

# 三种大型绿藻光合能力的差异及其在珊瑚养殖中的应用\*

杨小舟<sup>1,2</sup> 郑新庆<sup>1\*\*</sup> 林荣澄<sup>1</sup> 黄丁勇<sup>1</sup> 施晓峰<sup>1</sup> 牛文涛<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>国家海洋局第三海洋研究所, 福建厦门 361005; <sup>2</sup>厦门大学生命科学学院, 福建厦门 361005)

**摘要** 利用水下饱和脉冲调制叶绿素荧光仪(Diving-PAM)测定了珊瑚养殖水处理中3种常见大型海藻石莼(*Ulva lactuca*)、条浒苔(*Enteromorpha clathrata*)和羽状蕨藻(*Caulerpa mexicana*)光能转化效率( $F_v/F_m$ )、快速光曲线(RLC)相关参数和非光化学淬灭(NPQ)。结果表明:石莼和条浒苔的 $F_v/F_m$ 分别为 $0.808 \pm 0.004$ 和 $0.816 \pm 0.009$ ,显著高于羽状蕨藻。最大相对电子传递速率 $rETR_{max}$ ( $17.52 \pm 2.92$ 和 $19.59 \pm 4.43 \mu\text{mol } e \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、半饱和光强 $I_k$ ( $53.41 \pm 8.18$ 和 $59.71 \pm 13.52 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )也明显高于羽状蕨藻( $rETR_{max}$ 和 $I_k$ 分别为 $13.72 \pm 5.41 \mu\text{mol } e \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $32.67 \pm 14.06 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )表明石莼和条浒苔有着比羽状蕨藻更高的光合能力和对强光的耐受能力,光保护能力更强;羽状蕨藻较高的RLC初始斜率 $\alpha$ 表明其在弱光下拥有更强的光捕获能力,弱光下光合效率更高;随光照的增强( $0 \sim 373 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),羽状蕨藻NPQ的增幅有限( $0 \sim 0.2$ ),最大值仅为条浒苔和石莼的38.1%和62.5%,表明这种藻类更容易受到强光的抑制。因此,在珊瑚养殖的水处理中,可以根据不同的光照选择适宜的藻种或藻种组合并根据光梯度进行布局,反之也可以根据藻种来选择合适的光源,以达到最佳的处理效率。

**关键词** 大型海藻; 光合能力; 光能转化效率; 快速光曲线; 非光化学淬灭; 珊瑚养殖  
中图分类号 S963 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2014)6-1528-06

**Photosynthetic capacity of three common species of macroalgae and the application in coral aquarium.** YANG Xiao-zhou<sup>1,2</sup>, ZHENG Xin-qing<sup>1\*\*</sup>, LIN Rong-cheng<sup>1</sup>, HUANG Ding-yong<sup>1</sup>, SHI Xiao-feng<sup>1</sup>, NIU Wen-tao<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, Fujian, China; <sup>2</sup>School of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(6): 1528–1533.

**Abstract:** This study investigated the difference of photosynthetic capacity in three macroalgae species (*Ulva lactuca*, *Enteromorpha clathrata*, and *Caulerpa mexicana*) commonly used for nutrient removal in coral aquariums. The photochemical efficiency ( $F_v/F_m$ ), parameters relevant to rapid light curve (RLC) and non-photochemical quenching (NPQ) in the macroalgae were measured by underwater saturation pulse modulated chlorophyll fluorometer (Diving-PAM). The results showed that  $F_v/F_m$  was  $0.808 \pm 0.004$  for *U. lactuca* and  $0.816 \pm 0.009$  for *E. clathrata*, which were higher than that for *C. mexicana*. Higher maximum relative electron transfer rates ( $rETR_{max}$ ) ( $17.52 \pm 2.92$  and  $19.59 \pm 4.43 \mu\text{mol } e \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and half-starved value of light intensities ( $I_k$ ) ( $53.41 \pm 8.18$  and  $59.71 \pm 13.52 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) were observed in *U. lactuca* and *E. clathrata* than that in *C. mexicana* ( $13.72 \pm 5.41 \mu\text{mol } e \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  for  $rETR_{max}$  and  $32.67 \pm 14.06 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  for  $I_k$ ), indicating that *U. lactuca* and *E. clathrata* have stronger photosynthetic capacities, photo-protection capacities and tolerance to higher intense light than *C. mexicana*. A significantly lower RLC initial slope  $\alpha$  in *C. mexicana* implied that this algal species has a higher photosynthetic capacity under weak light condition. With increasing the light intensity ( $0 \sim 373 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), however, *C. mexicana*

