

不同温度条件下无机碳浓度增高对石莼光合作用的影响*

邹定辉 高坤山

(汕头大学海洋生物实验室 515063)

(中国科学院水生生物研究所 武汉 430072)

提要 为了探讨在不同光温条件下石莼 (*Ulva lactuca*) 光合作用对无机碳的需求,于 1999 年 6~7 月,在提高海水无机碳浓度 (8.8 mol/L) 的条件下,对石莼光合作用的光温反应特性进行了研究。结果表明,无机碳浓度增高对石莼光合作用的影响对温度有依赖性。增加无机碳浓度,在 30 °C 较高温度下,显著地提高了光饱和和光合速率,而在 10 °C 较低温度下,其影响不明显。在温度 20~30 °C 范围内时,无机碳浓度增高使光饱和和光合速率的温度系数增加,而在温度 10~20 °C 范围内时则没有影响。较高的光温度条件使石莼光合作用对无机碳的需求增加。

关键词 石莼,光合作用,无机碳,光照,温度

石莼属 (*Ulva*) 是一类很常见的潮间带大型底栖海藻。Drechsler 和 Beer 1991 年, Bjork 等 1992, 1993 年, Beer 和 Bjork 1994 年, Beer 1994 年, Drechsler 等 1994 年, 对它们的光合 HCO_3^- 利用问题作了许多工

* 国家自然科学基金资助项目 39830060 号。

第一作者:邹定辉,出生于 1969 年,博士,从事海藻生物学研究。E-mail: Dhzou@stu.edu.cn

收稿日期:2000-09-19;修回日期:2001-04-09

作。它们具有有效的光合 HCO_3^- 利用系统,能主动地积累 HCO_3^- 。Diechler 等 1994 年, Axelsson 等 1995 年, Larsson 等 1997 年^[2] 研究表明,大型海藻的 HCO_3^- 利用主要是通过两种方式,其一是, HCO_3^- 在胞外(膜表面结合的)碳酸酐酶催化作用下脱水形成 CO_2 , 然后 CO_2 被细胞吸收;其二是通过直接吸收的方式。Beer 和 Kock 1996 年报道在温度为 20 °C 及光强为 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,在通常海水无机碳浓度下(2.2 mol/L) 石莼的光合作用是接近饱和的。但在不同光温条件下石莼光合作用对无机碳的需求尚是一个未知的问题。本文在提高海水无机碳浓度(8.8 mol/L) 的条件下,对石莼(*Ulva lactuca*) 光合作用的光温反应特性进行了研究,并探讨在不同光温条件下石莼的光合无机碳需求的问题。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 1999 年 6~7 月在汕头大学海洋生物广东省重点实验室进行。低潮时从汕头广澳湾潮间带采集石莼叶状体,放入保温箱(内加冰块,藻体与冰块不直接接触),在 3 h 内运回实验室。光合作用测定前藻体在实验室进行暂养,暂养条件为温度 25 °C,光照为 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光照周期为 L: D=12 h: 12 h。培养液为人工海水(450 mmol/L NaCl, 10 mmol/L KCl, 10 mmol/L CaCl_2 , 30 mmol/L MgSO_4), 并加 2.2 mmol/L NaHCO_3 , 1 mmol/L NaNO_3 , 0.14 mmol/L Na_2HPO_4 作为营养补充。每天 24 h 充空气。实验在暂养期间的第 2 至 5 天内进行。这期间藻体光合活性保持稳定。

1.2 方法

1.2.1 反应介质的配制 以无 CO_2 的人工海水(pH 8.2), 溶解一定量的 NaHCO_3 , 配成两种不同无机碳(Ci)浓度(2.2 mmol/L 与 8.8 mmol/L , 以分别代表通常海水 Ci 浓度和提高的海水 Ci 浓度)的反应

