

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 13 期 Vol.33 No.13 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 13 期 2013 年 7 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 强度干扰后退化森林生态系统中保留木的生态效应研究综述..... 缪 宁,刘世荣,史作民,等 (3889)
- AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理..... 罗巧玉,王晓娟,林双双,等 (3898)

个体与基础生态

- 东灵山不同林型五角枫叶性状异速生长关系随发育阶段的变化..... 姚 婧,李 颖,魏丽萍,等 (3907)
- 不同温度下 CO₂ 浓度增高对坛紫菜生长和叶绿素荧光特性的影响..... 刘 露,丁柳丽,陈伟洲,等 (3916)
- 基于 LULUCF 温室气体清单编制的浙江省杉木林生物量换算因子..... 朱汤军,沈楚楚,季碧勇,等 (3925)
- 土壤逐渐干旱对菖蒲生长及光合荧光特性的影响..... 王文林,万寅婧,刘 波,等 (3933)
- 一株柠条内生解磷菌的分离鉴定及实时荧光定量 PCR 检测..... 张丽珍,冯利利,蒙秋霞,等 (3941)
- 一个年龄序列巨桉人工林植物和土壤生物多样性..... 张丹桔,张 健,杨万勤,等 (3947)
- 不同饵料和饥饿对魁蚶幼虫生长和存活的影响..... 王庆志,张 明,付成东,等 (3963)
- 禽畜养殖粪便中多重抗生素抗性细菌研究..... 祁诗月,任四伟,李雪玲,等 (3970)
- 链状亚历山大藻赤潮衰亡的生理调控..... 马金华,孟 希,张 淑,等 (3978)
- 基于环境流体动力学模型的浅水草藻型湖泊水质数值模拟..... 李 兴,史洪森,张树礼,等 (3987)

种群、群落和生态系统

- 干旱半干旱地区围栏封育对甘草群落特征及其分布格局的影响..... 李学斌,陈 林,李国旗,等 (3995)
- 宁夏六盘山三种针叶林初级净生产力年际变化及其气象因子响应..... 王云霓,熊 伟,王彦辉,等 (4002)
- 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征..... 莫保儒,蔡国军,杨 磊,等 (4011)
- 模拟酸沉降对鼎湖山季风常绿阔叶林地表径流水化学特征的影响..... 丘清燕,陈小梅,梁国华,等 (4021)
- 基于改进 PSO 的洞庭湖水源涵养林空间优化模型..... 李建军,张会儒,刘 帅,等 (4031)
- 外来植物火炬树水浸液对土壤微生物生态系统的化感作用..... 侯玉平,柳 林,王 信,等 (4041)
- 崇明东滩抛荒鱼塘的自然演替过程对水鸟群落的影响..... 杨晓婷,牛俊英,罗祖奎,等 (4050)
- 三峡水库蓄水初期鱼体汞含量及其水生食物链累积特征..... 余 杨,王雨春,周怀东,等 (4059)
- 元江鲤种群遗传多样性..... 岳兴建,邹远超,王永明,等 (4068)

景观、区域和全球生态

- 中国西北干旱区气温时空变化特征..... 黄 蕊,徐利岗,刘俊民 (4078)
- 集水区尺度下东北东部森林土壤呼吸的模拟..... 郭丽娟,国庆喜 (4090)
- 增氮对青藏高原东缘高寒草甸土壤甲烷吸收的早期影响..... 张裴雷,方华军,程淑兰,等 (4101)
- 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析..... 张 义,张合平 (4111)
- 深圳市景观生态安全格局源地综合识别..... 吴健生,张理卿,彭 建,等 (4125)

庐山风景区碳源、碳汇的测度及均衡..... 周年兴,黄震方,梁艳艳 (4134)

气候变化对内蒙古中部草原优势牧草生长季的影响 李夏子,韩国栋,郭春燕 (4146)

民勤荒漠区典型草本植物马蔺的物候特征及其对气候变化的响应..... 韩福贵,徐先英,王理德,等 (4156)

血水草生物量及碳贮量分布格局..... 田大伦,闫文德,梁小翠,等 (4165)

5 种温带森林生态系统细根的时间动态及其影响因子 李向飞,王传宽,全先奎 (4172)

资源与产业生态

干旱胁迫下 AM 真菌对矿区土壤改良与玉米生长的影响..... 李少朋,毕银丽,陈咄圳,等 (4181)

城乡与社会生态

上海环城林带保健功能评价及其机制..... 张凯旋,张建华 (4189)

研究简报

北京山区侧柏林林内降雨的时滞效应 史 宇,余新晓,张佳音 (4199)

采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应
..... 胡振宏,何宗明,范少辉,等 (4205)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 35 * 2013-07



封面图说: 岳阳附近的水源涵养林及水系鸟瞰——水源涵养林对于调节径流,减缓水、旱灾害,合理开发利用水资源具有重要的生态意义。洞庭湖为我国第二大淡水湖,南纳湘、资、沅、澧四水,北由岳阳城陵矶注入长江,是长江上最重要的水量调节湖泊。因此,湖周的水源涵养林建设对于恢复洞庭湖调节长江中游地区洪水的功能,加强湖区生物多样性的保护是最为重要的举措之一。对现有防护林采取人为干扰的调控措施,改善林分空间结构,将有利于促进森林生态系统的正向演替,为最大程度恢复洞庭湖水源林生态功能和健康经营提供重要支撑。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201301170112

马金华, 孟希, 张淑, 隋正红, 王津果, 周伟, 常连鹏. 链状亚历山大藻赤潮衰亡的生理调控. 生态学报, 2013, 33(13): 3978-3986.

Ma J H, Meng X, Zhang S, Sui Z H, Wang J G, Zhou W, Chang L P. Physiological regulation related to the decline of *Alexandrium catenella*. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 3978-3986.

链状亚历山大藻赤潮衰亡的生理调控

马金华¹, 孟希², 张淑¹, 隋正红^{1,*}, 王津果¹, 周伟¹, 常连鹏¹

(1. 中国海洋大学海洋生物遗传学与育种教育部重点实验室, 青岛 266003; 2. 南京农业大学园艺学院, 南京 210095)

摘要:研究了链状亚历山大藻在对数生长期、衰亡期、高氮、低氮条件下, 藻细胞中可溶性蛋白含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、丙二醛(MDA)、过氧化氢(H₂O₂)和还原型谷胱甘肽(GSH)含量、光合速率和呼吸速率、DNA降解、端粒酶活性的变化。结果表明:在衰亡期、高氮、低氮条件下链状亚历山大藻细胞中可溶性蛋白、GSH含量、光合速率和呼吸速率下降;SOD活性(低氮条件除外)、H₂O₂、MDA含量上升;端粒酶活性和DNA Ladder随着藻细胞生长而变化,并在衰亡时期,出现了明显的DNA Ladder。研究结果显示链状亚历山大藻衰亡过程的反应表现为:蛋白质合成受阻或降解,产生大量氧化中间产物(MDA, H₂O₂等),抗氧化系统被激活,GSH等非酶抗氧化物质被大量消耗,SOD等酶抗氧化物被激活;另外表现为光合速率和呼吸速率下降;同时活性氧自由基(Reactive Oxygen Species, ROS)的积累诱发了细胞凋亡,核酸内切酶被激活,选择性降解染色质DNA。推测低氮、高氮条件均可以加快藻细胞的衰亡的生理过程,链状亚历山大藻的赤潮衰亡是一种有序的死亡过程。

