

doi: 10.3969/j. issn. 2095 - 0780. 2012. 02. 008

不同温度和盐度条件对脆江蓠生长及其生化组分的影响

金玉林, 吴文婷, 陈伟洲

(汕头大学海洋生物研究所, 广东 汕头 515063)

摘要: 在不同温度(14、17、20、23 和 26)和不同盐度(5、10、15、20、25、30 和 35)条件下培养脆江蓠(*Gracilaria chouae*)，观察测定其生长及藻体生化组分的变化。试验结果显示，脆江蓠生长的适宜温度为14~26，最适温度为17~20，在此温度条件下藻体可以保持最快相对生长速率(relative growth rate, RGR)；温度高于20时脆江蓠的生长受到抑制。在生长状态、光合色素和抗氧化等方面，脆江蓠对低温的耐受能力要比高温强。脆江蓠生长的适宜盐度为20~35，最适盐度为30，在此盐度条件下藻体可以保持最快RGR，盐度低于20时脆江蓠的生长受到抑制。高盐度培养条件下脆江蓠在生长状态、光合色素和抗氧化等方面强于低盐度培养条件。

关键词: 脆江蓠；温度；盐度；生长；生化组分

中图分类号: S 968. 43⁺⁴

文献标志码: A

文章编号: 2095 - 0780 - (2012) 02 - 0051 - 07

Effects of different temperature and salinity on growth and biochemical constituents of *Gracilaria chouae*

JIN Yulin, WU Wenting, CHEN Weizhou

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

Abstract: We study the effects of different temperature (14, 17, 20, 23, 26) and salinity (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35) on the growth and biochemical constituents of *Gracilaria chouae*. Results indicate that the appropriate temperature for its growth is 14~26 and optimum is 17~20. Under 17~20, *G. chouae* obtains maximal relative growth rate. But when the temperature is higher than 20, the growth of *G. chouae* is inhibited. In addition, its tolerance to low temperature is better than that of high temperature in terms of growth performance, photosynthetic pigments and antioxidant enzymes. The appropriate salinity for its growth is 20~35 and optimum is 30. Under the salinity of 30, *G. chouae* obtains maximal relative growth rate. Its growth is inhibited when salinity is below 20. *G. chouae* treated with high salinity has better growth performance, photosynthetic pigment and antioxidant enzymes than that with low salinity.

Key words: *Gracilaria chouae*; temperature; salinity; growth; biochemical constituents

脆江蓠(*Gracilaria chouae*)隶属于红藻门、杉藻目、江蓠科、江蓠属，广泛分布于中国东南沿海地区^[1]。随着鲍鱼养殖技术的成熟，鲍鱼增、养殖业从海区底播增殖、海区筏式养殖发展到工厂化

养殖，养殖规模逐渐扩大，需要大量优良饲料^[2]。脆江蓠以其藻体质脆和肥厚多汁的特点，成为鲍鱼养殖的优良饲料之一^[3]。另外，脆江蓠具有一定的营养价值，口感和风味独特，可以作为海洋蔬菜

收稿日期: 2011-08-03; 修回日期: 2011-11-18

资助项目: 国家海洋公益性行业科研专项(200905020)；广东省科技计划项目(2010B020201015)；广东高校工程技术研究中心项目(GCZX-A0908)；广东省汕头市科技计划项目(2010-126)

作者简介: 金玉林(1988-)，男，硕士研究生，从事大型海藻栽培生物学研究。E-mail: 09yljin@stu.edu.cn

通讯作者: 陈伟洲, E-mail: wzchen@stu.edu.cn

供食用。

国内有开展脆江蓠凝集素研究工作的报道^[4]，但目前未见关于环境因子对脆江蓠生长及生化组分影响的研究报道。笔者通过分别测定不同温度和不同盐度培养条件对脆江蓠的生长及生化组分的影响，以期确定脆江蓠生长最适合的温度和盐度条件，为其栽培生产提供技术指导和依据。

1 材料与方法

1.1 材料

脆江蓠的试验材料采集于汕头市南澳岛汕头大学海洋生物临海实验站养殖海域(23°20' N, 116°55' E)。

1.2 试验前预培养条件

选择健康一致的藻体，用镊子仔细除去表面附着的杂藻，用大量消毒海水冲洗后放在室内长方形玻璃缸中扩大培养。培养温度为20℃，盐度为30，光暗周期为12 h : 12 h(L:D)，光照强度为120 μmol·(m²·s)⁻¹。试验用海水(pH 8.1，盐度30)经过过滤灭菌，冷却后备用。

1.3 试验设计和培养条件

取处理后同枝且形态颜色接近的脆江蓠藻体2 g培养于1 L三角烧瓶中，在智能型光照培养箱(GXZ-300D，中国宁波江南仪器厂出品)中恒温进行培养，温度试验光照强度120 μmol·(m²·s)⁻¹，光暗周期为12 h : 12 h，海水盐度为30。试验共设置5个温度梯度(14、17、20、23和26℃)，每个温度梯度重复3次。盐度试验光照强度为120 μmol·(m²·s)⁻¹，光暗周期为12 h : 12 h，海水温度为20℃。试验共设置7个盐度梯度(5、10、15、20、25、30和35)，每个盐度梯度重复3次。

