

## 温度对龙须菜“2007”生理生化特性的影响\*

# The Effects of Temperature on the Physiological and Biochemical Characteristics of Strain “2007” of *Gracilaria lemaneiformis*

钟志海,陈伟洲\*\*,杨雨玲,陈佩,黄中坚

ZHONG Zhi-hai, CHEN Wei-zhou, YANG Yu-ling, CHEN Pei, HUANG Zhong-jian

(汕头大学海洋生物研究所,广东汕头 515063)

(Marine Biology Institute, Shantou University, Shantou, Guangdong, 515063, China)

**摘要:**【目的】龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)“2007”新品系具有耐高温、生长快、琼胶含量高等特点,目前已经在中国南方海域进行栽培推广,研究温度对龙须菜“2007”生理生化特性的影响具有重要意义。【方法】测定在不同温度(15℃,20℃,25℃,30℃)培养条件下龙须菜“2007”新品系的相对生长速率(RGR)、光合色素含量、硝酸还原酶活性、叶绿素荧光参数等生理生化特性的变化。【结果】在15~25℃温度范围内,龙须菜的最大相对电子传递速率( $rETR_{max}$ )无明显差异( $P > 0.05$ ),但显著高于30℃时( $P < 0.05$ )。在15~30℃范围内,饱和光强( $I_k$ )却随着温度的增加而显著的下降,两两存在显著性差异( $P < 0.05$ )。随着温度的递增, $Q_{10}$ (反映硝酸还原活性与温度关系)显著下降( $P < 0.05$ ),到达30℃高温时, $Q_{10}$ 已经下降到1.13,说明30℃高温对龙须菜“2007”的生理活性有一定的损伤,硝酸还原酶活性降低,光合作用的能力显著下降。【结论】最适合龙须菜“2007”生长的温度为20℃,此时,龙须菜“2007”RGR最大,叶绿素(Chl a)和藻胆蛋白的含量最高。

**关键词:**龙须菜 相对生长速率 光合色素 硝酸还原酶 叶绿素荧光

**中图分类号:**S968.43<sup>+</sup>4 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2014)06-0600-06

**Abstract:**【Objective】*Gracilaria lemaneiformis* new strain “2007” has the features of high temperature resistance, rapid growth, high contents of agar, and so on. At present it has been cultured in southern of China. Thus, it is important to investigate the effects of temperature on the physiological and biochemical characteristics of strain “2007” of *G. lemaneiformis*. 【Methods】The strain “2007” of *G. lemaneiformis* was cultivated at various temperatures of 15℃, 20℃, 25℃ and 30℃, and its responses to temperature were studied, including relative growth rate (RGR), contents of photosynthetic pigments, nitrate reductase activity, and chlorophyll fluorescence parameters. 【Results】The maximum relative electron transfer rate ( $rETR_{max}$ ) had no significant difference ( $P > 0.05$ ) between 15℃ and 25℃ but significantly higher than

30℃ ( $P < 0.05$ ). Being cultivated between 15℃ and 30℃, the saturation light ( $I_k$ ) of strain “2007” of *G. lemaneiformis* markedly decreased with the increasing temperature, having significant difference between each other ( $P < 0.05$ ). The value of  $Q_{10}$  gradually decreased with increasing temperature ( $P < 0.05$ ), and decreased to 1.13 at 30℃, indicating that the high temperature of 30℃ damaged the physiological activi-

收稿日期:2014-8-10

修回日期:2014-8-30

作者简介:钟志海(1988-),男,硕士研究生,主要从事大型海藻生物学与生态学研究。

\* 国家海洋863计划项目(2012AA10A411),农业科技成果转化资金项目(2012GB2E000340)和广东省科技计划项目(2012B091100394)资助。

\*\* 通讯作者:陈伟洲(1971-),男,教授级高级工程师,硕士生导师,主要从事海藻生物学研究,E-mail:wzchen@stu.edu.cn.

ties of strain "2007" of *G. lemaneiformis* to a certain degree, inducing the decrease in nitrate reductase activity and lower capacity of photosynthesis. **【Conclusion】** The results showed that the suited growth temperature was 20°C. The relative growth rate, the contents of chlorophyll a, carotenoid and phycobiliprotein of strain "2007" of *G. lemaneiformis* were the highest cultured at 20°C.

