

光照对中国南北方萱藻丝状体生长发育影响的比较

夏云捷, 宫相忠*, 高伟, 罗伟, 张静, 王吉

(中国海洋大学海洋生命学院, 山东青岛 266003)

摘要: 通过分离、培养我国北方海域(烟台、青岛)和南方海域(舟山、温州)的萱藻丝状体, 比较研究了不同光强[7.2、21.6、36.0、50.4、64.8、86.4、108.0和129.6 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]和不同光周期(8L:16D、10L:14D、12L:12D、14L:10D和16L:8D)对我国南北方萱藻丝状体生长及发育的影响。结果表明: (1)过高[$\geq 108.0 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]或过低[$\leq 21.6 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]光强条件均不利于我国南北方萱藻丝状体的快速生长; (2)我国南北方萱藻丝状体生长的最适光强条件相同, 在64.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 条件下培养20 d后, 其丝状体的增重倍比和日均增长率均达到最大值; (3)我国南北方萱藻丝状体发育的最适光强条件均为36.0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 培养20 d后, 烟台、青岛、舟山和温州的萱藻丝状体的孢子囊枝比例均达到最大值, 分别为34.72% \pm 0.91%、35.06% \pm 1.17%、35.37% \pm 0.59%和34.33% \pm 0.41%; (4)我国南北方萱藻丝状体生长的最适光周期条件不同, 培养20 d后, 北方萱藻丝状体的增重倍比和日均增长率均在14L:10D条件下达到最大值, 分别为82.75% \pm 2.39%、3.00% \pm 0.36%和81.28% \pm 4.53%、3.04% \pm 0.49%, 而南方均在16L:8D条件下达到最大值, 分别为89.52% \pm 0.88%、3.18% \pm 0.30%和88.66% \pm 7.09%、3.22% \pm 0.26%; (5)经过20 d的培养观察, 我国北方萱藻丝状体发育的适宜光周期范围为8L:16D~10L:14D, 而南方的适宜光周期范围为10L:14D~12L:12D。

关键词: 萱藻; 丝状体; 光照强度; 光周期; 生长; 发育

中图分类号: S 968.4

文献标志码: A

萱藻(*Scytosiphon lomentaria*)隶属褐藻门(Phaeophyta)、萱藻科(Scytosiphonaceae)、萱藻属(*Scytosiphon*), 是一年生广温性海藻, 分布于我国辽东半岛至广东省海陵岛间沿海海域^[1]。萱藻具有由配子体世代和孢子体世代构成的异形世代交替的生活史, 丝状体既可以转化成垫状体和类垫状体, 又可以形成单室孢子囊并释放游动孢子进而发育形成叶状体^[2-3]。国内外关于萱藻生活史和繁殖条件的研究已有报道^[4-13], 但关于不同地理位置的萱藻生物学特性的对比研究尚未见报道。

萱藻口感鲜美, 营养价值较高, 富含氨基酸、不溶性膳食纤维、脂肪、蛋白质、褐藻胶

等成分^[14-17]。此外, 萱藻具有良好的抗肿瘤^[18-20]、抗病毒^[21]及抗氧化^[22-23]的特性, 其细胞内的活性成分具有抗血小板凝聚^[24]和抑制B淋巴细胞增殖的作用^[25]。因此, 萱藻是一种开发潜力巨大的新型海藻, 大力开展其人工育苗及养殖势在必行。

中国是海藻养殖大国, 海藻产量居世界第一^[26], 先后成功实现了海带(*Saccharina japonica*)、坛紫菜(*Porphyra haitanensis*)、条斑紫菜(*Porphyra yezonesis*)、裙带菜(*Undaria pinnatifida*)等的人工养殖。萱藻的人工养殖已开展近十年, 主要集中在北方辽宁大连和山东烟台海域, 如何扩大其养殖规模, 逐渐将养殖范围拓展到南方海域, 并借鉴其他经济海藻的异地养殖技术^[27-31],

收稿日期: 2016-01-31 修回日期: 2016-04-07

资助项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AA10A413)

通信作者: 宫相忠, E-mail: gxzhw@163.com

对于萱藻的人工养殖意义重大。

本实验通过分离和培养我国南北方萱藻丝状体,首次研究了光强和光周期对其生长和发育的差异,为萱藻在南、北方不同海域的人工养殖提供基础数据,也为其实验生态学和繁殖生物学的研究提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

萱藻叶状体分别于2014年3月—2014年5月采集自山东烟台(37°27'N, 121°26'E)、山东青岛(36°03'N, 120°22'E)、浙江舟山(29°59'N, 122°12'E)和浙江温州(27°59'N, 120°41'E)(图1)。选取山东海域(烟台和青岛)代表的北方萱藻,以及浙江海域(舟山和温州)代表的南方萱藻,对其丝状体进行分离和培养,用于后续的实验生态学研究。扩增条件为L:D=14:10、光强64.8~86.4 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;北方萱藻丝状体的扩增温度为(21.0±0.5)°C,南方的扩增温度为(22.5±0.5)°C。

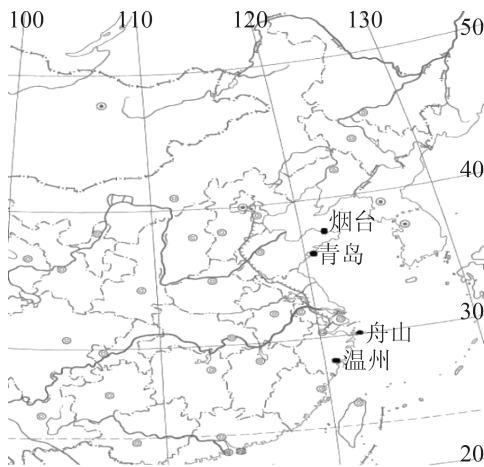


图1 采样点位置图(烟台、青岛、舟山和温州)

Fig. 1 Map of sampling locations (Yantai, Qingdao, Zhoushan and Wenzhou)

1.2 实验方法

光照强度实验 光照强度设置7.2、21.6、36.0、50.4、64.8、86.4、108.0、129.6(±3.6) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 共8个梯度。取生长状态良好的丝状体,经组织捣碎机适度切割,最终得到长度为(200±20) μm 的藻枝段,用250目尼龙筛绢过滤,用灭菌海水反复冲洗除去碎屑,再用吸水纸吸干多余水分,称取适量丝状体,用灭菌海水配