\* 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务项目(海三科 2011033)、厦门海洋研究开发院共建项目和海洋公益性行业科研项目(201105012)资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: daozi@xmu.edu.cn

收稿日期: 2013-10-10 接受日期: 2014-02-27

had a limited increase of  $NPQ$  ( $0 - 0.2$ ), the maximum of which was equivalent to 38.1% of that in *U. lactuca* and 62.5% of that in *E. clathrata*. These results indicate that the photosynthesis of *E. clathrata* may be more easily limited by intense light. Our study suggests that the selection of algal species for nutrient removal in a coral aquarium should be adapted to the light intensity. Single species or the combination of different species of macroalgae can be selected according to the illumination of the coral aquarium in order to maximize the efficiency of nutrient removal.

**Key words:** macroalgae; photosynthetic capacity; photochemical efficiency; rapid light curve; non-photochemical quenching; coral aquarium.

现代人生活忙碌,生活压力大,饲养水族宠物已成为排遣压力的渠道之一。其中,浅水珊瑚形态多样,色彩斑斓,备受关注。据估计,每年大量的珊瑚(主要来自印尼)通过各种渠道流向世界各地,并且以每年12%~30%的速率在增长(Timotius 2009),所带动的产值约高达150亿美元(Chao & Prang, 1997; Bartley, 1999)。不过,珊瑚对水质要求较高,饲养难度大。目前市面上涉及海水养殖的生命支持系统(life supporting system)大多价格高昂,维护困难,耗电量大,而且很难长时间维持系统的稳定。因此,构建一个稳定、高效又经济的水处理系统是推广珊瑚室内人工养殖优先需要解决的问题。

在海水养殖中,大型海藻是一个非常重要的“营养盐过滤器”。利用海藻吸收水体中的无机营养盐的报道屡见不鲜。在污水处理和富营养化水体的修复当中,利用大型藻类进行生态化处理的方法被普遍的接受和采用(刘静雯和董双林 2001; 岳维忠等 2004; da Silva Copertino *et al.* 2009; 邹定辉和夏建荣 2011)。大型海藻已经成为海水养殖业的一个重要生物处理方法。在珊瑚养殖中,结合柏林系统混养大型藻类构建复合珊瑚养殖系统是控制养殖水体富营养化的有效措施之一。

蕨藻属(*Caulerpa*)、石莼属(*Ulva*)和浒苔属(*Enteromorpha*)是热带、亚热带海域较为常见的大型海藻。由于生长迅速,这几类海藻常被作为“营养盐过滤器”生物广泛应用于海水养殖当中。尤其是蕨藻属的种类,由于生长迅速,可以迅速将系统的营养物质转化为其生物量,存在假根可以附着在硬质基底(活石上)以及观赏性强等特性,被广泛应用于珊瑚养殖的水处理当中。例如,由LengSy建立的生态水族缸(Ecosystem Aquarium<sup>®</sup>)就将蕨藻与神奇泥(Miracle Mud<sup>®</sup>)搭配运用在水处理系统中(Delbeek & Sprung 2005)。不过,与其应用的广泛相比,蕨藻属藻类的营养盐吸收动力学及其光合作用特性的研究还不多。一般来说,大型藻类对营养