**Key words:** *Gracilaria lemaneiformis*, relative growth rate, photosynthetic pigments, nitrate reductase activity, chlorophyll fluorescence parameters

**【研究意义】** 龙须菜 (*Gracilaria lemaneiformis*) 是一种具有重要经济价值的海藻, 可以作为生产琼胶的原料也可以作为鲍鱼等贵重海珍品的饵料; 同时, 龙须菜可以吸收海水中大量的 N 和 P 等营养盐, 对海水的净化起到了重要作用, 作为生物过滤器来影响近海岸的生态系统。龙须菜 "2007" 品系 (原命名为 07-2) 具有耐高温、生长快、琼胶含量高特点<sup>[1]</sup>, 适合在中国南方海域进行栽培。**【前人研究进展】** 目前, 国内的研究多集中在不同环境因子 (温度、光照、盐度、营养盐等) 对龙须菜的生长和生化组分及抗氧化性的影响<sup>[2~5]</sup>。**【本研究切入点】** 温度对龙须菜, 特别是对龙须菜 "2007" 新品系的生理生化特性, 如硝酸还原酶的活性、光合作用的研究未见报道。**【拟解决的关键问题】** 主要研究温度对于龙须菜 "2007" 的生长、光合色素、硝酸还原酶及光合作用的影响, 为今后龙须菜的生理生态研究及栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与培养

实验材料: 龙须菜 "2007" 采集于广东省汕头市南澳岛深澳湾的养殖区。

预培养和实验培养条件设置: 智能型光照培养箱 (GXZ-300D), 光照强度  $111 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 光暗周期 12 h : 12 h, 培养的海水自然灭菌, 盐度为 28。

实验材料的预培养: 在 4°C 条件下 3 h 内带回室内, 在恒温 20°C 的培养箱中培养 3 d。

实验培养: 预培养后, 挑选健康无溃烂、粗细均匀的藻体鲜重 4 g 于 1000 mL 三角烧瓶中培养, 设置 4 个温度梯度 (15°C, 20°C, 25°C, 30°C), 每天更换一次灭菌海水 (100  $\mu\text{mol/L}$   $\text{NaNO}_3$ , 10  $\mu\text{mol/L}$   $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  加富), 培养 7 d 后进行取样分析, 每个处理进行 3 次重复。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 相对生长速率 (Relative growth rate, RGR)

藻体在培养 7 d 内鲜重 (FM) 的变化来表示藻体的生长, RGR 计算公式:

$$RGR (\% \cdot \text{d}^{-1}) = [\ln (M_t / M_0) / t] \times 100.$$

其中  $M_0$  为初始鲜重,  $M_t$  为  $t$  天后的鲜重, 藻体称量前用吸水纸吸干藻体表面水分。

#### 1.2.2 叶绿素 a 及类胡萝卜素的测定

称取约 0.1 g 鲜重的藻体置于 5 mL 甲醇中, 放入 4°C 冰箱避光过夜 24 h 后, 用分光光度计测定上清液的吸光值。叶绿素 a 的含量根据 Porra (2002) 公式计算<sup>[6]</sup>, 类胡萝卜素的含量根据 Parsons and Stricklan (1963)<sup>[7]</sup> 公式计算:

$$\text{叶绿素 a} (\mu\text{g/mL}) = 16.29 \times (A_{665} - A_{750}) - 8.54 \times (A_{652} - A_{750});$$

$$\text{类胡萝卜素} (\mu\text{g/mL}) = 7.6 \times [(A_{480} - A_{750}) - 1.49 \times (A_{510} - A_{750})].$$

