

赤潮中利玛原甲藻和中肋骨条藻 LED 单色光饱和光强的研究

苗洪利 孙丽娜 田庆震 周晓光

(中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要 光照是诱发赤潮的主要原因之一,光照的强弱对赤潮优势藻生长起到了关键作用。以甲藻类的利玛原甲藻和硅藻类的中肋骨条藻为研究对象,以单色 LED 为光源,固定温度和光照周期,分别研究了不同光强的绿光、红光和蓝光照射下两种藻的生长速率和光谱吸收系数。实验结果表明,利玛原甲藻和中肋骨条藻的蓝光饱和光强都是最低的,而利玛原甲藻红光饱和光强最高,中肋骨条藻绿光饱和光强最高。在饱和光强之内相同光强下,使这两种藻的生长速率最大的都是蓝光,使生长速率最小的分别为红光和绿光。进而得出了在不同单色光下两种藻的生长速率与相应的光谱吸收系数正相关,饱和光强与相应的光谱吸收系数负相关的结论。

关键词 生物光学;光谱吸收系数;单色激光二极管;利玛原甲藻;中肋骨条藻

中图分类号 Q682 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.s104001

Study of the Effect of Saturated Light Intensity of LED Monochromatic Light on Growth of *Prorocentrum* *Lima* and *Skeletonema Costatum* in Red Tide

Miao Hongli Sun Lina Tian Qingzhen Zhou Xiaoguang

(*Institute of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China*)

Abstract Light is one of the precipitating factors of red tide, and the intensity of light plays a key role on the growth of red tide advantage algae. Monochromatic LEDs are used as the light source to cultivate dinoflagellate *Prorocentrum lima* and diatom *Skeletonema costatum*. When temperature and light cycle are fixed, to investigate the effect of different light intensities of green, red and blue light on the growth rates and spectrum absorption coefficient of algae is investigated. The results show that the saturated light intensity of blue light of *Prorocentrum lima* and *Skeletonema costatum* are the lowest, and the saturated light intensities of red light of *Prorocentrum lima*, and green light of *Skeletonema costatum* are the highest, respectively. Within saturated light intensity and the same light intensity, the growth rates of *Prorocentrum lima* and *Speletonema constatum* are the largest in blue light, but lowest in red and green light, separately. Besides, it is concluded that the growth rates of two algae are positive to the spectrum absorption coefficient, while saturated light intensity is negative to the spectrum absorption coefficient under different monochromatic lights.

Key words biological optics; spectrum absorption coefficient; monochromatic light emitting diode; *Prorocentrum lima*; *Skeletonema costatum*

OCIS codes 170.1420; 230.3670; 010.1030

1 引 言

甲藻和硅藻是海洋中浮游植物的主要成分,是海洋形成赤潮的优势藻种。利玛原甲藻是一种能产生腹泻性贝类毒素(DSP)的附生甲藻,遍布于热带

和温带沿海水域^[1~4]。中肋骨条藻是硅藻中产生赤潮的优势种之一,在全世界海域都有广阔分布,在我国也是发生频率高且危害严重的几种典型赤潮藻之一^[5]。光照是影响微藻生长的重要环境因素之一,

收稿日期: 2011-07-15; 收到修改稿日期: 2011-08-31

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2010DM009)资助课题。

作者简介: 苗洪利(1964—),男,副教授,主要从事半导体照明方面的研究。E-mail: oumhl@ouc.edu.cn

也是其生长的主要能量来源。在一定 PH 值、温度和营养条件下,光照的强弱和时间决定着藻类光合作用的效率,对藻类的生长速率也起着至关重要的作用^[6~9]。对于太阳光或人工白光作用,不同藻类都有最适合其生长的光强范围,在此范围之内强光照射能够提高其生长速率,超过此范围光越强生长速率越低^[10~14]。最大生长率对应的光强称作最适光强或饱和光强。

赤潮发生时包含了多种微藻,而关于不同赤潮藻对光照强度的反映以及各种赤潮藻的单色光饱和光强的研究引发了人们的广泛关注,目前关于利玛原甲藻和中肋骨条藻的单色光饱和光强的研究还未见报道。LED 光源具有电光转换效率高、节能环保、易于实现自动控制等优势,并且峰值波长可以选择,将它们组合使用,能够实现光源光谱的调整^[15~17]。因此本文以单色 LED 为光源,研究不同单色光光强对两种藻生长的影响,获得了利玛原甲藻和中肋骨条藻的单色光饱和光强,为分析赤潮发生的机理提供理论依据。