介质。无 CO_2 的人工海水(pH 8.2)的配制方法为:先用蒸馏水配成人造海水(450 mmol/L NaCl, 10 mmol/L KCl, 10 mmol/L CaCl_2 , 30 mmol/L MgSO_4), 用 0.1 mol/L HCl 调 pH 至 4.0, 通纯 N_2 气 1 h, 驱去人工海水中的 CO_2 气体。然后溶解一定量的 Tris, 使之最终浓度为 25 mmol/L 。最后用 0.1 mol/L NaOH 和 0.1 mol/L HCl 调 pH 至 8.2。

1.2.2 光合作用测定 分别用上述所配置的二种反应介质,在不同的光温条件下,根据高坤山^[1]的方法,用氧电极(YSI Model 5300)进行石莼叶状体小片块的光合放氧速率测定。测定之前,把藻体用锋利的小剪刀剪成约 0.4 mm^2 大小的小片块。在反应介质中及 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光照下放置至少 1 h(室温),以减小藻体损伤对光合作用所造成的影响。

测定之前,先进行在该测定温度下氧电极的标定。然后称取大约 0.08 g 鲜重的藻片放入装有 3 ml 反应介质的反应槽中,测定时反应介质被不断搅拌。用循环水浴控制反应槽内的温度。光源为卤钨灯(500 W),通过改变光源与反应槽之间的距离调整不同的光照强度。每次测定在 10 min 之内完成。

2 结果

2.1 无机碳(Ci)浓度增高对石莼光合作用光温反应的影响

从图 1 及表 1 可以看出,温度对光合作用-光(P-I)曲线的形状有很大影响。光合效率(α , 即 P-I 曲线的初始斜率)在 20~30 °C 时较大,而在 10 °C 时则较小;光补偿点(I_c)、光饱和点(I_k)都随温度(10~30 °C)增加而增加。

Ci 浓度增高对 P-I 曲线的有关参数值有显著影响。在所测定温度(10~30 °C)范围内, Ci 浓度增高使 α 增加($P < 0.05$)。Ci 浓度增高对 I_c 有降低趋势,但没有明显影响($P > 0.05$)。Ci 浓度增高使 I_k 在高温(30 °C)时

表 1 无机碳浓度增加及温度对光合作用-光曲线有关参数的影响

Tab.1 Effects of the elevated Ci concentration and temperature on the parameters of P-I curves (mean \pm SD of three measurements)

温度 (°C)	Ci 浓度 (mmol/L)	α	I_c ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	I_k ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	P_{max} [$\mu\text{mol O}_2 \cdot \text{g}^{-1}(\text{D.W.}) \cdot \text{h}^{-1}$]
10	2.2	1.96 \pm 0.11	11.3 \pm 0.8	107.6 \pm 9.7	194.5 \pm 17.6
10	8.8	2.31 \pm 0.03	10.1 \pm 0.5	117.9 \pm 2.5	257.7 \pm 23.8
20	2.2	2.87 \pm 0.62	24.2 \pm 9.3	152.7 \pm 26.5	360.6 \pm 42.5
20	8.8	3.43 \pm 0.22	19.5 \pm 3.6	159.6 \pm 17.9	477.0 \pm 51.3
30	2.2	2.77 \pm 0.08	41.8 \pm 8.4	147.6 \pm 14.1	328.3 \pm 82.8
30	8.8	3.22 \pm 0.25	32.4 \pm 3.5	261.9 \pm 12.2	707.5 \pm 85.5

注: α 为光合效率 [$\mu\text{mol O}_2 \cdot \text{g}^{-1}(\text{D.W.}) \cdot \text{h}^{-1} / (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$]; I_c 为光补偿点 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); I_k 为光饱和点; P_{max} 为光饱和和最大净光合速率。

表 2 在不同光温条件下,相对于增高的 Ci 浓度(8.8 m mol/L),通常海水中 Ci 浓度(2.2 m mol/L)对光合作用的限制作用

Tab.2 The limitation of photosynthesis in ambient Ci level (2.2 m mol/L) relative to elevated Ci concentration (8.8 m mol/L) under different light temperature conditions

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	光强 ($\text{m mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	限制 (%)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	光强 ($\text{m mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	限制 (%)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	光强 ($\text{m mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	限制 (%)
10	90	22.7	20	90	19.9	30	90	22.7
10	180	23.2	20	180	13.2	30	180	29.3
10	300	23.9	20	300	9.7	30	300	45.8
10	460	24.4	20	460	20.0	30	460	52.7
10	690	24.5	20	690	21.6	30	690	52.0