成生物量为(0.50±0.05) mg/mL的藻液,按1:1000的比例加入F1培养液^[11]。取300 mL藻液置于500 mL三角烧瓶中,将三角烧瓶置于光照培养箱,温度(21.0±0.5)°C, L:D=12:12,每个梯度设置3个平行组,静置培养,每天定时摇瓶3次,每7天全量更换1次培养液。在培养0、1、3、5、10、15、20 d后,充分摇匀并从三角烧瓶中各取10 mL藻液,用筛绢过滤,并置于定性滤纸上抽滤至无液体流出,用镊子挑到电子天平上称量丝状体鲜重,计算萱藻丝状体的增重倍比*P*和日均增长率*K*^[32]。培养20 d后,计算萱藻丝状体的孢子囊枝比例作为其发育质量的评价指标^[33]。

$$P(\%) = [(N_t - N_0) / N_0] \times 100$$

$$K(\%) = [(\ln N_t - \ln N_0) / t] \times 100$$

式中, N_t 为第*t*天的萱藻丝状体鲜重(mg); N_0 为第0天的萱藻丝状体初始鲜重(mg); *t*为实验天数。

孢子囊枝比例(%)=具有成熟孢有成熟孢子体个数/丝状体总数×100

在10×40倍镜下,随机观察10个视野的计数。

光周期实验 光周期设置8L:16D、10L:14D、12L:12D、14L:10D、16L:8D共5个梯度,温度(21.0±0.5)°C,光照强度(64.8±3.6) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

1.3 数据处理和统计学分析

实验结果用SPSS 19.0软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),结果差异显著后进行多重比较(Duncan),以*P*<0.05为差异显著。采用Sigmaplot 10.0软件进行制图。

2 结果

2.1 光强对中国南北方萱藻丝状体生长和发育的影响

在所设[7.2~129.6 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]范围内其丝状体的增重倍比均随着培养时间的延长而增加。经过20 d的培养后,在所设的各光强条件下,烟台萱藻丝状体的增重倍比分别为42.35%±11.16%、50.85%±8.39%、62.60%±9.23%、80.90%±0.59%、91.84%±7.05%、70.36%±5.57%、56.71%±4.70%和48.60%±8.57%;青岛萱藻丝状体的增重倍比分别为40.37%±13.29%、52.36%±8.88%、63.82%±5.17%、82.15%±8.45%、92.47%±4.09%、72.64%±3.02%、56.19%±8.30%和45.42%±5.22%。上述数据表明,在64.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 条件下,北方萱藻丝状体的增重倍比均达到最大值,分别为91.84%±

7.05%和92.47%±4.09%，均显著高于其他条件下的增重倍比($P<0.05$)(图2~图5)。同时，烟台和青岛萱藻丝状体的日均增长率在[7.2~64.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]范围内均随着光强的增强逐渐增大，在[64.8~129.6 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]范围内均随着光强的增强逐渐减小，在64.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 条件下其丝状体的日均增长率均达到最大值，分别为3.26%±0.19%和3.27%±0.11%，均显著高于其他条件下的日均增长率($P<0.05$)(表1)。此外，显微镜检可知，在64.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 条件下，烟台和青岛萱藻丝状体均呈深褐色，细胞质较其他条件更饱满，念珠状细胞比例也高于其他条件，丝状体生长状态佳。

综合考量烟台和青岛萱藻丝状体的增重倍比、日均增长率和生长状态，我国北方萱藻丝状体生长的最适光强为64.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

光强对南方(舟山和温州)萱藻丝状体生长的影响较为显著(图4和图5)。培养3 d后，舟山和温州萱藻丝状体均呈现出随光强升高增重倍比先增大后减小的趋势，即当光强低于64.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时，均随着光强的增强而增大，当光强高于64.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时，均随着光强的增强而减小。在64.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 条件下培养3、5、10、15和20 d后，舟山萱藻丝状体的增重倍比分别为27.24%±2.03%、32.98%±2.03%、50.12%±2.95%、73.90%±7.02%、95.47%±4.21%；温州萱藻丝状体

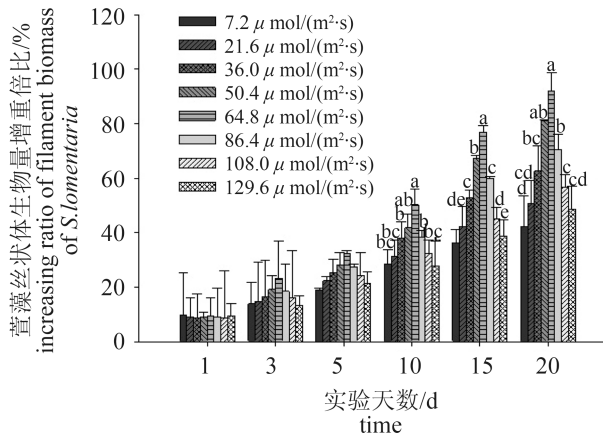


图2 光照强度对烟台萱藻丝状体增重倍比的影响

Fig. 2 Effects of light intensity on increasing ratio of filament biomass of *S. lomentaria* collected from Yantai

上标字母不相同的表示各组之间的差异显著($P<0.05$), 字母有相同的表示差异不显著($P>0.05$), 下同

Different letters in the same day indicate significant difference($P<0.05$), the same below

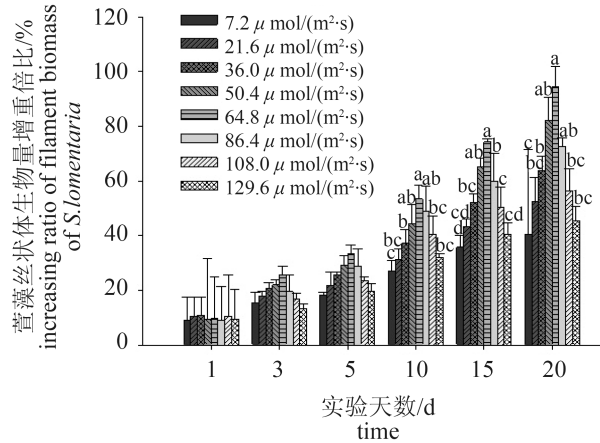


图3 光照强度对青岛萱藻丝状体增重倍比的影响

Fig. 3 Effects of light intensity on increasing ratio of filament biomass of *S. lomentaria* collected from Qingdao

