodgkiss I J. More raphidophyte blooms in south China waters [A]. In: Wyatt T, (ed.). Harmful algae news [C]. The Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, 2001. 1-2.
- [2] Yamaguchi H, Sakamoto S, Yamaguchi M. Nutrition and growth kinetics in nitrogen-and phosphorus-limited cultures of the novel red tide flagellate *Chattonella ovata* (Raphidophyceae) [J].

- Harmful Algae, 2008, **7**(1): 26-32.
- [3] Hiroishi S, Okada H, Imai I, *et al.* High toxicity of the novel bloom-forming species *Chattonella ovata* (Raphidophyceae) to cultured fish[J]. Harmful Algae, 2005, **4**(4): 783-787.
- [4] Marshall J A, De Salas M, Oda T, *et al.* Superoxide production by marine microalgae I. Survey of 37 species from 6 classes[J]. Marine Biology, 2005, **147**(2): 533-540.
- [5] Kim D, Watanabe M, Nakayasu Y, *et al.* Changes in O_2^- and H_2O_2 production by *Chattonella antiqua* during diel vertical migration under nutrient stratification[J]. Aquatic Microbial Ecology, 2005, **39**(2): 183-191.
- [6] Oda T, Moritomi J, Kawano I, *et al.* Catalase-and superoxide dismutase-induced morphological changes and growth inhibition in the red tide phytoplankton *Chattonella marina* [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 1995, **59**(11): 2044-2048.
- [7] Liu W H, Au D W T, Anderson D M, *et al.* Effects of nutrients, salinity, pH and light: dark cycle on the production of reactive oxygen species in the alga *Chattonella marina* [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2007, **346**(1-2): 76-86.
- [8] Kim C S, Lee S G, Lee C K, *et al.* Reactive oxygen species as causative agents in the ichthyotoxicity of the red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrioides* [J]. Journal of Plankton Research, 1999, **21**(11): 2105-2115.
- [9] Kim D, Nakashima T, Matsuyama Y, *et al.* Presence of the distinct systems responsible for superoxide anion and hydrogen peroxide generation in red tide phytoplankton *Chattonella marina* and *Chattonella ovata* [J]. Journal of Plankton Research, 2007, **29**(3): 241-247.
- [10] Hyslop P A, Sklar L A. A quantitative fluorimetric assay for the determination of oxidant production by polymorphonuclear leukocytes: its use in the simultaneous fluorimetric assay of cellular activation processes[J]. Analytical Biochemistry, 1984, **141**(1): 280-286.
- [11] Guillard R R L. Division rates [A]. In: Stein J R, (ed.). Handbook of phycological methods: culture methods and growth measurements [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1973. 289-311.
- [12] 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.
- [13] Redfield A C, Ketchum B H, Richards F A. The influence of organisms on the composition of sea-water [A]. In: Hill M N, (ed.). The sea [C]. New York: John Wiley, 1963. 26-77.
- [14] Valenti T W Jr, James S V, Lahousse M J, *et al.* A mechanistic explanation for pH-dependent ambient aquatic toxicity of *Prymnesium parvum* Carter [J]. Toxicon, 2010, **55**(5): 990-998.
- [15] 傅永静, 周成旭, 严小军. 环境胁迫对微小卡罗藻溶血毒素分泌的影响[J]. 宁波大学学报 (理工版), 2009, **22**(2): 175-180.
- [16] Johansson N, Granéli E. Cell density, chemical composition and toxicity of *Chrysochromulina polylepis* (Haptophyta) in relation to different N: P supply ratios [J]. Marine Biology, 1999, **135**(2): 209-217.
- [17] Everest S A, Hipkin C R, Syrett P J. Enzyme activities in some marine phytoplankters and the effect of nitrogen limitation on nitrogen and carbon metabolism in *Chlorella stigmatophora* [J]. Marine Biology, 1986, **90**(2): 165-172.
- [18] 齐雨藻. 中国南海赤潮研究 [M]. 广州: 广东经济出版社, 2008.
- [19] 江涛, 王锐, 吴霓, 等. 海洋卡盾藻 (香港株) 溶血活性特征研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(10): 2920-2925.
- [20] Marshall J A, Hallegraeff G M. Comparative ecophysiology of the harmful alga *Chattonella marina* (Raphidophyceae) from South Australian and Japanese waters [J]. Journal of Plankton Research, 1999, **21**(10): 1809-1822.
- [21] Yamaguchi M, Imai I, Honjo T. Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth rates of the noxious red tide flagellates *Chattonella antiqua* and *C. marina* (Raphidophyceae) [J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1991, **57**(7): 1277-1284.
- [22] 张辉, 石晓勇, 张传松, 等. 北黄海营养盐结构及限制作用时空分布特征分析[J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2009, **39**(4): 773-780.
- [23] 韦钦胜, 战国, 臧家业, 等. 南黄海春季海水化学要素的分布特征及其受控因素[J]. 海洋科学, 2010, **34**(3): 52-60.
- [24] 石晓勇, 王修林, 韩秀荣, 等. 长江口邻近海域营养盐分布特征及其控制过程的初步研究[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(7): 1086-1092.
- [25] 丘耀文, 王肇鼎, 朱良生. 大亚湾海域营养盐与叶绿素含量的变化趋势及其对生态环境的影响[J]. 台湾海峡, 2005, **24**(2): 131-139.
- [26] Yin K D, Qian P Y, Wu M C S, *et al.* Shift from P to N limitation of phytoplankton growth across the Pearl River Estuarine plume during summer [J]. Marine Ecology Progress Series, 2001, **221**: 17-28.
- [27] 刘浩, 尹宝树. 渤海生态动力过程的模型研究 II. 营养盐以及叶绿素 a 的季节变化[J]. 海洋学报, 2007, **29**(4): 20-33.
- [28] Marshall J A, Nichols P D, Hamilton B, *et al.* Ichthyotoxicity of *Chattonella marina* (Raphidophyceae) to damselfish (*Acanthochromis polyacanthus*): the synergistic role of reactive oxygen species and free fatty acids[J]. Harmful Algae, 2003, **2**(4): 273-281.
- [29] Tang J Y M, Anderson D M, Au D W T. Hydrogen peroxide is not the cause of fish kills associated with *Chattonellamarina*: cytological and physiological evidence[J]. Aquatic Toxicology, 2005, **72**(4): 351-360.

CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China	CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-peí, <i>et al.</i> (673)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains	WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, <i>et al.</i> (679)
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou	ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, <i>et al.</i> (687)
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions	YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, <i>et al.</i> (694)
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (701)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, <i>et al.</i> (711)
Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	CAO Xiu-hong, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (720)
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary	JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, <i>et al.</i> (727)
Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay	XU Ya-yan, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (732)
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment	LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (741)
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, <i>et al.</i> (746)
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai	DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, <i>et al.</i> (754)
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification	WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (771)
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge	GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (777)
Influence of <i>Ruditapes philippinarum</i> Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay	DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (782)
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing	HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (794)
Temporal and Spatial Variation of Non-Point Source Nitrogen in Surface Water in Urban Agricultural Region of Shanghai	WANG Nan, MAO Liang, HUANG Hai-bo, <i>et al.</i> (802)
Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff	HE Xiao-yan, ZHAO Hong-tao, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (810)
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland	HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (817)
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism	LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, <i>et al.</i> (825)
Production of Peroxide Hydrogen in <i>Chattonella ovata</i> Hong Kong Strain	JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, <i>et al.</i> (832)
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of <i>Bacillus</i> sp. B1 on <i>Phaeocystis globosa</i>	LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he (838)
Effects of Sediment on the Growth of <i>Microcystis</i> and <i>Anabaena</i> in Yanghe Reservoir	CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (844)
New-Type Electroless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution	YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, <i>et al.</i> (849)
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes	ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (857)
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT	PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, <i>et al.</i> (866)
Influences of pH and Complexing Agents on Degradation of Reactive Brilliant Blue KN-R by Ferrous Activated Persulfate	ZHANG Cheng, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (871)
Degradation Kinetics of Ozone Oxidation on High Concentration of Humic Substances	ZHENG Ke, ZHOU Shao-qi, YANG Mei-mei (879)
Index of Stability and Its Mechanisms of Aerobic Granular System Using Volume-based Information Entropy	LI Zhi-hua, JI Xiao-qin, LI Sheng, <i>et al.</i> (885)
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage	LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, <i>et al.</i> (889)
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age	ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (896)
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification	LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, <i>et al.</i> (903)
Optimization and Comparison of Nitrogen and Phosphorus Removal by Different Aeration Modes in Oxidation Ditch	GUO Chang-zi, PENG Dang-cong, CHENG Xue-mei, <i>et al.</i> (910)
Effect of Acidification on the Dewaterability of Sewage Sludge in Bioleaching	ZHU Hai-feng, ZHOU Li-xiang, WANG Dian-zhan (916)
Microbial Ecology Analysis of the Biofilm from Two Biological Contact Oxidation Processes with Different Performance	QIAN Yin, QUAN Xiang-chun, PEI Yuan-sheng, <i>et al.</i> (922)
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity	FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, <i>et al.</i> (932)
Storages and Distributed Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen During the Succession of Artificial Sand-Binding Vegetation in Arid Desert Ecosystem	JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, <i>et al.</i> (938)
Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China	WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun (946)
Impact of Microbial Aggregating Agents on Soil Aggregate Stability Under Addition of Exogenous Nutrients	MO Yan-hua, TANG Jia, ZHANG Ren-duo, <i>et al.</i> (952)
Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids	YAO Jia-jia, KANG Fu-xing, GAO Yan-zheng (958)
Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil	WU Wei, JIANG Lin, CHEN Jia-jun, <i>et al.</i> (965)
Study on the Land Use Optimization Based on PPI	WU Xiao-feng, LI Ting (971)
Research on Algal Diversity in Zoige Alpine Wetland	CHEN Xi, LIU Ru-yin, WANG Yan-fen, <i>et al.</i> (979)
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, <i>et al.</i> (987)
Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer	ZHENG Yan-ling, HOU Li-jun, LU Min, <i>et al.</i> (992)
Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition	LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, <i>et al.</i> (1000)
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus	XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (1008)
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation	LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (1015)
Construction of a Microbial Consortium RXS with High Degradation Ability for Cassava Residues and Studies on Its Fermentative Characteristics	HE Jiang, MAO Zhong-gui, ZHANG Qing-hua, <i>et al.</i> (1020)
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines	TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, <i>et al.</i> (1028)
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor	CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, <i>et al.</i> (1033)

《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3月15日 33卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 3 Mar. 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

国内外公开发行人