1.4 生长的测定

试验周期为11 d，培养第1天开始测定脆江蓠藻体鲜质量(FW)，然后每2 d测定1次，总共测定6次。测定时用吸水纸吸去藻体表面水分，称质量后及时转移入培养水体中防止藻体水分过度流失，记录藻体的质量和颜色等性状变化。

脆江蓠相对生长速率计算公式：

$$\text{RGR}(\% \cdot \text{d}^{-1}) = \ln(W_T / W_0) \times 1 / T \times 100\%$$

其中 W_T 是开始培养时藻体的鲜质量(g)； W_0 是培养结束时藻体的鲜质量(g)； T 为培养时间(d)。

1.5 生化组分的测定

在试验的最后一天测定脆江蓠的光合色素叶绿素a(Chl-a)与类胡萝卜素(Car)、藻胆蛋白[藻红蛋白(PE)和藻蓝蛋白(PC)]、可溶性蛋白(Pro)和超氧化物歧化酶(SOD)活力。 $w(\text{Chl-a})$ 和 $w(\text{Car})$ 测定参考WELLBURN^[5]的方法用分光光度法测定； $w(\text{PE})$ 和 $w(\text{PC})$ 测定参考BEER和ESHEL^[6]的方法； $w(\text{Pro})$ 用考马斯亮蓝G-250染色法^[7]测定；SOD活力采用氮蓝四唑(NBT)光还原法^[8]测定。

1.6 数据处理

试验数据采用Excel 2007和Origin 7.0统计软件进行处理及统计分析。用One-Way ANOVA和Two-Way ANOVA检验差异的显著水平，设显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 温度对生长的影响

不同温度条件下对脆江蓠的RGR的影响见图1。高温组(23和26℃)和低温组(14、17和20℃)之间差异显著($P < 0.05$)，但低温组组间差异不显著($P > 0.05$)。脆江蓠在14~20℃时生长较快，在17℃时RGR达到最高值(24.80%·d⁻¹)。温度高于20℃时脆江蓠的RGR随温度的升高而快速降低，同时藻体的颜色随温度升高而逐渐产生褪色现象。温度达到26℃时藻体末端发生溃烂。

