

网络优先数字出版时间: 2015-11-26

网络优先数字出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/45.1075.N.20151126.1016.004.html>

水动力条件对鼠尾藻幼苗生长的影响*

Effects of Hydrodynamic Conditions on Growth of *Sargassum thunbergii* Seedling and Content of Chlorophyll-a

丁刚, 吴海一**, 辛美丽, 詹冬梅

DING Gang, WU Hai-yi, XIN Mei-li, ZHAN Dong-mei

(山东省海洋生物研究院, 山东青岛 266104)

(Marine Biology Institute of Shandong Province, Qingdao, Shandong, 266104, China)

摘要:【目的】考察水层深度和水流速度对鼠尾藻幼苗生长的影响。【方法】以特定生长率和叶绿素 a 含量为考查对象, 设计水层深度和水流速度的单因子实验和双因子实验, 研究鼠尾藻幼苗对水层和水流刺激的适应情况。【结果】鼠尾藻幼苗特定生长率在水层深度为 -0.3 m 时最高, 过深的水层(水层深度为 -1.5 m)不适合鼠尾藻幼苗的生长; 特定生长率随着水流速度的增加而增加, 在水流速度为 0.9 m/s 时最高, 然后下降。鼠尾藻幼苗体内叶绿素 a 含量随着水层加深(0~-0.9 m)而不断积累增多, 但是随着水层继续加深而相对减少, 且其在低水流速度下含量较高, 随着水流速度的升高呈下降趋势。【结论】较浅的培育水层和适度的水流速度条件对鼠尾藻幼苗生长有积极的影响。

关键词: 水层深度 水流速度 特定生长率 叶绿素 a

中图分类号: S968.42 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2015)04-0233-06

Abstract: 【Objective】To investigate the effects of water depth and flow velocity on the growth of *Sargassum thunbergii*. 【Methods】Taking the growth rate and the contents of chlorophyll-a as test objects, the single factor and two factors experiments were designed to study the adaptation of the water flow stimulation and different water layers to *Sargassum thunbergii* seedlings. 【Results】The specific growth rate of *Sargassum thunbergii* seedlings was highest in -0.3 m water depth, and the *Sargassum thunbergii* seedlings didn't grow in the excessive water depth(in -1.5 m water depth). The specific growth rate increased when the water flow velocity increased. When the water flow velocity reached 0.9 m/s, the specific growth rate fell down. The chlorophyll-a contents of *Sargassum thunbergii* seedlings increased with the water depth declined(0~-0.9 m), and reduced when the water depth declined enough. The chlorophyll-a content was high in low water flow velocity, and declined with the water flow velocity increased. 【Conclusion】The lower layer and moderate flow velocity show a positive impact on the growth rate of *Sargassum thunbergii* seedlings.

Key words: water depth, water velocity water, the specific growth rate, chlorophyll-a

收稿日期: 2015-08-15

作者简介: 丁刚(1978-), 男, 助理研究员, 主要从事海藻生物学和海藻养殖学方面研究。

* 国家海洋公益性行业科研专项资助项目(201405040, 201205001, 201405010), 山东省自然科学基金资助项目(ZR2012CQ004), 海洋经济创新发展区域示范项目和山东省农业科技成果转化资金项目(2013N248)资助。

