

# 裙带菜配子体和幼孢子体的光合作用特性

张 栩<sup>1, 3</sup>, 李大鹏<sup>2</sup>, 施定基<sup>4</sup>, 谭天伟<sup>1</sup>, 欧阳藩<sup>3</sup>

(1. 北京化工大学 生命科学与技术学院, 北京 100029; 2. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院 过程工程研究所, 北京 100080 4. 中国科学院 植物研究所, 北京 100093)

**摘要:** 裙带菜 (*Undaria pinnatifida*) 幼孢子体光合作用效率和能力明显超过配子体, 在 17℃ 时, 幼孢子体的饱和光强和最大净光合放氧速率分别为 61.90 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 和 139.98 μmol/(mg·h), 而雌配子体分别为 46.75 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 和 71.16 μmol/(mg·h); 幼孢子体所含光合色素的含量明显高于配子体; 此外, 配子体 77 K 荧光发射光谱的长波荧光发射峰在 741 nm 处, 而幼孢子体在 705 nm 处。

**关键词:** 裙带菜 (*Undaria pinnatifida*); 配子体; 幼孢子体; 光合作用

**中图分类号:** Q949.288.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2004)11-0020-08

裙带菜 (*Undaria pinnatifida*) 作为一种大型底栖褐藻, 自然生长在潮下带上部的岩石上, 其分布的上限是大潮低潮线附近。对于其独特的生长环境, 可通过对自身光合作用的调控与之相适应。近年来, 针对大型海藻光合作用已有一定程度的研究<sup>[1, 2]</sup>, 但大多局限于海藻生活史某一阶段 (主要是大型海藻的成体) 的色素特点及光合生理特点。对进行世代交替的大型海藻在生长发育过程中的光合作用特性, 尚缺乏系统的研究, 特别是针对裙带菜的配子体和幼孢子体未见相关报道。作者以裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体为研究对象, 通过测定光合呼吸曲线、活体室温吸收光谱以及 77 K 荧光发射光谱来描述裙带菜在发育过程中光合作用的不同特性。

## 1 材料与方 法

### 1.1 裙带菜配子体

裙带菜雌、雄配子体由中国科学院海洋研究所提供。培养基为加富消毒海水<sup>[3]</sup>。

将保存的裙带菜雌、雄配子体, 在冰水浴中, 利用 JY92-2D 型超声波细胞粉碎仪 (宁波新芝科器研究所), 功率 100 W 下破碎 1 min (间隔 1 s) 后, 用消毒海水在 400 目筛绢中反复滤洗 3 次, 更换新鲜培养基。在温度 25℃ ± 0.5℃, 光强 40 μmol/(m<sup>2</sup>·s), 光暗周期 12 h: 12 h 的光照培养箱中, 静置培养, 每天人工摇

瓶 3 次。每 3 天, 利用筛绢滤洗 1 次, 换 1 次新鲜培养基。1 周后, 在实验要求的温度、光照等实验条件下, 进行培养。

### 1.2 裙带菜幼孢子体

将分散的裙带菜雌、雄配子体按鲜质量 1: 1 的比例混合, 配成悬浮液。在 500 mL 烧杯的底部, 平放两块光面载玻片, 倒入 100 mL 悬浮液, 使配子体均匀地附着在载玻片上。整个转化过程的温度 17℃ ± 0.5℃, 由空调控制; 光源为荧光灯, 光强 60 μmol/(m<sup>2</sup>·s), 光暗周期 12 h: 12 h。每 2 天, 取出载玻片在显微镜下镜检, 然后换新鲜培养基。当孢子体出现假根, 并长成约 1~2 mm 时, 作为幼孢子体进行相关的研究。

### 1.3 光合和呼吸速率曲线的测定

利用 DW2/2 型氧电极 (Hansatech Ltd, King's Lynn, Norfolk, U. K.) 测定裙带菜配子体和孢子体的光合放氧

收稿日期: 2003-06-09 修回日期: 2004-04-16

基金项目: 生化工程国家重点实验室科学基金课题 (KT200002)