#### 1.2.3 藻胆蛋白含量测定

参照 TA Kursar (1983)<sup>[8]</sup> 的方法, 取 0.15 g 鲜重的藻体, 加 1 mL 浓度为 0.1 mol/L 的磷酸缓冲液 (pH=5.5), 用研钵研磨至匀浆, 然后用磷酸缓冲液清洗研钵, 最后定容至 5 mL, 整个过程在 0~4°C 下进行, 尽可能避光, 在 4°C 下 5000 g 离心 15 min, 上清液在 498.5 nm、614 nm 和 651 nm 下测其吸光值, 依据下列公式分别计算别藻蓝蛋白 (APC)、藻蓝蛋白 (PC) 和藻红蛋白 (PE) 的含量 ( $\mu\text{g/mL}$ ):

$$APC = 181.3A_{651} - 22.3A_{614};$$

$$PC = 151.1A_{614} - 99.1A_{651};$$

$$PE = 155.8A_{498.5} - 40.0A_{614} - 10.5A_{651}.$$

#### 1.2.4 硝酸还原酶的测定

根据 Corzo and Niell (1991)<sup>[9]</sup> 的测定方法, 将 0.3 g 鲜重的藻体放入 5 mL 反应介质中, 充 2 min  $\text{N}_2$  以排除溶液中的  $\text{O}_2$ , 来防止产物  $\text{NO}_2^-$  被重新氧化成  $\text{NO}_3^-$ , 然后将不同温度培养下的藻体分别置于 15°C, 20°C, 25°C, 30°C 温度下, 黑暗条件下反应 2 h, 然后测定反应液中的  $\text{NO}_2^-$  的含量, 单位质量的藻体在单位时间内生成的  $\text{NO}_2^-$  量来表示硝酸还原酶的活性 (Nitrate reductase, NR)。

反应液的配制: 0.2 mol/L 磷酸缓冲液 (pH=7.9), 1 mmol/L EDTA, 0.1% 的丙醇, 50 mmol/L  $\text{NaNO}_3$ , 10  $\mu\text{mol}$  的葡萄糖。

$Q_{10}$  的计算: 根据公式  $\ln Q_{10} = 10(\ln V_1 - \ln V_2)/(T_2 - T_1)$  计算出  $Q_{10}$  的值<sup>[10]</sup>,  $V_1$  和  $V_2$  分别代表温度  $T_1$  和  $T_2$  时硝酸还原酶活性, 温度跨度为 15~30℃;  $Q_{10}$  的值用来分析不同培养温度条件下藻体的硝酸还原酶活性与温度的关系。

### 1.2.5 叶绿素荧光参数的测定

藻体在黑暗条件下适应 15min 后, 用德国 Walt 公司生产的 Imagine-PAM 测定叶绿素荧光参数。

快速光响应曲线 (RLC) 的测定是使用 11 个光强梯度 ( $1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $21 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $56 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $111 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $186 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $281 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $336 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $396 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $461 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $531 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $611 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的光化光, 每个光强处理时长设定为 10 s。

非光化学淬灭 (NPQ) 通过以下公式计算:

$NPQ = (F_m - F_m')/F_m'$ 。其中  $F_m$  代表暗适应后的最大叶绿素荧光, 而  $F_m'$  则为在预设的光化光背景下的最大叶绿素荧光。

相对电子传递速率 ( $rETR$ ) 通过以下的公式计算:

$rETR = \text{yield} \times 0.5 \times \text{photon flux density (PFD)}$ 。其中 yield 代表光系统 II 的有效光化学效率, 系数 0.5 代表光系统 II 吸收的光量子占总量的 50%,  $PFD$  代表光化光的强度 ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

快速光响应曲线根据 Eilers and Peeters(1988) 进行拟合<sup>[11]</sup>, 公式如下:

$$rETR = I/(aI^2 + bI + c),$$

$$I_k = (c/a)1/2, \alpha = 1/c,$$

$$rETR_{\max} = 1/[b + 2(ac)1/2]。$$

其中  $rETR_{\max}$  代表最大相对电子传递速率,  $I$  代表光强,  $\alpha$  代表光能利用效率,  $I_k$  代表饱和光强,  $a, b, c$  是参数。