** 通讯作者: 吴海一(1973-), 男, 副研究员, 主要从事海洋生态学, E-mail: wuhaiyi1997@163.com。

0 引言

【研究意义】水动力条件的变化, 可以引起藻类生长环境的光照强度变化、营养盐运送能力变化及敌害生物捕食行为的变化, 从而对藻类的生长产生

不同程度的影响^[1~5]。【前人研究进展】水流速度是水动力条件中最基本和最直观的参数。焦世珺等^[6]研究发现,三峡水库流速减缓,导致库区泥沙沉积,透明度增加,藻类生长繁殖加快,叶绿素 a 含量升高;廖平安等^[7]研究发现,增加水体的流速可以在一定程度上抑制藻类的生长,延缓水华的发生;Devercellim^[8]通过多变量 RDA 研究发现,河流的水流量和透明度能明显影响藻类的群落组成;陈伟明等^[9]认为,水动力作用可以增加水体中的悬浮物质,降低透明度,改变水下光照条件,从而使浮游植物种群结构和数量发生改变;王红萍等^[10]总结影响汉江水化的水文因素包括流量、流速和水面比降,认为汉江中的藻类浓度与水流速度成指数关系;王利利^[11]研究认为,在小型模拟河道中,藻类生长在不同流速下可能存在临界值,在临界值之下,叶绿素 a 含量随流速增大而增大,在临界值之上,叶绿素 a 含量随流速增大而减小。【本研究切入点】鼠尾藻是我国沿海分布较广的一种经济褐藻,近年来受到广泛的关注^[12~14],有关养殖水层和水流速度变化对其生长的影响也有研究^[15~18],但多关注其生长速率变化,对人工幼苗养殖阶段的生化物质组成变化及生物量积累未有报道。【拟解决的关键问题】对鼠尾藻人工幼苗进行养殖实验,以特定生长率和叶绿素 a 含量为监测指标,研究并探讨鼠尾藻幼苗对不同强度的水流刺激和不同培育水层的适应情况,为鼠尾藻人工幼苗适应产业化养殖提供理论依据和实验基础。

1 材料和方法

1.1 材料

选用人工培育的鼠尾藻幼苗。材料采集后于消毒海水中反复冲洗,清理附着的杂藻及污物,然后于实验室条件下:海水盐度 29 ± 1 , 温度 $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$ 暂养 15 d 后进行实验,期间充气并每天更换海水。实验时选取质量相近的 20 株幼苗为一组,每组湿重为 $14.94 \sim 15.48 \text{ g}$ (平均数 \pm 标准差 $= 15.21 \pm 0.27$)。

1.2 方法

1.2.1 培育条件

实验在鲍鱼饵料培育池内进行,培育池规格为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 。采用侧位进水,中央排水的方法形成水流,并用流速计确定水流速度。选择在实验要求的水层和水流速度下固定鼠尾藻幼苗进行培育。光照条件为日常光照,培育时间为 7 d。

1.2.2 单因子实验与双因子实验

单因子实验中,水流速度水平为 0 m/s 、 0.3

m/s 、 0.6 m/s 、 0.9 m/s 、 1.2 m/s 、 1.5 m/s , 水层深度水平为 0 m 、 -0.3 m 、 -0.6 m 、 -0.9 m 、 -1.2 m 、 -1.5 m 。

双因子实验中设置水流速度 5 个水平,水层深度 4 个水平,实验因子水平见表 1。

表 1 双因子实验因子水平

Table 1 Results of two factors experiment

水平 Levels	水流速度 Water velocity(m/s)	水层深度 Water depth(m)
1	0.0	0.0
2	0.3	-0.3
3	0.6	-0.6
4	0.9	-0.9
5	1.2	

1.2.3 数据分析

实验结束后测定藻体的湿质量,并计算特定生长率(SGR),计算公式如下

$$\text{SGR} = (\ln W_t - \ln W_0) / t \times 100\%$$

式中: W_0 为初始藻的鲜质量(g); W_t 为实验结束时藻的鲜质量(g); t 为实验持续的天数。实验期间的盐度、pH 值和光周期与暂养期间的培养条件相同。

叶绿素 a 含量的测定方法采用 Seely 等^[19]的褐藻叶绿素测定方法。

数据以平均值 \pm 标准差 ($X \pm SD$) 表示。使用数据分析软件 SPSS 13.0 对数据进行单因素方差分析(ANOVA)和 Duncan 多重比较,用以检验数据间的差异显著性 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 水层深度对鼠尾藻幼苗生长的影响

如图 1 所示,在水层深度为 -0.3 m 时,鼠尾藻幼苗特定生长率最高,显著高于其他水层深度;在水层深度为 -0.9 m 时,鼠尾藻幼苗叶绿素 a 含量最高,显著高于其他水层深度。方差分析表明,水层深度对鼠尾藻幼苗特定生长率和叶绿素 a 含量的影响