作者简介: 张 栩 (1972-), 男, 浙江海盐人, 博士, 研究方向为生物技术, E-mail: qdzhangxu@163.com

速率。电极反应池为 2 mL 的密闭系统, 其温度由 DG 1015 低温恒温槽 (宁波海曙天恒仪器厂) 通过循环水控制, 光源为红色发光二极管, 光强大小由软件控制, 通过 QRT1 型光子计标定。整个过程由 Oxy-lab 程序控制, 并记录数据。

所有待测样品应为生长良好、健康的藻体, 并在与所测环境条件 (包括温度、光照、pH 值、培养基等) 相同的条件下培养至少 1 d。测定时更换新鲜培养基, 样品量约 0.05 g 鲜质量, 其中裙带菜雌、雄配子体应通过超声波破碎, 制备成细胞悬浮液。

在恒定温度下, 光强控制在 0-100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  之间, 每隔 10  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  测定一个光合放氧速率和呼吸速率, 实测的放氧速率实际是光合作用减去呼吸作用的差数, 被称为净光合速率 (Net photosynthesis rate 简称 NPS), 将呼吸速率 (Respiration rate 简称 RES) 加上净光合速率, 则得到真正光合速率 (True photosynthesis rate 简称 TPS)。

在净光合速率 ( $P-I$ ) 曲线中,  $P$  为实测的以叶绿素  $a$  为单位质量的净光合放氧速率,  $I$  为设定的光照强度, 可以直接从曲线中读出最大净光合放氧速率 ( $P_m$ ), 即光饱和的光合放氧速率, 以及呼吸速率 ( $R_d$ )。光合作用在光限制部分的斜率 ( $\alpha$ ) 是  $P-I$  曲线的初始斜率, 可以用来表示光合效率。饱和光强 ( $I_k$ ) 和补偿光强 ( $I_c$ ) 分别根据以下公式计算<sup>[4]</sup>:

$$I_k = (P_m + R_d) / \alpha$$

$$I_c = R_d / \alpha$$

利用 DU7500 分光光度计 (Beckman), 测量 90% 丙酮的待测样品色素提取液在 630, 647, 664 nm 处的吸光度, 利用以下公式计算提取液里叶绿素  $a$  的浓度:

$$c(\text{叶绿素 } a) (\text{mg/L}) = 11.85A_{664} - 1.54A_{647} - 0.08A_{630}$$

#### 1.4 吸收光谱的测定

室温 (20~25  $^{\circ}\text{C}$ ) 下用 UV-3000 型紫外可见双波长双光束分光光度计 (Shimadzu) 测定, 扫描波长范围 360~720 nm。

#### 1.5 低温荧光发射光谱的测定

在 77 K 低温条件下, 用 F4500 型荧光分光光度计 (HITACHI) 测定, 扫描波长范围 650~780 nm, 激发光波长 436 nm。

## 2 结果和讨论

### 2.1 裙带菜配子体和幼孢子体的光合和呼吸速率曲线

藻类的净光合速率曲线是描述藻类生理调节的重要方法, 可以了解光照强度对藻类光合作用的影响<sup>[5]</sup>。裙带菜配子体向孢子体转化过程中, 海水温度通常控制在 17  $^{\circ}\text{C}$ <sup>[3]</sup>。分别在该温度下, 测定了裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体的净光合速率曲线 (见图 1)。

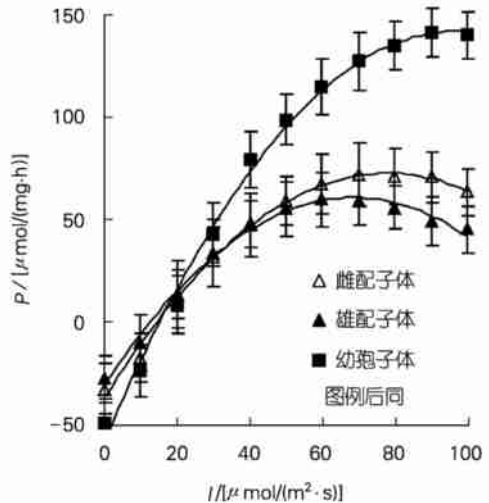


图 1 裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体的净光合速率曲线 (17  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 1 Net photosynthesis rate curves of female and male gametophytes and juvenile sporophytes of *Undaria pinnatifida* (17  $^{\circ}\text{C}$ )