### 1.3 数据处理

试验数据采用 Origin 7.5 统计软件进行数据处理及统计分析。用 one-way ANOVA 检验差异的显著水平, 设置显著水平为  $P = 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 龙须菜“2007”的生长

在不同温度 (15℃, 20℃, 25℃, 30℃) 下培养 7 d 后, 龙须菜“2007”的生长发生了明显的变化 (图 1)。在 20℃ 时, 龙须菜“2007”有最大的相对生长率, 与其他温度之间有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。当温度为

25℃ 时, 在培养后期, 藻体有少量变绿或腐烂, 在 30℃ 时, 腐烂的藻体量有相应的增加。

### 2.2 光合色素的变化

藻体为了适应温度胁迫, 藻体细胞内含物的含量及组成必然发生变化来应对外界的环境变化。图 2 所示, 温度对龙须菜“2007”的光合色素的含量产生了显著的影响。20℃ 有利于光合色素的积累, 随着温度的升高, 光合色素的含量逐渐减小, 当温度到达 30℃ 高温时, 含量降到了最低值, 显著低于其它温度 ( $P < 0.05$ ), 说明高温对光合色素具有破坏作用。

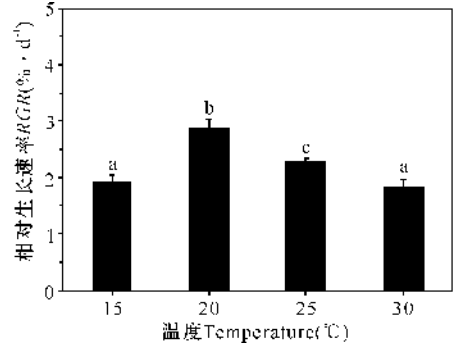


图 1 温度对龙须菜“2007”生长的影响,  $n = 3$

Fig. 1 The effects of temperature on the growth of strain “2007” of *G. lemaneiformis*,  $n = 3$

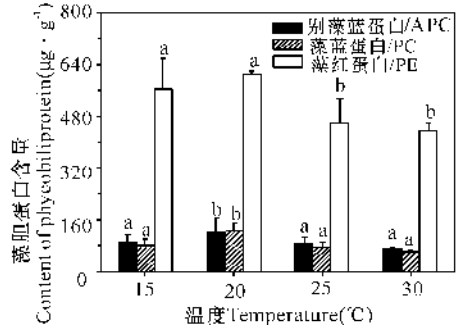
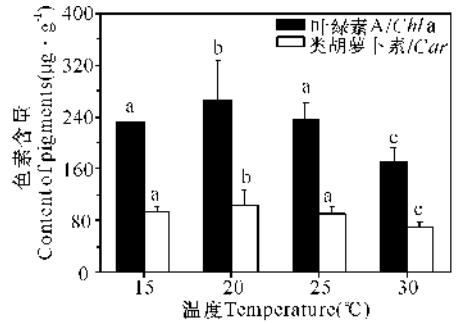


图 2 温度对龙须菜“2007”的光合色素的影响,  $n = 3$

Fig. 2 The effects of temperature on the photosynthetic pigments of strain “2007” of *G. lemaneiformis*,  $n = 3$

### 2.3 硝酸还原酶活性的变化

不同温度下培养的龙须菜“2007”, 置于不同温度 (15℃, 20℃, 25℃, 30℃) 下测定其硝酸还原酶活性, 能够显示出温度对硝酸还原酶的积累或活性的影响。如图 3 所示, 当在相同温度下培养的龙须菜“2007”置

于不同温度下测定时,硝酸还原酶的活性随着温度的增加而增加,在 30℃时,硝酸还原酶具有最高的活性,说明硝酸还原酶活性的最适温度为 30℃。而将不同温度培养下的龙须菜“2007”置于相同温度下测定时,硝酸还原酶的活性随着温度的增加而减小,在 15℃时,藻体有最高的活性,而在 30℃却有最低值,说明在 15℃时,藻体含有更多的硝酸还原酶,而在 30℃时,含量的降低导致活性的下降。 $Q_{10}$  随着培养温度的增加显著下降 ( $P < 0.05$ ),只有 15℃条件下的龙须菜“2007”的  $Q_{10}$  大于 2,其他温度条件下的均小于 2。