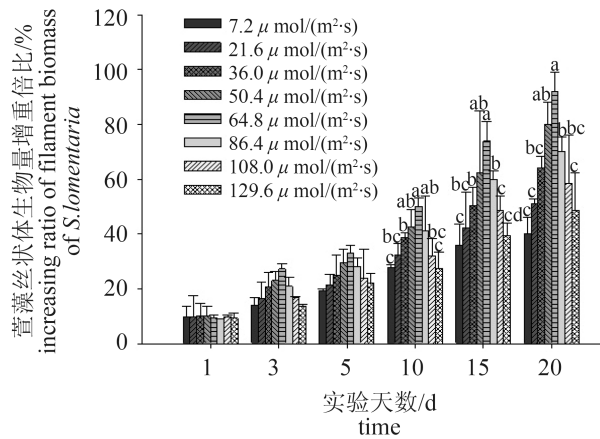


图4 光照强度对舟山萱藻丝状体增重倍比的影响

Fig. 4 Effects of light intensity on increasing ratio of filament biomass of *S. lomentaria* collected from Zhoushan

的增重倍比分别为27.38%±3.68%、33.35%±3.57%、52.16%±10.56%、72.80%±15.81%、94.17%±2.27%，均大于同期其他光强条件下的增重倍比($P<0.05$)。同时，在64.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 条件下，舟山和温州萱藻丝状体的日均增长率均达到最大值，分别为3.35%±0.11%和3.32%±0.07%(表1)，均显著高于其他光强条件下的日均增长率($P<0.05$)。此外，显微镜检可知，在64.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 条件下，舟山和温州萱藻丝状体细胞均呈深褐色，细胞质较其他条件更饱满，念珠状细胞比例也高于其他条件，丝状体生长状态佳。

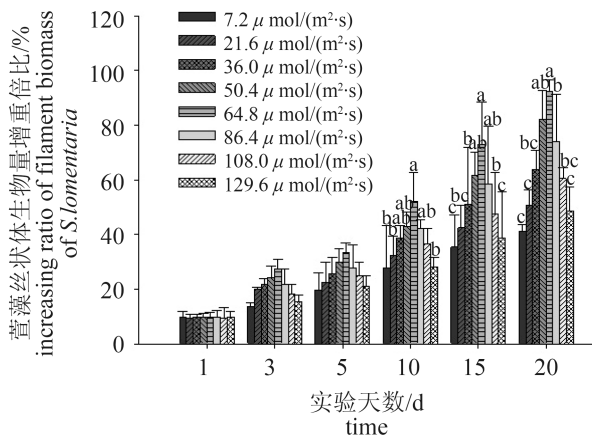


图5 光照强度对温州萱藻丝状体增重倍比的影响

Fig. 5 Effects of light intensity on increasing ratio of filament biomass of *S. lomentaria* collected from Wenzhou

综合考量舟山和温州萱藻丝状体的增重倍比、日均增长率和生长状态，我国南方萱藻丝状体生长的最适光强为64.8 μmol/(m²·s)。

通过对同一光强条件下4个不同地理位置的萱藻丝状体的增重倍比和日均增长率进行比较分析(表1)，在培养20 d后，在64.8 μmol/(m²·s)条件下，烟台、青岛、舟山和温州的萱藻丝状体的增重倍比依次为91.84%±7.05%、92.47%±4.09%、95.47%±4.21%和94.17%±2.27%，其丝状体的日均增长率依次为3.26%±0.19%、3.27%±0.11%、3.35%±0.11%和3.32%±0.07%，差异均不显著(P<0.05)。同时，在64.8 μmol/(m²·s)条件下，对4个不同地理位置的萱藻丝状体细胞进行显微观察可见，其丝状体细胞均呈深褐色，细胞质饱满，生长状态佳，即64.8 μmol/(m²·s)是我国南北方萱藻丝状体生长的最佳光强条件。

当光强≥108.0 μmol/(m²·s)或≤21.6 μmol/(m²·s)条件时，我国南北方萱藻丝状体的增重倍比和日均增长率均显著低于其他条件(P<0.05)。同时，显微镜下观察可见，在7.2 μmol/(m²·s)条件下，4个不同地理位置的萱藻丝状体细胞均呈深褐色，细胞质饱满，并有单室孢子囊的出现；在129.6 μmol/(m²·s)条件下其丝状体细胞均呈浅褐色，细胞多为直筒状，丝状体生长状态远不及其他光强条件。因此，过高[≥108.0 μmol/(m²·s)]或过低[≤21.6 μmol/(m²·s)]的光强均不利于我国南北方萱藻丝状体的快速生长。

培养20 d后，烟台、青岛、舟山和温州的萱藻丝状体的孢子囊枝比例在[7.2~36.0 μmol/(m²·s)]范围内均随着光强的增强而增大，在[36.0~129.6 μmol/(m²·s)]范围内均随着光强的增强而减少(表2)。在36.0 μmol/(m²·s)条件下，4个不同地理位置的萱藻丝状体的孢子囊枝比例均达到最大值，分别为34.72%±0.91%、35.06%±1.17%、35.37%±0.59%和34.33%±0.41%，差异不显著(P>0.05)。同时，在36.0 μmol/(m²·s)条件下，对4个不同地理位置的萱藻丝状体细胞进行显微观察可见，其丝状体细胞均呈深褐色，细胞质充盈，念珠状孢子囊比例较高。因此，36.0 μmol/(m²·s)是我国南北方萱藻丝状体发育的最佳光强条件。

2.2 光周期对中国南北方萱藻丝状体生长和发育的影响

经研究发现，光周期对北方(烟台和青岛)萱藻丝状体生长的影响较为显著，在所设的(8L:16D~16L:8D)范围内，其丝状体的增重倍比均随着培养时间的延长逐渐增大(图6和图7)。培养10 d后，在14L:10D条件下，烟台和青岛萱藻

表1 光强条件对烟台、青岛、舟山和温州萱藻丝状体日均增长率的影响(培养20 d后)