2 材料与方法

2.1 实验材料

实验藻种为利玛原甲藻和中肋骨条藻,藻种由

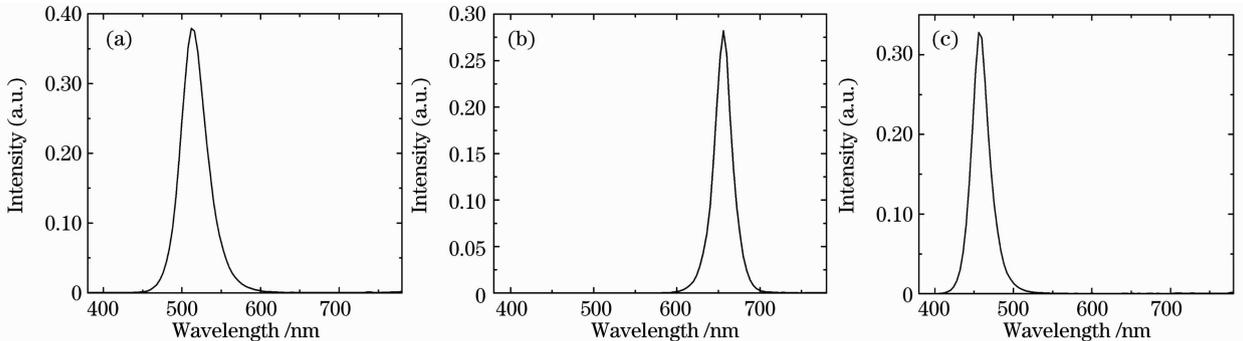


图 1 三种 LED 光源光谱分布。(a) 绿光 LED;(b) 红光 LED;(c) 蓝光 LED

Fig. 1 Spectrum of three kinds of LED illuminants. (a) Green light LED; (b) red light LED; (c) blue light LED

2.4 测量方法

培养过程中每天摇瓶两次,利用双目显微镜进行一次细胞密度的测量,每个样品计数三次,取其平均值。生长速率可表示为

$$\mu = \frac{\ln N_2 - \ln N_1}{t_2 - t_1}, \quad (1)$$

式中 N_1, N_2 分别是起始时间 t_1 和终止时间 t_2 的细胞密度。

中国海洋大学水产学院提供。光源是自行研制的可自动控制光强、光周期的 LED 面光源。

2.2 培养方法和条件

实验所用海水经过滤、煮沸消毒后配置培养液。培养液使用 f/2 营养盐配方,盐的质量分数为 2.5%,PH 值为 7.5,培养温度保持在 21~23 °C。光源采用单色 LED,提供中心波长分别为 512、656 和 456 nm 的绿光、红光和蓝光,光照周期为 12 h。微藻接种在盛有 100 mL 培养液的 300 mL 的三角瓶中,同时设 2 个平行样品,置于光照培养箱内进行培养。在整个培养过程中,所有操作都进行了无菌处理。

2.3 光照实验

对利玛原甲藻和中肋骨条藻分别设置了 6 个光照强度[20、40、60、70、80、100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 20、40、45、50、60、80 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。通过调整 LED 面光源与培养物之间的距离,获得所需的光照强度。光源光强及光谱采用美国 PHOTO RESEARCH 公司生产的 PR-650 光谱光度/色度计测定,该仪器是一种便携、非接触式测量光谱及光强度的光度/色度计,精度可达 2 nm。可直接测得与光谱分布相关的光量子数表示的光照强度。三种颜色 LED 光源的光谱如图 1 所示。

3 结果与分析

3.1 利玛原甲藻单色光饱和光强及生长率

三种 LED 单色光的中心波长分别为绿光 512 nm、红光 656 nm 和蓝光 456 nm,在光强分别为 20、40、60、70、80 和 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 下培养利玛原甲藻。