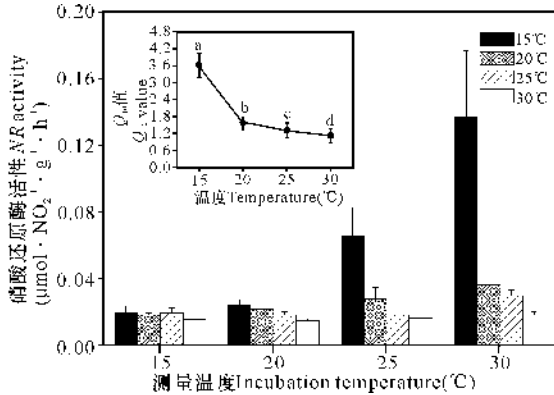


图3 温度对龙须菜“2007”的硝酸还原酶的影响以及  $Q_{10}$ ,  $n = 3$

Fig. 3 The effect of temperature on the nitrate reductase of strain “2007” of *G. lemaneiformis* and the value of  $Q_{10}$ ,  $n = 3$

#### 2.4 叶绿素荧光参数的变化

在 15~25℃范围内,龙须菜“2007”的相对电子传递速率( $rETR$ )明显高于 30℃时(图 4)。根据图 4 计算得到的荧光参数如表 1 所示,在 15~25℃范围内,藻体的最大相对电子传递速率( $rETR_{max}$ )无明显差异 ( $P > 0.05$ ),而显著高于 30℃的,约高出 60%。但是在 20℃时,藻体的光能利用效率( $\alpha$ )最低 ( $P < 0.05$ ),而饱和光强( $I_k$ )却随着温度的增加而显著下降,两两存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

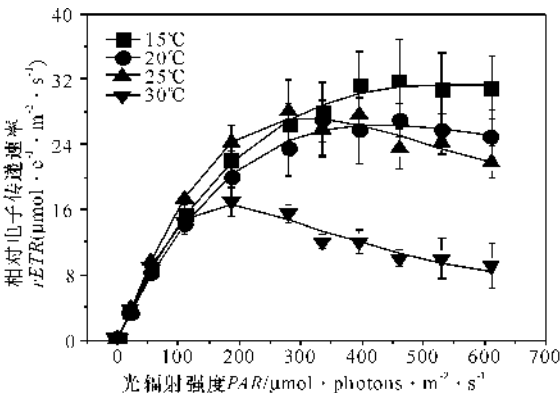


图4 温度对龙须菜“2007”的快速光曲线的影响,  $n = 3$

Fig. 4 The effect of temperature on the rapid light curve of strain “2007” of *G. lemaneiformis*,  $n = 3$

表 1 不同温度下培养的龙须菜“2007”光响应曲线拟合参数  
Table 1 The rapid light curve (RLC) of strain “2007” of *Gracilaria lemaneiformis* cultured under different temperature.

Temperature (°C)	$rETR_{max}$	$\alpha$	$I_k$
15°C	28.7 ± 1.22 <sup>a</sup>	0.171 ± 0.046 <sup>a</sup>	542.5 ± 7.55 <sup>a</sup>
20°C	25.7 ± 3.01 <sup>a</sup>	0.156 ± 0.005 <sup>b</sup>	383.1 ± 27.3 <sup>b</sup>
25°C	24.6 ± 1.82 <sup>a</sup>	0.181 ± 0.022 <sup>a</sup>	305.9 ± 10.3 <sup>c</sup>
30°C	16.6 ± 1.31 <sup>b</sup>	0.181 ± 0.022 <sup>a</sup>	182.4 ± 12.1 <sup>d</sup>