Tab. 1 Effects of light intensity on daily average growth rate of filaments of *S. lomentaria* collected from Yantai, Qingdao, Zhoushan and Wenzhou (cultured for 20 d)

地理位置 location	光照强度/[μmol/(m ² ·s)] light intensity							
	7.2	21.6	36.0	50.4	64.8	86.4	108.0	129.6
烟台 Yantai	1.76±0.39	2.05±0.28	2.43±0.29	2.96±0.00	3.26±0.19 ^a	2.67±0.16	2.24±0.15	1.97±0.29
青岛 Qingdao	1.61±1.19	2.10±0.29	2.47±0.16	2.99±0.23	3.27±0.11 ^a	2.73±0.00	2.22±0.26	1.87±0.18
舟山 Zhoushan	1.69±0.21	2.06±0.00	2.48±0.12	2.94±0.22	3.35±0.11 ^a	2.65±0.16	2.28±0.55	1.97±0.47
温州 Wenzhou	1.72±0.00	2.05±0.18	2.47±0.22	2.99±0.30	3.32±0.07 ^a	2.75±0.51	2.36±0.12	1.98±0.29

注：上标字母不相同的表示各组之间的差异显著(P<0.05)，字母有相同的表示差异不显著(P>0.05)，下同

Notes: The different letters in each column mean significant differences (P<0.05), the same letters mean no significant differences (P>0.05), the same below

表 2 光照强度对烟台、青岛、舟山和温州萱藻丝状体孢子囊枝比例的影响(培养 20 d后)

Tab. 2 Effects of light intensity on sporangial branchlets ratio of filaments of *S. lomentaria* collected from Yantai, Qingdao, Zhoushan and Wenzhou (cultured for 20 d)

地理位置 location	光照强度/[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$] light intensity							
	7.2	21.6	36.0	50.4	64.8	86.4	108.0	129.6
烟台 Yantai	19.80±1.15	28.67±0.67	34.72±0.91 ^a	22.62±1.34	14.08±1.53	9.70±0.57	7.23±0.40	5.72±0.70
青岛 Qingdao	19.95±0.88	29.19±1.23	35.06±1.17 ^a	22.15±0.95	14.91±0.33	9.70±1.39	7.12±0.49	5.91±0.62
舟山 Zhoushan	20.63±0.51	30.16±0.86	35.37±0.59 ^a	23.33±0.74	15.52±0.81	10.65±1.41	8.20±1.12	7.15±0.29
温州 Wenzhou	20.53±1.39	30.80±1.06	34.33±0.41 ^a	23.17±1.82	15.02±0.08	10.54±0.92	8.20±1.11	6.99±0.07

丝状体的增重倍比均达到最大值, 分别为54.18%±8.34%和51.39%±4.12%, 均显著高于其他光周期条件下的增重倍比($P>0.05$)。培养20 d后, 在所设的各光周期条件下, 烟台萱藻丝状体的增重倍比分别为42.11%±1.83%、54.25%±3.70%、67.00%±7.14%、82.75%±2.39%和74.30%±1.83%; 青岛萱藻丝状体的增重倍比分别为41.82%±1.70%、55.98%±4.11%、67.96%±0.53%、81.28%±4.53%和76.97%±1.71%, 在14L:10D条件下其丝状体的增重倍比均达到最大值, 分别为82.75%±2.39%和81.28%±4.53%, 该结果与培养10 d后相比分别增大了1.5倍和1.6倍, 均显著高于其他光周期条件下的增重倍比($P>0.05$)。同时, 在14L:10D条件下, 烟台和青岛萱藻丝状体的日均增长率均达到最大值, 分别为3.00%±0.36%和3.04%±0.49%(表3), 均显著高于其他光周期条件下的日均增长率($P>0.05$)。因此, 我国北方萱藻丝状体生长的最适光周期为14L:10D。

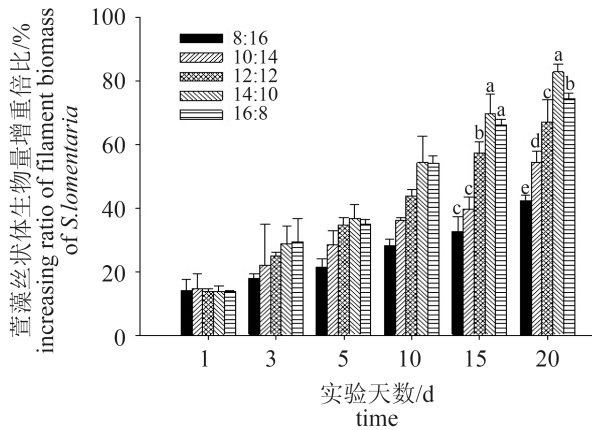


图 6 光周期对烟台萱藻丝状体增重倍比的影响
Fig. 6 Effects of photoperiod on increasing ratio of filament biomass of *S. lomentaria* collected from Yantai

在所设的(8L:16D~16L:8D)范围内, 舟山和温州萱藻丝状体的增重倍比均随着培养时间的延长逐渐增大。培养10 d后, 舟山和温州萱藻丝状体的增重倍比均在16L:8D条件下达到最大值, 分别为55.84%±1.98%和49.31%±6.17%(图8和图9), 均显著高于其他光周期条件下的增重倍比($P>0.05$)。培养20 d后, 舟山和温州萱藻丝状体的增重倍比在8L:16D~16L:8D范围内均随着光照时长的增加而增大, 且在16L:8D条件下其丝状体的增重倍比均达到最大值, 分别为89.52%±0.88%和88.66%±7.09%, 该结果与培养10 d后相比分别增大了1.6倍和1.8倍, 均显著高于其他光周期条件下的增重倍比($P>0.05$)。同时, 在16L:8D条件下, 舟山和温州萱藻丝状体的日均增长率均达到最大值, 分别为3.18%±0.30%和3.22%±0.26%(表3), 均显著高于其他光周期条件下的日均增长率($P>0.05$)。因此, 我国南方萱藻丝状体生长的最适光周期为16L:8D。