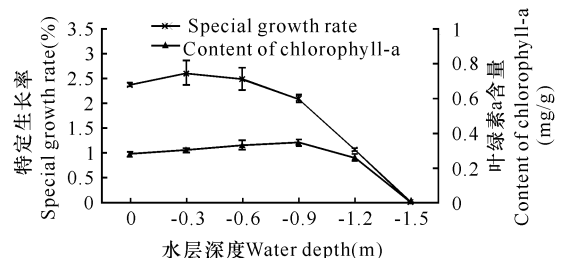


图 1 不同水层深度对鼠尾藻幼苗特定生长率和叶绿素 a 含量的影响

Fig. 1 The effect of water depth on *Sargassum thunbergii* growth and content of chlorophyll-a

极显著(两者 $P < 0.01$)。

2.2 水流速度对鼠尾藻幼苗生长的影响

由图2可见,在水流速度为0.9 m/s时,鼠尾藻幼苗特定生长率最高,显著高于其他水流速度;随着水流速度的升高,鼠尾藻幼苗叶绿素a含量呈下降趋势。方差分析表明,水流速度对鼠尾藻幼苗特定生长率和叶绿素a含量的影响显著(两者 $P < 0.05$)。

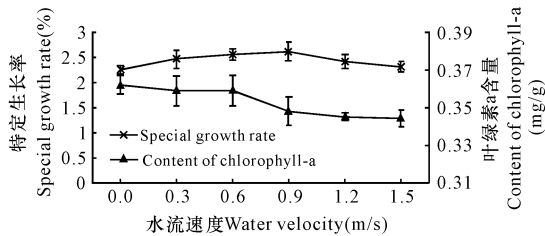


图2 不同水流速度对鼠尾藻幼苗特定生长率和叶绿素a含量的影响

Fig. 2 The effect of water velocity on *Sargassum thunbergii* growth and content of chlorophyll-a

2.3 水层深度和水流速度对鼠尾藻幼苗特定生长率的影响

双因子方差分析表明,水层深度、水流速度对幼苗特定生长率的交互作用极显著($P < 0.01$)。从图3中可以看到(图中不同小写字母代表相同水层深度、不同水流速度之间的差异显著, $P < 0.05$),表层(水深0 m)由于光照强度强烈,鼠尾藻幼苗特定生长率随水流速度变化较大,由此可见,不同程度的水流扰动对鼠尾藻幼苗特定生长率构成不同程度的影响。同时,在水深较浅(-0.3 m)处,水体的流动(0.3 m/s, 0.6 m/s, 0.9 m/s)对鼠尾藻幼苗生长具有积极的影响。

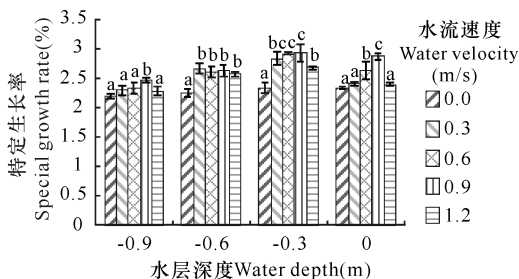


图3 不同水层深度和水流速度对鼠尾藻幼苗特定生长率的影响

Fig. 3 The effect of water depth and velocity on *Sargassum thunbergii* special growth rate

2.4 水层深度和水流速度对鼠尾藻幼苗叶绿素a含量的影响

双因子方差分析表明,水层深度、水流速度对幼苗叶绿素a含量的交互作用极显著($P < 0.01$)。

由图4可以看到(图中不同小写字母代表相同水层深度、不同水流速度之间的差异显著, $P < 0.05$),鼠尾藻幼苗叶绿素a含量随着水层逐渐加深(0~ -0.9 m)而逐渐增多,可见水层越深,鼠尾藻幼苗为满足光合作用需求进行自身调节,从而满足生长的要求。同时,不同水层的鼠尾藻幼苗叶绿素a含量均随水流速度的增加而减少,可见水流速度的增强,为鼠尾藻幼苗的光合作用提供更多的光照来源。

