

CO₂ 加富对盐生杜氏藻(*Dunaliella salina*) 叶绿素荧光参数的影响*

臧宇¹ 黄致远³ 赵新宇¹ 胡顺鑫^{1,2}

(1. 中国海洋大学海洋生命学院 青岛 266003; 2. 山东省海洋资源与环境研究院 烟台 264006;
3. 山东省青岛市第五十八中学 青岛 266199)

摘要 大气中 CO₂ 浓度不断升高导致的海水酸化, 已经引起了广泛的环境、生态和气候问题。本实验采用实验生态学的方法, 以盐生杜氏藻(*Dunaliella salina*)为研究对象, 分析其在 CO₂ 加富的条件下叶绿素荧光参数的变化。研究表明, CO₂ 加富对盐生杜氏藻光系统 II 最大光化学量子产额(F_v/F_m)和最大相对电子传递速率($rETR_{max}$)无显著影响($P>0.05$), 显著促进了光系统 II 实际光合效率($P<0.05$)和光能利用效率(α) ($P<0.05$), 并且降低了饱和光强(E_k) ($P<0.05$)。然而, CO₂ 升高增加了盐生杜氏藻的光抑制参数(β) ($P<0.05$)和非光化学淬灭(NPQ) ($P<0.05$), 这说明在光照充足的情况下, CO₂ 加富会对盐生杜氏藻产生负面效应, 使其更容易受到光抑制。

关键词 CO₂; 海水酸化; 盐生杜氏藻; 叶绿素荧光

中图分类号 Q14 **doi:** 10.11693/hyhz20170300051

因为煤炭、石油及天然气等燃料的使用以及森林破坏的加剧, 大气中 CO₂ 含量正急剧升高, 并在环境、生态以及气候等方面导致诸多问题(Hughes, 2000)。海洋作为地球表面最大的碳源之一, 可以吸收人类活动排放 CO₂ 总量的一半, 而 CO₂ 排放量上升, 也导致了一系列的负面效应, 而这其中最严峻的一个海洋化学事件就是海洋酸化(Ocean Acidification)(Fabry, 2008)。在以欧洲为代表的工业革命以前, 海水中的 pH 为 8.2, 截至目前, 海水 pH 下降了 0.1 个单位, 此时大气 CO₂ 浓度为 390ppmv。根据推断, 到 2100 年, 海表 pH 将下降 0.4 个单位, pCO_2 将上升 200%, 届时 CO₂ 浓度将达到 1000ppmv (Caldeira *et al.*, 2003; Doney *et al.*, 2009)。

海洋酸化改变了海洋化学环境, 截至目前, 大量研究表明海洋酸化可以降低珊瑚、珊瑚藻类以及贝类的钙化量(Gao *et al.*, 1993); 海洋酸化对于非钙化生物也会产生影响, CO₂ 浓度升高可以促进海洋硅藻三角

褐指藻(*Phaeodactylum tricornutum*)的生长和光合作用, 并且下调了其无机碳浓缩机制(Wu *et al.*, 2010)。同时, 利用叶绿素荧光技术探讨海洋酸化对藻类影响的研究也有很多: 徐金涛等(2016)研究表明, CO₂ 加富条件能够显著促进塔玛亚历山大藻(*Alexandrium tamarense*)PS II 最大光化学量子产量(F_v/F_m), 提高最大相对电子传递效率($rETR_{max}$)和光能转换效率。当营养条件及光照条件适宜时, 海洋酸化可促进坛紫菜(*Pyropia haitanensis*)与龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)的光合作用, 并在一定程度上有利于坛紫菜对病害的抗性(陈斌斌, 2015)。

盐生杜氏藻(*Dunaliella salina*)是一种单细胞绿藻, 由于其结构简单、可以在高盐环境下生存, 抗性较强。作为一种良好的模式生物, 其已经被广泛应用于生物工程和遗传工程中。但关于盐生杜氏藻对环境胁迫的基础研究仍然不够系统全面, 尤其是盐生杜氏藻光合作用对海洋酸化的响应尚未见报道。因此,

