

紫外辐射对条斑紫菜不同部位藻体 光化学效率和光合色素含量的影响

冯子慧¹, 李信书^{1,2}, 魏华¹, 何培民^{1*}

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

2. 淮海工学院海洋学院, 江苏 连云港 222005)

摘要: 实验室条件下研究了紫外辐射(UVR)对条斑紫菜藻体不同部位最大光化学效率(Fv/Fm)和光合色素含量的影响,以探讨条斑紫菜不同部位对紫外辐射反应的差异性。在全光谱PAB(PAR + UV - A + UV - B, 280 ~ 700 nm)和滤除紫外辐射UVR(UV - A + UV - B)的有效光辐射(PAR, 395 ~ 700 nm)两种处理下进行测定。实验结果表明,PAB处理后的各部位藻体最大光化学效率下降程度均高于PAR处理后,且弱光期恢复程度低、速度慢。藻体不同部位间最大光化学效率下降程度也存在差异,藻体梢部对PAB的耐受性高,恢复也较快;基部耐受性最差,恢复也较慢。藻红蛋白(phycoerythrin, PE)和藻蓝蛋白(phycocyanin, PC)对不同辐射处理较敏感,PAB辐射处理后,各藻体部位的PE、PC含量均显著上升($P < 0.05$),其中藻体梢部PAB处理后的PE、PC含量的均极显著升高($P < 0.01$)。然而不同部位藻体在PAB和PAR照射下,叶绿素a(Chl. a)和类胡萝卜素(Car)并无显著变化($P > 0.05$)。藻体的紫外吸收物质(MAAs)的含量从基部到梢部逐步升高,不同辐射处理前后,各藻体部位的紫外吸收物质也未显著增加($P > 0.05$)。总之,条斑紫菜不同部位藻体光合生理特性存在较大差异。推测条斑紫菜应对紫外辐射的策略有遮蔽作用,积累紫外吸收物质和动态光抑制作用。

关键词: 条斑紫菜; 紫外辐射; 最大光化学效率; 色素含量

中图分类号: Q 947.8; S 917

文献标识码: A

紫菜是我国重要栽培经济海藻之一。国内人工养殖的主要种类是条斑紫菜(*Porphyra yezoensis*)和坛紫菜(*P. haitanensis*),都生活在潮间带,随着潮汐变化,其生长环境变化大,会面临强光、紫外辐射(UVR)等胁迫^[1]。

平流层的臭氧是太阳紫外辐射的主要吸收带,近年来由于全氯氟烃(CFCs)、哈龙、四氯化碳等化学物质的污染,大气臭氧层破坏,使到达地表的紫外辐射增强^[2]。

紫外辐射(280 ~ 400 nm)会抑制大型海藻的光合作用,造成DNA损伤,色素含量的减少,还会抑制孢子的萌发率^[3-4]。关于紫外辐射对紫菜

光合生理特性的影响,国内外也已有较多报道,研究表明紫外辐射使*P. leucosticta*^[5]和脐形紫菜(*P. umbilicalis*)^[6]的光化学效率下降,还会降低条斑紫菜叶绿素和藻胆蛋白的含量,但人工紫外辐射后,脐形紫菜叶绿素a、类胡萝卜素和藻胆蛋白的含量没有变化。

以上研究都定位在种或个体水平上,大型海藻的藻体不同部位间的光合特性及对紫外辐射的响应是存在差异的。如岩衣藻(*Ascophyllum nodosum*)的光合作用、固碳和呼吸作用取决于藻体组织的形态、年龄及生理状态^[7];海带(*Laminaria japonica*)色素及脂肪含量在藻体内

收稿日期:2010-10-29 修回日期:2011-01-04

资助项目:国家自然科学基金项目(2007AA09Z406);上海市浦江人才计划项目(05PJ14086);上海市优秀学科带头人计划项目(08X14037);上海市水生生物学重点学科资助项目(S30701)

通讯作者:何培民, E-mail: pmhe@shou.edu.cn

的纵剖面有很明显的组织差异^[8]；海膜(*Halymenia floresii*)的梢部、中部及基部藻体的色素含量有明显差别^[9]，孔石莼(*Ulva pertusa*)的边缘部分藻体对紫外辐射较其它部位敏感^[10]。坛紫菜成熟藻体不同部位间叶绿素 a 的含量是不同的^[11]，但紫菜叶状体不同部位光合生理特性及对紫外辐射响应的差异尚未见报道。