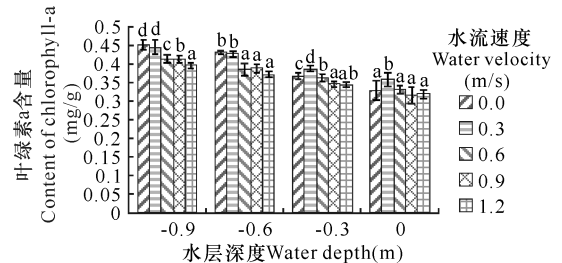


图4 不同水层深度和水流速度对鼠尾藻幼苗叶绿素a含量的影响

Fig. 4 The effect of water depth and velocity on the content of chlorophyll-a of *Sargassum thunbergii*

3 讨论

3.1 水层深度对鼠尾藻幼苗生长的影响

单因子实验结果表明,水层深度对鼠尾藻幼苗的生长有显著影响($P < 0.05$),对鼠尾藻幼苗的叶绿素a含量有极显著影响($P < 0.01$)。

水层深度对海藻生长的主要影响因素是光照强度,光照强度随着水层深度的变化而变化,即水层越深,光照强度越弱,尤其是正午时不同水层光强变化较大,存在指数关系^[20],因而水层实验主要是研究光照强度的影响^[21]。刘思俭等^[22]对江蕨的研究表明,位于水层表面的浮筏养殖年产量最高;另外,对金鱼藻、苦草、轮叶黑藻、水盾草等沉水植物的研究也表明不同沉水植物在不同水层的生长情况不同。光照强度能够影响鼠尾藻对营养盐(N、P)的吸收^[23],是影响藻类生长的重要影响因子^[24]。本实验中,在水层深度为-0.3 m时,鼠尾藻幼苗特定生长率最高,较浅的水层适宜其生长;在水层深度为-1.5 m时,鼠尾藻幼苗已经开始溃烂,藻体脱落,显然过深的水层已经不适合鼠尾藻幼苗的生长。

叶绿素a是进行光合作用的主要物质,受光照强度的影响较大。由图4可见,随着水层深度变深,光照强度逐渐减弱,鼠尾藻幼苗叶绿素a的含量逐渐增多,在水层深度为-0.9 m时含量最高,这与Ramus等^[25]、林贞贤等^[26]和刘静雯等^[27]的研究结果相似。但是随着水层继续变深,叶绿素a含量减

少,显然是由于过深的水层光照强度较弱,在影响鼠尾藻幼苗生长的同时,叶绿素 a 的含量也受到不利的影 响,在水层深度为-1.5 m 时藻体甚至开始溃烂并脱落。

在较深水层中,鼠尾藻幼苗的生长受到抑制,但是藻体内叶绿素 a 含量却有相应增加,这是海藻自我调节以适应环境变化,可以保证藻类正常生长,对其在不同环境中生存具有积极的意义。从为生产服务的角度出发,需要在保证幼苗能够生长的前提下实现较高的生长速率,因而具备充足光照条件的较浅水层成为幼苗生长的适宜水层。

3.2 水流速度对鼠尾藻幼苗生长的影响

单因子实验结果表明,水流速度对鼠尾藻幼苗的生长有显著影响($P < 0.05$),对鼠尾藻幼苗叶绿素 a 含量的变化有极显著影响($P < 0.01$)。

适当的水体流动有利于藻类的生长和繁殖^[28],对蓝藻^[7,29]、微囊藻^[30,31]的生长而言,均存在最佳流速条件。在对蓝藻的研究中,当 N:P 为 4.5:1 时,推测蓝藻适宜生长的临界流速为 0.50 m/s;当 N:P 为 2.7:1 时,推测临界流速为 0.30 m/s(文献^[29]);铜绿微囊藻在流速 0.50 m/s 条件下获得最大比增殖速率^[32]。本实验中,鼠尾藻幼苗特定生长率随着水流速度的增加而增加,在水流速度为 0.9 m/s 时最高,然后开始下降,说明鼠尾藻幼苗在生长过程中,水流速度也存在临界点,这与鼠尾藻在池塘中的养殖情况相吻合^[17]。