* 海洋公益性行业科研专项经费资助项目, 201305027 号; 国家自然科学基金项目, 41476091 号。臧宇, E-mail: 493687012@qq.com

通讯作者: 胡顺鑫, E-mail: 290166784@qq.com

收稿日期: 2017-03-12, 收修改稿日期: 2017-06-14

本实验以盐生杜氏藻为实验对象,拟利用叶绿素荧光技术,探究 CO₂ 浓度升高对盐生杜氏藻对叶绿素荧光参数的影响,以期预测未来海洋酸化条件下海洋浮游植物的适应性提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 藻种来源及培养条件

实验所用微藻——盐生杜氏藻(*Dunaliella salina*)取自中国科学院海洋研究所微藻培养室,培养于改良后的 *f/2* 培养基中。所用的海水取自青岛市鲁迅公园附近的自然海水,经脱脂棉粗过滤、M-50 抽滤器过滤(滤膜直径 5cm,孔径 0.45μm)细过滤,然后高压灭菌。光照强度为 80μmol/(m²·s),光暗周期比为 12h : 12h,培养温度(22±1)°C,盐度为 32。

1.2 实验设计

实验选取了两种 CO₂ 浓度的气体,分别为 390ppmv(目前大气中 CO₂ 浓度)和 1000ppmv(2100 年的预测值)。390ppmv 浓度的 CO₂ 取自室外空气(气体采集处应注意通风);1000ppmv 浓度的 CO₂ 气体是高纯二氧化碳气体(99.99%)和空气在二氧化碳光照培养箱(HP400G,瑞华,武汉)内混合而成,二氧化碳光照培养箱可以控制培养箱内 CO₂ 气体的浓度。借助空气压缩泵将达到预设浓度的 CO₂ 气体通过 0.22μm 的针式过滤器泵入培养瓶内,以保证通入培养液的气体无菌。实验时先将目标微藻培养至指数生长期,将处于指数生长期的微藻接种 300mL 锥形瓶,实验初始密度为 5×10⁴cell/mL。微藻接种前,预先向培养液中通各浓度的 CO₂ 气体 24h,使培养液中的碳酸盐系统达到稳定。在培养 24、48、72 和 96h 后进行相关指标的测定。

1.3 叶绿素荧光参数的测定

采用调制叶绿素荧光仪(Water-PAM, Walz, 德国)测定 390 和 1000ppmv CO₂ 条件下盐生杜氏藻诱导光曲线和快速光响应曲线,来反映 CO₂ 浓度升高对盐生杜氏藻叶绿素荧光参数的影响。

测定诱导光曲线时,先将样品暗适应 20min,使得光 PS II 处于完全开放状态。打开测量光,测定初始荧光值(F_0),随后打开饱和脉冲,持续时间为 0.8s,测得 F_m 和 F_v/F_m 值。40s 之后打开光化光,每隔 20s 打开饱和脉冲,连续进行 13 次,直至最大荧光值(F_m')达到稳定。所得荧光值按照公式(1)计算光系统 II 的实际光化学效率(Yield):

$$\text{Yield}=(F_m'-F)/F_m' \quad (1)$$

快速光响应曲线测定方法:打开测量光[0.01μmol/(m²·s)]测定初始荧光值 F_0 ,然后打开饱和脉冲[4000μmol/(m²·s), 0.8s],测定 F_m 和 F_v/F_m 值。在预实验的基础上,光化光强度分别设定为 0、90、150、210、265、295、350、405、480μmol/(m²·s),共 8 个梯度。在每个光化光梯度下,测得饱和和脉冲前的荧光值(F)和打开饱和脉冲后测得的 F_m' 。相对电子传递速率(rETR)通过公式(2)计算:

$$\text{rETR}=(F_m'-F)/F_m' \times \text{PAR} \times A \times 0.5, \quad (2)$$

其中,PAR 代表光化光强度;A 表示藻类的吸光系数 0.84;0.5 代表有 50% 的吸收光能被分配到光系统 II。随后,以光化光强度为 X 轴,rETR 为 Y 轴制作相对电子传递速率随 PAR 变化的曲线,即快速光响应曲线(rapid light curve, RLC)。随后,对快速光响应曲线进行最小二乘法拟合(Platt *et al*, 1980),得到初始斜率(α)、最大相对电子传递速率(rETR_{max})、半饱和光强(E_k)等参数:

$$P=P_m \times (1-e^{-\alpha \text{PAR}/P_m}) \times e^{-\beta \text{PAR}/P_m}, \quad (3)$$