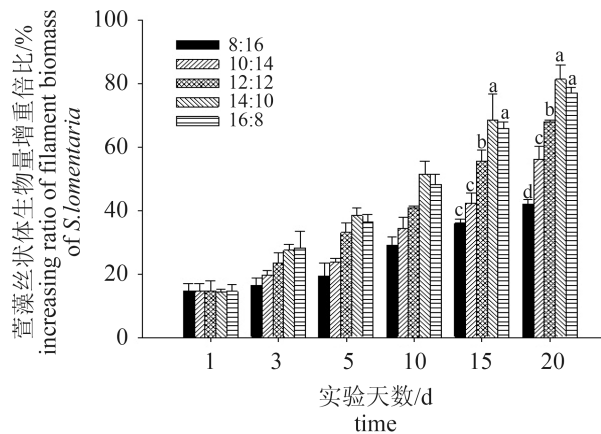


图 7 光周期对青岛萱藻丝状体增重倍比的影响
Fig. 7 Effects of photoperiod on increasing ratio of filament biomass of *S. lomentaria* collected from Qingdao

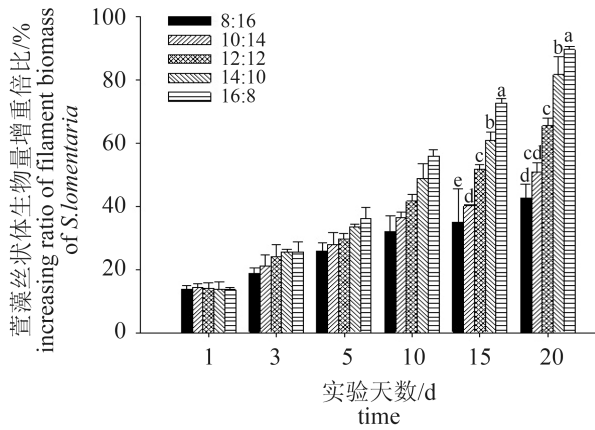


图 8 光周期对舟山萱藻丝状体增重倍比的影响
Fig. 8 Effects of photoperiod on increasing ratio of filament biomass of *S. lomentaria* collected from Zhoushan

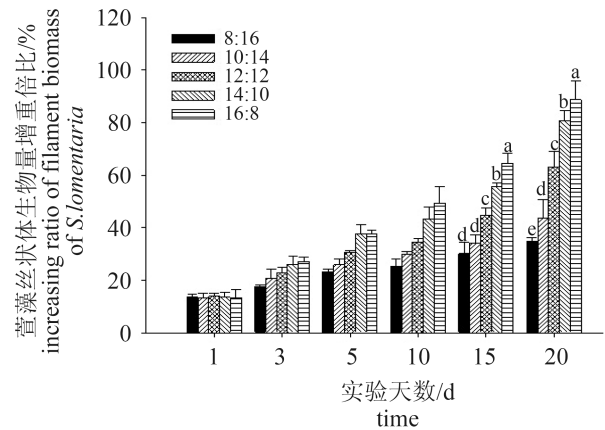


图 9 光周期对温州萱藻丝状体增重倍比的影响
Fig. 9 Effects of photoperiod on increasing ratio of filament biomass of *S. lomentaria* collected from Wenzhou

通过对同一光周期条件下4个不同地理位置的萱藻丝状体的生物量增重倍比和日均增长率进行比较分析,即培养20 d后,在14L:10D条件下,烟台、青岛、舟山和温州萱藻丝状体的增重倍比依次为82.75%±2.39%、81.28%±4.53%、81.56%±5.70%和80.73%±3.96%,其丝状体的日均增长率依次为3.00%±0.36%、3.04%±0.49%、3.00%±0.34%和3.03%±0.31%,差异均不显著($P>0.05$)(表3,图6~图9)。此外,在14L:10D条件下,对4个不同地理位置的萱藻丝状体细胞进行显微观察可见,其丝状体细胞均呈深褐色,细胞质饱满,生长状态佳。因此,14L:10D是我国南北方萱藻丝状体生长的最佳光周期条件。

在16L:8D条件下,4个不同地理位置的萱藻丝状体的增重倍比依次为74.32%±0.35%、76.97%±1.71%、89.52%±0.88%和88.66%±7.09%,其丝状体的日均增长率依次为2.75%±0.35%、2.83%±

0.33%、3.18%±0.30%和3.22%±0.26%,经单因素方差分析可知,舟山和温州萱藻丝状体的增重倍比和日均增长率均显著高于烟台和青岛萱藻丝状体的增重倍比和日均增长率($P>0.05$)(表3,图6~图9)。此外,在16L:8D条件下,对4个不同地理位置的萱藻丝状体细胞进行显微观察可见,舟山和温州萱藻丝状体细胞均呈深褐色,细胞质更加饱满。因此,16L:8D是我国南方萱藻丝状体生长的最佳光周期条件。

不同光周期条件下同一地理位置的萱藻丝状体的孢子囊枝比例不同,同一光周期条件下不同地理位置的萱藻丝状体的孢子囊枝比例也存在差异(表4)。培养20 d后,在10L:14D条件下,烟台和青岛萱藻丝状体的孢子囊枝比例均达到最大值,分别为40.17%±0.29%和39.63%±0.49%,均显著高于其他光周期条件下的孢子囊枝比例($P>0.05$),而在8L:16D条件下其丝状体的孢子囊

表 3 光周期对烟台、青岛、舟山和温州的萱藻丝状体日均增长率的影响(培养20 d后)

Tab. 3 Effects of photoperiod on daily average growth rate of filaments of *S. lomentaria* collected from Yantai, Qingdao, Zhoushan and Wenzhou (cultured for 20 d)

地理位置 location	光周期 photoperiod				
	8L:16D	10L:14D	12L:12D	14L:10D	16L:8D
烟台 Yantai	1.75±0.28	2.10±0.45	2.56±0.21	3.00±0.36 ^a	2.75±0.35 ^b
青岛 Qingdao	1.74±0.17	2.13±0.34	2.55±0.40	3.04±0.49 ^a	2.83±0.33 ^b
舟山 Zhoushan	1.75±0.62	2.05±0.43	2.51±0.41	3.00±0.34 ^a	3.18±0.30 ^a
温州 Wenzhou	1.71±0.41	2.02±0.36	2.55±0.36	3.03±0.31 ^a	3.22±0.26 ^a