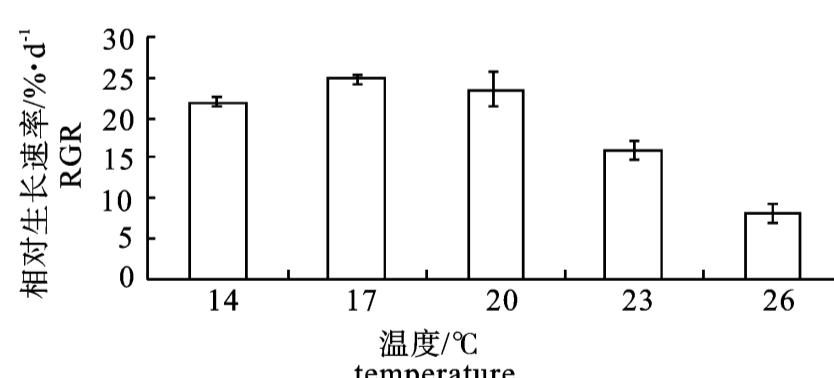
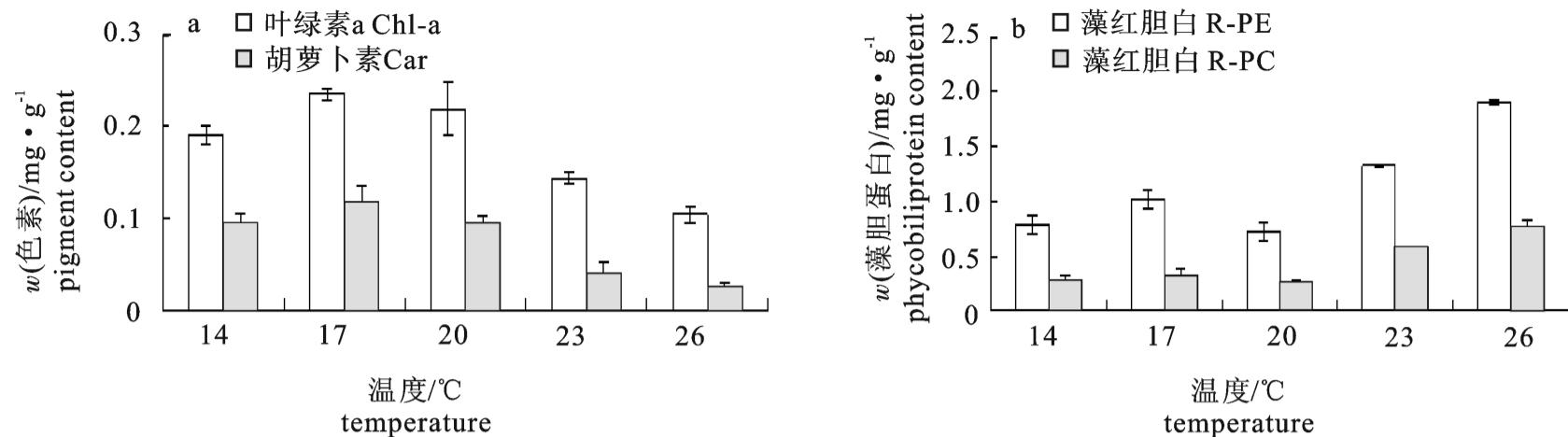
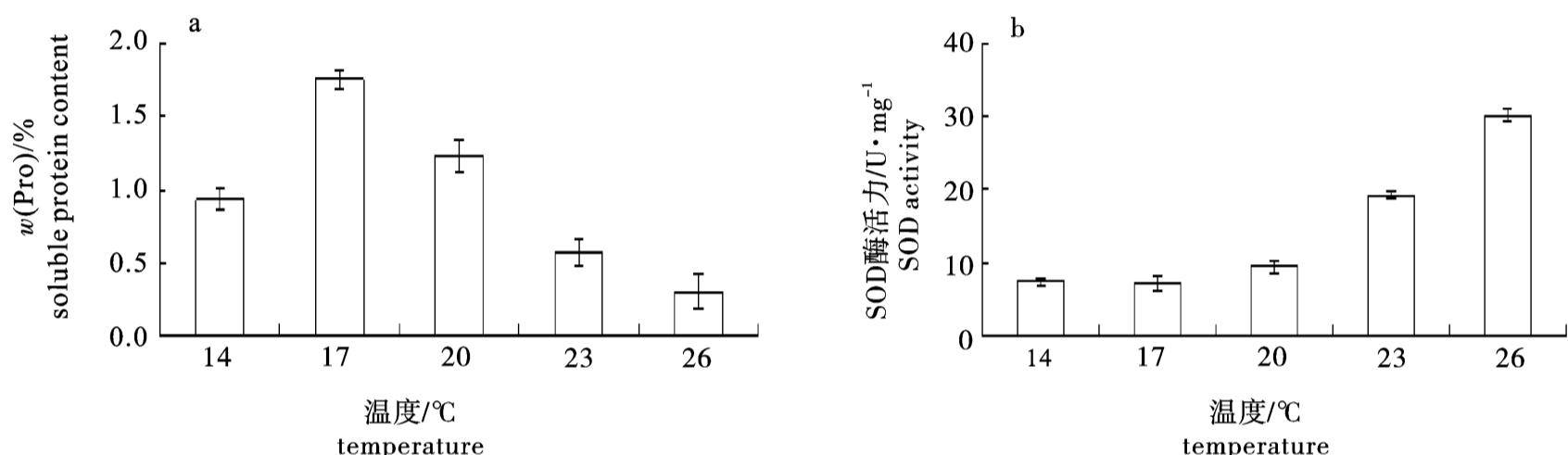


图1 不同温度对脆江蓠相对生长速率的影响($n=3$)

Fig. 1 Effects of different temperatures on RGR of *G. chouae*

2.2 温度对生化组分的影响

低温组脆江蓠 $w(\text{Chl-a})$ 与高温组之间的差异显著($P < 0.05$)，但低温组组间差异不显著($P > 0.05$)，最高值出现于17℃。低温组 $w(\text{Chl-a})$ 高于高温的2组，温度高于20℃时 $w(\text{Chl-a})$ 随温度升高呈下降趋势。 $w(\text{Car})$ 也呈现相同趋势(图2-a)。

图 2 不同温度对脆江蓠光合色素质量分数的影响($n=3$)Fig 2 Effects of different temperature on photosynthetic pigments content of *G. chouae*图 3 不同温度对脆江蓠可溶性蛋白质量分数和 SOD 活力的影响($n=3$)Fig. 3 Effects of different temperature on soluble protein content and SOD activity of *G. chouae*

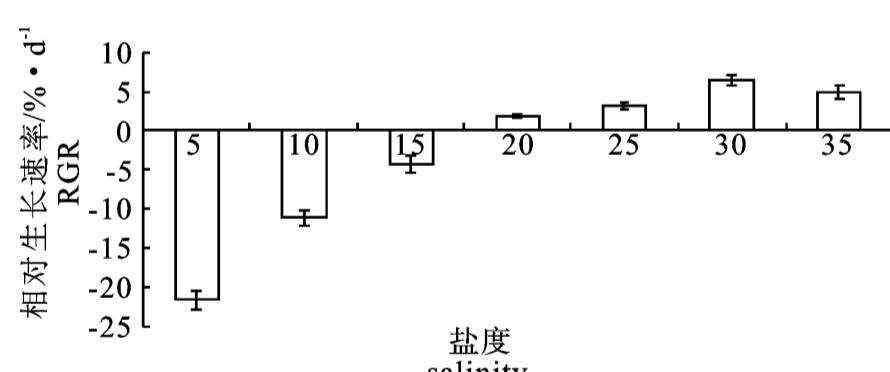
低温组脆江蓠 $w(\text{PE})$ 与高温组之间差异显著 ($P < 0.05$)，但低温组组间差异不显著 ($P > 0.05$)，温度高于 20 °C 时 $w(\text{PE})$ 随温度升高呈上升趋势，最大值出现于 26 °C。PC 也呈现相同趋势 (图 2 - b)。