绿光下利玛原甲藻的生长情况如图 2 和图 3 所示。不同光照强度的绿光对利玛原甲藻生长的作用

显著不同。利玛原甲藻在 $20 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光照条件下生长相对缓慢, 对应的生长速率分别为 0.0592 和 0.0625; 在 $40 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光照条件下生长速率增加, 光强为 $70 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时生长最快并达到高峰, 相应生长速率为 0.1242。随着光照强度的继续增加, 生长速率降低。因此, 可估计利玛原甲藻的饱和光强为 $70 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 光照强度过高或过低都抑制利玛原甲藻的生长。

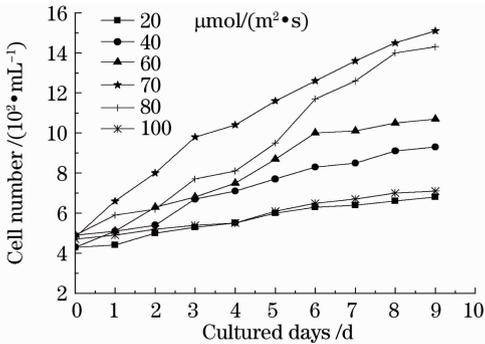


图 2 绿光下利玛原甲藻的生长曲线

Fig. 2 Growth curves of *Prorocentrum lima* under green light

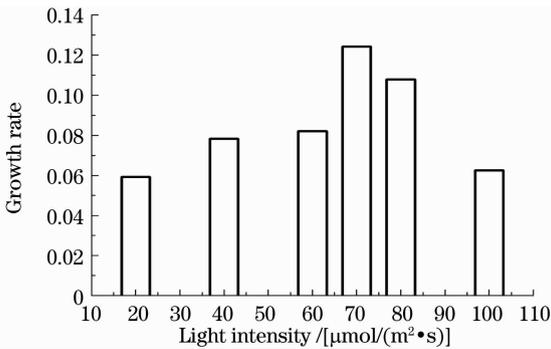


图 3 绿光下利玛原甲藻的生长率

Fig. 3 Growth rates of *Prorocentrum lima* under green light

图 4 和图 5 为利玛原甲藻在红光下的生长情

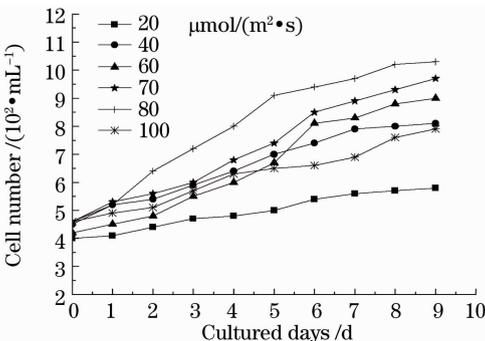


图 4 红光下利玛原甲藻的生长曲线

Fig. 4 Growth curves of *Prorocentrum lima* under red light

况。由图可知, 红光下利玛原甲藻的生长速率随着光照强度从 $20 \sim 80 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 增加而增加。在 $80 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光照条件下生长速率最大, 为 0.1078, 从而估计利玛原甲藻在红光下的饱和光强为 $80 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

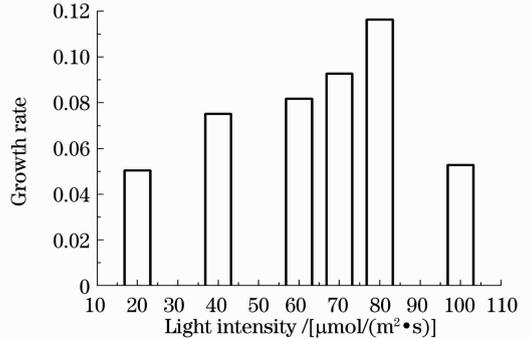


图 5 红光下利玛原甲藻的生长率

Fig. 5 Growth rates of *Prorocentrum lima* under red light

利玛原甲藻在蓝光下的生长情况如图 6 和图 7 所示。由图可知, 利玛原甲藻的生长速率随着光强从 $20 \sim 60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的增加而增加, 然后随着光强的继续增加而减小。因此, 利玛原甲藻的蓝光饱和光强大约为 $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 对应的生长速率为 0.1493。