大型藻类和其它植物一样，具有不同的策略以保护光合系统免受强光的伤害，光抑制是光保护的机制之一^[12]。其它保护机制还有通过产生类胡萝卜素或紫外吸收物质(MAAs)^[13]。*Euchema striatum*的梢部在紫外辐射时可以产生高浓度的紫外吸收物质^[14]，藻类的紫外吸收物质有多种，它们具备不同的光谱吸收特性^[15]，藻类体内 MAAs 的浓度与藻所处的深度和紫外辐射强度有关^[16]。

本文在实验室条件下，研究了紫外辐射对条斑紫菜藻体梢部、中部、基部的最大光化学效率，光合色素含量以及紫外吸收物质的影响，探讨了条斑紫菜对紫外辐射的响应机制。

1 材料与实验方法

1.1 实验材料

条斑紫菜于 2010 年 2 月采自连云港连岛养殖海区(34.75°N, 119.48°E)，采后就地阴干，带回后贮于低温冰箱中，在一周内使用。实验前，将冷藏紫菜放在加入 NaNO₃ (400 mmol/L)、KH₂PO₄ (40 mmol/L) 的消毒海水中，光照 50 μmol/(m²·s)、15 °C 条件下恢复培养 24 h^[17]，选取长度约 10 cm 未成熟的健康藻体，分别截取其基部、中部和梢部供实验使用。

1.2 阳光辐射处理

试验期间循环水槽控温 15 °C，光照强度为 800 μmol/(m²·s)。将实验藻体分别放入可透紫外的石英试管里(内径 55 mm，长度 340 mm)，石英管外包裹紫外滤膜得到 2 个不同的阳光辐射处理：① PAR 处理(光合有效辐射 395 ~ 700 nm)，石英管包裹 395 滤膜(Ultraphan UV Opak, Digefra, Munich, Germany)，滤掉 UV - A 和 UV - B，使藻体只接受 PAR 的辐射^[18]；② PAB 处理(PAR + UVA + UVB, 280 ~ 700 nm)，石英管未包裹滤膜，滤膜和石英管的透光光谱见图 1。

将藻体至于太阳模拟器(Sol 1200, Dr Hönle,

Martinsried, Germany)内辐射处理，太阳模拟器辐射水平设定为 PAR 320 W/m²，UV - A 73.6 W/m²，UV - B 2.24 W/m²，辐射光谱如图 2。每种处理 3 个或 3 个以上重复。

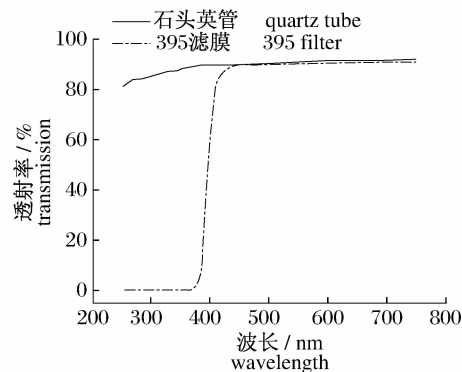


图 1 实验用滤膜和石英管透射率

Fig. 1 Transmission spectra of the cut-off filter and quartz tube

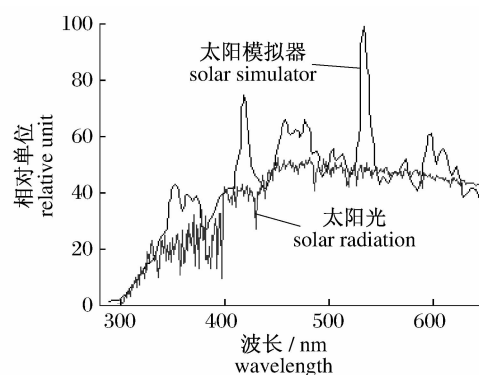


图 2 太阳模拟器和阳光的辐射光谱

Fig. 2 Spectral radiance of solar simulator and natural solar radiation

1.3 最大光化学速率测定

实验采用脉冲调制荧光仪(Water-PAM, Germany)测定藻体叶绿素荧光参数^[19-20]。藻体不同部位经过太阳模拟光辐射处理的第 30 分钟和 120 分钟，测定其最大光化学效率，而后置于光照培养箱内，15 °C、弱光照[10 μmol/(m²·s)]条件下，分别于第 30、90 和 330 分钟测定其最大光化学效率的恢复情况。最大光化学效率(optimal photochemical efficiency) $Y = (F_m - F_0) / F_m$ 。F_v/F_m 为暗适应处理 10 min 后的测定值。F₀ 的检测光强为 0.3 μmol/(m²·s)，F_m 的脉冲饱和光强为 8 000 μmol/(m²·s)。