在低光照强度范围内, 雌、雄配子体和幼孢子体放氧速率随着光强的增加基本呈正相关增大, 此时光合作用速率取决于光合色素对光的吸收<sup>[5]</sup>, 即光合色素中, 吸收光子被激发的色素分子数量越多, 则光合速率越大。用光合曲线的初始斜率 ( $\alpha$ ) 来表示, 雌配子体的  $\alpha$  比雄配子体的略高 (见表 1), 而幼孢子体的  $\alpha$  明显高于雌、雄配子体, 是雄配子体的 1.5 倍。

当光强增大到某一定值后, 光合速率的增加变缓, 达到一最大值 ( $P_m$ ); 而  $P_m$  的大小表示在 17  $^{\circ}\text{C}$  光合作用中相关酶催化过程的最大速度, 与酶的数量和酶活有关<sup>[5]</sup>。雌配子体同雄配子体相比较, 在 17  $^{\circ}\text{C}$  时,

表 1 裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体的光合作用参数(17℃)

Tab. 1 Photosynthetic characteristics of female and male gametophytes and juvenile sporophytes of *Undaria pinnatifida* (17℃)

种类	$P_m$	$\alpha$	$R_d$	$I_k$	$I_c$
	[ $\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ ]	[ $\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ ] /[ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]	[ $\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ ]	[ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]	[ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]
雌配子体	71.16±7.21	2.22±0.11	32.63±5.15	46.75±3.12	14.70±1.67
雄配子体	59.16±5.57	2.07±0.12	27.79±5.02	42.01±2.72	13.43±1.72
幼孢子体	139.98±7.79	3.05±0.17	48.82±6.27	61.90±3.98	16.01±2.21

当光强高于  $40 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 雄配子体的表观光合速率就开始低于雌配子体的表观光合速率; 随着光强的增大, 两者差距越大, 最终雌配子体的  $P_m$  为  $71.16 \mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ , 而雄配子体的  $P_m$  只有  $59.16 \mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ 。显然在  $17^\circ\text{C}$  时雌配子体比雄配子体更能适应较高的光强。雌、雄配子体的另一个重要光合作用参数  $I_k$  也证明了这一点。当光照强度小于  $I_k$  时, 藻类生长在光受限阶段; 而光照强度大于  $I_k$  时, 已满足藻类光合作用的需要。雌、雄配子体的  $I_k$  分别为  $46.75 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  和  $42.01 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

同配子体相比, 在  $17^\circ\text{C}$  裙带菜的幼孢子体具有明显高的净光合速率,  $P_m$  和  $I_k$  分别达到  $139.98 \mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$  和  $61.90 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。这或许可以通过 Litter<sup>[6]</sup> 的功能/形态假说来说明这一现象。他根据大型海藻在饱和光强时光合作用效率和形态, 提出处在生活史中快速生长期的形态具有更强的光合作用效率。幼孢子体要进行快速生长和生存竞争, 所以光合器功能较强; 而每年晚春早夏发育的配子体, 要以营养生长的形态度过高水温的夏季, 为了抵抗逆境, 其光合器偏向于结构和防御功能, 减少对光的利用。这些参数的变化同时也取决于生长所在的特殊环境, 由于潮汐的作用, 叶状体漂浮在海水中的成熟孢子体可以接受到更强的光强, 裙带菜成熟孢子体的  $I_k$  达到  $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ <sup>[2]</sup>, 而固着在海底岩石上的幼孢子体, 只能吸收到经过衰减的较弱光。

当光强高于  $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  时, 雌、雄配子体的表观光合速率都开始下降, 雄配子体更明显, 这时配子体处于光抑制阶段。在光合作用过程中, 如果暗反应速度跟不上光反应速度, 后者会导致光氧化, 致使叶绿体中诸如酶类那样的化合物遭受破坏, 而使光合作用的速率降低, 甚至使藻类死亡<sup>[5]</sup>。可预计  $I_k$  愈低, 产生光抑制的光照强度也就愈弱。

呼吸作用和光合作用通常是相互配合的。在相同

条件下, 测定了裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体的呼吸速率曲线(见图 2)。它们的呼吸速率都不随光照强度的增加而增加; 但幼孢子体的  $R_d$  要明显高于雌、雄配子体的  $R_d$ , 而雌配子体的  $R_d$  又略高于雄配子体的  $R_d$ , 与它们净光合速率的大小基本相对应。这可能是在藻类的光合作用速度提高时, 藻细胞内部的氧含量升高, 而这种较高的氧含量又促使光呼吸速率增加<sup>[5]</sup>。