温度对脆江蓠 $w(\text{Pro})$ 的影响差异显著 ($P < 0.05$)。温度 14 ~ 17 °C 时 $w(\text{Pro})$ 随温度升高而增大，最高值出现于 17 °C；温度高于 17 °C 时 $w(\text{Pro})$ 随温度升高而减小 (图 3 - a)。

低温组组间 SOD 的差异不显著 ($P > 0.05$)，温度高于 20 °C 时 SOD 的活力随着温度升高呈明显上升趋势 (图 3 - b)。高温组和低温组之间的差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 盐度对生长的影响

盐度高于 20 时脆江蓠可正常生长，而盐度低于 20 时则出现负增长。低盐组 (5、10 和 15) 和高盐组 (20、25、30 和 35) 之间差异显著 ($P < 0.05$)，且低盐组组间差异显著 ($P < 0.05$)，但高盐组组间差异不显著 ($P > 0.05$)。盐度在 20 ~ 35 时生长较快，盐度 30 时 RGR 达到最高值 ($6.45\% \cdot d^{-1}$) (图

图 4 不同盐度对脆江蓠相对生长速率的影响($n=3$)Fig. 4 Effects of different salinity on the biomass of *G. chouae*

4)。盐度低于 20 时 RGR 随着盐度下降而快速降低，同时藻体随着盐度下降而逐渐产生脱色现象。盐度低于 15 时藻体末端发生溃烂变白，盐度低于 10 时藻体发生肢解溃烂。

2.4 盐度对生化组分的影响

图 5 - a 表示不同盐度条件下脆江蓠 $w(\text{Chl-a})$ 和 $w(\text{Car})$ 的变化，低盐组 $w(\text{Chl-a})$ 和高盐组之间差异显著 ($P < 0.05$)，但低盐组组间差异不显著 ($P > 0.05$)，高盐组 $w(\text{Chl-a})$ 高于低盐组，最大值出

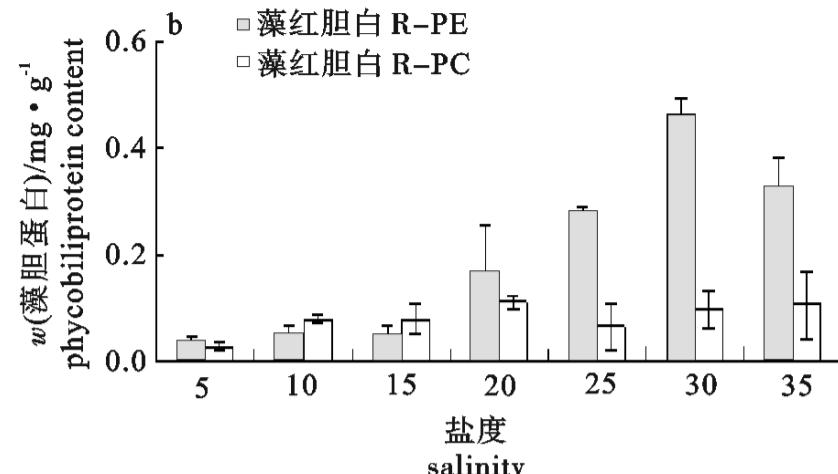
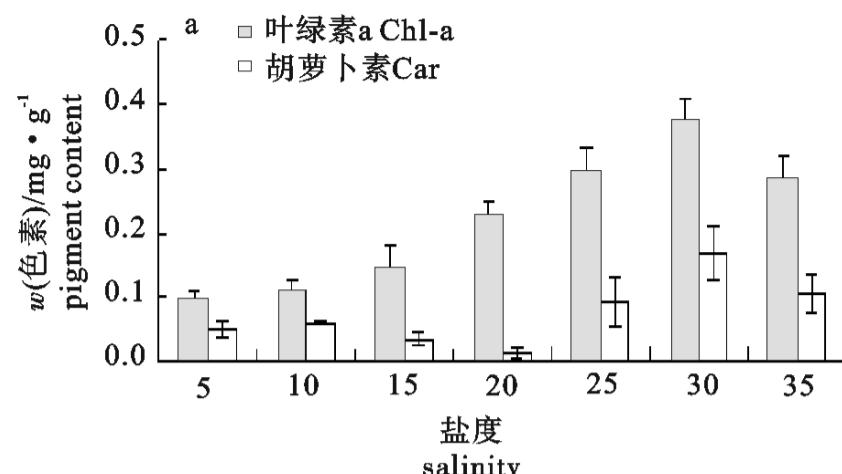


图 5 不同盐度对脆江蓠光合色素质量分数的影响($n=3$)

Fig 5 effects of different salinity on photosynthetic pigments content of *G. chouae*