注:不同字母表示不同处理之间有显著性差异,数值为平均值±标准差,  $n = 3$

Note: The value represents mean ± SD, and different letters represent significant difference between values,  $n = 3$

### 3 讨论

本文通过测定龙须菜“2007”在不同温度下(15℃, 20℃, 25℃, 30℃)的生长及生理生化的变化来探讨温度对其的影响。研究表明:

(1) 温度在 20℃时,  $RGR$  最大, 高达  $2.9\% \cdot d^{-1}$ , 随着温度的上升  $RGR$  下降。因此, 龙须菜“2007”生长的最适温度为 15~25℃。郭翠等<sup>[12]</sup>的研究结果表明, 在 23℃时龙须菜的生长较好, 与本文的结论比较接近。赵建刚等的研究也认为龙须菜最佳生长温度为 20℃<sup>[13]</sup>,  $RGR$  约为  $1.4\% \cdot d^{-1}$ , 低于本文的结果, 可能与其培养条件有关, 而毛玉泽等<sup>[14]</sup>在研究龙须菜的生长、光合作用及对扇贝排泄氮磷的吸收实验中发现 15~25℃都适宜龙须菜生长, 其中 20℃龙须菜具有较高的相对生长率 ( $RGR$ ), 为  $2.8\% \cdot d^{-1}$ , 结论与本文的结果一致。

(2) 温度是影响海藻分布和生理的一个重要因子, 温度主要通过控制藻体内的生物化学反应(如光合作用速率等)来影响藻体的生长及生化组分<sup>[15]</sup>, 藻体内的生化反应是由各种关键性酶催化的, 而酶的活性在一定温度范围内随着温度的增加而加强, 超过这个范围酶的活性就会受到影响, 从而导致生化反应不能正常的进行, 最终影响藻体的生长及生化组分<sup>[16]</sup>, 藻体在不同温度下经过长期适应, 藻体的内部生化组分将会发生变化来适应外界环境的变化<sup>[15]</sup>。藻胆蛋白作为藻体的捕光系统<sup>[17]</sup>, 应对外界环境的变化其含量及组成必然发生改变<sup>[18]</sup>。本研究中, 藻体在 20℃时, 藻胆蛋白的含量最高, 与藻体的生长趋势相一致。

(3) 15℃培养下的龙须菜“2007”的硝酸还原酶在不同测量温度(15℃, 20℃, 25℃和 30℃)下活性均处于最高, 在 20~30℃培养温度范围内, 随着温度的上升活性逐渐减小, 可能与藻体内含有的硝酸还原酶的

量逐渐降低有关,具体原因有待进一步研究。而不同培养温度下的龙须菜“2007”的硝酸还原酶的活性的最大值均出现在 30℃,说明硝酸还原酶活性的最适温度为 30℃。硝酸还原酶活性的大小必须与光合作用相适应,藻体才不会积累过多的有毒害作用的  $\text{NO}_2^-$  [19],光合作用也可以为硝态氮的还原过程提供足够的还原力和碳骨架,及时将  $\text{NO}_2^-$  还原为  $\text{NH}_4^+$ ,来合成蛋白质,消除  $\text{NO}_2^-$  对藻体的损伤。当培养温度过高(30℃)时,硝酸还原酶活性的降低导致了藻体内毒害物质( $\text{NO}_2^-$  等)的进一步积累,影响了光合作用系统以及生化组分,最终影响了藻体的生长。 $Q_{10}$  随着培养温度的递增而逐渐减小,当温度为 30℃时, $Q_{10}$  仅仅为 1.13 远小于 2,进一步说明过高的培养温度使得藻体内活性酶浓度的下降[20]。

(4)光合色素作为光合作用的捕光系统及反应中心[21],其含量的变化必然会引起藻体光合作用的变化,温度在 15~25℃范围内,藻体的最大相对电子传递速率( $rETR_{\text{max}}$ ) 两两相差不显著( $P > 0.05$ ),但比 30℃的约高出 60%,龙须菜“2007”在 30℃高温下,随着光合色素含量的降低,其光合作用的能力也显著下降。