1.4 阳光辐射抑制率的计算

阳光辐射相对抑制率 (%) = $100 \times (P_{\text{control}} - P_i) / P_{\text{control}}$

式中, P_{control} 表示初始对照组的最大光化学效率; P_i 表示 PAR 和 PAB 处理后的最大光化学效率。

1.5 色素的测定

对辐射处理前后的藻体,根据文献[21]的方法提取和计算叶绿素 a (Chl. a)、类胡萝卜素 (Car) 的含量。取约 2 cm² 藻体,用数码相机拍照后,运用 Photoshop CS2 计算藻体面积。将藻体置于 2 mL 的甲醇中,4 ℃ 的冰箱内过夜处理后,用紫外分光光度计 (UV530, Beckman counter, USA) 在 280 ~ 700 nm 波段对提取液进行光吸收扫描,根据文献[21]提供的公式计算:

$$[\text{Chl. a}] (\text{叶绿素 a}) = 15.65A_{666} - 7.34A_{653};$$

$$[\text{Car}] (\text{类胡萝卜素}) = (1000A_{470} - 2.86Ca - 129.2Cb) / 221$$

紫外吸收物质的浓度根据提取液最大吸收峰 (334 nm) 的 OD 值与叶片面积的比值来估测。

辐射实验结束后,取每种处理的藻体约为 2 cm²,在研钵内加入一定量的石英砂和少量的磷酸缓冲液 (pH = 6.8),将藻体研碎,加 3 mL 的磷酸缓冲液 10 000 r/min 离心 10 min,取上清液,将沉淀物继续研磨,并重复上面的步骤,最后将上清液定

容到 10 mL,用紫外分光光度计在 450 ~ 650 nm 波段对提取液进行光吸收扫描。藻胆蛋白的含量按下列公式计算^[22]:

$$[R - PE] (\text{藻红蛋白}) = [(A_{564} - A_{592}) - (A_{455} - A_{592}) \times 0.2] \times 0.12$$

$$[R - PC] (\text{藻蓝蛋白}) = [(A_{564} - A_{592}) - (A_{455} - A_{592}) \times 0.51] \times 0.15$$

1.6 统计分析

上述实验均采用 3 个或 3 个以上重复。实验数据采用 One-Way ANOVA 分析或 *t*-test 分析,显著水平设为 $P < 0.05$,极显著水平设为 $P < 0.01$ 。

2 结果

2.1 紫外辐射对条斑紫菜各部位的最大光化学效率的影响

图 3 显示了条斑紫菜各部位 PAB 和 PAR 处理过程中最大光化学效率变化及其在弱光下的恢复情况。可以看到,随着 PAR 和 PAB 辐射处理时间的延长,紫菜各部位的最大光化学效率 (Fv/Fm) (除 30 min PAR 处理基部组外) 均显著下降 ($P < 0.05$)。但紫菜叶片各部位的下降幅度并不相同,在弱光下恢复的速度和程度也有很大差异。