其中, P 代表给定光化光强度下的相对电子传递速率(rETR); α 代表快速光曲线的初始斜率,能够反映光能的利用效率; P_m 代表最大相对电子传递速率(rETR_{max}); $E_k=P_m/\alpha$,代表半饱和光强,反映藻类对光强的耐受能力; β 代表光抑制参数。

2 结果与分析

由图 1 可知,随着 PAR 强度的提升,盐生杜氏藻的相对电子传递率先线性上升到最大值后保持不变。24、48、72、96h 时,390 和 1000ppmv CO₂ 条件下盐生杜氏藻快速光响应曲线拟合参数如表 1 所示:24h 时,1000ppmv 处理组与 390ppmv 处理组相比较, α 值无显著性差异($P>0.05$);48、72、96h 时,1000ppmv 处理组的 α 值显著增加($P<0.05$),与 390ppmv CO₂ 条件下相比,分别增加 12.5% ($P<0.05$)、21.7% ($P<0.05$)、8.333% ($P<0.05$)。

在前 72 小时内,390 和 1000ppmv CO₂ 条件下盐生杜氏藻光抑制参数 β 无显著性差异($P>0.05$);在 96h 时,1000ppmv CO₂ 条件下生长的盐生杜氏藻的 β 发生了显著变化,比 390ppmv CO₂ 条件下的值增加了 45.45%。

对于 rETR_{max} 值来说,前 72 小时内,1000ppmv CO₂ 条件下的 rETR_{max} 值均高于 390ppmv CO₂,但是无显著差异($P>0.05$);在 96h 时,390ppmv CO₂ 条件下的 rETR_{max} 略高于对照组,但两者间仍无显著性

差异($P>0.05$)。

在24h时, 390和1000ppmv CO₂条件下盐生杜氏藻的半饱和光强 E_k 无显著性差异($P>0.05$), 但是通过

比较48、72、96h的 E_k 值发现, 其在1000ppmv CO₂条件下均显著降低($P<0.05$), 分别为390ppmv CO₂条件下的90%、86.79%、87.10%。