枝比例次之, 分别为(30.93%±0.88%)和(30.56%±0.67%)。因此, 我国北方萱藻丝状体发育的适宜光周期范围为8L:16D~10L:14D。

培养20 d后, 舟山和温州萱藻丝状体的孢子囊枝比例在8L:16D~10L:14D范围内均随着光照时长的增加而增大, 在10L:14D~16L:8D范围内, 其均随着光照时长增加而减少, 在10L:14D条件下

其丝状体的孢子囊枝比例均达到最大值, 分别为39.03%±0.52%和38.99%±0.98%, 均显著高于其他光周期条件下的孢子囊枝比例($P>0.05$), 而在12L:12D条件下其丝状体的孢子囊枝比例次之, 分别为31.53%±1.35%和31.99%±0.49%。因此, 我国南方萱藻丝状体发育的适宜光周期范围为10L:14D~12L:12D。

表4 光周期对烟台、青岛、舟山和温州的萱藻丝状体孢子囊枝比例的影响(培养20 d后)

地理位置 location	光周期 photoperiod					%
	8L:16D	10L:14D	12L:12D	14L:10D	16L:8D	
烟台 Yantai	30.93±0.88 ^a	40.17±0.29 ^a	25.91±0.22 ^b	16.98±0.34 ^a	10.08±0.53 ^a	
青岛 Qingdao	30.56±0.67 ^a	39.63±0.49 ^a	24.80±1.02 ^b	17.58±0.89 ^a	9.66±0.88 ^a	
舟山 Zhoushan	29.80±0.93 ^b	39.03±0.52 ^a	31.53±1.35 ^a	16.39±0.54 ^a	9.13±0.17 ^a	
温州 Wenzhou	28.52±0.69 ^b	38.99±0.98 ^a	31.99±0.49 ^a	16.64±1.04 ^a	8.96±0.90 ^a	

3 讨论

据报道, 裙带菜由于分布海域纬度的不同其藻体形态上有明显的变化^[34-35]。在本研究中, 分布于烟台和青岛海域的北方萱藻与分布于舟山、温州海域的南方萱藻所处的海域纬度有所不同, 但其藻体形态基本一致, 即藻体呈黄褐色至深褐色, 长8~25 cm, 直径2~5 mm, 单条圆柱状体, 相隔1~5 cm有缢缩形成的节部。据现有资料表明, 我国沿海海域的萱藻均为同一种^[1], 这应是其外部形态表现出一致性的内在原因。

适宜的光强条件可以促进海藻的生长, 过高或过低的光强则会对其生长产生抑制作用。据报道, 海带配子体生长的适宜光强为36.0~54.0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ^[36], 光强较低[0.9~9.0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]时其配子体生长缓慢^[27], 而较高[90.0~126.0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]时其配子体生长则受到抑制^[37]。本研究也有类似结果, 即过低[7.2~21.6 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]或过高[108.0~129.6 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]的光强均不利于我国南北方萱藻丝状体的快速生长。此外, 在本研究显示我国南北方萱藻丝状体生长的最适光强条件均为64.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 而其发育的最适光强条件均为36.0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 即萱藻丝状体发育的最适光强条件低于其生长的最适光强条件, 该规律与海带配子体生长发育过程中对光强的需求

相似^[27]。因此, 在萱藻工厂化育苗过程中, 可通过适当调节光强来提高其孢子囊比例, 以达到丝状体培育最佳效果。

光周期对海藻生长发育的影响与其所处的海域环境有着密切地联系。在本研究中, 不同海域萱藻丝状体生长发育的适宜光周期不同, 其中, 北方萱藻丝状体生长的最适光周期条件为14L:10D, 而南方的最适光周期条件为16L:8D; 北方萱藻丝状体发育的适宜光周期范围为8L:16D~10L:14D, 而南方的适宜光周期范围为10L:14D~12L:12D, 说明较短的光照时间有利于其丝状体的发育, 该结果与逢少军^[38]对裙带菜的研究结果相似, 即较短的光周期条件有利于其配子体的发育。此外, 在本研究中, 南方海域萱藻丝状体生长发育所需的光照时间长于北方海域萱藻丝状体生长发育所需的光照时间, 该差异或与其所处的海域环境、纬度高低和气候变化三者的协同作用有关, 烟台和青岛的纬度分别为37°27'N和36°03'N, 舟山和温州的纬度分别为29°59'N和27°59'N, 由于生活的海域纬度不同, 长期适应各自海域环境的光周期节律性变化而形成了与此相适应的内源节律^[39]。但本实验所设光周期范围为8L:16D~16L:8D, 存在着一定的局限性, 因而我国南方萱藻丝状体生长是否需要更长的光照时长还有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] 曾呈奎, 张德瑞, 张峻甫. 中国经济海藻志[M]. 北京: 科学出版社, 1962: 59-60.
Tseng C K, Zhang D R, Zhang J F. Chinese Economic Seaweed[M]. Beijing: Science Press, 1962: 59-60 (in Chinese).
- [2] 邢永泽, 宫相忠, 尹宝树. 萱藻不同发育阶段形态学及生活史的研究[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(8): 98-102.
Xing Y Z, Gong X Z, Yin B S. The morphology and life history of *Scytosiphon lomentaria*[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(8): 98-102 (in Chinese).
- [3] 邢永泽. 生态因子对萱藻(*Scytosiphon lomentaria*)孢子体、配子体生长发育影响的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
Xing Y Z. Effects of ecological factors on sporophytes and gametophytes of *Scytosiphon lomentaria*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010 (in Chinese).
- [4] Parente M I, Neto A I, Fletcher R L. Morphology and life history of *Scytosiphon lomentaria* (Scytosiphonaceae, Phaeophyceae) from the Azores[J]. Journal of Phycology, 2003, 39(2): 353-359.
- [5] Clayton M N. Experimental analysis of the life history of the complanate form of *Scytosiphon* (Scytosiphonaceae, Phaeophyta) in southern Australia[J]. Phycologia, 1981, 20(4): 358-364.
- [6] Clayton M N. Sexual reproduction-A rare occurrence in the life history of the complanate form of *Scytosiphon* (Scytosiphonaceae, Phaeophyta) from southern Australia[J]. British Phycological Journal, 1980, 15(2): 105-118.
- [7] Clayton M N. The morphology, anatomy and life history of a complanate form of *Scytosiphon lomentaria* (Scytosiphonales, Phaeophyta) from southern Australia[J]. Marine Biology, 1976, 38(3): 201-208.
- [8] Clayton M N. Morphological variation and life history in cylindrical forms of *Scytosiphon lomentaria* (Scytosiphonaceae:Phaeophyta) from southern Australia[J]. Marine Biology, 1978, 47(4): 349-357.
- [9] Kogame K. Morphology and life history of *Scytosiphon canaliculatus* comb. nov. (Scytosiphonales, Phaeophyceae) from Japan[J]. Phycological Research, 1996, 44(2): 85-94.
- [10] 邢永泽, 宫相忠, 高伟, 等. 生态因子对萱藻(*Scytosiphon lomentaria*)孢子体生长发育的影响[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(1): 101-106.
Xing Y Z, Gong X Z, Gao W, et al. Effect of ecological factors on growth and development of sporophytes of *Scytosiphon lomentaria*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(1): 101-106 (in Chinese).
- [11] 高伟. 环境因子对萱藻(*Scytosiphon lomentaria*)丝状体扩增及孢子囊发育的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
Gao W. Effect of environmental factors on the filaments amplification and sporangia development of *Scytosiphon lomentaria*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012 (in Chinese).
- [12] 高伟, 宫相忠, 张必达. 环境因子对萱藻(*Scytosiphon lomentaria*)丝状体孢子放散的影响[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(2): 244-248.
Gao W, Gong X Z, Zhang B D. Effect of environmental factors on spore releasing of filaments of *Scytosiphon lomentaria*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(2): 244-248 (in Chinese).
- [13] 张文健, 宫相忠, 高伟. 环境因子对萱藻(*Scytosiphon lomentaria*)孢子附着的影响[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(6): 1661-1666.
Zhang W J, Gong X Z, Gao W. Effect of environmental factors on spore attachment of *Scytosiphon lomentaria*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(6): 1661-1666 (in Chinese).
- [14] 孙杰, 缪静, 朱路英, 等. 烟台沿海4种常见海藻的氨基酸分析及营养评价[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(8): 3081-3082.
Sun J, Miao J, Zhu L Y, et al. Analysis and nutritional evaluation on amino acids in 4 species of alga collected from Yantai[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(8): 3081-3082 (in Chinese).
- [15] 张宇, 付晓婷, 林洪, 等. 萱藻营养品质的分析和评价[J]. 营养学报, 2011, 33(6): 619-620, 623.
Zhang Y, Fu X T, Lin H, et al. Analysis and evaluation of nutritional quality of *Scytosiphon lomentarius*[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2011, 33(6): 619-620, 623 (in Chinese).