盐的吸收效率与其光合作用特性密切相关(Nagahama & Hirata, 1990; Cohen & Neori, 1991; 程丽巍等, 2010)。从目前公开发表的文献来看,浒苔、石莼属藻类的光合作用特性研究的报道较多(Beer *et al.*, 2000; Han *et al.*, 2008; 王超等, 2008; 汤文仲等, 2009),但蕨藻属的研究相对较少,仅总状蕨藻(*Caulerpa racemosa*)和杉叶蕨藻(*Caulerpa taxifolia*)等有少量报道(Driscoll 2004; García-Sánchez *et al.*, 2012),而对羽状蕨藻(*Caulerpa mexicana*)的光合特性研究仅见于Ukabi(2013)的报道。不同属或种的藻类,它们的光合作用特性经常存在明显的差异。因此,只有摸清它们的光合作用特征,才能充分利用其营养盐吸收效率,达到高效处理营养盐的目的。野外调查显示,这三类海藻的生活习性并不一致,石莼、浒苔通常都生活于潮间带或者水深较浅的区域,并且生活的区域通常会面临退潮时直接裸露于阳光下照射,而蕨藻属的藻类则能够分布于水深相对较深的区域,甚至在光照很弱的30~70 m水深的区域都有分布(Klein 2008)。此外,我们在室内的养殖中也发现,藻缸(Refugium)内的羽状蕨藻(*C. mexicana*)、条浒苔(*E. clathrata*)和石莼(*U. lactuca*)存在明显的光梯度分布特征,推测可能是受到光可利用性的制约。这促使我们对这3种海藻光需求的差异进行思考,以便能挑选出最适宜的藻种或多种海藻的组合来最大程度地提高海藻营养盐过滤器的效率。鉴于已有的资料不能较好地阐明羽状蕨藻、条浒苔和石莼的光需求的差异,所以本研究利用水下脉冲调制荧光仪(Diving-PAM),分别测定了珊瑚养殖水处理系统中3种大型绿藻石莼、条浒苔和羽状蕨藻在不同光照下的多组光合参数,对3种大型海藻光合特性进行比较,以了解这3种被广泛应用到海水养殖当中的海藻的光适应性和耐受性,并填补蕨藻属藻类在这方面研究的不足。此外,本研究还旨在充分了解这3种海藻光合特性的基础上,科学地选择合适的藻种或藻种组合构建造礁珊瑚养殖系

统的“营养盐生物过滤器”,为开发经济、简约的海水水族缸提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

于实验室珊瑚饲养缸(温度 25 °C,盐度 34, pH 8.4)内取样石莼、条浒苔和羽状蕨藻。3种海藻生长于同一玻璃缸中,鱼缸大小(长×宽×高)为 85 cm×40 cm×35 cm,相互未形成遮蔽。珊瑚缸正上方设有光强的 250 W 金属卤素灯,光周期设定为 10 h/14 h(light/darkness)。

经过一段时间养殖,3种海藻在藻缸内自行生长。缸内3种海藻的生长区域不同,石莼集中生长于灯下方距离光源较近的活石上,条浒苔则大量附着在缸壁或漂浮在水面上,而羽状蕨藻则生长在离光源较远的区域,不同藻类分布区域的光强如表1所示,数据通过水下脉冲调制叶绿素荧光仪 Diving-PAM(WALZ公司)上的光量子探头测得。

### 1.2 实验方法

通过德国 Diving-PAM 测定3种海藻的多组光合参数(重复数  $n=8$ )。

最大量子产量  $F_v/F_m$ 。早晨灯未亮起时,连接叶夹夹于藻体成熟叶片距离叶尖约 2 cm 处。开启检测光( $0.15 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),得到暗适应条件下光系统 II(PS II)最小荧光  $F_0$ 。再由饱和脉冲光( $8000 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )激发测得暗适应的最大荧光  $F_m$ 。根据  $F_0$  和  $F_m$  计算出  $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$  以反映 PS II 反应中心内光能转换效率或潜在的光能转化效率。

快速光曲线的测量 RLC。选取健康的藻体,将藻体夹在 Diving-PAM 的叶夹上,通过叶夹连接到探头上。光化光强度(PAR)梯度设置为 0、10、29、58、92、138、189、278、373  $\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,快速光曲线的测量由仪器内部电脑控制,打开光化光和测量光,适应 20 s 后打开饱和脉冲,之后提升光化光强度并适应 20 s,再次打开饱和脉冲,如此重复

表 1 三种藻类缸内生长区域的光强 ( $\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Table 1 Light density of growth region in tank for three macroalgae species

藻类	光强
石莼 <i>Ulva lactuca</i>	150~200
条浒苔 <i>Enteromorpha clathrata</i>	30~150
羽状蕨藻 <i>Caulerpa mexicana</i>	15~70