随着光照减弱, 光合速率逐渐接近呼吸速率, 最后达到光合速率等于呼吸速率, 此时的光照强度被定义为  $I_c$ 。藻细胞在  $I_c$  时, 有机物的形成和消耗相等, 不能积累干物质。藻细胞正常生长时, 在晚间无光照时还要消耗干物质, 因此白天所需的最低光照强度, 必须高于  $I_c$ 。在  $17^\circ\text{C}$  时, 雄配子体的  $I_c$  为  $13.43 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 雌配子体的  $I_c$  为  $14.70 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 幼孢子体的  $I_c$  为  $16.01 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。可见, 当裙带菜从配子体阶段向孢子体阶段转化时, 对光的需求量则相应增大。

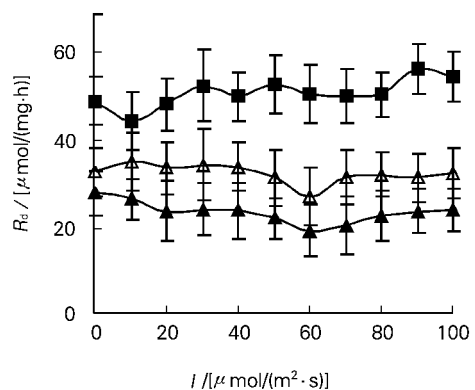


图 2 裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体的呼吸速率曲线(17℃)

Fig. 2 Respiration rate curves of female and male gametophytes and juvenile sporophytes of *Undaria pinnatifida* (17℃)

表 2 裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体在不同温度下的光合作用参数

Tab. 2 Photosynthetic characteristics of female and male gametophytes and juvenile sporophytes of *Undaria pinnatifida* at different temperature

种类	温度 (°C)	$P_m$ [ $\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ ]	$\alpha$		$R_d$ [ $\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ ]	$I_k$ [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]	$I_c$ [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]
			[ $\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$ ]	/[ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]			
雌配子体	20	107.62±7.77	2.82±0.18		36.95±5.65	51.34±3.76	13.12±1.67
	25	127.19±8.23	3.19±0.23		41.63±5.34	52.92±4.05	13.05±1.79
	30	82.21±5.69	3.08±0.17		46.40±6.17	41.78±3.33	15.07±2.16
雄配子体	20	86.40±8.07	2.55±0.28		32.98±5.05	46.87±3.65	12.95±1.22
	25	115.33±7.62	3.20±0.22		38.06±5.32	47.92±4.21	11.89±1.17
	30	69.35±5.21	1.95±0.19		37.78±6.38	54.99±3.68	19.39±1.82
幼孢子体	15	137.55±8.17	3.02±0.17		41.70±7.15	59.35±4.15	13.81±1.89
	20	130.21±6.75	3.66±0.27		57.71±6.76	51.34±2.75	15.77±1.57
	25	128.84±7.12	3.74±0.15		58.12±7.51	49.99±2.97	15.54±2.02

## 2.2 温度对裙带菜配子体和幼孢子体光合作用和呼吸作用的影响

早在 20 世纪 30 年代就开始研究裙带菜配子体与温度的关系,但主要侧重于温度对配子体的生长发育的影响,尚缺乏研究温度对光合、呼吸作用的影响<sup>[2]</sup>。现分别将雌、雄配子体在 20、25、30℃, 40  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  光照强度下培养 1 d, 幼孢子体在 15、20、25℃, 60  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  光照强度下培养 1 d, 然后在相应温度下测定它们的净光合速率曲线;根据净光合速率曲线获得不同条件下的光合作用参数(见表 2),并结合 17℃的雌、雄配子体和幼孢子体的光合作用参数(见表 1),比较不同温度对配子体和幼孢子体  $P_m$ 、 $R_d$  和  $\alpha$  的影响(见图 3),以及  $P/R_d$ (见表 3)。

实验结果表明,裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体的光合速率分别受光照强度和温度变化的影响,并且这两种环境因子之间存在协同影响。在低光强条件下,温度对光合速率的影响不大, $\alpha$  值基本随温度升