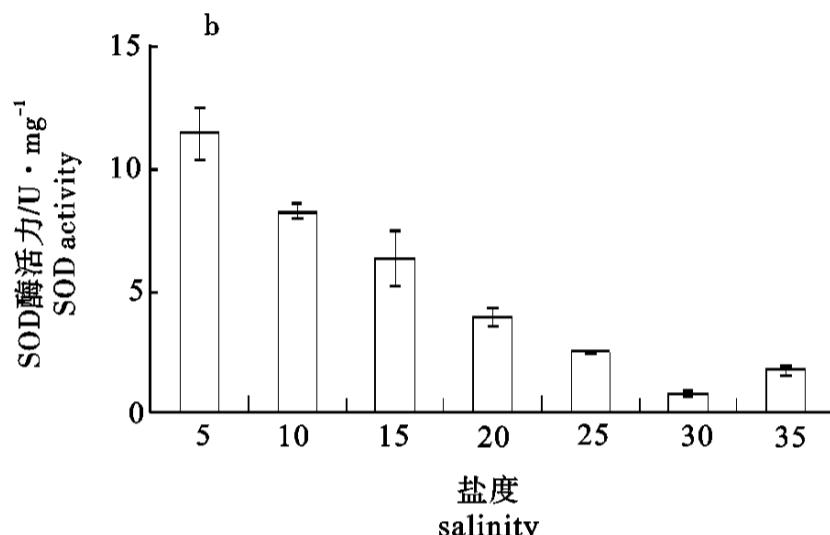
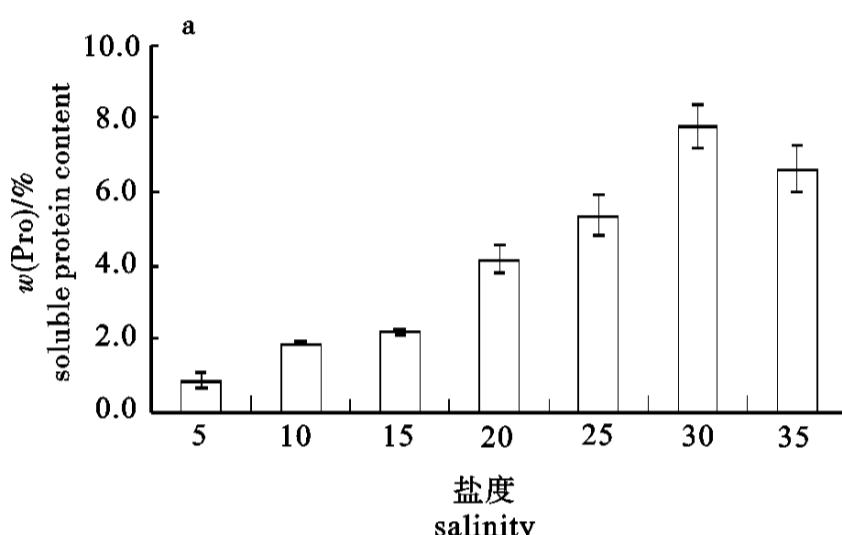


图 6 不同盐度对脆江蓠 P 质量分数和 SOD 活力的影响($n=3$)

Fig 6 Effects of different salinity on soluble protein content and SOD activity of *G. chouae*

现于盐度 30。盐度低于 30 时 $w(\text{Chl-a})$ 随盐度降低呈下降趋势。 $w(\text{Car})$ 也呈现相同的变化趋势。

图 5 - b 表示不同盐度条件下脆江蓠 $w(\text{PE})$ 和 $w(\text{PC})$ 的变化, 低盐组 $w(\text{PE})$ 和高盐组之间差异显著($P < 0.05$), 但低盐组组间差异不显著($P > 0.05$), $w(\text{PE})$ 的最大值出现于盐度 30。盐度低于 30 时 $w(\text{PE})$ 随盐度降低呈下降趋势。 $w(\text{PC})$ 各组差异不显著($P > 0.05$)。

图 6 - a 表示不同盐度条件下脆江蓠 $w(\text{Pro})$ 的变化, 盐度对 $w(\text{Pro})$ 差异显著($P < 0.05$)。盐度为 5 ~ 30 时 $w(\text{Pro})$ 随盐度升高而增大, 最高值出现于盐度 30 培养组。盐度高于 30 时 $w(\text{Pro})$ 随盐度升高而减小。

图 6 - b 表示不同盐度条件对脆江蓠中 SOD 的影响, 低盐组(5、10 和 15) 和高盐组(20、25、30 和 35) 之间差异显著($P < 0.05$), 高盐组(20、25、30 和 35) 之间差异不显著($P > 0.05$), 盐度低于 20 时 SOD 的活力随盐度下降呈明显上升趋势。低盐组(5、10 和 15) 之间差异显著($P < 0.05$)。盐度为 30 时 SOD 活力最低。