关键词:链状亚历山大藻;衰亡;生理调控

Physiological regulation related to the decline of *Alexandrium catenella*

MA Jinhua¹, MENG Xi², ZHANG Shu¹, SUI Zhenghong^{1,*}, WANG Jinguo¹, ZHOU Wei¹, CHANG Lianpeng¹

1 Key Laboratory of Marine Genetics and Breeding Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

2 College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Abstract: Over the last several decades, harmful algal blooms (HABs) have emerged as a global environmental problem because of their more frequent occurrence and because of the threat they pose to the health of humans and other organisms. Great efforts have been made to elucidate the ecological and biological features of red tide events, using approaches ranging from molecular and cell biology to large-scale field surveys, numerical modeling, and remote sensing from space. However, studies on the molecular mechanisms of red tides, including those involved in their decline phase, are still limited. Researchers believe that the decline phase of red tides represents a process of programmed cell death (PCD). PCD, which is controlled by multiple factors, is an active, gene-regulated process that has evolved in most organisms. *Alexandrium catenella* is an important causative dinoflagellate associated with HABs and paralytic shellfish poisoning. In this study, we determined physiological and biochemical indices of *A. catenella* including soluble protein content, superoxide dismutase (SOD) activity, malondialdehyde (MDA) content, reduced glutathione (GSH) content, hydrogen peroxide (H₂O₂) content, photosynthetic rate, respiratory rate, DNA laddering, and telomerase activity. These biochemical analyses were conducted using cells of *A. catenella* collected after different periods of growth and under different growth conditions (i. e., with different concentrations of nitrogen in the medium). There were differences in several parameters between the decline phase and the logarithmic phase. There was an increase in peroxidation in *A. catenella* during the decline phase and under low- and high-nitrogen conditions. This was characterized by increased SOD activity (except under low-nitrogen growth

基金项目:山东省自然科学基金重点项目(ZR2011DZ002); 高校博士点基金(20100132110007)

收稿日期:2013-01-17; 修订日期:2013-04-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: suizhengh@ouc.edu.cn

conditions), MDA content, and H_2O_2 content, and decreases in soluble protein content, GSH content, photosynthetic rate, and respiratory rate. The results suggested that excessive reactive oxygen was the main reason for the decline of *A. catenella*. Based on these experimental results, we hypothesized that the physiological process during the decline phase of *A. catenella* was as follows: First, metabolism slowed, resulting in a decrease in intracellular protein levels. Secondly, cells produced large amounts of peroxide, which activated the cellular antioxidant system. SOD was activated in response to the massive accumulation of ROS, and other non-enzymatic antioxidants such as GSH were consumed. In spite of these changes, the oxidation and antioxidant system remained unbalanced, resulting in excess accumulation of H_2O_2 and other ROS. Ultimately, those ROS led to serious membrane lipid peroxidation and the release of MDA. The decrease in SOD activity under low-nitrogen conditions may have been due to a lack of nitrogen, which is necessary for protein synthesis. Finally, excessive accumulation of ROS induced apoptosis, and the endonuclease was activated to selectively degrade chromosomes, resulting in DNA laddering. The photosynthetic rate decreased as a result of decreases in chlorophyll content and RUBP carboxylase activity. The respiration rate decreased as a result of the decreased volume of mitochondria and smaller area of their internal cristae. Telomerase activity also changed during the cell growth and decline periods. Low-nitrogen and high-nitrogen conditions accelerated the physiological process of cell aging. These results are consistent with the hypothesis that the decline of *A. catenella* is a controlled process of cell death. Our findings reveal some of the physiological changes that occur during the decline phase of *A. catenella*. These data will help us to understand the decline mechanisms of red tide algae, and provide a foundation for studying the molecular mechanisms of red tide dynamics. Such information will be useful for developing methods to monitor and control red tides.

Key Words: *Alexandrium catenella*; decline; physiological regulation

链状亚历山大藻(*Alexandrium catenella*)是一种可产生麻痹性贝毒(Paralytic Shellfish Poisoning, PSP)的赤潮微藻,是我国东南沿海主要的有毒赤潮藻之一^[1]。PSP的毒性很强,是全球神经麻痹性毒素发生的主要原因之一^[2],对人体产生巨大的危害^[3]。

赤潮发生消亡时,赤潮生物大量死亡,在细菌分解作用下,可造成环境严重缺氧引起鱼贝类窒息,或因代谢物质对海洋生态系统造成毒害作用,同时赤潮的消亡与爆发一样呈现出突然性和一致性的群体的生长改变,故赤潮消亡是赤潮研究中的热点问题。关于赤潮消亡的机理,有很多研究者认为这是一种细胞程序性死亡(PCD)的过程^[4-7]。本实验在实验室条件下研究了链状亚历山大藻在不同氮浓度生长条件及不同生长时期的生理生化指标的变化,从而推测赤潮衰亡的过程是否符合这种推断。已有报道揭示活性氧自由基(Reactive Oxygen Species, ROS)是PCD的关键因子^[8-10]。

对链状亚历山大藻赤潮爆发与消亡的研究多集中于海洋学、生态学等方面^[11],对于赤潮衰亡生理变化方面还未见报道。本文主要对链状亚历山大藻对数生长期、衰亡期、高氮、低氮条件下的藻细胞分别测定一系列生理、生化指标,揭示链状亚历山大藻在衰亡阶段发生的生理反应,为阐明赤潮衰亡机理奠定基础。

1 材料和方法

1.1 材料

链状亚历山大藻,来源于中国海洋大学藻种室。

1.2 培养条件和材料处理

将活化的链状亚历山大藻(*A. catenella*)在正常 f/2 培养基中培养至对数期,以初始浓度为 3000 个/mL 的藻细胞量分别接种于低氮(氮浓度为 0.0882 mmol/L)培养基、正常 f/2 培养基(氮浓度为 0.882 mmol/L)和高氮(氮浓度为 2.646 mmol/L)培养基^[12]中,于温度为(20±1)℃、光暗周期为 12h:12h、光照度为 30—35 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的培养室中进行培养,隔天取藻计数,并绘制生长曲线图,在培养第 10 天(对数期)取 3 种生长条件中的藻细胞约 1×10^6 个,并在第 20 天(对数期)及第 40 天(衰亡期)分两次取正常 f/2 培养基中的藻细胞约 $1 \times$

10^6 个,进行各生理生化指标的测定。

先将藻体在正常 f/2 培养基中进行活化,至对数期后再以 3000 个/mL 的量接种到新的 f/2 培养基中,于温度为 $(20\pm 1)^\circ\text{C}$,光暗周期为 12h :12h,光照度为 $30\text{—}35\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的培养室中进行培养。隔天取藻计数,每隔 5d 取样约 $5\times 10^6\text{—}1\times 10^7$ 个藻细胞,液氮保存,进行 DNA 降解实验和端粒酶活性的测定。

1.3 生理生化指标测定

藻细胞生长至对数期以及衰亡期以及低氮、高氮条件化培养 10d 后取样约 1×10^6 个藻细胞,4000r/min 离心 5 min,取沉淀的藻泥进行生理生化指标的测定。每个指标的测定均设定 3 个平行样。