9次。打开饱和脉冲前的荧光为  $F_s$ ,打开饱和脉冲后的最大荧光为  $F_m'$ ,可变荧光  $\Delta F = F_m' - F_s$ 。由此可以获得 PS II 的有效量子产量  $Yield = \Delta F/F_m' = (F_m' - F_s)/F_m'$ ,根据  $Yield$  和  $PAR$  可以计算出相对电子传递速率  $rETR = Yield \times PAR \times 0.5 \times 0.84$ 。其中 0.84 是植物的经验性吸光系数,0.5 是假设吸收的光能被 PS I 和 PS II 平均分配(Cohen & Neori, 1991)。

快速光曲线的拟合:通过 Wincontrol 程序导出测定的数据,利用 Statistica 10.0 进行快速光曲线拟合,拟合采用 Platt 等(1981)的公式:

$$P = P_s \cdot (1 - e^{-\frac{\alpha \cdot PAR}{P_s}}) \cdot e^{-\frac{\beta \cdot PAR}{P_s}} \quad (1)$$

式中  $P_s$  为无光抑制时的潜在最大相对电子传递速率  $rETR_{\text{max}}$ ,单位为  $\mu\text{mol e} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , $\alpha$  为快速光曲线的初始斜率, $\beta$  为光抑制参数, $PAR$  为光合有效辐射强度( $\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

$I_k$  为半饱和光强,根据  $P_s/\alpha$  计算而得。

非光化学淬灭(non-photochemical quenching, NPQ):反映了植物耗散过剩光能为热能的能力,由 Diving-PAM 测量计算得出。

$$NPQ = (F_m - F_m') / F_m' = F_m/F_m' - 1 \quad (2)$$

式中  $F_m'$  为打开饱和脉冲后的最大荧光, $F_m$  为暗适应的最大荧光。

### 1.3 数据处理

通过 SPSS 17.0 和 Sigmaplot 10.0 进行数据处理和作图。采用单因素方差分析 HSD 检验不同海藻之间  $F_v/F_m$ 、RLC 的相关参数( $rETR_{\text{max}}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $I_k$ ) 和 NPQ 的差异性, $P < 0.05$  为差异显著, $P < 0.001$  为差异极显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 三种海藻光系统 PS II 最大量子产量的差异 ( $F_v/F_m$ )

3种海藻的 PS II 最大量子产量( $F_v/F_m$ )如图1所示。石莼和条浒苔的  $F_v/F_m$  分别为  $0.808 \pm 0.004$  和  $0.816 \pm 0.009$ ,二者差异不显著( $P > 0.05$ ),但都明显高于羽状蕨藻( $P < 0.05$ )。

### 2.2 快速光曲线 RLC 的比较

从图2可见,随着激发光的光照增强,在光强超过  $150 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,石莼和条浒苔的  $rETR$  达到平台区并随着光强的增强而逐渐缓慢下降;而羽状蕨藻在光强超过  $50 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,其  $rETR$  即开始下降,并随着光强的持续增强

表 2 三种藻类的光合参数

Table 2 Photosynthetic parameters of three macroalgae species

物种	初始斜率 $\alpha$	光抑制参数 $\beta$	最大相对电子传递速率 $rETR_{max}$	半饱和光强 $I_k$
石莼	$0.328 \pm 0.014$ a	$0.011 \pm 0.008$ a	$17.522 \pm 2.922$ a	$53.412 \pm 8.182$ a
条浒苔	$0.328 \pm 0.016$ a	$0.027 \pm 0.016$ a	$19.594 \pm 4.432$ a	$59.707 \pm 13.520$ a
羽状蕨藻	$0.418 \pm 0.051$ b	$0.164 \pm 0.135$ b	$13.718 \pm 5.408$ b	$32.674 \pm 14.061$ b

\* 同一列不同字母表示经单因素方差检验不同海藻之间差异显著 ( $P < 0.05$ ) 相同字母表示差异不显著。

迅速衰减至 0。这表明羽状蕨藻的光电子传递速率显著低于石莼和条浒苔 并且表现出明显的强光抑制特性。

通过对 3 种藻类的快速光曲线进行拟合 得出三者的拟合方程参数 ( $R^2 > 0.99$   $P < 0.001$ )。从表 2 可以看出 石莼和条浒苔 RLC 的初始斜率  $\alpha$  差异并不显著 均值和标准差接近 ,分别为  $0.328 \pm 0.014$  和  $0.328 \pm 0.016$  ( $P > 0.05$ ) ,明显低于羽状蕨藻 ( $0.418 \pm 0.051$ ) ( $P < 0.01$ )。最大相对电子传递速率  $rETR_{max}$  ( $17.522 \pm 2.922$  和  $19.594 \pm 4.432 \mu\text{mol } e \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 和半饱和光强 ( $53.412 \pm 8.182$  和  $59.707 \pm$