表 3 裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体在不同温度下的光合/呼吸比值

Tab. 3 The ratio of photosynthesis to respiration in gametophytes and juvenile sporophytes of *Undaria pinnatifida* at different temperature

种类	$P/R_d$				
	15℃	17℃	20℃	25℃	30℃
雌配子体		2.18	2.91	3.06	1.77
雄配子体		2.13	2.62	3.03	1.84
幼孢子体	3.30	2.87	2.26	2.22	

高而缓慢增加,只有雄配子体在 30℃时的  $\alpha$  值迅速下降了 40%,表明在低光强条件下,高温将对雄配子体的光合作用产生抑制。随着光强的升高,温度对光合作用的影响变得显著了,其中雌、雄配子体适宜在较高的温度下进行光合作用,在 25℃时的  $P_m$  值最高,比 17℃时提高了接近 1 倍,而温度升高到 30℃时,光合作用受到严重抑制, $P_m$  值下降大约 50%。相对而言,幼孢子体适宜在较低温度下进行光合作用, $P_m$  值在 17℃时的最高,在 25℃时最低,但只下降了 8.6%。

比较温度对裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体呼吸速率的影响,基本上随着温度升高,呼吸作用得到促进,其中只有雄配子体在 30℃时呼吸速率略有下降,而幼孢子体在较低温度下(15~20℃)呼吸速率受温度变动影响较大。结合  $P/R_d$  的计算,幼孢子体的  $P/R_d$  在 15℃时最高,且受温度变动影响不大;雌、雄配子体则是 25℃时最高,受温度变动影响较大(见表 3)。

可见,裙带菜在进行光合呼吸作用时,配子体比幼孢子体更适应高温,而雄配子体相对较差。在裙带菜的人工育苗中<sup>[2]</sup>,夏季以配子体的形式度夏,雄配子体的最适生长温度(20℃)比雌配子体(25℃)略低,秋季水温降至 20℃以下再发育成幼孢子体,在 15℃发育的数量较多,在 20℃发育的速度较快,26℃以上,配子体只进行营养生长而不发育。此外,幼孢子体光合呼吸作用对温度变化的适应性强于配子体,这可能是裙带菜在东亚、欧洲和澳大利亚、新西兰等地广泛分布的原因之一。因此,在不同温度条件下,裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体所进行的光合作用和呼吸作用是与其生长和发育相适应的。

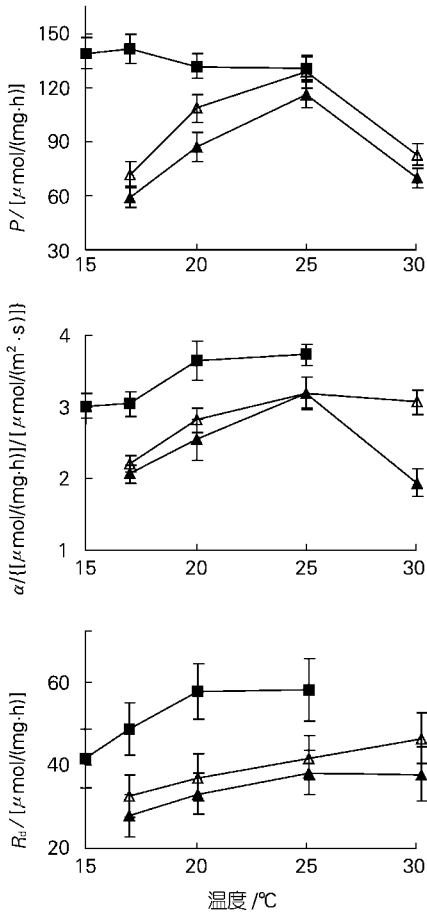


图3 裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体光合作用和呼吸作用的温度曲线

Fig. 3 Temperature curves of photosynthesis and respiration in female and male gametophytes and juvenile sporophytes of *Ulvaria pinnatifida*

### 2.3 裙带菜配子体和幼孢子体的室温吸收光谱

藻类的光合色素种类较多,除了含有与高等植物共有的一些色素外,还含有进化较低级的特殊色素,并且在藻类的不同门类中差别很大,在进化史上被作为划分分类群的重要标志<sup>[7]</sup>。