可溶性蛋白含量的测定按照 Bradford 方法进行,以牛血清蛋白做标准曲线,计算蛋白质含量^[13]。超氧化物歧化酶(SOD)活力的测定采用氮蓝四唑(NBT)光化学反应法^[14]。丙二醛(MDA)含量测定参考张志良的方法^[15]。还原型谷胱甘肽(GSH)含量测定参考张宗申等的方法^[16]。过氧化氢(H_2O_2)含量测定参考 Pick 和 Keisari 的方法^[17]测定。光合速率和呼吸速率采用氧电极的方法测定;端粒酶活性用 TRAPEZE® XL Telomerase Detection Kit 测定, $\Delta\text{FL}/\Delta\text{R}$ 的大小与端粒酶的活性大小呈正比;DNA 降解用 Apoptotic DNA Ladder Kit 测定。

2 结果与分析

2.1 可溶性蛋白含量的变化

图 1 为对数期(20d)和衰亡期(40d)以及不同氮浓度条件培养(10d)可溶性蛋白含量的变化。藻细胞内可溶性蛋白的含量在衰亡期、高氮及低氮生长条件显著下降($P<0.01$),由此表明在衰亡期和高氮、低氮培养条件下的细胞生长受到限制,代谢能力下降,蛋白质合成减少或受阻,或部分代谢酶含量下降或降解。

2.2 超氧化物歧化酶(SOD)活性的变化

图 2 为对数期(20d)和衰亡期(40d)以及不同氮浓度条件培养(10d) SOD 活性的变化。通过统计学分析,SOD 活性在衰亡期、低氮、高氮条件与对数期(20d、10d)差异非常显著($P<0.01$)。在衰亡期、高氮条件中藻细胞 SOD 活性上升,可能是由于衰亡和高氮等不利条件刺激了藻体产生过量的 ROS,激活 SOD,活性明显上升,清除体内过量的 ROS,以减轻藻体所受到的伤害。而低氮条件中 SOD 活性降低,有可能是由于氮元素不足,阻碍了蛋白质的合成。

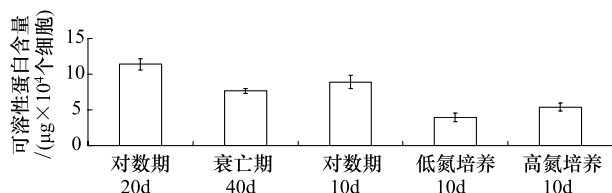


图 1 对数期(20d)和衰亡期(40d)以及不同氮浓度条件培养(10d)可溶性蛋白含量的变化

Fig. 1 Change of soluble protein content in *A. catenella* during logarithmic(20d), decline (40d) phase and cultured at different nitrogen lever (10d)

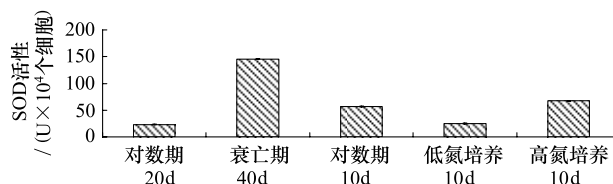


图 2 对数期(20d)和衰亡期(40d)以及不同氮浓度条件培养(10d) SOD 活性的变化

Fig. 2 Change of SOD activity in *A. catenella* during logarithmic(20d), decline (40d) phase and cultured at different nitrogen lever (10d)

2.3 丙二醛(MDA)含量的变化

图 3 为对数期(20d)和衰亡期(40d)以及不同氮浓度条件培养(10d) MDA 含量的变化。衰亡期、低氮、高氮条件培养的藻细胞中 MDA 的含量明显升高($P<0.01$),说明了在生长的衰亡期、低氮、高氮条件中藻细胞膜脂过氧化程度加剧,造成 MDA 大量积累。

2.4 还原型谷胱甘肽(GSH)含量的变化

图 4 为对数期(20d)和衰亡期(40d)以及不同氮浓度条件培养(10d) GSH 含量的变化。在衰亡期、低氮、高氮条件培养的藻细胞内 GSH 含量明显降低($P<0.01$),由此推测藻细胞内产生了过多的 ROS,激活了藻细

胞的抗氧化系统,GSH 作为非酶抗氧化物质用于清除藻细胞内的过量的 ROS。

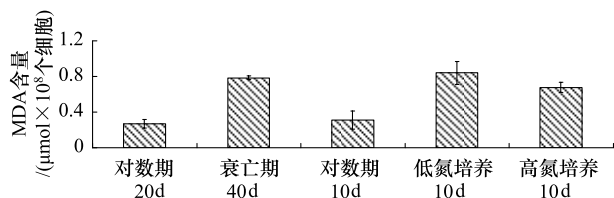


图3 对数期(20d)和衰亡期(40d)以及不同氮浓度条件培养(10d)MDA含量的变化

Fig.3 Change of MDA content in *A. catenella* during logarithmic(20d), decline (40d) phase and cultured at different nitrogen lever (10d)

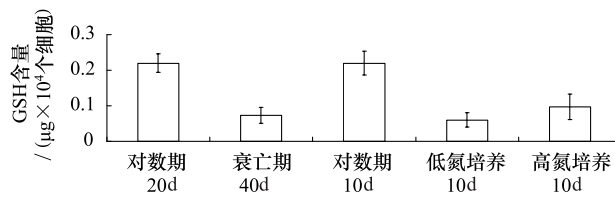


图4 对数期(20d)和衰亡期(40d)以及不同氮浓度条件培养(10d)GSH含量的变化

Fig.4 Change of GSH content in *A. catenella* during logarithmic(20d), decline (40d) phase and cultured at different nitrogen lever (10d)

2.5 过氧化氢(H_2O_2)含量的变化

图5为对数期(20d)和衰亡期(40d)以及不同氮浓度条件培养(10d) H_2O_2 含量的变化。在衰亡期、低氮、高氮条件培养的藻细胞内 H_2O_2 含量明显上升($P < 0.01$),表明了衰亡期、高氮、低氮等不适生长条件刺激了藻体产生过量的 O_2^- ,致使 H_2O_2 的积累。

2.6 光合特性

2.6.1 光合速率

图6为对数期(20d)和衰亡期(40d)以及不同氮浓度条件培养(10d)光合速率的变化。衰亡期、高氮、低氮条件藻细胞的光合速率明显下降($P < 0.01$),表明与衰亡期及高氮、低氮条件下藻细胞中叶绿体内RUBP羧化酶活性下降,光合电子传递和光合磷酸化受到阻碍^[18]有关。

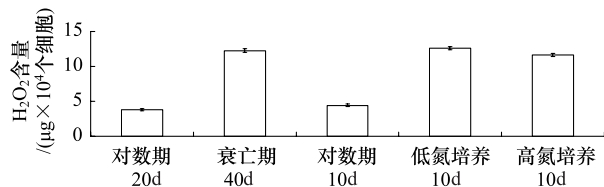


图5 对数期(20d)和衰亡期(40d)以及不同氮浓度条件培养(10d) H_2O_2 含量的变化

Fig.5 Change of H_2O_2 content in *A. catenella* during logarithmic(20d), decline (40d) phase and cultured at different nitrogen lever (10d)