水体流动能够提高藻类对光的捕捉效率和对光的利用率^[33~35],因而在较低的水流速度下,藻类内叶绿素 a 含量相应增加,以满足对光捕捉效率的需求,实现对光线的利用。本实验中,随着水流速度的升高,叶绿素 a 含量呈下降趋势。可见水流速度的增加对光照强度的变化有着积极的影响。从为生产服务的角度出发,适度的水流速度有利于鼠尾藻幼苗的快速生长。

3.3 水层深度和水流速度对鼠尾藻幼苗培育的影响

双因子方差分析表明,水层深度和水流速度对鼠尾藻幼苗特定生长率和叶绿素 a 含量均影响极显著($P < 0.01$)。

水动力条件的变化将直接影响到光照强度、温度、营养盐在不同水层的分布,从而影响鼠尾藻幼苗的培育过程。从本实验中可以看出,鼠尾藻幼苗在较浅的水层获得较高的生长速率,因为较浅的水层更有利于光合作用的进行;同时鼠尾藻幼苗在有水

流的条件下能够快速生长,是因为水流的扰动使得鼠尾藻幼苗更容易获取光照。实验结果显示,在较浅的培育水层(-0.3 m)和适度的水流速度(0.9 m/s)条件下,鼠尾藻幼苗的特定生长率获得较高水平。在鼠尾藻幼苗培育过程中,需要综合考虑光照强度、温度、营养盐、水动力条件等条件。如何在培育过程中将诸多动态因子结合在一起并形成模式,需要进一步在实践中探索。

4 结论

在较深的水层和较低的水流速度条件下,鼠尾藻幼苗叶绿素 a 含量补偿性增加;鼠尾藻幼苗在较浅水层(-0.3 m)和适度的水流速度(0.9 m/s)下具有较高的生长速率。

参考文献:

- [1] 颜润润,逢勇,赵伟,等.环流型水域水动力对藻类生长的影响[J].中国环境科学,2008,28(9):813-817.
Yan R R, Pang Y, Zhao W, et al. Influence of circumfluent type waters hydrodynamic on growth of algae [J]. China Environmental Science, 2008, 28(9): 813-817.
- [2] Grobbelaar J U. Turbulence in mass algal cultures and the role of light/dark fluctuations[J]. Journal of Applied Phycology, 1994, 6(3): 331-335.
- [3] 张运林,秦伯强,陈伟民,等.模拟水流条件下初级生产力及光动力学参数[J].生态学报,2004,24(8):1808-1815.
Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, et al. Primary production and photosynthetic parameters under simulated water cuent regimes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(8): 1808-1815.
- [4] Alldredge A L, Silver M W. Characteristics, dynamics and significance of marine snow[J]. Progress in Oceanography, 1988, 20(1): 41-82.
- [5] Kiorboe T, Anderson K P, Dam H G. Coagulation efficiency and aggregate formation in marine phytoplankton[J]. Marine Biology, 1990, 107(2): 235-245.
- [6] 焦世珺,钟成华,邓春光.浅谈流速对三峡库区藻类生长的影响[J].微量元素与健康研究,2006,23(2):48-50.
Jiao S J, Zhong C H, Deng C G. The effects of velocity of flow to the growth of algae in the Three Gorges[J]. Studies of Trace Elements and Health, 2006, 23(2): 48-50.
- [7] 廖平安,胡秀琳.流速对藻类生长影响的试验研究[J].北京水利,2005(2):12-14.