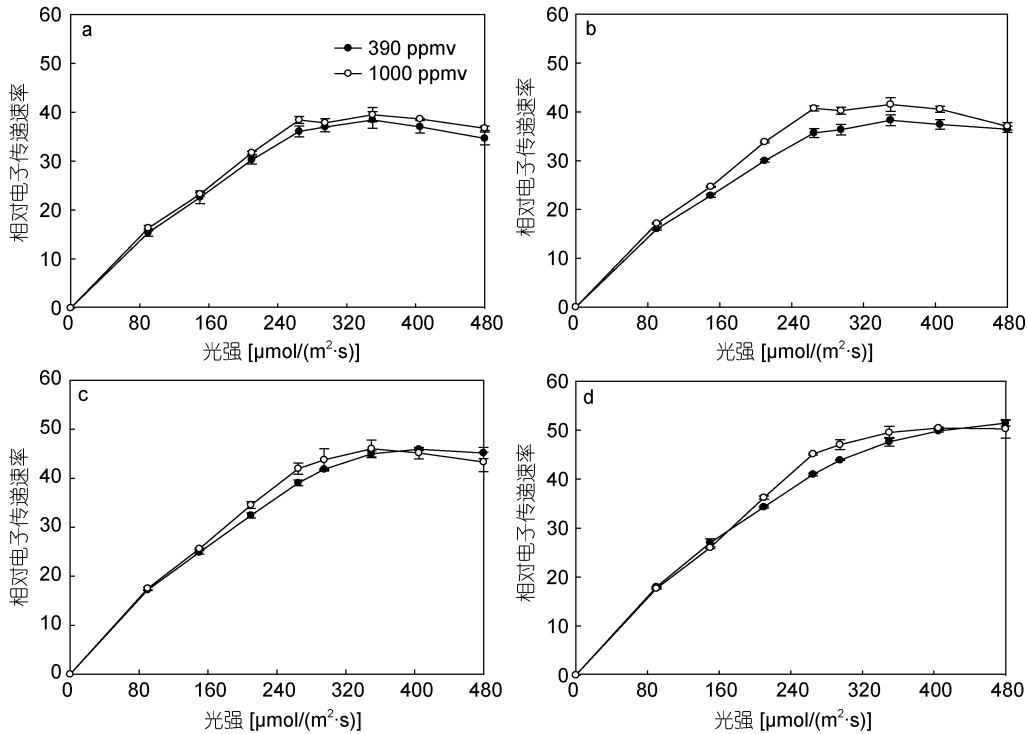


图1 不同CO₂浓度下盐生杜氏藻快速光响应曲线

Fig.1 The curves of rapid response to light by *D. salina* under different $p\text{CO}_2$ in different exposure durations
注: a: 光照时间24h; b: 48h; c: 72h; d: 96h

表1 24、48、72、96h时不同CO₂浓度下盐生杜氏藻快速光响应曲线拟合参数

Tab.1 Parameter derived from curves of rapid response to light by *D. salina* under different $p\text{CO}_2$ in 24h, 48h, 72h and 96h

时间(h)	CO ₂ 浓度(ppmv)	α	β	rETRmax	E_k
24	390	0.24±0.01	0.40±0.14	36.68±1.24	151.64±0.31
	1000	0.25±0.00	0.56±0.03	39.44±0.44	153.17±2.16
48	390	0.24±0.00	0.43±0.07	38.48±0.80	160.29±2.77
	1000	0.27±0.01*	0.41±0.08	40.22±1.00	144.25±2.23*
72	390	0.23±0.00	0.35±0.09	47.03±1.74	198.65±6.74
	1000	0.28±0.01*	0.38±0.06	48.55±0.56	172.41±5.36*
96	390	0.24±0.00	0.22±0.02	55.75±1.35	228.01±3.15
	1000	0.26±0.00*	0.32±0.01*	52.96±1.35	198.59±6.08*

注: α 代表光能利用效率; β 代表光抑制参数; rETRmax 代表最大相对电子传递速率; E_k 代表饱和光强。“*”表示与对照组具有显著性差异($P<0.05$)

以 PAR 强度为横坐标, 以相应的非光化学淬灭值为纵坐标作图(图2), 得到不同 CO₂ 浓度下, 盐生杜氏藻非光化学淬灭值随 PAR 的变化规律。结果表明, 随着 PAR 强度的上升, 所有实验组中的 NPQ 值均逐渐增大。通过对比 24、48、72、96h 时, 390 和

1000ppmv CO₂ 条件下盐生杜氏藻非光化学淬灭值发现, 24、48、72h 内, 当 PAR 大于 150 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时, 1000ppmv CO₂ 条件下的 NPQ 值均大于 390ppmv CO₂ 条件下; 96h 时, 在 PAR 较低时[0—150 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$], 390ppmv CO₂ 条件下的 NPQ 显著高