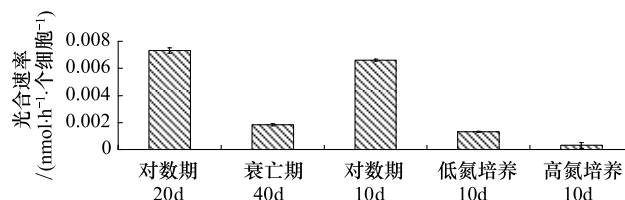


图6 对数期(20d)和衰亡期(40d)以及不同氮浓度条件培养(10d)光合速率的变化

Fig.6 Change of photosynthetic rate in *A. catenella* during logarithmic(20d), decline (40d) phase and cultured at different nitrogen lever (10d)

2.6.2 呼吸速率

图7为对数期(20d)和衰亡期(40d)以及不同氮浓度条件培养(10d)呼吸速率的变化。衰亡时期、高氮、低氮条件藻细胞的呼吸速率下降($P < 0.01$),推测可能是由线粒体体积变小,褶皱膨胀,数目减少^[19]造成的。

2.7 DNA降解

图8为每隔5d藻细胞的DNA Ladder的变化。DNA从第25天出现DNA降解的现象,到40、45天时DNA降解现象明显,出现了多条DNA Ladder。出现DNA Ladder是植物细胞凋亡的标志性特征^[20],说明藻细胞衰老也是经过PCD这个过程。

2.8 端粒酶活性变化

图9为每隔5d藻细胞的端粒酶活性的变化。通过统计学分析,5、10、15d端粒酶活性差异显著($P < 0.05$),酶活性上升;15、20d差异极显著($P < 0.01$),酶活性下降;20、25d差异显著($P < 0.05$),酶活性上升;25、

30d 差异显著 ($P < 0.05$), 酶活性下降; 30、35、40d 差异不显著 ($P > 0.05$); 40、45d 差异显著 ($P < 0.05$), 酶活性下降。端粒酶活性在 5 至 15d 成上升趋势, 15d 至 30d 呈上下波动现象, 30 至 40d 酶活性相差不大, 直到 45d 酶活性降低 (图 9)。No heated 是检测样品; Heated 是阴性对照样品, 即将端粒酶 85℃ 高温灭活 10min, 端粒酶活性很低; 两者比较测定端粒酶活性, 从而验证实验的可靠性和准确性 (图 9)。

3 讨论

周名江等^[11]根据现场和实验室的研究结果, 提出了甲藻赤潮生消过程的一个初步假设, 认为赤潮衰亡是随着营养盐的大量消耗、光照和水温的过强过高, 以及可能的高摄食压力而出现的藻细胞密度不断降低的过程。但由于实验室条件有限, 无法完全模拟赤潮爆发与衰亡, 故采用批次培养的方法, 隔天计数, 绘制生长曲线, 直至藻细胞密度出现持续下降时, 即认为到达衰亡阶段。由于在赤潮衰亡阶段, 随着营养盐的大量消耗, 氮元素浓度下降, 故本实验设计低氮条件。海水富营养化是赤潮发生的物质基础和首要条件^[21]。Lomas 等^[22], Glibert 等^[23]的研究表明当环境中氮营养物质浓度较高, 特别是铵盐和尿素等还原态氮营养物质浓度较高时, 容易爆发甲藻赤潮, 所以本实验设计了高氮条件模拟赤潮爆发的环境条件, 以与衰亡条件下的生理过程进行比较。

植物衰老是由基因控制的且受内外因素影响导致植物自然死亡的一系列衰退过程^[24]。衰老期间会出现与正常生长阶段不同的生理生化变化, 首先是蛋白质的降解, 吴光南等^[25]指出蛋白质降解是叶片衰老的基本特征。王月福等^[26]研究了小麦旗叶衰老中蛋白质含量的变化, 发现小麦旗叶衰老过程中, 可溶性蛋白含量下降。陈贵等^[27]指出, 在植物衰老进程中, 蛋白质逐渐降解成氨基酸。田丹等^[28]研究了镉胁迫对湛江等鞭金藻和普通小球藻的生长和抗氧化系统的影响, 结果表明, 高浓度的镉抑制两种藻的生长, 可溶性蛋白含量降低。在本实验中在衰亡期及高氮低氮条件下的藻细胞中蛋白质含量均下降, 与他们的实验结果一致。说明赤潮发生消亡时, 蛋白质合成受阻或降解。

其次是活性氧自由基 (ROS) 的变化。20 世纪 60 年代末, McCord 等^[29]提出生物自由基伤害学说, 该学说认为衰老过程即活性氧代谢失调累积的过程。其中超氧化物歧化酶 (SOD) 是需氧生物细胞中普遍存在的一种含金属的酶, 对机体的氧化与抗氧化平衡起着至关重要的作用, 它可以清除 ROS, 保护细胞免受伤害, 被称为细胞的保护酶^[30]。由于 SOD 对细胞起到有效的保护作用, 其活性的高低可视为植物体自身清除有害物质

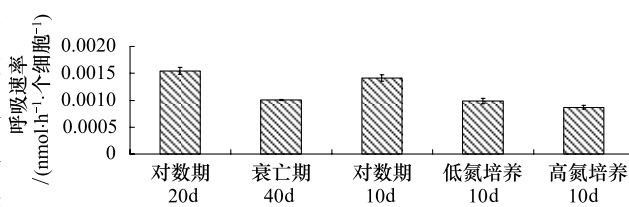


图 7 对数期 (20d) 和衰亡期 (40d) 以及不同氮浓度条件培养 (10d) 呼吸速率的变化

Fig. 7 Change of respiratory rate in *A. catenella* during logarithmic (20d), decline (40d) phase and cultured at different nitrogen level (10d)

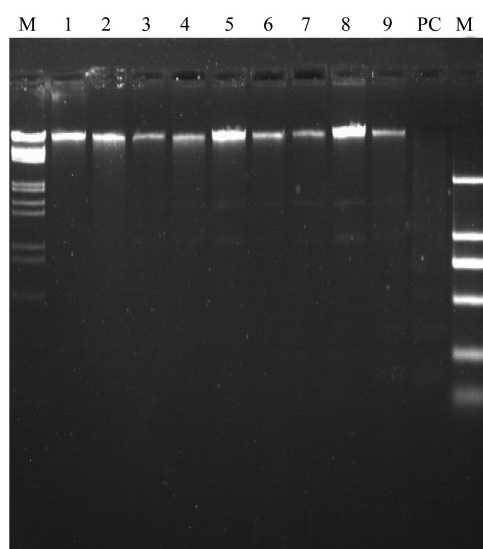


图 8 每隔 5d 藻细胞的 DNA Ladder 的变化

Fig. 8 Changes of DNA Ladder in *A. catenella* every 5 days

泳道 1 为 λ /HindIII DNA Marker, 泳道 1—9 为分别从 5、10、15、20、25、30、35、40、45d 亚历山大藻细胞中提取的 DNA, 泳道 10 为阳性对照, 泳道 11 为 DL 2000 DNA Marker