- Chinese).
- [16] 何洁, 崔铁军, 王家骧, 等. 4种药用海藻有效成份的分析与比较[J]. 中国海洋药物, 1996(3): 23-27.
He J, Cui T Y, Wang J X, *et al.* Analysis and comparison on the effective compositions of four kinds of medicinal seaweeds[J]. Chinese Journal of Marine Drugs, 1996(3): 23-27 (in Chinese).
- [17] 丁兰平, 栾日孝, 黄冰心. 中国海洋褐藻门萱藻目 *Scytosiphonales* 的分类学研究[C]//中国藻类学会第八次会员代表大会暨第十六次学术讨论会论文摘要集. 上海: 中国海洋湖沼学会, 2011.
Ding L P, Ruan R X, Huang B X. The Taxonomical Study of Chinese Phaeophyta Scytosiphonales[C]//The Abstract Collection of Eighth Member Representative Assembly in the Chinese Algae Society and the 16th Seminar. Shanghai: China Marine Lacustrine Bog Institute, 2011 (in Chinese).
- [18] 徐年军, 范晓, 韩丽君, 等. 山东沿海海藻抗肿瘤活性的筛选[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(4): 408-413.
Xu N J, Fan X, Han L J, *et al.* Screening marinealgae from Shandong coast for antitumor activity[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(4): 408-413 (in Chinese).
- [19] Noda H, Amano H, Arashima K, *et al.* Antitumor activity of marine algae[J]. Hydrobiologia, 1990, 204-205(1): 577-584.
- [20] Kim S C, Park S Y, Hyoun J H, *et al.* The cytotoxicity of *Scytosiphon lomentaria* against HL-60 promyelocytic leukemia cells[J]. Cancer Biotherapy & Radiopharmaceuticals, 2004, 19(5): 641-648.
- [21] Hudson J B, Kim J H, Lee M K, *et al.* Antiviral compounds in extracts of Korean seaweeds: Evidence for multiple activities[J]. Journal of Applied Phycology, 1998, 10(5): 427-434.
- [22] Kuda T, Tsunekawa M, Goto H, *et al.* Antioxidant properties of four edible algae harvested in the Noto Peninsula, Japan[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2005, 18(7): 625-633.
- [23] Kuda T, Tsunekawa M, Hishi T, *et al.* Antioxidant properties dried 'kayamo-nori', a brown alga *Scytosiphon lomentaria* (Scytosiphonales, Phaeophyceae)[J]. Food Chemistry, 2005, 89(4): 617-622.
- [24] 刘志峰, 宫晓黎, 魏淑贞. 五种海藻多糖体外抗血小板聚集作用的观察[J]. 中国海洋药物, 2001, 20(2): 36-38.
Liu Z F, Gong X L, Wei S Z. Observation the effects of five kinds algal polysaccharides on platelets aggregation[J]. Chinese Journal of Marine Drugs, 2001, 20(2): 36-38 (in Chinese).
- [25] 徐秀丽, 范晓, 韩丽君. 山东海区大型海藻抗肿瘤及免疫活性[J]. 海洋科学, 2003, 27(9): 44-48.
Xu X L, Fan X, Han L J. Anti-tumor activity and immunocompetence of macroalgae from Shandong sea area[J]. Marine Sciences, 2003, 27(9): 44-48 (in Chinese).
- [26] 许璞, 张学成, 王素娟, 等. 中国主要经济海藻的繁殖与发育[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013: 10-12.
Xu P, Zhang X C, Wang S J, *et al.* Reproduction and Development of Major Economic Marine Algae in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013: 10-12 (in Chinese).
- [27] 曾呈奎, 王素娟, 刘思俭, 等. 海藻栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984: 14-197.
Zeng C K, Wang S J, Liu S J, *et al.* Marine Algae Cultivation[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1984: 14-197 (in Chinese).
- [28] 李世英, 郑宝福, 费修缙. 坛紫菜北移研究[J]. 海洋与湖沼 1992, 23(3): 297-301.
Li S F, Zheng B F, Fei X G. Northward transplantation of *Porphyra haitanensis* in China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1992, 23 (3): 297-301 (in Chinese).
- [29] 骆其君, 费志清, 马斌, 等. 浙江海区条斑紫菜养成的研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 1999, 18(3): 232-237.
Luo Q J, Fei Z Q, Ma B, *et al.* Studies on the cultivation from seedlings of *Porphyra yezoensis* Ueda in Zhejiang[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 1999, 18(3): 232-237 (in Chinese).
- [30] 方琼珊. 福建海区条斑紫菜的栽培试验[J]. 台湾海峡, 2001, 20(2): 210-215.
Fang Q S. Studies on culture of *Porphyra yezoensis* in sea area of Fujian[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2001, 20(2): 210-215 (in Chinese).
- [31] 李世英, 郑宝福. 坛紫菜与条斑紫菜轮栽试验[J]. 海洋与湖沼, 1992, 23(5): 537-540.