3 讨论

3.1 温度对生长的影响

生长是一个重要的参数, 是细胞内生物化学和生理学过程的综合体现^[9]。此试验结果表明, 脆江蓠比较适合生长于较低温条件的水体中(14、17 和 20)。温度在 14 ~ 20 时脆江蓠的 RGR 显著高于高温组(23 和 26)($P < 0.05$)。在低温组中脆江蓠最适合在 17 下生长, 此时脆江蓠的 RGR 最高。这表明脆江蓠生长的适宜温度为 14 ~ 20, 最适温度在 17 左右。

温度是影响大型海藻生长的重要因素, 海区温度随着季节变迁而变化, 南澳岛夏季水温一般高于 25, 脆江蓠在海区会很快出现断枝和腐烂。试验结果显示, 26 时脆江蓠生长速率为 $8.08\% \cdot d^{-1}$, 而 20 时生长速率为 $23.58\% \cdot d^{-1}$, 这与自然条件下脆江蓠的生长状况一致。温度对其他大型海藻的生长普遍存在影响, 但不同种类适宜的温度不同。刘树霞等^[10] 在对经济红藻龙须菜(*G. lemaneiformis*) 的研究中发现, 25 是龙须菜最合适的生

长温度, 这说明脆江蓠对高温条件的适应能力不及龙须菜。刘静雯等^[11]在对细基江蓠繁殖变种 (*G. tenuistipitata* var. *liui* Zhang et Xia) 对温度的适应性研究中发现 25 ℃ 最适其生长, 同样高于脆江蓠的最适合生长温度。HANISAK 等^[12]发现通过增加水体二氧化碳(CO_2)含量可以提高松藻 (*Codium fragile* ssp. *tomentosoides*) 藻体干质量, 这说明改变温度以外的其他生态因子也会对海藻生长产生影响。在实际养殖过程中可以考虑通过改变温度及其他因子以增加脆江蓠的产量。

3.2 对温度变化的生理响应

温度是影响藻类生长发育和季节分布的重要因素。特别是在沿岸海湾和养殖区, 水体营养丰富, 不存在营养物质缺乏, 温度成为影响植物生理成分的重要因素^[13]。通过试验发现, 脆江蓠在低温条件下(14 ℃、17 ℃ 和 20 ℃)光合色素([w(Chl-a) 和 w(Car)])以及 w(Pro) 高于高温组(23 ℃ 和 26 ℃), 温度高于 20 ℃ 时藻体 w(PC) 和 w(PE) 随着温度升高而增加。这表明了脆江蓠对自然环境变化的一种适应性, 当温度高于藻体生长的适宜温度时, 高温影响藻体细胞内酶的活性和叶绿素的合成, 并加速叶绿素分解, 导致叶绿素质量分数明显下降。一般来说, 叶绿素形成的最低温度是 2 ~ 4 ℃, 最适温度为 30 ℃, 最高温度为 40 ℃^[14]。但是对于不同藻类, 其细胞内参与叶绿素合成的酶种类不同, 所以不同藻类叶绿素的最高值出现于不同温度。虽然高温条件下 Car 可以作为抗氧化剂清除活性氧, 防止膜脂的过氧化, 维持膜结构的稳定性^[15]。但高温条件可能对合成 Car 的酶的活力产生抑制, 这种抑制作用强于藻体抵抗高温合成 Car 的作用, 导致 Car 总质量分数减少。低温条件下光合色素质量分数较高, 可能是因为在自然水体, 冬季随着温度的降低, 藻类生长和酶反应速率受到明显抑制, 但此时藻体内色素和酶水平出现了补偿性增加, 提高藻体对光能的有效利用率, 维持藻类的生长, 这是海藻适应环境的一种自身调节过程^[16]。至于藻胆蛋白质量分数上升, 可能在逆境胁迫中清除过量的活性氧, 维持活性氧的代谢平衡、保护膜结构, 从而使植物在一定程度上忍耐、减缓或抵御逆境胁迫伤害^[17]。温度高于 20 ℃ 时脆江蓠藻体中的 Pro 与温度呈现出负相关, 可能与藻体合成蛋白质的酶受到抑制有关。但当温度高于 20 ℃ 时脆江蓠藻体中 SOD 活力随着温度的升高呈明显上升

趋势。温洋等^[18]认为 SOD 可以作为鉴定植物耐热性大小的重要生理指标之一, 因此在一定的逆境条件下, SOD 活力的变化表明植物对胁迫环境的适应性。此试验结果也印证了这一结论。

3.3 盐度对生长的影响

盐度的变化不仅能够改变海水藻类生物群落的生物量和组成^[19], 而且也是制约海藻在水中分布的重要因素, 一般对盐度变化耐受能力越强的海藻在潮间带中的分布范围越广^[20]。生长是一个重要的参数, 是细胞内生物化学和生理学过程的综合体现^[10]。此试验结果表明, 脆江蓠比较适合生长于较高盐度的水体中。盐度为 20 ~ 35 时脆江蓠可以正常生长, 且在盐度为 30 的水体中 RGR 最高。脆江蓠生长的适宜盐度为 20 ~ 35, 最适盐度为 30。