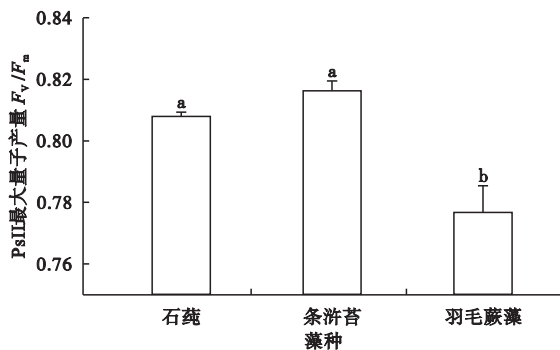


图 1 三种海藻的 PS II 最大量子产量 ( $F_v/F_m$ )  
Fig. 1 PS II maximal quantum yield of photosynthesis ( $F_v/F_m$ ) of three macroalgae species

\* 柱上不同字母表示不同海藻之间差异显著 ( $P < 0.05$ ) 相同字母表示差异不显著。

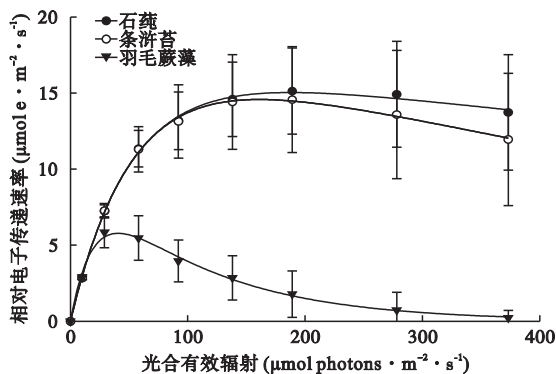


图 2 三种藻类的拟合快速光曲线图  
Fig. 2 Fitting rapid light curve of three species of macroalgae

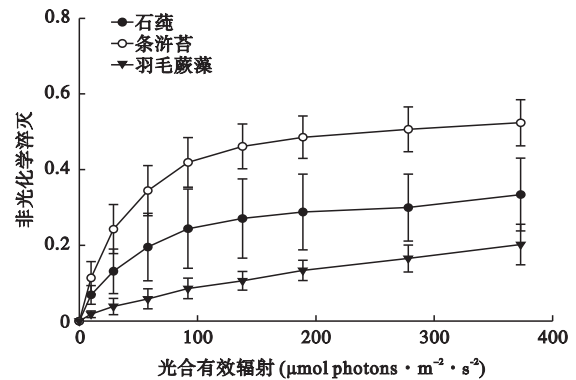


图 3 三种藻类 NPQ 值随光照强度变化曲线  
Fig. 3 NPQ changes along with the changes in illumination of three species of macroalgae

$13.520 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  ,也明显高于羽状蕨藻 ( $P < 0.05$ )。而光抑制参数  $\beta$  分别为  $0.011 \pm 0.008$  和  $0.027 \pm 0.016$  ,分别约为羽状蕨藻的 1/15 和 1/6 远低于羽状蕨藻 ( $P < 0.001$ )。

### 2.3 非光化学淬灭

NPQ 随光照的变化曲线显示(图 3) ,随着激发光强度的增加 3 种海藻的 NPQ 曲线皆表明出明显上升的趋势 ,但三者之间差异显著 ( $P < 0.01$ )。其中条浒苔的 NPQ 值增幅最为明显 ,石莼次之 ,羽状蕨藻最低且增幅有限 ( $0 \sim 0.2$ ) ,仅为条浒苔和石莼的 38.1% 和 62.5%。