图 3、图 5 和图 7 的实验结果表明, 在饱和光强之内相同光强下, 蓝光下利玛原甲藻的生长速率最大, 红光下生长速率最小。

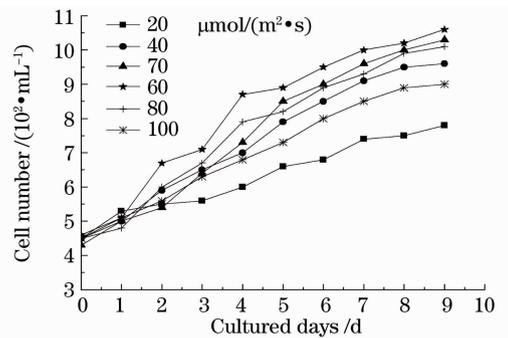


图 6 蓝光下利玛原甲藻的生长曲线

Fig. 6 Growth curves of *Prorocentrum lima* under blue light

3.2 中肋骨条藻的单体光饱和和光强及生长率

采用上述三种 LED 单色光, 在光强分别为 20、40、45、50、60 和 $80 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 下培养中肋骨条藻。

中肋骨条藻在绿光下的生长情况如图 8 和图 9 所示。由图可知, 中肋骨条藻生长速率随着光照强度从 20 到 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的增加而增加, 光照强度为 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的条件下生长最快, 相应生长速率为 0.3006, 光照强度继续增加中肋骨条藻的生长速率不升反降。因此, 中肋骨条藻的绿光饱和和光