- Li S Y, Zheng B F. Studies on the rotation culture of *Porphyra haitanensis* T. J. Chang et B. F. Zheng and *Porphyra yezoensis* Ueda[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1992, 23(5): 537-540 (in Chinese).
- [32] Andersen R A. Algal Culturing Techniques[M]. Amsterdam: Academic Press, 2005: 269-285.
- [33] He P M, Yarish C. The developmental regulation of mass cultures of free-living conchocelis for commercial net seeding of *Porphyra leucosticta* from Northeast America[J]. *Aquaculture*, 2006, 257(1-4): 373-381.
- [34] 钱树本, 刘东艳, 孙军. 海藻学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005.
- Qian S B, Liu D Y, Sun J. Phycology[M]. Qingdao: Ocean University of China Press, 2005 (in Chinese).
- [35] 李晓丽. 裙带菜、海带多倍体及杂交育种的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008: 1-2.
- Li X L. Study on polyploid and cross breeding of *Undaria pinnatifida* and *Laminaria japonica*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008: 1-2 (in Chinese).
- [36] 王素娟. 海藻生物技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1994:105.
- Wang S J. Seaweed Biotechnology[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1994: 105 (in Chinese).
- [37] 尚书. 海带配子体克隆的扩增培养及多样性分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008: 19-23.
- Shang S. Vegetative amplification and genetic diversity analysis of *Laminaria* gametophyte clones[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008: 19-23 (in Chinese).
- [38] 逢少军. 日光照时数对裙带菜配子体发育的影响[J]. *海洋与湖沼*, 1996, 27(3): 302-307.
- Pang S J. Influence of daylength hours on gametogenesis of *U.pinnatifida*(har.) sur.[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1996, 27(3): 302-307 (in Chinese).
- [39] 潘双叶. 光照、温度对坛紫菜自由丝状体生长的影响[J]. *河北渔业*, 2006(2): 17-20.
- Pan S Y. Influence of temperature and light on free living conchocelis of *Porphyra haitanensis*[J]. *Hebei Fisheries*, 2006(2): 17-20 (in Chinese).

A comparative study on effects of light intensity and photoperiod on the growth and development of filaments of the northern and the southern *Scytosiphon lomentaria* in China

XIA Yunjie, GONG Xiangzhong*, GAO Wei, LUO Wei, ZHANG Jing, WANG Ji

(College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: In the present research, the filaments of *Scytosiphon lomentaria* collected from the northern coastal area (Yantai, Qingdao) and the southern coastal area (Zhoushan, Wenzhou) of China, respectively, were used as the experimental materials. The effects of different light intensity [7.2, 21.6, 36.0, 50.4, 64.8, 86.4, 108.0 and 129.6 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$] and different photoperiod (8L:16D, 10L:14D, 12L:12D, 14L:10D and 16L:8D) on the growth and development of filaments of the northern *S. lomentaria* (Yantai and Qingdao) and the southern *S. lomentaria* (Zhoushan and Wenzhou) were studied by means of isolation and culture, mainly to find out the differences among them. Results indicated that: (1) Light intensity had significant influences on the growth of filaments of *S. lomentaria*, neither higher light intensity [$\geq 108.0 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$] nor lower light intensity [$\leq 21.6 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$] were suitable for the rapid growth of filaments; (2) Cultured for 20d, the increasing ratio of filament biomass and daily average growth rate of filaments of the northern and the southern *S. lomentaria* had reached the maximum under the condition of 64.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; (3) The optimum light intensity on the development of filaments of the northern and the southern *S. lomentaria* was 36.0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, and cultured for 20 d, the sporangial branchlets ratio of filaments of *S. lomentaria* collected from Yantai, Qingdao, Zhoushan and Wenzhou had reached the maximum under the condition of 36.0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, and the values were 34.72% \pm 0.91%, 35.06% \pm 1.17%, 35.37% \pm 0.59% and 34.33% \pm 0.41%, respectively; (4) Cultured for 20 d, the increasing ratio of filament biomass and daily average growth rate of filaments of the northern *S. lomentaria* had reached the maximum under the condition of 14L:10D, and the values were 82.75% \pm 2.39%, 3.00% \pm 0.36% and 81.28% \pm 4.53%, 3.04% \pm 0.49%, while the southern *S. lomentaria* had reached the maximum under the condition of 16L:8D, and the values were 89.52% \pm 0.88%, 3.18% \pm 0.30% and 88.66% \pm 7.09%, 3.22% \pm 0.26% respectively; (5) The appropriate photoperiod on the development of filaments of the northern *S. lomentaria* was 8L:16D—10L:14D, while the appropriate photoperiod on the development of filaments of the southern *S. lomentaria* was 10L:14D—12L:12D.

Key words: *Scytosiphon lomentaria*; filaments; light intensity; photoperiod; growth; development

Corresponding author: GONG Xiangzhong. E-mail: gxzhw@163.com

Funding projects: National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA10A413)