## 3 讨论

### 3.1 三种藻类的光合特性比较

叶绿素荧光与光合作用密切相关 ,环境因子对光合作用的影响可通过叶绿素荧光参数反映出来 (Schreiber *et al.* ,1997)。 $F_v/F_m$ 反映的是当所有 PS II 反应均处于开放状态时的量子产量 ,即植物的潜在最大光合能力 ,是衡量 PS II 完整性的指标(张守仁 ,1999)。本实验中 ,羽状蕨藻的  $F_v/F_m$  值低于石莼和条浒苔 ,表明羽状蕨藻的潜在最大光合能力低于石莼和条浒苔 ,这与高亚平等(2011)、Häder 等(2001)、Kühl 等(2001)的研究均相符。

Enríquez和Borowitzka(2010)指出 ,要准确测定

表3 部分藻类的PSII最大量子产量  
Table 3 PS II maximal quantum yield of photosynthesis ( $F_v/F_m$ ) of some species of macroalgae

藻类	$F_v/F_m$	来源
石莼 <i>Ulva lactuca</i>	0.808 ± 0.004	本研究
条浒苔 <i>Enteromorpha clathrata</i>	0.816 ± 0.009	本研究
羽状蕨藻 <i>Caulerpa mexicana</i>	0.777 ± 0.025	本研究
孔石莼 <i>U. pertusa</i>	0.74	高亚平等 2011
缘管浒苔 <i>E. linza</i>	0.728 ± 0.022	汤文仲等 2009
总状蕨藻 <i>Caulerpa racemosa</i>	0.766 ± 0.012	Raniello et al. 2006

$F_v/F_m$  值 植物必须在完全无环境压力影响光化学变化的状态下测定,最好是较长时间的避免光照射或背景光较低情况下的暗适应(6~7 h)。在植株健康的情况下, $F_v/F_m$ 值受光环境的波动影响较大,健康绿藻的 $F_v/F_m$ 值通常为0.75左右(Enríquez & Borowitzka 2010)。我们所测的藻类均在藻缸中自由生长,水体环境与海域相近,并且经过较长时间暗适应,所测得的 $F_v/F_m$ 值比其他研究同属或同种藻类的值均略高(表3),表明实验所用的海藻均处于健康状态,并且测定的时候暗适应充分,PSII光反应中心没有受到破坏。

植物的相对电子传递速率表示植物吸收的光能沿光合电子传递链被传递利用了多少,很大程度上反映了植物光合作用的能力(Harrison et al., 1989)。本研究结果显示,无论是最大光合速率 $rETR_{max}$ 还是半饱和光强 $I_k$ ,石莼和条浒苔都明显高于羽状蕨藻,表明条浒苔和石莼的光合作用能力大于羽状蕨藻,这个结果与 $F_v/F_m$ 的测定结果相符合(图1)。羽状蕨藻较高的 $\alpha$ 值、 $\beta$ 值和较低的 $I_k$ 值表明,尽管羽状蕨藻对强光的耐受能力较低,但它对光能的利用效率更高,即可以在低光照下更有效地利用光能进行光合作用。非光化学淬灭NPQ的数据(图3)也证实了这一点。NPQ指的是在能量作为电子链传递的中间产物过量累积之前,植物可以将能量耗散,以避免电子过量累积导致光化学途径受到伤害(Ralph & Gademann 2005)。它反映了植物耗散过剩光能为热的能力,即植物的光保护能力(Müller et al. 2001)。本研究表明,随着光照的增强,羽状蕨藻的NPQ的增幅有限,仅为条浒苔和石莼的38.1%和62.5%,表明羽状蕨藻在强光下PSII反应中心容易受到破坏,使得光合作用电子传递链受损,进而影响到其正常的光合作用,光保护能力较弱。这也与高亚平等(2011)的研究结果相似,他们在桑沟湾对6种大型海藻光合作用的比较研究中

也发现,较高光合效率和较低半饱和光强的藻类对弱光环境的耐受能力更强,捕光能力更强,容易在低光照条件下存活。从图3也可看出,随着光照增强,条浒苔和石莼相较于羽状蕨藻NPQ上升幅度较大,表明这两种藻类有着较强的耗散过剩光能的能力,光保护能力更强。这给我们在饲养过程观察到的一个现象提供了很好的解释:当长时间强光( $> 400 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )照射羽状蕨藻,羽状蕨藻容易死亡。