综上所述,适合龙须菜“2007”生长的适合温度在 15~25℃范围内,20℃是其生长的最佳温度。当温度过高时(30℃),外界的高温对藻体的光合系统、色素及硝酸还原酶都有一定的破坏,不利于藻体的生长。

#### 参考文献:

[1] 陈伟洲,徐涤,王亮根,等.两个龙须新品系经济性状及琼胶特性的初步研究[J].中国海洋大学学报:自然科学版,2009,39(3):437-442.  
Chen W Z, Xu D, Wang L G, et al. Preliminary study on economic characteristics and agar characteristics of two new strains of *Gracilaria lemaneiformis* [J]. Periodical of Ocean University of China: Natural Sciences, 2009, 39(3): 437-442.

[2] 杨文鸽,谢果凰,徐大伦,等.龙须菜多糖的降解及其降解产物的抗氧化活性[J].水产学报,2009,33(2):342-347.  
Yang W G, Xie G H, Xu D L, et al. Degradation of *Gracilaria lemaneiformis* polysaccharide and antioxidation of its degraded products[J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(2): 342-347.

[3] 李枫,邹定辉,刘兆普,等.氮磷水平对龙须菜生长和光合特性的影响[J].植物生态学报,2009,33(6):1140-1147.  
Li F, Zou D H, Liu Z P, et al. Effects of nitrogen and phosphorous levels on growth and photosynthetic traits

of *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(6): 1140-1147.

[4] 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,2005,31(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 Sciences, 2005, 31(11): 22-26.

[5] 刘树霞,徐军田,蒋栋成.温度对经济红藻龙须菜生长及光合作用的影响[J].安徽农业科学,2009,37(33):16322-16324.  
Liu S X, Xu J T, Jiang D C. The effects of temperature on the growth and photosynthesis of economic red macroalga *Gracilaria lemaneiformis* [J]. Journal of Anhui Agric Sci, 2009, 37(33): 16322-16324.

[6] Porra R J. The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls a and b [J]. Photosynth Res, 2002, 73: 149-156.

[7] Parsons T R, Strickland J D H. Discussion of spectrophotometric determination of marine plant pigments, with revised equation for ascertaining chlorophylls and carotenoids [J]. Journal of Marine Research, 1963, 21(3): 155-163.

[8] Kursar T A, van der Meer J, Alberte R S. Light-harvesting system of the red alga *Gracilaria tikvahiae*. Biochemical analyses of pigment mutations [J]. Plant Physiology, 1983, 73: 353-360.

[9] Corzo A, Niell F X. Determination of nitrate reductase activity in *Ulva rigida* C. Agardh by the in situ method [J]. J Exp Mar Biol Ecol, 1991, 146: 181-191.

[10] Berges J A, Varela D E, Harrison P J. Effects of temperature on growth rate, cell composition and nitrogen metabolism in the marine diatom *Thalassiosira pseudonana* (Bacillariophyceae) [J]. Mar Ecol Prog Ser, 2002, 225: 139-146.

[11] Eilers P, Peeters J. A model for the relationship between light intensity and the rate of photosynthesis in phytoplankton [J]. Ecological Modelling, 1988, 42(3): 199-215.

[12] 郭翠,陈伟洲,曹会彬,等.不同龙须菜品系在高温胁迫下的生理响应比较[J].南方水产科学,2011,7(3):14-19.  
Guo C, Chen W Z, Cao H B, et al. Comparing physiological response of different strains of *Gracilaria lemaneiformis* to high temperature stress [J]. South China Fisheries Science, 2011, 7(3): 14-19.