活体吸收光谱是了解在活体条件下各种色素存在状态和能量传递的基础。分别测定了室温下的裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体的活体吸收光谱(见图4),结果表明,裙带菜3种不同形态色素的组成基本相同,与裙带菜成熟孢子体<sup>[1]</sup>和其所含色素蛋白复合物<sup>[8]</sup>的吸收光谱极为相似。主要由两个吸收峰组成,分别为叶绿素a的蓝光区和红光区吸收峰,位于437 nm和673 nm附

近。裙带菜含有叶绿素c,以及 $\beta$ -胡萝卜素、紫堇黄素(violaxanthin)、墨角藻黄素(fucoxanthin)<sup>[9]</sup>,其中460 nm附近有一肩峰(幼孢子体的较为明显),630~640 nm有一平台状吸收峰,这些属于叶绿素c。由于裙带菜不含有叶绿素b,其红光区吸收峰窄而陡,短波长一侧较为陡峭;同时,蓝光区吸收峰的长波长一侧下降比较平缓,特别是在500 nm附近,这一区域是墨角藻黄素的吸收带,这些特征使裙带菜对红橙光的吸收有所减少,对绿光的吸收增加<sup>[1]</sup>。除此以外,在385, 417, 586, 615 nm附近有不明显的吸收峰。

比较裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体吸收光谱的差别,它们各吸收峰的大小及吸收峰值的相对比例有一定程度的差异(见表4);其中雌、雄配子体之间较为接近,而幼孢子体的叶绿素a在673 nm处的吸收峰,叶绿素c在460 nm和640 nm附近的吸收峰,以及墨角藻黄素在500 nm附近的吸收带都明显高于雌、雄配子体。

裙带菜含有特征色素叶绿素c和墨角藻黄素,是裙带菜进行光合作用的辅助色素,和天线叶绿素一起负责吸收光能,并将所吸收的光能传递给光合作用的反应中心。其中叶绿素c是对光系统II的辅助色素,墨角藻黄素能吸收光谱中绿色部分(500~560 nm)的光,在550 nm处有80%的光被墨角藻黄素所吸收,而叶绿素对这种光的吸收很少。正是由于墨角藻黄素的存在,裙带菜能深入生长在一般沿岸水域的有光带下部<sup>[5]</sup>。

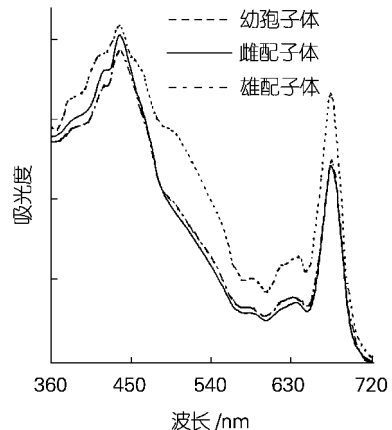


图4 裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体的室温吸收光谱  
Fig. 4 Absorption spectra of female and male gametophytes and juvenile sporophytes of *Ulvaria pinnatifida* at room temperature

表 4 裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体室温吸收光谱的各吸收峰值的相对比例

Tab. 4 Ratio of maximal absorption of female and male gametophytes and juvenile sporophytes of *Undaria pinnatifida*

种类	各吸收峰值的相对比例			
	436/673	460/673	500/673	640/673
雌配子体	1.66	1.31	0.81	0.30
雄配子体	1.56	1.26	0.78	0.31
幼孢子体	1.25	1.09	0.84	0.38

藻类光合作用中的光化学过程的速率取决于光合色素对光的吸收,随着裙带菜的配子体向孢子体的转化,藻细胞对光照强度的需求也随之增大,色素的含量及对光的吸收也相应增加,这就是藻类对光照强度的生理适应过程。

#### 2.4 裙带菜配子体和幼孢子体的 77 K 荧光发射光谱

植物细胞色素系统吸收光能,首先用于光化学反应转变成化学能,损失部分以荧光或热辐射等形式散发。在低温(77 K)下,依赖于温度的酶促反应过程停止,此时细胞表现出简单的荧光诱导动力学,此时低温荧光发射光谱可以相对明显地反映出光能在两个光系统(PSI和PSII)间的调节和分配情况。