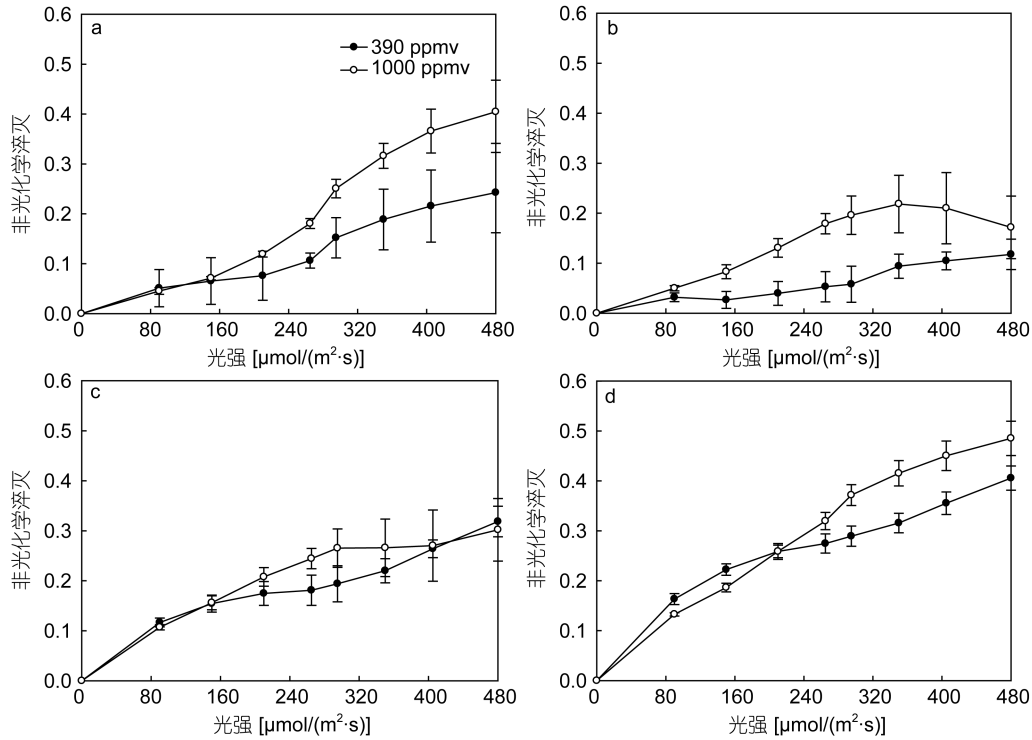


图 2 不同 CO₂ 浓度下不同光照时间盐生杜氏藻非光化学淬灭

Fig.2 NPQ (non-photochemical quenching) of *D. salina* under different pCO₂ in different light exposure durations

注: a: 光照时间 24h; b: 48h; c: 72h; d: 96h

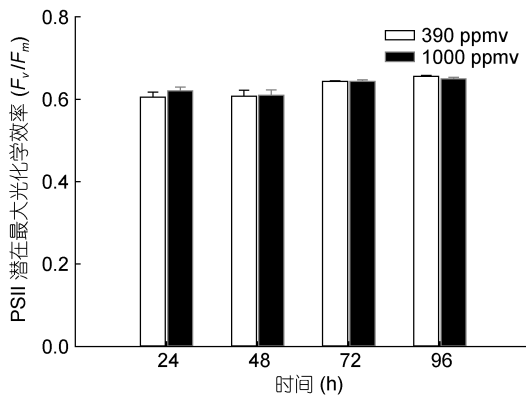


图 3 不同 CO₂ 浓度下不同光照时间对盐生杜氏藻 PS II 的潜在最大光合作用效率 (F_v/F_m) 的关系

Fig.3 F_v/F_m of *D. salina* under different pCO₂ in different light exposure length

注: a: 光照时间 24h; b: 48h; c: 72h; d: 96h

于 1000ppmv CO₂ ($P<0.05$), 随着 PAR 的上升, 390ppmv CO₂ 条件下 NPQ 值增长速度逐渐低于 1000ppmv CO₂ 条件下, 当 PAR 值大于 295 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时, 1000ppmv CO₂ 条件下 NPQ 显著高于 390ppmv CO₂ 条件下 NPQ 值。

24、48、72、96h 时, 390 和 1000ppmv CO₂ 条件下盐生杜氏藻诱导光曲线中 PS II 的潜在 F_v/F_m 和 PS II 的实际光合效率如图 3 和图 4 所示。结果表明,