- Liao P A, Hu X L. Experimental study on the effect of flow velocity on algal growth[J]. Beijing Water Resources, 2005(2):12-14.
- [8] Devercelli M. Phytoplankton of the Middle Paraná River during an anomalous hydrological period: A morphological and functional approach [J]. Hydrobiologia, 2006, 563(1):465-478.
- [9] 陈伟明, 陈宇炜, 秦伯强, 等. 模拟水动力对湖泊生物群落演替的实验[J]. 湖泊科学, 2000, 12(4): 343-353.
- Chen W M, Chen Y W, Qin B Q, et al. Experimental study on the biological community succession caused by water flow[J]. Journal of Lake Sciences, 2000, 12(4): 343-353.
- [10] 王红萍, 夏军, 谢平, 等. 汉江水华水文因素作用机理——基于藻类生长动力学的研究[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(3):282-285.
- Wang H P, Xia J, Xie P, et al. Mechanisms for hydrological factors causing algal blooms in Hanjiang River-Based on kinetics of algae growth[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2004, 13(3): 282-285.
- [11] 王利利. 水动力条件下藻类生长相关影响因素研究[D]. 重庆:重庆大学, 2006.
- Wang L L. Research on the Relevant Factors of the Algal Growth in Hydrodynamic Condition[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [12] 王飞久, 孙修涛, 李锋. 鼠尾藻的有性繁殖过程和幼苗培育技术研究[J]. 海洋水产研究, 2006, 27(5):1-6.
- Wang F J, Sun X T, Li F. Studies on sexual reproduction and seedling-rearing of *Sargassum thunbergii* [J]. Marine Fisheries Research, 2006, 27(5):1-6.
- [13] 詹冬梅, 李美真, 丁刚, 等. 鼠尾藻有性繁育及人工育苗技术的初步研究[J]. 海洋水产研究, 2006, 27(6): 55-59.
- Zhan D M, Li M Z, Ding G, et al. Study on reproduction biology and artificial breeding techniques of *Sargassum thunbergii*[J]. Marine Fisheries Research, 2006, 27(6):55-59.
- [14] 张泽宇, 李晓丽, 韩余香, 等. 鼠尾藻的繁殖生物学及人工育苗的初步研究[J]. 大连水产学院院报, 2007, 22(4):255-259.
- Zhang Z Y, Li X L, Han Y X, et al. Indoor artificial seeding in sea weed *Sargassum thunbergii* [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2007, 22(4): 255-259.
- [15] 王丽梅, 宋广军, 何平, 等. 鼠尾藻人工苗种保苗及海上养殖技术研究[J]. 渔业现代化, 2011, 38(4):37-40.
- Wang L M, Song G J, He P, et al. Study on the technology of intermediate cultivation and off-shore breeding of artificial *Sargassum thunbergii* seedlings [J]. Fishery Modernization, 2011, 38(4):37-40.
- [16] 李美真, 丁刚, 詹冬梅, 等. 北方海区鼠尾藻大规模苗种提前育成技术[J]. 渔业科学进展, 2009, 30(5):75-82.
- Li M Z, Ding G, Zhan D M, et al. A method for early production of large-size *Sargassum thunbergii* seedling in north China[J]. Progress in Fishery Sciences, 2009, 30(5):75-82.
- [17] 胡凡光. 鼠尾藻池塘栽培技术研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2011.
- Hu F G. Culture Technique Study on *Sargassum thunbergii* in Pond[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [18] 崔志峰. 烟台沿海鼠尾藻的生态学研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2009.
- Cui Z F. Ecological Study on *Sargassum thunbergii* O'Kunte in Intertidal Zone of Yantai Coast[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [19] Seely G R, Duncan M J, Vidaver W E. Preparative and analytical extraction of pigments from brown algae with dimethyl sulfoxide[J]. Marine Biology, 1972, 12(2):184-188.
- [20] 季高华, 徐后涛, 王丽卿, 等. 不同水层光照强度对4种沉水植物生长的影响[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(10):29-32.
- Ji G H, Xu H T, Wang L Q, et al. Effects of light intensity at different depth of water on growth of 4 submerged plants[J]. Environmental Pollution and Control, 2011, 33(10):29-32.
- [21] 李宏基, 李庆扬, 庄保玉. 温度和水层对石花菜生长的影响[J]. 水产学报, 1983, 7(4):373-383.
- Li H J, Li Q Y, Zhang B Y. The effect of temperature and water depth on the growth of *Gelidium amansii* lamx[J]. Journal of Fisheries of China, 1983, 7(4): 373-383.
- [22] 刘思俭, 曾淑芳. 江蓠在不同水层中的光合作用与生长[J]. 水产学报, 1982, 6(1):59-64.
- Liu S J, Zeng S F. Rate of photosynthesis and growth of *Gracilaria verrucosa* in different layers of seawaters[J]. Journal of Fisheries of China, 1982, 6(1):59-64.
- [23] 包杰, 田相利, 董双林, 等. 温度、盐度和光照强度对鼠尾藻氮、磷吸收的影响[J]. 中国水产科学, 2008, 15(2):293-300.