在 77 K 条件下,用叶绿素 a 吸收的光(436 nm)激发,测定了裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体的低温荧光发射光谱(见图 5)。它们都在 689 nm 处有一荧光发射主峰,这是由 PSII 发射的,在裙带菜孢子体的叶状体、叶绿体和类囊体膜的低温荧光发射光谱中也发现 690 nm 处有 PSII 的荧光发射峰,而孢子体的色素蛋白复合物的 PSII 荧光发射峰在 681 nm 处<sup>[8,10]</sup>。其它褐藻的 PSII 荧光发射峰也分别在 680~690 nm 之间<sup>[11]</sup>;高等植物 PSII 复合物的荧光发射峰同样位于 683 nm 处<sup>[12]</sup>。因此,虽然裙带菜等褐藻的色素组成与高等植物不同,但 PSII 低温荧光发射峰的波长是相近的。

高等植物和大多数绿藻的 77 K 活体荧光发射光谱中都有明显的长波荧光发射峰,此峰位于 730~735 nm,这个荧光峰是 PSI 的主要表征,已经确定它是 PSI 的捕光色素——蛋白复合物 LHG-1 上的叶绿素 a 发出的荧光<sup>[13]</sup>。褐藻的 77 K 长波荧光发射峰一般位于 710~720 nm 之间<sup>[11,13]</sup>,缺少 730 nm 的长波荧光发射峰,其中裙带菜孢子体的叶状体、叶绿体和类囊体膜在 705~710 nm 处有一个肩峰,PSI 的色素蛋白复合物有位于 715 nm 的长波荧光发射峰<sup>[8,10]</sup>。根据作者所测的结果(见图 5),裙带菜雌配子体在 741 nm 处有明显的长波荧光发射峰,雄配子体在该处有一个不明显的荧光发射峰,而幼孢子体在 705 nm 处有一个肩峰。这说明裙带菜的配子体与孢子体之间在 PSI 的结构和能量传递方面有明显的区别,雌、雄配子体之间也存在一定程度的差别。

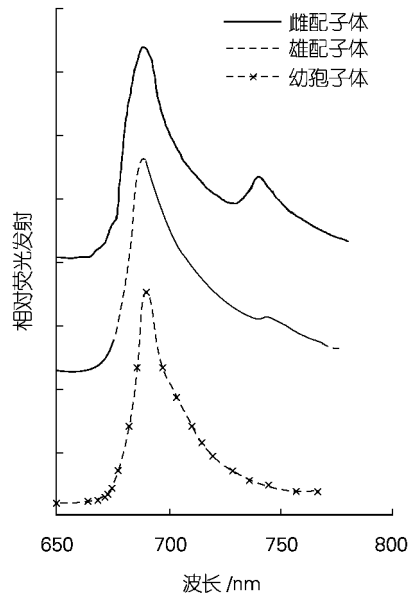


图 5 裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体的 77 K 荧光发射光谱(激发波长 436 nm)

Fig. 5 Fluorescence emission spectra of female and male gametophytes and juvenile sporophytes of *Undaria pinnatifida* at 77 K (excitation wavelength is 436 nm)

## 3 结论

通过测定裙带菜雌、雄配子体和幼孢子体的光合呼吸曲线、活体室温吸收光谱以及 77 K 荧光发射光谱,发现裙带菜在配子体和孢子体两个不同发育阶段,其光合作用的特性是有所不同,不仅表现在内在的结构和物质基础,而且体现在对外部环境——光的需求。此外,外在形态有一定差别的雌、雄配子体,即使它们的光合作用特性较为接近,但也有着明显的不同:(1) 幼孢子体对光的利用效率和能力,以及对光的需求量都明显超过雌、雄配子体,这既是裙带菜对外部生态环境的适应,又是自身生长的需求;(2) 雄配子体比雌配子体对光的利用较弱,且光照强度和温度的增大对雄配子体光合作用的抑制作用较强;(3) 雌、雄配子体适宜在较高的温度下进行光合作用,幼孢子体光合作用的最适温度较低,但对温度增高不敏感;(4) 雌、雄配子体和幼孢子体的色素组成相同,主要含有叶绿素 a、叶绿素 c、墨角藻黄素,幼孢子体所含色素的含量和对光的吸收都强于雌、雄配子体;(5) 雌、雄配子体和幼孢子体的 77 K 荧光发射光谱都具有 690 nm 的荧光峰,而只有雌配子体在 741 nm 处有明显的长波荧光峰。