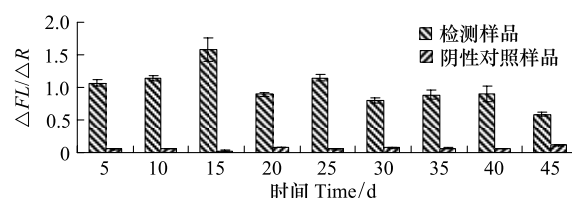


图 9 每隔 5d 藻细胞的端粒酶活性的变化

Fig. 9 Changes of telomerase in *A. catenella* every 5 days

能力的强弱,标志着细胞衰老程度^[31]。俞泓伶等^[32]认为 UV-B 辐射刺激了杜氏盐藻、小角毛藻的抗氧化系统,SOD 等抗氧化酶类的活性会明显上升,以清除产生的过量 ROS,减轻藻体所受到的伤害。毛树春等^[33]研究发现随生长进程,中棉所 29 和中棉所 34 两个品种的 SOD 酶活性均表现升高趋势,且两品种表现一致,和丙二醛(MDA)含量变化趋势相同。MDA 作为脂质过氧化作用的产物,其含量的多少可以代表膜损伤程度的大小^[34]。MDA 能与蛋白质结合引起蛋白质分子间交联,伴随着膜脂过氧化的其它作用,生物膜中结构蛋白与酶聚合和交联,使它们结构功能中的催化功能发生变化,从而使整个细胞的功能和结构受到伤害,最终导致衰老^[35]。华春等^[36]在对杂交水稻及其三系叶片自然衰老的研究中表明,水稻叶片衰老过程中 MDA 含量增加。孙颖颖等^[37]推测对羟基苯甲酸能够影响 5 种微藻的某些生理生化过程,包括形成氧化胁迫,加速藻细胞体内活性氧的积累,导致藻细胞发生过氧化反应,使得 MDA 含量上升。还原型谷胱甘肽(GSH)具有保护生物膜、抗衰老、解毒、抗癌等的作用。谷胱甘肽不仅是细胞内主要的还原型物质,还是多种酶反应的辅基,对于生物体内蛋白质—SH 有保护作用,因而能够保护细胞免受氧化及有毒物质的损伤。Dertinger 等^[38]的研究表明,烟草叶片的水溶性抗氧化剂如抗坏血酸盐、谷胱甘肽的浓度随植株年龄不断降低。彭金良等^[39]研究了 α -萘酚对小球藻谷胱甘肽及其还原酶的影响,结果显示 GSH 含量降低,说明藻细胞在 α -萘酚胁迫下膜脂过氧化加剧,GSH 在清除活性氧消除过氧化方面起了重要作用。 H_2O_2 是光合电子传递链的天然产物,是对植物具有毒害作用的一种 ROS。Brennan 认为, H_2O_2 可能是启动衰老机制的一个重要因子。沈文飏等^[40]在研究小麦旗叶自然衰老过程的清除活性氧能力的变化时也发现,旗叶在自然衰老过程中, H_2O_2 迅速累积的时间与衰老的起始时间基本一致。蔡恒江等^[41]对 UV-B 辐射对亚历山大藻生长及其生理生化特征的影响的研究中指出 UV-B 辐射后, H_2O_2 含量升高表明藻体细胞内的毒害作用也在加剧。在本实验中在衰亡期、高氮和低氮条件的藻细胞内 SOD 的活性(低氮条件除外)、MDA 含量以及 H_2O_2 的含量有明显的上升,而 GSH 含量下降,与之前的报道一致。说明链状亚历山大藻赤潮衰亡的生理性反应过程表现为:赤潮发生消亡时,藻细胞生长受到抑制,蛋白质降解,代谢产生大量氧化中间产物,细胞的抗氧化系统被激活,GSH 等非酶抗氧化物质被大量消耗,SOD 等酶抗氧化物被激活,活性上升,以应对大量积累的 ROS 有害物质。但是,细胞内氧化与抗氧化作用仍然发生失衡, H_2O_2 等 ROS 积累,导致膜脂过氧化程度严重,MDA 积累释放,对膜和细胞造成伤害。而低氮条件 SOD 活性下降,可能是由于低氮条件下,氮元素不足,蛋白质合成受阻所导致的。

再次是光合作用和呼吸作用的变化。Martin 等^[42]的研究表明,叶绿素含量和衰老之间存在明显的负相关。植物衰老的早期,叶绿体变小,基粒的数量减少,叶绿素含量下降,核酮糖-1,5-二磷酸(RUBP)羧化酶的活性下降,电子传递、光合磷酸化受阻,因此,随着衰老的加剧及叶绿体的结构开始解体,光合速率迅速下降。Ghosh 等^[43]研究甘蓝型油菜的子叶衰老,发现伴随着叶绿素的降解,叶绿体的超微结构发生了变化,光合系统 II 的活性也有较大的下降。植物器官衰老时,由于线粒体体积变小,内膜折皱,数目减少,使呼吸速率下降,但下降速度比光合作用慢。李子杰等^[44]研究得出 $LaCl_3$ 降低了轮藻叶绿素 b 比例,不利于捕光复合物及叶绿体基粒的形成,从而引起光合效率的下降。本实验测得的光合速率与呼吸速率均在衰老及高氮低氮条件下降低,与之前的研究一致。说明链状亚历山大藻赤潮衰亡的生理性反应过程表现为:赤潮发生消亡时,叶绿素含量下降,RUBP 羧化酶的活性下降,电子传递、光合磷酸化受阻,光合速率下降;同时线粒体作为呼吸作用的主要场所,体积变小,内膜折皱,导致呼吸速率下降。

核酸的急剧降解也是植物衰老期间的特征之一,衰老时细胞核及核内物质如 DNA、RNA、组蛋白及非组蛋白等会产生较大的变化,染色质凝缩和核 DNA 的损伤也是植物衰老的基本特征之一。出现 DNA Ladder 是植物细胞凋亡的标志性特征^[20]。Smieonova 等^[45]研究了 *Ornithogal umvirens* 和烟草的叶片衰老,发现 DNA 损伤先于染色质凝缩,指出草本植物的叶片衰老同样也是经过细胞程序性死亡(PCD)这个过程。Vardi 等^[4-5]认为在赤潮生物 *Peridinium gatunense* 的消亡过程是由于 CO_2 限制引起的氧压力所启动的类似程序性死亡的过程,并在细胞中检测到了活性氧物质,他们还证明正在衰老的细胞会分泌一种胞外硫醇蛋白,这种蛋白会促使未衰老的细胞对氧压力敏感。Dunn 等^[6]认为在高温胁迫的 *Aiptasia sp* 中存在细胞坏死和 PCD 两种

死亡过程。本实验中随着藻细胞的生长,逐渐出现了 DNA Ladder 现象,因此推测链状亚历山大藻的衰老过程也经历了 PCD 的过程。

端粒是一种存在于真核细胞染色体的末端,由 DNA-蛋白质复合物组成的特殊结构,端粒缩短到无法维持染色体结构的完整性是复制衰老的一个典型生物特征^[46]。端粒的维持由端粒酶所催化,端粒酶是一种能延长端粒末端的核酸蛋白酶。端粒酶(Telomerase)能够向端粒末端添加(TTAGGG) n 序列,使端粒的长度在单细胞个体和多细胞生物生殖细胞中维持动态平衡^[47-48]。本实验中得到的端粒酶活性检测数据证实了在单细胞有机体中,如酵母,端粒酶的表达是持续性的^[49]的说法以及端粒酶是影响细胞衰老的重要因素。