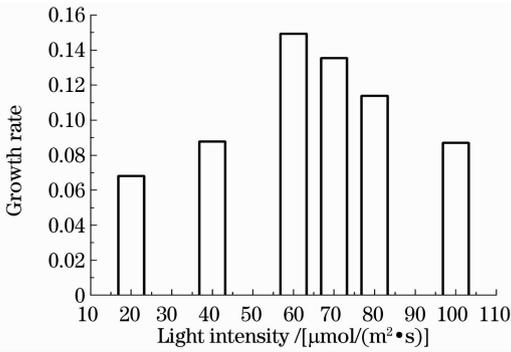


图 7 蓝光下利玛原甲藻的生长率

Fig. 7 Growth rates of *Proocentrum lima* under blue light

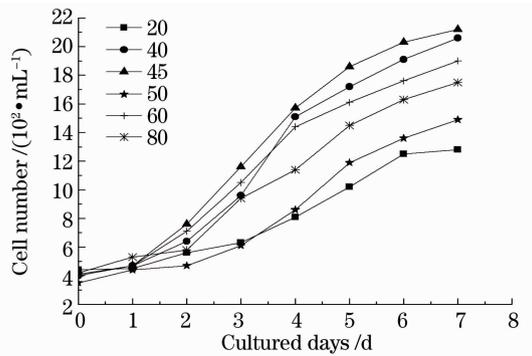


图 10 红光下中肋骨条藻的生长曲线

Fig. 10 Growth curves of *Skeletonema costatum* under

red light

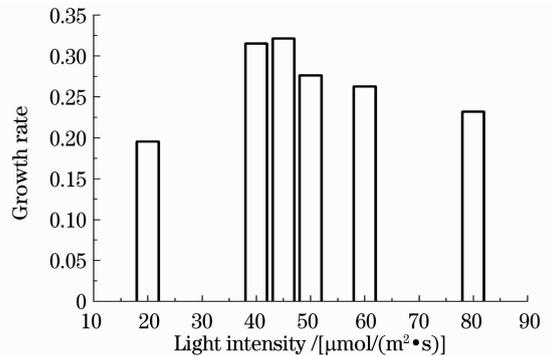


图 11 红光下中肋骨条藻的生长率

Fig. 11 Growth rates of *Skeletonema costatum* under

red light

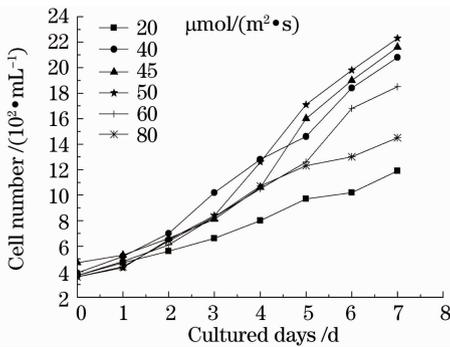


图 8 绿光下中肋骨条藻的生长曲线

Fig. 8 Growth curves of *Skeletonema costatum* under

green light

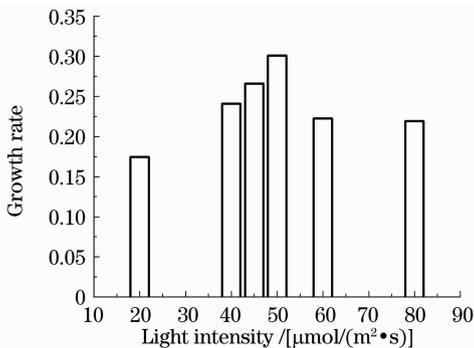


图 9 绿光下中肋骨条藻的生长率

Fig. 9 Growth rates of *Skeletonema costatum* under

green light

强大约为 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

图 10 和图 11 为中肋骨条藻在红光下的生长情况。由图可知,红光下,中肋骨条藻生长速率随着光照强度从 $20 \sim 45 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 增加而增大,在 50 至 $80 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光照条件下生长越来越慢,在 $45 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光照条件下生长速率最大,为 0.3197 。因此,中肋骨条藻的红光饱和光强大约为 $45 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

中肋骨条藻在蓝光下的生长情况如图 12 和图 13 所示。由图可知,蓝光下,中肋骨条藻的蓝光

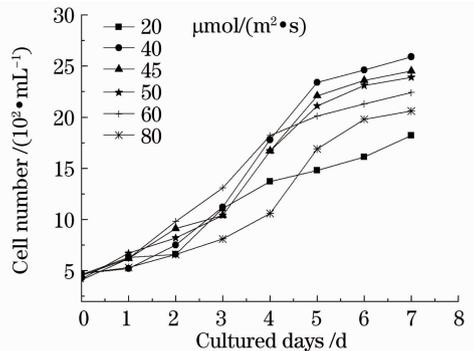


图 12 蓝光下中肋骨条藻的生长曲线

Fig. 12 Growth curves of *Skeletonema costatum* under

blue light

饱和光强约为 $40 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,对应的生长速率为 0.3444 。

对比图 9、图 11 和图 13 可知,在饱和光强之内相同光强下,蓝光下中肋骨条藻生长速率最大,绿光下生长速率最小。

3.3 光谱吸收系数与生长速率、饱和光强的关系

光谱吸收系数 A_p 表征了该光照下的光合有效量子通量被微藻吸收的量子效率,进一步反映了该

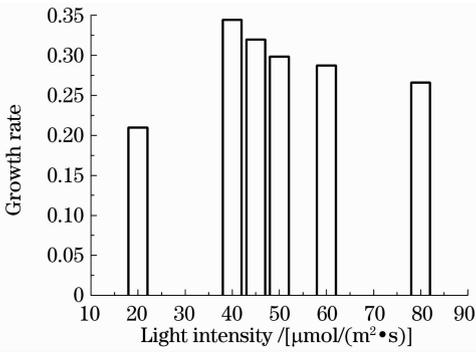


图 13 蓝光下中肋骨条藻的生长率

Fig. 13 Growth rates of *Skeletonema costatum* under blue light

光照促进微藻生长的速率。光谱吸收系数为^[18]

$$A_{\gamma} = \frac{\sum_{400}^{700} \lambda \phi(\lambda) [1 - 10^{-D(\lambda)}] \Delta \lambda}{\sum_{380}^{780} \lambda \phi(\lambda) \Delta \lambda}, \quad (2)$$