雌、雄配子体之间,以及配子体与孢子体之间光合作用特性的差异,将决定它们具有不同的生长和生理特点,是裙带菜无性繁殖系育苗的理论基础之一。

## 参考文献:

- [1] 周百成,郑舜琴,曾呈奎. 几种绿藻、褐藻和红藻的吸收光谱的比较研究[J]. 植物学报, 1974, 16(2): 146-155.
- [2] 曾呈奎,潘忠正,周百成. 底栖海藻比较光合作用研

究: II. 潮间带褐藻光合作用特性与光强的关系[J]. 海洋与湖沼, 1981, 12(3): 60-64.

- [3] Pang S J, Wu C Y. Study on gametophyte vegetative growth of *Undaria pinnatifida* and its applications [J]. **Chin J Oceanol Limnol**, 1996, 14(3): 205-211.
- [4] Henley W J. Measurement and interpretation of photosynthetic light response curves in alga in the context of photoinhibition and diel changes[J]. **J Phycol**, 1993, 29(5): 729-739.
- [5] Seemann Nielsen E 著,周百成,温宗存,译. 海洋光合作用[M]. 北京: 科学出版社, 1979. 36-45.
- [6] Littler M M, Littler D. The evolution of thallus form and survival strategies in benthic marine macroalgae: field and laboratory tests of a functional form model[J]. **Am Nat**, 1980, 116(1): 25-44.
- [7] 曾呈奎,周百成. 关于藻类植物进化的若干问题[A]. 中国藻类学会. 第一届中国藻类学术讨论会论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1983. 1-7.
- [8] 李爱芬,陈敏,周百成. 褐藻裙带菜色素-蛋白质复合物的分离和命名[J]. 植物学报, 2000, 42(2): 153-157.
- [9] 纪明侯. 海藻化学[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 458-482.
- [10] 李爱芬,陈敏,周百成. 3种褐藻色素-蛋白复合物的分离及光谱特性[J]. 海洋科学, 2000, 24(2): 21-24.
- [11] Peyriere M, Caron L, Jupin J. Pigment complexes and energy transfer in brown algae[J]. **Photosynthetica**, 1984, 18(2): 184-191.
- [12] Bassi R, Simpson D. Chlorophyll-protein complexes of baley photosystem I[J]. **Eur J Biochem**, 1987, 163(2): 221-230.
- [13] Berkaloff C, Caron L, Rousseau B. Subunit organization of PS I particle from brown algae and diatoms: polypeptide and pigment analysis[J]. **Photosyn Res**, 1990 23(2): 181-193.

# Photosynthesis properties of gametophytes and juvenile sporophytes of algae, *Undaria pinnatifida*

ZHANG Xu<sup>1, 3</sup>, LI Da-peng<sup>2</sup>, SHI Ding-ji<sup>4</sup>, TAN Tian-wei<sup>1</sup>, OUYANG Fan<sup>3</sup>

(1. Department of Biochemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Institute of Process Engineering, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 4. Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

**Received:** Jun. , 9, 2003

**Key words:** *Undaria pinnatifida*; gametophytes; juvenile sporophytes; photosynthesis

**Abstract:** In this paper, Photosynthesis properties of female and male gametophytes as well as juvenile sporophytes of *Undaria pinnatifida* were investigated. The photosynthesis of gametophytes and juvenile sporophytes were different. At 17 °C, saturation irradiances and maximum net photosynthetic rates were significantly higher in juvenile sporophytes ( 61.90  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and 139.98  $\mu\text{mol}/(\text{mg} \cdot \text{h})$ ) than in female gametophytes ( 46.75  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and 71.16  $\mu\text{mol}/(\text{mg} \cdot \text{h})$ ). Photosynthetic pigment content in juvenile sporophytes was greatly higher than that in gametophytes. In fluorescence emission spectra at 77 K, gametophytes had fluorescence emission maximum at 741 nm which is seen as the characteristic of PS I. It was at 705 nm in juvenile sporophytes.