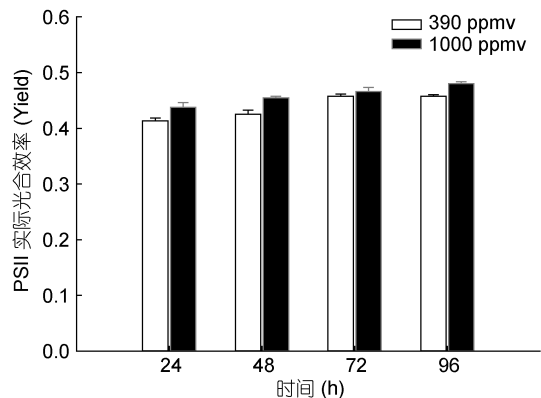


图 4 24、48、72、96h 时不同 CO₂ 浓度下盐生杜氏藻 PS II 的实际光合效率

Fig.4 Yield of *D. salina* under different pCO₂ at 24h, 48h, 72h, 96h.

在 24、48、72、96h 时, 390 和 1000ppmv CO₂ 条件下盐生杜氏藻 PS II 的潜在 F_v/F_m 均无显著差异。然而, 在 24、48、96h 时, 与对照组相比, 1000ppmv CO₂ 条件下盐生杜氏藻的 PS II 的实际光合效率分别被促进了 5.8% ($P<0.05$)、6.9% ($P<0.05$) 和 3.8% ($P<0.05$)。

3 讨论

当外界环境发生变化时, 叶绿素荧光是反映环境变化对光合生物影响的重要指标之一(Maxwell et

al, 2000), 能够客观地反映光合生物本身的光合特征及其对环境变化的适应能力(Jiang *et al*, 2003; 李鹏民等, 2005)。通过叶绿素荧光技术测定光合生物的快速光响应曲线和诱导曲线, 不但可以反映细胞在实验条件下对光能的分配和响应能力, 同时也可以反映细胞在不同光合环境条件下的潜在光合特征(Frank *et al*, 1996)。本研究结果表明, CO₂ 浓度升高并没有改变盐生杜氏藻 PS II 的 F_v/F_m 和 $rETR_{max}$, 这与徐金涛等(2016)对塔玛亚历山大藻的研究结果相反, 当 CO₂ 浓度由 370ppmv 增加至 1000ppmv 时, 塔玛亚历山大藻的 F_v/F_m 值和 $rETR_{max}$ 显著增加。尽管 CO₂ 升高并没有改变盐生杜氏藻的 F_v/F_m 和 $rETR_{max}$, 但是从光能利用效率、半饱和光强以及 PS II 的实际光化学量子产额的角度上来讲, CO₂ 浓度升高对盐生杜氏藻的 PS II 产生了积极的促进作用。通常来说, 光能利用效率(α)反映了光合生物对光能的吸收和利用效率(Fu *et al*, 2007, 2008)。对盐生杜氏藻来说, 高浓度 CO₂ 条件下盐生杜氏藻的光能利用效率明显高于对照组, 这可能是由于对照组中, 更多的能量被用来浓缩 CO₂ 以满足核酮糖-1,5 二磷酸羧化酶的需要, 因此在吸收光能不变的情况下, 高浓度 CO₂ 下更多的能量被用于光合固碳, 从而提高了光能利用效率(Olischläger *et al*, 2013)。类似的结果在 *Synechococcus* sp. 和 *Ulva prolifera* 中也同样被发现(Fu *et al*, 2007; Liu *et al*, 2012)。Olischläger 等(2013)发现, 在 10°C 条件下, *Neosiphonia harveyi* 的光能利用效率在 1411ppmv CO₂ 条件下被显著促进, 但是当温度升高至 17.5°C 时, CO₂ 升高对其光能利用效率无显著影响, 这说明其他环境因子(如温度)在一定程度上会影响光能利用效率对 CO₂ 升高的响应。