江天久等^[50]发现当培养液氮浓度超过 1.765mM 对塔玛亚历山大藻的生长会产生抑制作用。Hodgkiss 等^[51]研究香港海域赤潮种,指出 *Alexandrium catenella* 生长的最佳氮磷比是 15—30 :1。本实验设计了设计高氮条件(氮浓度为 2.646 mmol/L, N/P 比为 45 :1)模拟赤潮爆发的环境条件,以与衰亡条件下的生理过程进行比较,但得出的结果显示,高氮与低氮和衰亡期藻细胞结果一致,说明高氮条件不利于 *A. catenella* 的生长,并刺激了藻细胞产生胁迫反应。

综上所述,可以推断产生过量的活性氧自由基是导致链状亚历山大藻衰亡的主要原因,低氮、高氮条件均可以加快藻细胞的衰老的生理过程,赤潮衰亡是一种有序的死亡过程,符合之前很多研究者关于赤潮消亡是一种细胞程序性死亡(PCD)的过程的推测。

References:

- [1] Chen Y, Yan T, Zhou M J. The effects of *Prorocentrum donghaiense* and *Alexandrium catenella* on the material transfer in a simulated marine food chain. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 3964-3972.
- [2] Hallegraeff G M. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia*, 1993, 32(2): 79-99.
- [3] García C, del Carmen Bravo M, Lagos M, Lagos N. Paralytic shellfish poisoning: post-mortem analysis of tissue and body fluid samples from human victims in the Patagonia fjords. *Toxicon*, 2004, 43(2): 149-158.
- [4] Vardi A, Berman-Frank I, Rozenberg T, Hadas O, Kaplan A, Levine A. Programmed cell death of the dinoflagellate *Peridinium gatunense* is mediated by CO₂ limitation and oxidative stress. *Current Biology*, 1999, 9(18): 1061-1064.
- [5] Vardi A, Eisenstadt D, Murik O, Berman-Frank I, Zohary T, Levine A, Kaplan A. Synchronization of cell death in a dinoflagellate population is mediated by an excreted thiol protease. *Environmental Microbiology*, 2007, 9(2): 360-369.
- [6] Dunn S R, Bythell J C, Le Tissier M D A, Burnett W J, Thomason J C. Programmed cell death and cell necrosis activity during hyperthermic stress-induced bleaching of the symbiotic sea anemone *Aiptasia* sp. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2002, 272(1): 29-53.
- [7] Zhang X F, Yang G, Liu Y, Yu W, Pan K, Li R X, Zhu M. Induction of programmed cell death in aging *Prorocentrum Donghaiense* cells as was evidenced preliminarily by the identification of associated transcripts. *Acta Biologica Hungarica*, 2006, 57(4): 473-483.
- [8] Amirsadeghi S, Robson C A, McDonald A E, Vanlerberghe G C. Changes in plant mitochondrial electron transport alter cellular levels of reactive oxygen species and susceptibility to cell death signaling molecules. *Plant and Cell Physiology*, 2006, 47(11): 1509-1519.
- [9] Gechev T S, van Breusegem F, Stone J M, Denev I, Laloi C. Christophe Laloi. Reactive oxygen species as signals that modulate plant stress responses and programmed cell death. *BioEssays*, 2006, 28(11): 1091-1101.
- [10] Lin J, Wang Y, Wang G. Salt stress-induced programmed cell death in tobacco protoplasts is mediated by reactive oxygen species and mitochondrial permeability transition pore status. *Journal of Plant Physiology*, 2006, 163(7): 731-739.
- [11] Zhou M J, Zhu M Y. Progress of the Project "Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms in China". *Advances in Earth Science*, 2006, 21(7): 673-679.
- [12] Shi J Y, Hu H H, Ma R Y, Cong W, Cai Z L. Nitrogen and phosphorus absorption and growth characteristics of *Alexandrium tamarense*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(7): 1143-1146.
- [13] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72(1/2): 248-254.
- [14] Beauchamp C, Fridovich I. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, 1971, 44(1): 276-287.
- [15] Zhang Z L. *Experimental Guide for Plant Phytophysiology*. Beijing: China Higher Education Press, 1990: 59-62.
- [16] Zhang Z S, Li R Q, Wang J B. Effects of Oxalate Treatment on the Membrane Permeability and Calcium Distribution in Pepper Leaves Under Heat

- Stress. *Plant Physiology Journal*, 2001, 27(2): 109-113, T001.
- [17] Pick E, Keisari Y. A simple colorimetric method for the measurement of hydrogen peroxide produced by cells in culture. *Journal of Immunological Methods*, 1980, 38(1/2): 161-170.
- [18] Han B W. *Plant growth and differentiation*. Beijing: China Agriculture Press, 2003.
- [19] Chen R. Mechanism of Plant senescence Discussion. *Journal of Green Science and Technology*, 2012, (5): 6-9.
- [20] Ryerson D E, Heath M C. Cleavage of nuclear DNA into oligonucleosomal fragments during cell death induced by fungal infection or by abiotic treatments. *The Plant Cell*, 1996, 8(3): 393-402.
- [21] Hu G C. Reason and harm of occurrence of red tide in China. *China Fisheries*, 2006, (2): 73-74, 80-80.
- [22] Lomas M W, Glibert P M, Clougherty D A, Huber D R, Jones J, Alexander J, Haramoto E. Elevated organic nutrient ratios associated with brown tide algal blooms of *Aureococcus anophagefferens* (*Pelagophyceae*). *Journal of Plankton Research*, 2001, 23(12): 1339-1344.
- [23] Glibert P M, Magnien R, Lomas M W, Alexander J, Tan C L, Haramoto E, Trice M, Kana T M. Harmful algal blooms in the Chesapeake and Coastal Bays of Maryland, USA: Comparison of 1997, 1998, and 1999 events. *Estuaries*, 2001, 24(6): 875-883.
- [24] Noodén L D, Guimét J J, John I. Senescence mechanisms. *Physiologia Plantarum*, 1997, 101(4): 746-753.
- [25] Wu G N, Liu B R, Zhang J Y. Proteases in rice leaves-sme chemical and physical properties and activities in relation to senescence. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 1985, 1(1): 1-10.
- [26] Wang Y F, Yu Z W, Li S X, Yu S L. Effect of nitrogen nutrition on protein and nucleic acid metabolism during senescence of flag leaf. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(2): 178-183.
- [27] Chen G, Hu W Y, Xie F D, Zhang L J. Solvent for Extracting Malondialdehyde in Plant as an Index of Senescence. *Plant Physiology Communications*, 1991, 27(1): 44-46.
- [28] Tian D, Zhao W, Wang Y, Xiang B. Effects of Cd stress on growth and antioxidative system in two marine microalgae. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2010, 25(5): 417-421.
- [29] McCord J M, Fridovich I. Superoxide dismutase: An enzymic function for erythrocuprein (hemocuprein). *The Journal of Biological Chemistry*, 1969, 244(22): 6049-6055.
- [30] Liu P, Li M J. *Experiment technology of plant physiology*. Beijing Science and Technology Press, 2007, 147-147.
- [31] Wei D Z, Ning S J. Changes of hormones concentration and senescence of the wheat. *Guihaia*, 2002, 22(4): 382-384, 374-374.
- [32] Yu H L, Chen B B, Xie Z H. Effects of UV-B Radiation on Growth, Physiological and Biochemical Characteristics of Two Species of Marine Microalga. *Journal of Ningbo University(Natural Science & Engineering Edition)*, 2011, 24(3): 15-19.
- [33] Mao S C, Han Y C, Song M Z, Zhang C J, Fan Z Y. Study on Cultural Techniques and Physiological Characteristics of Transgenic Bt Hybrid Cotton CCR129. *Cotton Science*, 2001, 13(2): 82-86.
- [34] Wang Y M, Meng Y L, Ishikawa H, Hibino T, Tanaka Y, Nii N, Takabe T. Photosynthetic adaptation to salt stress in three-color leaves of a *C₄* plant *Amaranthus tricolor*. *Plant and Cell Physiology*, 1999, 40(7): 668-674.
- [35] Wang X J, Xu G Q, Yang Z J. Advances of Research on Rice Leaf Senescence Physiology. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(3): 187-190, 210-210.
- [36] Hua C, Wang R L. Changes of SOD and CAT activities and MDA content during senescence of hybrid rice and three lines leaves. *Acta Botanica BorealiOccidentalia Sinica*, 2003, 23(3): 406-409.
- [37] Sun Y Y, Yan B L, Zhang J, Wang C H. Growth Inhibition of P-hydroxybenzoic acid on Five Species of Water Bloom Microalgae. The conference proceeding of 2010 cademic annual meeting of Chinese Society for Environmental Sciences (Volume III). Beijing: Chinese Society for Environmental Sciences, 2010: 2428-2434.
- [38] Dertinger U, Schaz U, Schulze E D. Age-dependence of the antioxidative system in tobacco with enhanced glutathione reductase activity or senescence-induced production of cytokinins. *Physiologia Plantarum*, 2003, 119(1): 19-29.
- [39] Peng J L, Yan G A, Sheng G X, Deng X J. Effects of a — naphthol on the glutathione and its reductase in *Chlorella*. *China Environmental Science*, 2001, 21(2): 140-143.
- [40] Shen W B, Ye M B, Xu L L, Zhang R X. Changes of ability of scavenging active oxygen during natural senescence of wheat flag leaves. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39(7): 634-640.
- [41] Cai H J, Tang X X, Zhang Y H, Xie Z H, Wang R J. Effects of UV-B radiation on the growth, physiological and biochemical characteristics of *Alexandrium tamarense*. *Marine Environmental Science*, 2007, 26(2): 130-133.
- [42] Martin C, Thimann K V. The role of protein synthesis in the senescence of leaves. *Plant Physiology*, 1972, 49(1): 64-71.
- [43] Ghosh S, Mahoney S R, Penterman J N, Peirson D, Dumbroff E B. Ultrastructural and biochemical changes in chloroplasts during *Brassica napus* senescence. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2001, 39(9): 777-784.