### 3.2 三种藻类在室内珊瑚养殖水处理中的应用

石莼、条浒苔和羽状蕨藻三者之间光合作用特性的差异,直接影响了3种藻类分布区域的差异。野外的调查研究显示,石莼一般生活于海岸潮间带,以及海湾内中、低潮带的岩石上,通过基部的固着器固着于岩石上。浒苔通常营漂浮或者附生生活,可以通过光合作用形成气泡使藻体漂浮于水面。石莼和条浒苔生活的区域通常会面临退潮时直接裸露于阳光下照射,因此它们对强光的耐受能力较强。与石莼和浒苔相比,蕨藻属的藻类能够分布于水深相对较深的区域。Klein(2008)在地中海沿岸的调查发现,这些藻类甚至在光照很弱的30~70 m水深的区域都有分布。石莼和条浒苔能适应较强光照,相比之下,羽状蕨藻更喜欢弱光区域,这与本研究藻缸内3种海藻的光梯度分布相似,即由于缸内光照强度的差异,3种藻类生长在不同的区域,占据着不同的生态位:石莼和条浒苔生长于离光源较近的区域,这些区域光照较强( $> 100 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );而羽状蕨藻对强光的耐受性差,在强光下竞争能力较差,因此在强光区几乎没有分布。

因此,在珊瑚养殖水处理当中,可以根据3种海藻不同的光合特性,将3种海藻布置在不同区域,以充分利用光源和养殖空间。例如,在搭配藻缸进行水处理时,通过一段时间附着(活石或者夹板上)后,根据藻类不同的光需求将它们布置到光照强度不同的区域,以利于充分发挥光合作用。又如,在采用强光(金属卤化物灯或LED灯,水底有效光合辐射 $PAR > 50 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )照明时,将石莼和条浒苔置于距离水面较近的位置,而将羽状蕨藻置于靠近缸底的位置,并在藻缸底部铺设沙层以利于蕨藻属藻类生长。如果采用普通节能灯或者荧光灯管等亮度较低的照明设备或者水深较深时(水底有效光合辐射 $PAR < 50 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )应当尽量选用羽状蕨藻等对光需求较低的藻类。

总之, 在进行珊瑚养殖缸水处理系统设置时, 应根据不同的光照条件, 将藻类搭配布置于适当的区域; 反之也可以根据藻类适宜的光照强度选择光源, 以达到最大的营养盐处理效率。这种生态化的水处理方式能高效的处理养殖水体的营养盐, 实现节能、高效的目的。

#### 参考文献

- 高亚平, 张继红, 方建光, 等. 2011. 桑沟湾六种大型海藻光合特性的比较研究. 渔业现代化, **38**(1): 33-37.
- 刘静雯, 董双林. 2001. 海藻的营养代谢及其对主要营养盐的吸收动力学. 植物生理学通讯, **37**(4): 325-330.
- 汤文仲, 李信书, 黄海燕, 等. 2009. 不同光强和温度对长石莼(缘管浒苔)光合作用和叶绿素荧光参数的影响. 水产学报, **33**(5): 762-769.
- 王超, 乔洪金, 潘光华, 等. 2008. 青岛奥帆基地海域漂浮浒苔光合生理特点研究. 海洋科学, **32**(8): 13-15.
- 岳维忠, 黄小平, 黄良民, 等. 2004. 大型藻类净化养殖水体的初步研究. 海洋环境科学, **23**(1): 13-15.
- 张守仁. 1999. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论. 植物学通报, **16**(4): 444-448.
- 邹定辉, 夏建荣. 2011. 大型海藻的营养盐代谢及其与近岸海域富营养化的关系. 生态学杂志, **30**(3): 589-595.
- Bartley DB. 1999. Marine ranching: A global perspective// Howell E, Moskness, and Svasand T, eds. Stock Enhancement and Sea Ranching. Papers from the First International Symposium on Stock Enhancement and Sea Ranching, Bergen, Norway, 8-11 September 1997. Norway: Fishing News Books Ltd: 79-90.
- Beer S, Larsson C, Poryan O, et al. 2000. Photosynthetic rates of *Ulva* (Chlorophyta) measured by pulse amplitude modulated (PAM) fluorometry. *European Journal of Phycology*, **35**: 69-74.
- Chao NL, Prang G. 1997. Project Piaba: Towards a sustainable ornamental fishery in the Amazon. *Aquarium Sciences and Conservation*, **1**: 105-111.
- Cohen I, Neori A. 1991. *Ulva lactuca* biofilters for marine fishpond effluents. I. Ammonia uptake kinetics and nitrogen content. *Botanica Marina*, **34**: 475-482.
- da Silva Copertino M, Tormena T, and Seeliger U. 2009. Biofiltering efficiency, uptake and assimilation rates of *Ulva clathrata* (Roth) J. Agardh (Chlorophyceae) cultivated in shrimp aquaculture waste water. *Journal of Applied Phycology*, **21**: 31-45.
- Delbeek JC, Sprung J. 2005. The Reef aquarium: Science, Art, and Technology. Volume 3. USA: Ricordea Publishing.
- Driscoll MD. 2004. Effects of hydrodynamic regime on photosynthesis in the green alga *Caulerpa*. Graduate School Theses and Dissertations. USA: University of South Florida.
- Enríquez S, Borowitzka M. 2010. The use of the fluorescence signal in studies of seagrasses and macroalgae// Suggett DJ, Prášil O, Borowitzka MA, eds. Chlorophyll a Fluorescence in Aquatic Sciences: Methods and Applications.