式中 λ 为波长; $D(\lambda)$ 为吸收度, $\phi(\lambda)$ 为相对光谱功率密度。

两种藻的吸收谱利用北京普析通用仪器有限公司生产的 TU-1800-TC 紫外可见分光光度计测定, 利玛原甲藻和中肋骨条藻吸收谱如图 14 所示。

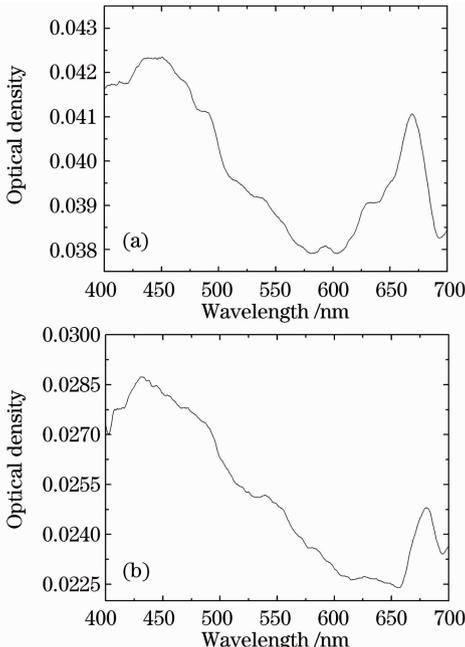


图 14 中肋骨条藻(a)和利玛原甲藻(b)的活体吸收谱

Fig. 14 Absorption spectra of *Skeletonema costatum*(a) and *Prorocentrum lima* (b)

根据(2)式计算利玛原甲藻和中肋骨条藻对上述 3 种光源 B(蓝光 LED)、G(绿光 LED)、R(红光 LED)的光谱吸收系数 A_{γ} , 如表 1 所示。

由表 1 可以看出, 利玛原甲藻对三种单色光的

光谱吸收系数大小顺序为 $B > G > R$, 而前面得到的饱和光强的大小顺序为 $B < G < R$; 中肋骨条藻光谱吸收系数的顺序为 $B > R > G$, 而饱和光强的大小顺序为 $B < R < G$ 。从而可知, 饱和光强与光谱吸收系数负相关, 生长速率与光谱吸收系数正相关。

表 1 两种微藻对不同光谱的光谱吸收系数 A_{γ}

Table 1 Absorption coefficient of two kinds of microalgae in different spectra

| Microalgae | Spectrum absorption coefficient A_{γ} | | |
|-----------------------------|--|--------|--------|
| | B | G | R |
| <i>Prorocentrum lima</i> | 0.0620 | 0.0571 | 0.0511 |
| <i>Skeletonema costatum</i> | 0.0913 | 0.0868 | 0.0871 |

4 结 论

在饱和光强范围内相同光强下, 利玛原甲藻和中肋骨条藻均在蓝光下生长较好, 利玛原甲藻在绿光下的生长要好于红光, 中肋骨条藻在红光下的生长要好于绿光。利玛原甲藻的三种单色光饱和和光强不同, 蓝光的饱和光强最小, 约为 $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 红光的饱和光强最大, 约为 $80 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。中肋骨条藻在三种单色光下的饱和光强相对于利玛原甲藻要低, 蓝光下的饱和光强也最小, 约为 $40 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 绿光下的饱和光强最大, 约为 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。由此可见, 不同类藻的饱和光强存在差异。单色光光强过高或过低均抑制藻的生长, 而这两类藻只在一定光照强度(即饱和光强)下才能快速生长繁殖, 最终爆发赤潮。

两种藻的三种单色光的光谱吸收系数不同。吸收系数越大, 饱和光强越低, 说明对于大光谱吸收系数的单色光, 赤潮藻在低光照强度下就能产生较高的生长速率。另一方面, 两类藻的生长速率与相应的光谱吸收系数成正相关, 表明赤潮藻的生长与光谱成分密切相关, 吸收峰附近的光谱对其生长起到了较强的促进作用。

参 考 文 献

- 1 T. Yasumoto, M. Murtata, Y. Oshima *et al.*. Diarrhetic shellfish toxins[J]. *Tetrahedron*, 1985, **41**(6): 1019~1025
- 2 Y. Murakami, Y. Oshoma, T. Yasumoto. Identification of okadaic acid as a toxic component of a marine dinoflagellate *Prorocentrum lima* [J]. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 1982, **48**(1): 69~72
- 3 I. Bravo, M. L. Fernandez, I. Ramilo *et al.*. Toxin composition of the toxic dinoflagellate *Prorocentrum lima* isolated from different locations along the Galician coast (NW Spain) [J]. *Toxicon*, 2001, **39**(10): 1537~1545
- 4 M. A. Quilliam, W. R. Hardstaff, N. Ishida *et al.*. Production of diarrhetic shellfish poisoning (DSP) toxins by *Prorocentrum*