- Bao J, Tian X L, Dong S L, et al. Effect of temperature, salinity and light intensity on nitrogen and phosphorus uptake by *Sargassum thunbergii* [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15(2): 293-300.
- [24] Hanisak M D, Harlin M M. Uptake of inorganic nitrogen by *Codium fragile* subsp. *tomentosoides* (chlorophyta) [J]. Journal of Phycology, 1978, 14(4): 450-454.
- [25] Ramus J, Beale S I, Mauzerall D, et al. Changes in photosynthetic pigment concentration in seaweeds as a function of water depth [J]. Marine Biology, 1976, 37(3): 223-229.
- [26] 林贞贤, 宫相忠, 李大鹏. 光照和营养盐胁迫对龙须菜生长及生化组成的影响 [J]. 海洋科学, 2007, 31(11): 22-26.
- Lin Z X, Gong X Z, Li D P. Effects of light and the stress of nutrients deficiency on the growth and levels of chemical constituents of *Gracilaria lemaneiformis* [J]. Marine Science, 2007, 31(11): 22-26.
- [27] 刘静雯, 董双林, 马牲. 温度和盐度对几种大型海藻生长率和 $\text{NH}_4 - \text{N}$ 吸收的影响 [J]. 海洋学报, 2001, 23(2): 109-116.
- Liu J W, Dong S L, Ma S. Effects of temperature and salinity on growth of *G. tenuistipitata* var. *liui*, *U. pertusa*, *G. filicina* and $\text{NH}_4 - \text{N}$ uptake of *G. tenuistipitata* var. *liui* [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(2): 109-116.
- [28] B 福迪. 藻类学 [M]. 罗迪安 (译). 上海: 上海科学技术出版社, 1980: 392-394.
- Bohuslav F. Phycology [M]. Luo D A (ed.). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1980: 392-394.
- [29] 张毅敏, 张永春, 张龙江, 等. 湖泊水动力对蓝藻生长的影响 [J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 707-711.
- Zhang Y M, Zhang Y C, Zhang L J, et al. The influence of lake hydrodynamics on blue algal growth [J]. China Environmental Science, 2007, 27(5): 707-711.
- [30] 金相灿, 李兆春, 郑朔方. 铜绿微囊藻生长特性研究 [J]. 环境科学研究, 2004, 17(增刊): 52-54.
- Jin X C, Li Z C, Zheng S F. Studies on the growth characteristics of *Microcystis aeruginosa* [J]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(z1): 52-54.
- [31] 王婷婷, 朱伟, 李林. 不同温度下水流对铜绿微囊藻生长的影响模拟 [J]. 湖泊科学, 2010, 22(4): 563-568.
- Wang T T, Zhu W, Li L. Simulation on the hydrodynamic effects of *Microcystis aeruginosa* in different temperature condition [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(4): 563-568.
- [32] 赵颖, 张永春. 流速与温度的交互作用对铜绿微囊藻生长的影响 [J]. 江苏环境科技, 2008, 21(1): 23-26.
- Zhao Y, Zhang Y C. Interaction effect of flow velocity and temperature on growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. Jiangsu Environmental Science and Technology, 2008, 21(1): 23-26.
- [33] 李林, 朱伟. 不同光照条件下水流对铜绿微囊藻生长的影响 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2012, 39(9): 87-92.
- Li L, Zhu W. Effects of water flow under different light intensity on the growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2012, 39(9): 87-92.
- [34] 张青田, 王新华, 林超, 等. 温度和光照对铜绿微囊藻生长的影响 [J]. 天津科技大学学报, 2011, 26(2): 24-27.
- Zhang Q T, Wang X H, Lin C, et al. Effects of temperature and illumination on the cell proliferation of *Microcystis aeruginosa* [J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2011, 26(2): 24-27.
- [35] Mitsuhashi S, Hosaka K, Tomonaga E, et al. Effects of shear flow on photosynthesis in a dilute suspension of microalgae [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1995, 42(5): 744-749.

(责任编辑: 米慧芝)