Vol. 4. Netherlands: Springer: 187-208.

- García-Sánchez M, Korbee N, Pérez-Ruzafa IM, et al. 2012. Physiological response and photoacclimation capacity of *Caulerpa prolifera* (Forsskål) JV Lamouroux and *Cymodocea nodosa* (Ucria) Ascherson meadows in the Mar Menor lagoon (SE Spain). *Marine Environmental Research*, **79**: 37-46.
- Häder DP, Lebert M, Helbling EW. 2001. Effects of solar radiation on the Patagonian macroalga *Enteromorpha linza* (L.) J. Agardh-Chlorophyceae. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **62**: 43-54.
- Han T, Kang SH, Park JS, et al. 2008. Physiological responses of *Ulva pertusa* and *U. armoricana* to copper exposure. *Aquatic Toxicology*, **86**: 176-184.
- Harrison PJ, Parslow JS, Conway HL. 1989. Determination of nutrient uptake kinetic parameters: A comparison of methods. *Marine Ecology Progress Series*, **52**: 301-312.
- Kühl M, Glud RN, Borum J, et al. 2001. Photosynthetic performance of surface-associated algae below sea ice as measured with a pulse-amplitude-modulated (PAM) fluorometer and O<sub>2</sub> microsensors. *Marine Ecology Progress Series*, **223**: 1-14.
- Klein J, Verlaque M. 2008. The *Caulerpa racemosa* invasion: A critical review. *Marine Pollution Bulletin*, **56**: 205-225.
- Müller P, Li XP, Niyogi KK. 2001. Non-photochemical quenching: A response to excess light energy. *Plant Physiology*, **125**: 1558-1566.
- Nagahama T, Hirata H. 1990. Nitrogen uptake by the sterile *Ulva pertusa*, Ohmura strain, and their interaction to the bacterial communities. *Suisanzoshoku*, **38**: 285-290.
- Platt T, Gallegos C, Harrison W. 1981. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton. *Journal of Marine Research*, **38**: 687-701.
- Ralph PJ, Gademann R. 2005. Rapid light curves: A powerful tool to assess photosynthetic activity. *Aquatic Botany*, **82**: 222-237.
- Raniello R, Lorenti M, Brunet C, et al. 2006. Photoacclimation of the invasive alga *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* to depth and daylight patterns and a putative new role for siphonaxanthin. *Marine Ecology*, **27**: 20-30.
- Schreiber U, Gademann R, Ralph P, et al. 1997. Assessment of photosynthetic performance of *Prochloron* in *Lissoclinum patella* in hospite by chlorophyll fluorescence measurements. *Plant and Cell Physiology*, **38**: 945-951.
- Timotius S. 2009. A review on ornamental coral farming effort in Indonesia// International Ocean Science, Technology, and Policy Symposium: 12-14.
- Ukabi S, Dubinsky Z, Steinberger Y, et al. 2013. Temperature and irradiance effects on growth and photosynthesis of *Caulerpa* (Chlorophyta) species from the eastern Mediterranean. *Aquatic Botany*, **104**: 106-110.

作者简介 杨小舟,男,1989年生,硕士研究生,主要从事珊瑚礁生态学研究。E-mail: yangxiaozhou890303@live.com  
责任编辑 李凤芹