半饱和光强 E_k 代表光合生物保持捕获光能和处理光能的最佳平衡点(Olischläger *et al*, 2013)。本实验中, 在高浓度 CO₂ 条件下, 光能利用效率的升高和未发生显著变化的最大相对电子传递速率引起盐生杜氏藻 E_k 的降低。CO₂ 浓度升高导致的 E_k 降低并非普遍存在于所有浮游植物类群中, Suárez-Álvarez 等(2012)的实验表明, *Hypnea spinella* 的 E_k 在高浓度 CO₂ 条件下显著增加, 这可能是 CO₂ 升高使得最大相对电子传递速率被显著促进所导致的; 另外, 也有研究表明, CO₂ 升高并不改变浮游植物的 E_k (Wu *et al*, 2010; Yang *et al*, 2012)。从这个角度上讲, 未来在海洋酸化条件下, 盐生杜氏藻对光照强度的依赖程度将会减弱, 大大降低了在自然环境中遭受光强限制

的可能性。与酸化情况下 E_k 不变或升高的浮游植物类群相比, 盐生杜氏藻在种群竞争和群落演替过程中将比现在更具竞争优势。

不断加剧的海洋酸化将会对海洋中的钙化生物产生严重的威胁, 主要表现为降低钙化生物的钙化速率、表面钙片脱落等(Gao *et al*, 1993; Riebesell *et al*, 2000)。对海洋中的非钙化生物来说, 虽然 CO₂ 升高导致的海洋酸化促进了非钙化生物的生长、光合和初级生产力, 但是酸化对非钙化生物同样也是一个潜在的胁迫因子。本研究发现, 在 1000ppmv CO₂ 条件下, 盐生杜氏藻光系统 II 的光抑制率(β)显著增加, 并且伴随着较高的 NPQ 值。Tchernov 等(2001)指出, 浮游植物可以通过无机碳浓缩机制(CCMs)的运行耗散多余的光能、分流电子以起到缓解光抑制的作用。因此, 盐生杜氏藻光抑制程度增加可能是由于高浓度 CO₂ 下调了 CCMs 的运行所致。在光限制条件下, 下调 CCMs 所节省的能量可能会促进浮游植物的生长和光合作用; 但是在光充足的情况下, 这部分能量不但不会补充藻细胞对光能的需求, 反而增加了过剩光能引起的光抑制程度, 类似的结果在三角褐指藻和浒苔幼苗中也同样被发现(Wu *et al*, 2010; Liu *et al*, 2012)。

4 结论

基于本实验的结果, CO₂ 导致的海洋酸化将会对盐生杜氏藻光系统 II 产生促进作用, 主要表现为增加的光能利用效率和 PS II 的实际光化学量子产额以及降低的半饱和光强; 但是在光能充足的条件下, CO₂ 升高导致的海洋酸化增加了盐生杜氏藻的光抑制程度, 并且导致了更高的 NPQ 值。海洋酸化对盐生杜氏藻的正面效应和负面效应的净值将决定其最终对海洋酸化的响应。比较之前的研究可以发现, 浮游植物对海洋酸化的响应存在种间差异, 而这种种间差异很可能会改变浮游植物的种间竞争关系, 甚至会影响浮游植物类群的进化。

参 考 文 献

- 李鹏民, 高辉远, Strasser R J, 2005. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用. 植物生理与分子生物学学报, 31(6): 559—566
- 陈斌斌, 2015. 海洋酸化背景下经济海藻龙须菜与坛紫菜的生物学特性. 广州: 华南理工大学博士学位论文
- 徐金涛, 庞 敏, 马 新等, 2016. CO₂ 加富对塔玛亚历山大藻叶绿素荧光参数及产毒的影响. 海洋与湖沼, 47(3): 557—563