盐度主要是指海水中无机盐的含量, 其高低决定海水渗透压的大小^[21]。盐度是影响大型海藻生长的重要因素, 盐度低于其最适范围, 必然影响其渗透压, 降低藻类对营养盐吸收的能力, 抑制其生长^[22]。海区盐度受降雨及径流影响, 广东海区 1 月 ~ 4 月为枯水期, 盐度维持在 30 左右, 且温度适宜, 脆江蓠生长较好, 这与此研究条件下脆江蓠的生长状况相一致; 径流入海口及半咸水地区盐度低于 20, 脆江蓠无法成活, 这与此研究结果也相一致。盐度对多种大型海藻的生长普遍存在影响, 但不同种类适宜的盐度范围不同。细基江蓠繁枝变型生长的最适盐度范围为 14 ~ 27, 最适盐度为 27^[23]。圆扁江蓠 (*G. tikvahiae*) 是广盐耐受性种之一, 在盐度为 17 ~ 40 时都有相对较高的日特定生长率^[24]。

3.4 对盐度变化的生理响应

通过试验发现, 脆江蓠的低盐组(5、10 和 15)光合色素[w(Chl-a) 和 w(Car)]、藻体 w(PE) 及 w(Pro) 低于高盐组(20、25、30 和 35), 盐度低于 30 时以上各生化组分质量分数随盐度下降而降低。这种变化是脆江蓠对盐度变化的一种生理响应。盐度的变化不仅能影响海藻的生长状况, 而且会引起藻体生理组分的变化。当盐度低于藻体正常生长的盐度临界点时, 对于海藻来说, 渗透压过低将影响细胞中的水分及对氮(N)和磷(P)的吸收^[25]。盐度为 30 时 N、P 达到最大吸收速率, 这对脆江蓠各组分的积累有利。渗透压影响藻类生长的另一种机制可能是当渗透压过低时, 细胞内的可

溶性物质，如各种光合色素及可溶性蛋白流失到细胞外，导致细胞结构的破坏及细胞的死亡。多数海藻利用自身合成和分解有机物来实现渗透压的调节具有相同之处^[26]。当盐度低于20，脆江蓠藻体中SOD的活性随着盐度降低呈明显上升趋势。这是因为在一定的逆境条件下，SOD活性的变化表明植物对胁迫环境的适应性^[18]，这与此研究结果相一致。

4 结论

综上所述，适合脆江蓠生长的温度为14~26，最适生长温度为17~20，在此温度条件下藻体可以保持最快的RGR，温度高于20时脆江蓠的生长受到抑制。在生长状态、光合色素和抗氧化等方面，脆江蓠耐受低温能力要比高温时强。脆江蓠生长的盐度为20~35，最适盐度为30，在此盐度条件下藻体可以保持最快的RGR，盐度低于20时脆江蓠的生长受到抑制。高盐度培养条件下的脆江蓠在生长状态、光合色素和抗氧化等方面强于低盐度。

参考文献：

- [1] 夏邦美. 中国海藻志, 红藻门, 伊谷藻目, 杉藻目, 红皮藻目 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 41 - 42.
XIA Bangmei. Flora Algarum Marinorum Sinicarum, Rhodophyta, Ahnfeltiales Gigartinales Rhodymeniales [M]. Beijing: Science Press, 1999: 41 - 42. (in Chinese)
- [2] 阎希柱, 王桂忠, 李少菁, 等. 九孔鲍摄食江蓠与人工配合饲料的能量收支比较 [J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(6): 757 - 761.
YAN Xizhu, WANG Guizhong, LI Shaojing, et al. Energy budgets of *Haliotis diversicolorquatalis* fed by *Gracilariae lichenoides* and formula feed[J]. Chin J Appl Environ Biol, 2004, 10(6): 757 - 761. (in Chinese)
- [3] 潘江球, 李思东. 江蓠的资源开发利用新进展 [J]. 热带农业科学, 2010, 30(10): 47 - 50.
PAN Jiangqiu, LI Sidong. Development and utilization of *Gracilaria* resources[J]. Chin J Trop Agric, 2010, 30(10): 47 - 50. (in Chinese)
- [4] 郑怡, 余萍, 刘艳茹. 脆江蓠凝集素的部分性质及细胞凝集作用 [J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(1): 60 - 70.
ZHENG Yi, YU Ping, LIU Yanru. Partial properties and cell agglutination of *Gracilaria bursapastoris* lectin[J]. Chin J Appl Environ Biol, 2002, 8(1): 60 - 70. (in Chinese)
- [5] WELLBURN A R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution[J]. Plant Physiol, 1994, 144 (3): 307 - 313.
- [6] BEER S, ESHEL A. Determining phycoerythrin and phycocyanin concentrations in aqueous crude extracts of red algae [J]. Aust J Mar Freshwater Res, 1985, 36(6): 785 - 792.
- [7] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 158 - 160.
ZHANG Zhiliang, JU Weijing. Experimental instruction of plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 158 - 160. (in Chinese)
- [8] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 184 - 185.
LI Hesheng. Principles and techniques of plant physiology biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 184 - 185. (in Chinese)
- [9] 波钦诺克. 植物生物化学分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1981: 23 - 27.
. Plant biochemistry analysis method[M]. Beijing: Science Press, 1981: 23 - 27. (in Chinese)
- [10] 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 Shuxia, XU Juntian, JIANG Dongcheng. The effects of temperature on the growth and photosynthesis of economic red macroalgae *Gracilaria lemaneiformis*[J]. J Anhui Agric Sci, 2009, 37(33): 16322 - 16324. (in Chinese)
- [11] 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]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2001, 31(3): 332 - 338.
LIU Jingwen, DONG Shuanglin. Interactions between light and temperature on the growth and levels of chemical constituents of *Gracilaria tenuistipitata* var *liui* Zhang et Xia[J]. Periodic Ocean Univ China: Natural Science, 2001, 31(3): 332 - 338. (in Chinese)
- [12] HANISAK M D. Growth patterns of *Codium fragile* spp. Tomentosoides in response to temperature, irradiance, salinity and nitrogen source[J]. Mar Biol, 1979, 50(4): 319 - 332.
- [13] 李伟新, 朱仲嘉, 刘凤贤. 海藻学概论 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982: 224 - 225.
LI Weixin, ZHU Zhongjia, LIU Fengxian. Introduction to seaweed [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982: 224 - 225. (in Chinese)
- [14] 潘瑞炽. 植物生理学 [M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2001: 57 - 66.
PAN Ruichi. Plant physiology [M]. 4th edition. Beijing: Higher Education Press, 2001: 57 - 66. (in Chinese)
- [15] NIYOGI K K. Photo protection revised: genetic and molecular approaches[J]. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol, 1999, 50(4): 333 - 359.
- [16] DUKE C S, LITAKER W, RAMUS J. Effect of temperature, N supply, and tissue N on ammonium uptake rates of the *Ulva cunuata* and *Codium decorticatum* [J]. J Phycol, 1989, 25(1): 113 - 120.