[13] 赵建刚,叶长鹏.温度和营养盐胁迫对龙须菜氮氮吸收

- 率及生长速率的影响[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(6): 57-60.
- Zhao J G, Ye C P. Effects of stress of temperature and nutrients on ammonia nitrogen uptake rate and growth rate of *Gracilaria lemaneiformis* [J]. Journal of Hydroecology, 2011, 32(6): 57-60.
- [14] 毛玉泽, 杨红生, 周毅, 等. 龙须菜 (*Gracilaria lemaneiformis*) 的生长、光合作用及其对扇贝排泄氮磷的吸收[J]. 生态学报, 2006, 2(10): 3225-3231.
- Mao Y Z, Yang H S, Zhou Y, et al. Studies on growth and photosynthesis characteristics of *Gracilaria lemaneiformis* and its capacity to uptake ammonium and phosphorus from scallop excretion[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 2(10): 3225-3231.
- [15] Davison I R. Environmental effects on algal photosynthesis: Temperature[J]. Journal of Phycology, 1991, 27: 2-8.
- [16] 刘静雯, 董双林. 光照和温度对细基江蓠繁枝变型的生长及生化组成影响[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 2001, 31(3): 332-338.
- Liu J W, Dong S L. Interaction between light and temperature on the growth and levels of chemical constituents of *Gracilaria tenuistipitata* var. liui[J]. Journal of Ocean University of Qingdao: Natural Sciences, 2001, 31(3): 332-338.
- [17] Gantt E. Pigments protein complexes and the concept of the photosynthetic unit: Chlorophyll complexes and phycobilisomes[J]. Photosynth Res, 1996, 48(112): 47-53.
- [18] Shen D L, Wu M. Chromosomal and mutagenic study of the marine macroalga, *Gracilaria tenuistipitata* [J]. Journal of Applied Phycology, 1995, 7(1): 25-31.
- [19] May Sandar Kyaing, 顾立江, 程红梅. 植物中硝酸还原酶和亚硝酸还原酶的作用[J]. 生物技术进展, 2011, 1(3): 159-164.
- May Sandar Kyaing, Gu L J, Chen H M. The role of nitrate reductase and nitrite reductase in plant[J]. Current Biotechnology, 2011, 1(3): 159-164.
- [20] 巩东辉, 乔辰. 温度对螺旋藻呼吸作用的影响[J]. 内蒙古科技大学学报, 2010, 29(1): 73-75.
- Gong D H, Qiao C. Effects of temperature on the respiratory of *Spirulina* [J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2010, 29(1): 73-75.
- [21] 韩博平, 韩志国, 付翔. 藻类光合作用机理与模型[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 12.
- Han B P, Han Z G, Fu X. The Model and Mechanism of Photosynthesis of Algae[M]. Beijing: Science Press, 2003: 12.

(责任编辑: 竺利波)

(上接第 599 页 Continue from page 599)

- [3] 刘思俭. 我国江蓠的种类和人工栽培[J]. 湛江海洋大学学报, 2001, 21: 71-79.
- Liu S J. Types and artificial cultivation of *Gracilaria* in China[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2001, 21: 71-79.
- [4] Fei X. Solving the coastal eutrophication problem by large scale seaweed cultivation[J]. Hydrobiologia, 2004, 512: 145-151.
- [5] Yang Y F, Fei X G, Song J M, et al. Growth of *Gracilaria lemaneiformis* under different cultivation conditions and its effects on nutrient removal in Chinese coastal waters[J]. Aquaculture, 2006, 254: 248-255.
- [6] 刘思俭, 曾淑芳, 揭振英. 我国细江蓠的人工栽培[J]. 海洋渔业, 1986(4): 174-176.
- Liu S J, Zeng S F, Jie Z Y. *Gracilaria tenuistipitata* cultivated in China[J]. Marine Fisheries, 1986(4): 174-176.
- [7] 张学成, 费修缙, 王广策, 等. 江蓠属海藻龙须菜的基础研究与大规模栽培[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39: 947-954.
- Zhang X C, Fei X G, Wang G C, et al. Genetic studies and large scale cultivation of *Gracilaria lemaneiformis* [J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39: 947-954.
- [8] Marinho-Soriano E. Agar polysaccharides from *Gracilaria* species (Rhodophyta, Gracilariaceae)[J]. Journal of Biotechnology, 2001, 89: 81-84.

(责任编辑: 竺利波)