- Caldeira K, Wickett M E, 2003. Oceanography: anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*, 425(6956): 365
- Doney S C, Fabry V J, Feely R A *et al*, 2009. Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science*, 1: 169—192
- Fabry V J, Seibel B A, Feely R A *et al*, 2008. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science*, 65(3): 414—432
- Frank H A, Cogdell R J, 1996. Carotenoids in photosynthesis. *Photochemistry and Photobiology*, 63(3): 257—264
- Fu F X, Warner M E, Zhang Y *et al*, 2007. Effects of increased temperature and CO₂ on photosynthesis, growth, and elemental ratios in marine *Synechococcus* and *Prochlorococcus* (cyanobacteria). *Journal of Phycology*, 43(3): 485—496
- Fu F X, Zhang Y, Warner M E *et al*, 2008. A comparison of future increased CO₂ and temperature effects on sympatric *Heterosigma akashiwo* and *Prorocentrum minimum*. *Harmful Algae*, 7(1): 76—90
- Gao K, Aruga Y, Asada K *et al*, 1993. Calcification in the articulated coralline alga *Corallina pilulifera*, with special reference to the effect of elevated CO₂ concentration. *Marine Biology*, 117(1): 129—132
- Hughes L, 2000. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? *Trends in Ecology & Evolution*, 15(2): 56—61
- Jiang C D, Gao H Y, Zou Q, 2003. Changes of donor and acceptor side in photosystem 2 complex induced by iron deficiency in attached soybean and maize leaves. *Photosynthetica*, 41(2): 267—271
- Liu Y T, Xu J T, Gao K, 2012. CO₂-driven seawater acidification increases photochemical stress in a green alga. *Phycologia*, 51(5): 562—566
- Maxwell K, Johnson G N, 2000. Chlorophyll fluorescence—a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345): 659—668
- Olischläger M, Wiencke C, 2013. Ocean acidification alleviates low-temperature effects on growth and photosynthesis of the red alga *Neosiphonia harveyi* (Rhodophyta). *Journal of Experimental Botany*, 64(18): 5587—5597
- Platt T, Gallegos C L, Harrison W G, 1980. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton. *J Mar Res*, 38: 687—701.
- Riebesell U, Zondervan I, Rost B È *et al*, 2000. Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂. *Nature*, 407(6802): 364-367.
- Suárez-Álvarez S, Gómez-Pinchetti J L, García-Reina G, 2012. Effects of increased CO₂ levels on growth, photosynthesis, ammonium uptake and cell composition in the macroalga *Hypnea spinella* (Gigartinales, Rhodophyta). *Journal of Applied Phycology*, 24(4): 815—823
- Tchernov D, Helman Y, Keren N *et al*, 2001. Passive entry of CO₂ and its energy-dependent intracellular conversion to HCO₃⁻ in cyanobacteria are driven by a photosystem I-generated ΔμH⁺. *Journal of Biological Chemistry*, 276(26): 23450—23455
- Wu Y, Gao K, Riebesell U, 2010. CO₂-induced seawater acidification affects physiological performance of the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Biogeosciences*, 7(9): 2915—2923
- Yang G Y, Gao K S, 2012. Physiological responses of the marine diatom *Thalassiosira pseudonana* to increased pCO₂ and seawater acidity. *Marine Environmental Research*, 79: 142—151

EFFECTS OF ELEVATED CO₂ ON CHLOROPHYLL FLUORESCENCE TO *DUNALIELLA SALINA*

ZANG Yu¹, HUANG Zhi-Yuan³, ZHAO Xin-Yu¹, HU Shun-Xin^{1,2}

(1. College of Marine Life Science, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006, China;

3. Qingdao No. 58 High School of Shandong Province, Qingdao 266199, China)

Abstract The increasing atmosphere carbon dioxide have led to a reduction in pH in the ocean and caused a wide range of environment, ecology, and climate problems. To investigate the potential effect of elevated CO₂ on marine microalgae photosynthesis, *Dunaliella salina* was exposed to two different pCO₂ levels: 390 and 1000 ppmv. Results show that the elevated CO₂ level stimulated the light utilization efficiency (α), actual photochemical efficiency (Yield), non-photochemical quenching (NPQ), and photoinhibition rate (β), decreased the light saturation point (E_k) of *D. salina*, while rETR_{max} and F_v/F_m remained stable.

Key words CO₂; ocean acidification; *Dunaliella salina*; the chlorophyll fluorescence