- [44] Li Z J, Jiang W J, Yu M, Zhou Y L, Zhao Y L, Chai Z F, Zhang Z Y. Effects of LaCl_3 on Photosynthetic Pigment Contents and Antioxidative Enzyme Activities in Chara. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2006, 24 (Supplement): 192-195.
- [45] Simeonova E, Sikora A, Charzyńska M, Mostowska A. Aspects of programmed cell death during leaf senescence of mono- and dicotyledonous plants. Protoplasma, 2000, 214 (1/2): 93-101.
- [46] Karlseder J, Smogorzewska A, de Lange T. Senescence induced by altered telomere state, not telomere loss. Science, 2002, 295 (5564): 2446-2449.
- [47] Scheel C, Poremba C. Telomere lengthening in telomerase-negative cells; the ends are coming together. Virchows Archiv, 2002, 440 (6): 573-582.
- [48] Gilson E, Géli V. How telomeres are replicated. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 2007, 8 (10): 825-838.
- [49] Verdun R E, Karlseder J. Replication and protection of telomeres. Nature, 2007, 447 (7147): 924-931.
- [50] Jiang T J, Xu Y X. Study on growth of *Alexandrium tamarense* balech. Acta Hydrobiologica Sinica, 2006, 30 (4): 472-476.
- [51] Hodgkiss I J, Ho K C. Are changes in N: P ratios in coastal waters the key to increased red tide blooms? Hydrobiologia, 1997, 352 (1/3): 141-147.

参考文献:

- [1] 陈洋, 颜天, 周名江. 东海原甲藻 (*Prorocentrum donghaiense*) 和链状亚历山大藻 (*Alexandrium catenella*) 对模拟食物链物质传递的影响. 生态学报, 2007, 27 (10): 3964-3972.
- [11] 周名江, 朱明远. “我国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治”研究进展. 地球科学进展, 2006, 21 (7): 673-679.
- [12] 石岩峻, 胡晗华, 马润宇, 丛威, 蔡昭铃. 塔玛亚历山大藻对氮和磷的吸收及其生长特性. 应用生态学报, 2003, 14 (7): 1143-1146.
- [15] 张志良. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 1990: 59-62.
- [16] 张宗申, 利容千, 王建波. 草酸处理对胁迫下辣椒叶片膜透性和钙分布的影响. 植物生理学报, 2001, 27 (2): 109-113.
- [18] 韩碧文. 植物生长与分化. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- [19] 陈睿. 植物衰老机理研究进展探讨. 绿色科技, 2012, (5): 6-9.
- [21] 胡国成. 我国沿海赤潮发生的原因及其危害. 中国水产, 2006, (2): 73-74, 80-80.
- [25] 吴光南, 刘宝仁, 张金瑜. 水稻叶片蛋白水解酶的某些理化特性及其与衰老的关系. 江苏农业学报, 1985, 1 (1): 1-10.
- [26] 王月福, 于振文, 李尚霞, 余松烈. 氮素营养水平对小麦旗叶衰老过程中蛋白质和核酸代谢的影响. 植物营养与肥料学报, 2003, 9 (2): 178-183.
- [27] 陈贵, 胡文玉, 谢甫绶, 张立军. 提取植物体内 MDA 的溶剂及 MDA 作为衰老指标的探讨. 植物生理学通讯, 1991, 27 (1): 44-46.
- [28] 田丹, 赵文, 王媛, 向蓓. 镉胁迫对两种海洋微藻生长和抗氧化系统的影响. 大连水产学院学报, 2010, 25 (5): 417-421.
- [30] 刘萍, 李明军. 植物生理学实验技术. 北京: 科学出版社, 2007: 147-147.
- [31] 魏道智, 宁书菊. 叶部激素变化与小麦的整体衰老. 广西植物, 2002, 22 (4): 382-384, 374-374.
- [32] 俞泓伶, 陈彬彬, 谢志浩. UV-B 辐射对 2 种海洋微藻生长和生理生化特征的影响. 宁波大学学报: 理工版, 2011, 24 (3): 15-19.
- [33] 毛树春, 韩迎春, 宋美珍, 张朝军, 范正义. 中棉所 29 栽培技术及其生理特性研究. 棉花学报, 2001, 13 (2): 82-86.
- [35] 王旭军, 徐国庆, 杨知建. 水稻叶片衰老生理的研究进展. 中国农学通报, 2005, 21 (3): 187-190, 210-210.
- [36] 华春, 王仁雷. 杂交稻及其三系叶片衰老过程中 SOD、CAT 活性和 MDA 含量的变化. 西北植物学报, 2003, 23 (3): 406-409.
- [37] 孙颖颖, 阎斌伦, 张静, 王长海. 对羟基苯甲酸对五种水华微藻生长的抑制作用 // 2010 中国环境科学学会学术年会论文集 (第三卷). 北京: 中国环境科学学会, 2010: 2428-2434.
- [39] 彭金良, 严国安, 沈国兴, 邓晓军. a-萘酚对小球藻谷胱甘肽及其还原酶的影响. 中国环境科学, 2001, 21 (2): 140-143.
- [40] 沈文彪, 叶茂炳, 徐朗莱, 张荣铤. 小麦旗叶自然衰老过程中清除活性氧能力的变化. 植物学报, 1997, 39 (7): 634-640.
- [41] 蔡恒江, 唐学玺, 张宇红, 谢志浩, 王仁君. UV-B 辐射对亚历山大藻生长及其生理生化特征的影响. 海洋环境科学, 2007, 26 (2): 130-133.
- [44] 李子杰, 姜文君, 于明, 周云龙, 赵宇亮, 柴之芳, 张智勇. LaCl_3 对轮藻光合色素含量及抗氧化酶活性的影响. 中国稀土学报, 2006, 24 (增刊): 192-195.
- [50] 江天久, 徐轶肖. 塔玛亚历山大藻的生长研究. 水生生物学报, 2006, 30 (4): 472-476.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 13 Jul. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- A review of ecological effects of remnant trees in degraded forest ecosystems after severe disturbances MIAO Ning, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3889)
- Mechanism and application of bioremediation to heavy metal polluted soil using arbuscular mycorrhizal fungi LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LIN Shuangshuang, et al (3898)