注:限制(%) = $[1 - (2.2 \text{ m mol/L Ci 浓度下的光合作用} / 8.8 \text{ m mol/L Ci 浓度下的光合作用})] \times 100$

显著地增加 ($P < 0.01$);而在较低温度(10~20 $^{\circ}\text{C}$)时,对 I_k 没有明显影响 ($P > 0.05$)。

Ci 浓度的增高对光合作用与温度的关系也有明显的影响。在 Ci 浓度为 8.8 m mol/L 时,光饱和和净光合速率(P_{max})在所测定温度(10~30 $^{\circ}\text{C}$)范围内,随温

度增加而增加;而在 Ci 浓度为 2.2 m mol/L 时,在温度 20~30 $^{\circ}\text{C}$ 时,光饱和和净光合速率几乎相等 ($P > 0.05$),在 10 $^{\circ}\text{C}$ 时减小。可见, Ci 浓度增加可使光饱和和光合速率的最适温度得以提高。

石莼呼吸作用在所测定温度范围(10~30 $^{\circ}\text{C}$)内,随温度增加而显著增加,即在 10, 20, 30 $^{\circ}\text{C}$ 时分别为 22.5, 65.4, 110.3 $\mu\text{mol O}_2\text{g}^{-1}(\text{D.W.})\text{h}^{-1}$,其呼吸系数(RQ)在 10~20 $^{\circ}\text{C}$ 时为 2.91,在 20~30 $^{\circ}\text{C}$ 时为 1.69,即 RQ 随温度增加而减小。然而,在温度为 10~20 $^{\circ}\text{C}$ 范围内时, Ci 浓度增加对光合作用的温度系数没有影响,在 Ci 浓度 2.2 m mol/L 和 8.8 m mol/L 情况下均为 1.85,而在温度为 20~30 $^{\circ}\text{C}$ 时, Ci 浓度增加使光合作用的温度系数从 0.91 增加至 1.49。

2.2 不同光、温条件下通常海水 Ci 浓度对光合作用的限制

从表 2 可知,在温度为 10 和 20 $^{\circ}\text{C}$ 时的任何光强条件下时,或者在温度为 30 $^{\circ}\text{C}$,且光强小于 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,通常海水中的 Ci 浓度对净光合速率限制在 20% 左右;而当温度为 30 $^{\circ}\text{C}$,且光强大于 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,净光合速率受通常海水中的 Ci 浓度限制达 50% 左右。可见,在高温和高光强条件时,石莼光合作用对 Ci 浓度的需求(即到达饱和和所需的 Ci 浓度)增加。

3 讨论

温度不但直接影响光合和呼吸代谢有关酶的活性,并且影响 Ci (CO_2 , HCO^- , CO_3^{2-}) 的扩散,细胞内 pH 值以及碳酸酐酶的活性,从而影响光合作用底物 CO_2 的供应。本文结果表明,介质中 Ci 浓度又影响着这种温度的效应。在 Ci 浓度提高的条件下,光饱和和净光合速率随温度升高而显著增高,而在通常海水 Ci