- lima in culture and development of analytical methods[A]. In: Yasumoto T, Oshima Y, Fukuyo Y, eds. Harmful and Toxic Algal Blooms [M]. Paris; Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO Publishers, 1996. 289
- 5 Xu Jiasheng. Offshore shrimp pond and red tide[M]. Beijing: Marine press, 2003. 27~28
徐家声. 近海与虾池赤潮[M]. 北京: 海洋出版社, 2003. 27~28
- 6 Fudi B. Algae [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1981. 30~50
福迪 B. 藻类学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981. 30~50
- 7 Sheng Yingjia, Chen Dehui. Effect of different light cycle on growth of *Microcystis aeruginosa* and *Microcystis viridis* [J]. *Journal of Lake Science*, 2004, **16**(3): 285~288
沈英嘉, 陈德辉. 不同光照周期对铜绿微囊藻和绿色微囊藻生长的影响[J]. 湖泊科学, 2004, **16**(3): 285~288
- 8 Sun Ruyong, Li Bo, Zhu Geyang *et al.*. Ordinary Ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 1993
孙儒泳, 李 博, 诸葛阳等. 普通生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993
- 9 Wang Wei, Lin Junmin. Photocontrol of development in algal [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1998, **17**(5): 31~39
王 伟, 林均民. 藻类的光控、发育[J]. 植物学通报, 1998, **17**(5): 31~39
- 10 Kristine Garde, Caroline Cailliau. The impact of UV-B radiation and different PAR intensities on growth, uptake of C¹⁴, excretion of DOC, cell volume, and pigmentation in the marine prymnesiophyte, *Emiliana huxleyi*[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2000, **247**: 99~112
- 11 Anette Kuster, Ralf Schaible, Hendrik Schubert. Light acclimation of photosynthesis in three charophyte species [J]. *Aquatic Botany*, 2004, **79**: 111~124
- 12 Mark E. Warner, Matilda L. Madden. The impact of shifts to elevated irradiance on the growth and photochemical activity of the harmful algae *Chattonella subsalsa* and *Prorocentrum minimum* from Delaware [J]. *Harmful Algae*, 2006, **247**: 11~21
- 13 Fen Jingnan, Zeng Zhaoqi, Yang Yonghua. Effects of different culture media, temperature, illumination and pH on the growth of *Cryptomonas Ovata*[J]. *Journal of Henan University*, 2005, **35**(2): 64~67
冯竞楠, 曾沼琪, 杨永华. 不同培养基、温度、光照及 pH 值对卵形隐藻生长的影响[J]. 河南大学学报, 2005, **35**(2): 64~67
- 14 Liu Qing, Zhang Xiaofang, Li Taiwu *et al.*. Effects of light on growth rate, chlorophyll level and cell cycle in four alga species [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2006, **21**(1): 24~30
刘 青, 张晓芳, 李太武等. 光照对 4 种单胞藻生长速率、叶绿素含量及细胞周期的影响[J]. 大连水产学院学报, 2006, **21**(1): 24~30
- 15 Mao Hongli, Zhou Xiaoguang, Liu Fengxue *et al.*. Application of the spectrum of LED on growth of *Chaetoceros gracilis* and *Platymonas subcordiformis*[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1101~1105
苗洪利, 周晓光, 刘逢学等. LED 光谱对纤细角毛藻和亚心形扁藻生长的影响[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 1101~1105
- 16 Su Liwei, You Da, Cheng Haiying *et al.*. Characterization of high-power GaN-based green LED on Si substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1066~1069
苏丽伟, 游 达, 程海英等. Si 衬底功率型 GaN 基绿光 LED 性能[J]. 光学学报, 2009, **29**(4): 1066~1069
- 17 Jin Ji, Yu Guiying, Lin Min. Research of high light collection efficiency of LED parabolic reflector based on non-imaging optics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 680~684
金 骥, 余桂英, 林 敏. 基于非成像光学的 LED 高收光率的抛物反射器研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 680~684
- 18 Mao Anjun, Wang Jing. Calculation and application of photosynthetic photon flux density [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, **36**(6): 151~155
毛安君, 王 晶. 光合有效量子通量密度的计算及应用[J]. 中国海洋大学学报, 2006, **36**(6): 151~155

栏目编辑: 韩 峰