- [17] 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 Boping, HAN Zhiguo, FU Xiang. Algal photosynthesis: mechanisms and models [M]. Beijing: Science Press, 2003: 12. (in Chinese)
- [18] 温洋, 孙吉雄, 王代军. 干旱胁迫对冷地型草坪草生理特性影响的研究 [J]. 草原与草坪, 2005, 10 (1): 43 - 45.
WEN Yang, SUN Jixiong, WANG Daijun. Effects of drought stress on physiological characteristics in cool season turfgrasses [J]. Grassland Turf, 2005, 10(1) : 43 - 45. (in Chinese)
- [19] FONG P, BOYER K E, DESMOND J S. Salinity stress, nitrogen competition, and facilitation: what controls seasonal succession of two opportunistic green macroalgae [J]. J Exp Mar Biol, 1996, 206 (1/2) : 203 - 211.
- [20] DAVISON I R, PEARSON G A. Stress tolerance in intertidal seaweed [J]. J Phycol, 1996, 32 (2) : 197 - 211.
- [21] 钱鲁闽, 徐永健, 焦念志. 环境因子对龙须菜和菊花心江蓠 N、P 吸收速率的影响 [J]. 中国水产科学, 2006, 13 (2) : 251 - 262.
QIAN Lumin, XU Yongjian, JIAO Nianzhi. Effects of environmental factors on uptake of nitrogen and phosphorus by *Gracilaria lemaneiformis* and *G. lichenoides* [J]. J Fish Sci China, 2006, 13 (2) : 251 - 262. (in Chinese)
- [22] 郑兰红. 冈村枝管藻培养及实验生态学基础研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
ZHENG LanHong. Primary study of culture and environmental factors on the growth of *Cladosiphon akamuranus* [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004. (in Chinese)
- [23] 吴超元, 李幼芷, 林光恒, 等. 细基江蓠繁枝变型生长适宜环境条件的研究 [J]. 海洋与湖沼, 1994, 25 (1) : 60 - 66.
WU Chaoyuan, LI Renzhi, LIN Guangheng, et al. Effect of environmental factors on growth of *Gracilaria tenuistipitata* var *liui Zhang et Xia* [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1994, 25 (1) : 60 - 66. (in Chinese)
- [24] BIRD K T, HABIG C, DEBUSK T. Nitrogen allocation and storage patterns in *Gracilaria tikvahiae* (RhodoPhyta) [J]. J Phycol, 1982, 18 (3) : 344 - 348.
- [25] 刘长发, 张泽宇, 雷衍之. 盐度、光照和营养盐对孔石莼光合作用的影响 [J]. 生态学报, 2001, 21 (5) : 795 - 798.
LIU Changfa, ZHANG Zeyu, LEI Yanzhi. Effects of salinity, light and nutrients on photosynthesis of sterile *Ulva pertusa* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21 (5) : 795 - 798. (in Chinese)
- [26] 赵素达, 董树刚, 吴以平, 等. 盐胁迫对孔石莼的生理生化影响 [J]. 海洋科学, 2000, 24 (7) : 52 - 55.
ZHAO Suda, DONG Shugang, WU Yiping, et al. Biochemical and physiological effects of salinity stress on *Ulva pertusa* [J]. Mar Sci, 2000, 24 (7) : 52 - 55. (in Chinese)