Autecology & Fundamentals

- Changes of allometric relationships among leaf traits in different ontogenetic stages of *Acer mono* from different types of forests in Donglingshan of Beijing YAO Jing, LI Ying, WEI Liping, et al (3907)
- The combined effects of increasing CO₂ concentrations and different temperatures on the growth and chlorophyll fluorescence in *Porphyra haitanensis* (Bangiales, Rhodophyta) LIU Lu, DING Liuli, CHEN Weizhou, et al (3916)
- Research on biomass expansion factor of chinese fir forest in Zhejiang Province based on LULUCF greenhouse gas Inventory ZHU Tangjun, SHEN Chuchu, JI Biyong, et al (3925)
- Influence of soil gradual drought stress on *Acorus calamus* growth and photosynthetic fluorescence characteristics WANG Wenlin, WAN Yinjing, LIU Bo, et al (3933)
- Isolation, identification, real-time PCR investigation of an endophytic phosphate-solubilizing bacteria from *Caragana korshinskii* Kom. roots ZHANG Lizhen, FENG Lili, MENG Qixia, et al (3941)
- Plant's and soil organism's diversity across a range of *Eucalyptus grandis* plantation ages ZHANG Danju, ZHANG Jian, YANG Wanqin, et al (3947)
- Effects of diet and starvation on growth and survival of *Scapharca broughtonii* larvae WANG Qingzhi, ZHANG Ming, FU Chengdong, et al (3963)
- Multidrug-resistant bacteria in livestock feces QI Shiyue, REN Siwei, LI Xueling, et al (3970)
- Physiological regulation related to the decline of *Alexandrium catenella* MA Jinhua, MENG Xi, ZHANG Shu, et al (3978)
- Numerical simulation of water quality based on environmental fluid dynamics code for grass-algae lake in Inner Mongolia LI Xing, SHI Hongsen, ZHANG Shuli, et al (3987)

Population, Community and Ecosystem

- Influence of enclosure on *Glycyrrhiza uralensis* community and distribution pattern in arid and semi-arid areas LI Xuebin, CHEN Lin, LI Guoqi, et al (3995)
- The interannual variation of net primary productivity of three coniferous forests in Liupan Mountains of Ningxia and its responses to climatic factors WANG Yunni, XIONG Wei, WANG Yanhui, et al (4002)
- Soil water use and balance characteristics in mature forest land profile of *Caragana korshinskii* in Semiarid Loess Area MO Baoru, CAI Guojun, YANG Lei, LU Juan, et al (4011)
- Effect of simulated acid deposition on chemistry of surface runoff in monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan QIU Qingyan, CHEN Xiaomei, LIANG Guohua, et al (4021)
- A space optimization model of water resource conservation forest in Dongting Lake based on improved PSO LI Jianjun, ZHANG Huiru, LIU Shuai, et al (4031)
- Allelopathic effects of aqueous extract of exotic plant *Rhus typhina* L. on soil micro-ecosystem HOU Yuping, LIU Lin, WANG Xin, et al (4041)
- The impact of natural succession process on waterbird community in a abandoned fishpond at Chongming Dongtan, China YANG Xiaoting, NIU Junying, LUO Zukui, et al (4050)
- Mercury contents in fish and its biomagnification in the food web in Three Gorges Reservoir after 175m impoundment YU Yang, WANG Yuchun, ZHOU Huaidong, et al (4059)

- Microsatellite analysis on genetic diversity of common carp, *Cyprinus carpio*, populations in Yuan River
 YUE Xingjian, ZOU Yuanchao, WANG Yongming, et al (4068)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Research on spatio-temporal change of temperature in the Northwest Arid Area HUANG Rui, XU Ligang, LIU Junmin (4078)
- Simulation of soil respiration in forests at the catchment scale in the eastern part of northeast China
 GUO Lijuan, GUO Qingxi (4090)
- The early effects of nitrogen addition on CH₄ uptake in an alpine meadow soil on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau
 ZHANG Peilei, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (4101)
- Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services ZHANG Yi, ZHANG Heping (4111)
- The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen
 WU Jiansheng, ZHANG Liqing, PENG Jianet al (4125)
- Carbon sources and storage sinks in scenic tourist areas: a Mount Lushan case study
 ZHOU Nianxing, HUANG Zhenfang, LIANG Yanyan (4134)
- Impacts of climate change on dominant pasture growing season in Central Inner Mongolia
 LI Xiazi, HAN Guodong, GUO Chunyan (4146)
- Phenological Characteristics of Typical Herbaceous Plants (*Lris lacteal*) and Its Response to Climate Change in Minqin Desert
 HAN Fugui, XU Xianying, WANG Lide, et al (4156)
- Biomass and distribution pattern of carbon storage in *Eomecon chionantha* Hance
 TIAN Dalun, YAN Wende, LIANG Xiaocui, et al (4165)
- Temporal dynamics and influencing factors of fine roots in five Chinese temperate forest ecosystems
 LI Xiangfei, WANG Chuankuan, QUAN Xiankui (4172)

Resource and Industrial Ecology

- Effects of AMF on soil improvement and maize growth in mining area under drought stress
 LI Shaopeng, BI Yinli, CHEN Peizhen, et al (4181)

Urban, Rural and Social Ecology

- Health function evaluation and exploring its mechanisms in the Shanghai Green Belt, China
 ZHANG Kaixuan, ZHANG Jianhua (4189)

Research Notes

- Time lag effects of rainfall inside a *Platycladus Orientalis* plantation forest in the Beijing Mountain Area, China
 SHI Yu, YU Xinxiao, ZHANG Jiayin (4199)
- Long-term effects of harvest residue management on soil total carbon and nitrogen concentrations of a replanted Chinese fir
 plantation HU Zhenhong, HE Zongming, FAN Shaohui, et al (4205)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 彭少麟

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 13 期 (2013 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 13 (July, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元