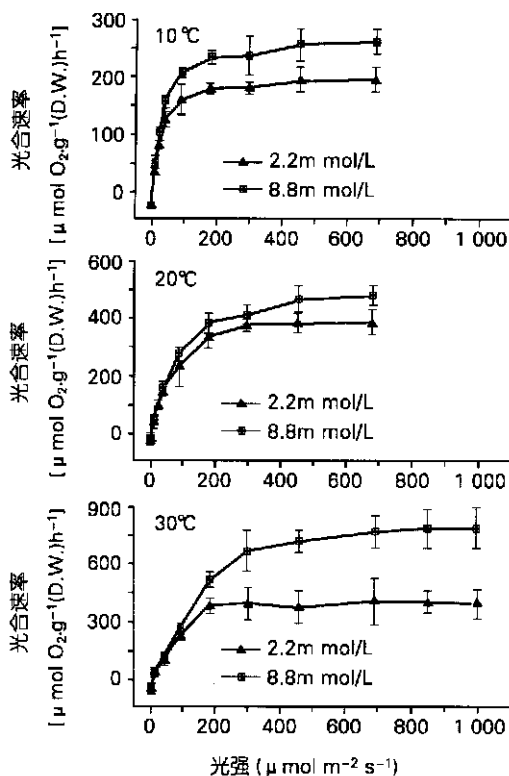


图 1 不同温度下无机碳浓度增高对石莼光合作用-光强曲线的影响

Fig.1 The effects of elevated inorganic carbon concentration on the Pn - I curves of *Ulva lactuca* at different temperature

浓度下,光饱和和净光合速率在 10~20 ℃时,是随温度升高而增高,但在 20~30 ℃范围时,几乎不受温度的影响。并且, CO_2 浓度增高使得光饱和和净光合速率的最适温度提高。

虽然原初光化学反应本身是温度非依赖性的,但是光合磷酸化作用的酶,电子传递以及质体醌的扩散等则是受温度的影响。因此,光合效率(α),也可能随温度而有变化。本文结果表明,在温度 20~30 ℃范围内, α 几乎相等,而在 10 ℃时则较小。光补偿点(I_c)随温度升高而提高;且 CO_2 浓度增高对其没有影响。而光合作用光饱和点(I_k)随温度升高而提高。 CO_2 浓度增高使 α 在 10~30 ℃范围)、 I_k (在高温即 30 ℃)提高,这表明,光合作用在高温及高光强下的光能利用率与 CO_2 浓度成正相关。然而,在高 CO_2 浓度下培养的海藻,光合效率及光饱和和光合速率下降。例如, Gao 等 1993 年表明,在增加 CO_2 浓度 3~5 倍的条件培养智利

江藻 (*Gmclania chilensis*),其光合 CO_2 吸收受到抑制。García-Sánchez 等 1994 年报道,在其他条件(光温、营养)相同时,细基江藻 (*Gmclania tenuistipitata*) 最大光合速率与光合效率在低 CO_2 浓度中增加,而在高 CO_2 浓度中降低。因此,可以看到,海藻光合作用对 CO_2 浓度增高的瞬间性(短期的)响应与适应性(长期的)响应是不一样的。但是,两种响应实质上是有联系的,受海水 CO_2 限制的海藻,经长期的高 CO_2 或 CO_2 的适应,其对 CO_2 的亲和力下降。

参考文献

- 1 高坤山.藻类光合固碳的研究技术与解析方法,海洋科学,1999,6: 37~41
- 2 Larsson C., Axelsson L., Ryberg H. et al.. Photosynthetic carbon Utilization by *Enteromorpha intestinalis* (Chlorophyta) from a Swedish rock pool, *Eur. J. Phycol.*, 1997, 32: 49~54

THE EFFECTS OF ELEVATED INORGANIC CARBON CONCENTRATION ON PHOTOSYNTHESIS OF *Ulva lactuca* UNDER DIFFERENT TEMPERATURE

ZOU Ding Hui GAO Kun Shan

(*Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072*)
(*Marine Biology Laboratory of Shantou University 515063*)

Received: Sep., 19, 2000

Key Words: *Ulva lactuca*, Photosynthesis, Inorganic carbon, Light, Temperature

Abstract

The photosynthetic responses of *Ulva lactuca* to light and temperature were investigated under elevated inorganic carbon concentrations during the period of June to July, 1999. It was found that effects of elevated inorganic carbon concentration on the photosynthesis were temperature-dependent. Elevated inorganic carbon concentration increased the light-saturated photosynthesis at 30 ℃, but did not affect it at 10 ℃. Elevated inorganic carbon significantly increased the temperature coefficient of light-saturated photosynthesis under higher temperature range (20~30 ℃). However, it did not affect the temperature coefficient of light-saturated photosynthesis under lower temperature range (10~20 ℃). The photosynthetic inorganic carbon demand increased with increasing light-temperature conditions.

(本文编辑:张培新)