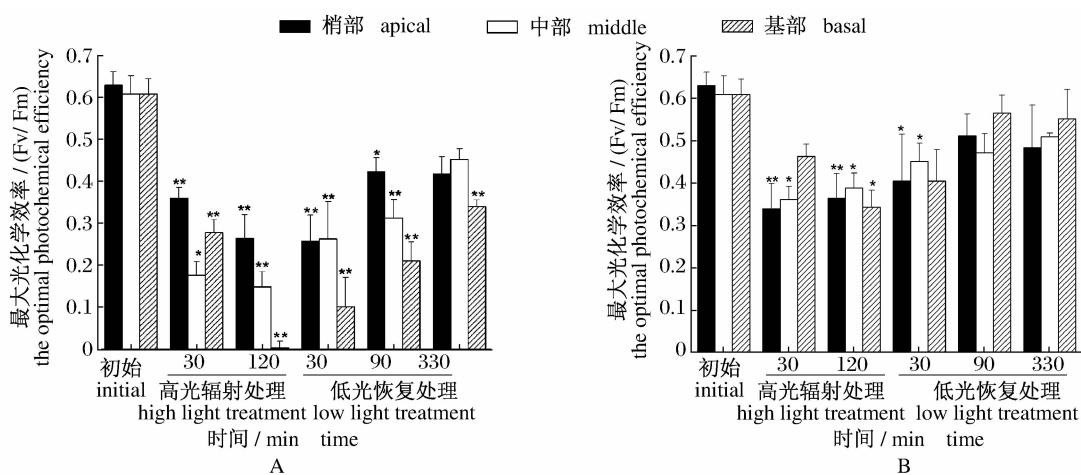


图 3 条斑紫菜藻体不同部位在 PAB 辐射和 PAR 辐射处理期及其弱光恢复期的最大光化学效率 (Fv/Fm) 变化

A. PAB 辐射处理; B. PAR 辐射处理。

* 代表 PAB 和 PAR 处理与处理前相比差异显著 ($P < 0.05$); ** 代表差异极其显著 ($P < 0.001$)。

Fig. 3 Changes of optimal photochemical efficiency (Fv/Fm) of different blade parts in *P. yezoensis* during PAB and PAR treatment and recovery stages with low lights

A; with PAB treatment; B; with PAR treatment.

*: significant difference ($P < 0.05$); **: extremely significant difference ($P < 0.001$).

随着 PAB 辐射处理时间的延长,对梢部最大光化学效率的抑制率从 42.9% (30 min) 提高到 58.0% (120 min);对中部的抑制率从 71.0% (30 min) 升高到 75.5% (120 min);而对基部的抑制率从 54.4% (30 min) 升高到 99.5% (120 min) (表 1)。基部最大光化学效率下降幅度最大且恢复速度、程度较低,与梢部和中部差异显著 ($P < 0.05$)。在弱光恢复期,梢部最大光化学效率的恢复在前 30 min 存在滞后现象,330 min 后最大光化学效率为处理前的 66.4%;基部和中部也恢复到处理前的 58.7% 和 74.3% (图 3-A,表 1)。

表 1 PAR 和 PAB 处理前后叶片最大光化学效率的相对抑制率

Tab. 1 The relative inhibition rate of optimal photochemical efficiency in blades with earlier and later treatment of PAR and PAB

时间 (min) time	部位 section	$100 \times (P_{\text{control}} - P_i) / P_{\text{control}}$ 抑制率 (%) inhibition	
		PAR	PAB
30	梢部 apical	46.2	42.9
	中部 middle	40.7	71.0
	基部 basal	24.0	54.4
120	梢部 apical	42.2	58.0
	中部 middle	32.4	75.6
	基部 basal	43.7	99.5

PAR 处理对藻体光化学的抑制明显低于 PAB 处理,而且抑制现象主要出现在前 30 min,梢部和中部处理 120 min 后的最大光化学效率甚至略有上升。梢部最大光化学效率所受抑制率从 30 min 的 46.2% 降低到 120 min 的 42.2%,中部的抑制率从 40.7% (30 min) 降低到 32.4% (120 min)。但 PAR 对基部的抑制率仍随时间的延长而增加,从 30 min 的 24.0% 升高到 120 min 的 43.7% (图 3-B,表 1)。弱光恢复期,基部最大光化学效率 90 min 内,恢复到稳定水平;330 min 后,藻体梢部、中部、基部最大光化学效率分别恢复为处理前的 76.6%、83.3% 和 90.5%,藻体总的恢复速度和程度均高于 PAB 处理 (图 3)。

可以看出,弱光恢复期,PAR 处理后藻体梢部、中部、基部的最大光化学效率在 330 min 恢复时间内都能达到稳定状态;而 PAB 处理后藻体基部在 330 min 的恢复时间内最大光化学效率仍与初始时差异极显著 ($P < 0.01$) (图 3)。

2.2 紫外辐射对条斑紫菜藻体色素含量的影响

藻体不同部位的四类光合色素含量也不同, *Chl. a* 及 *Car* 的含量从梢部到基部依次递减,而 PE 和 PC 的含量却从梢部到基部逐步升高,显示条斑紫菜叶状体叶片在生化组成上的差异性 (表 2)。条斑紫菜不同部位对不同辐射处理后的响

表 2 PAR 处理和 PAB 处理后条斑紫菜藻体不同部位各光合色素含量变化

Tab. 2 Changes of different pigment contents of different blade parts in *P. yezoensis* with PAR and PAB treatment

处理 treatment	色素含量 pigment contents			
	<i>Chl. a</i>	<i>Car</i>	PE	PC
梢部 apical				
处理前 before treatment	12.01 ± 0.49 ^a	2.56 ± 0.13 ^a	3.11 ± 0.53 ^a	3.96 ± 1.11 ^a
120 min PAR 处理	11.89 ± 0.50 ^a	2.17 ± 0.24 ^a	10.51 ± 1.69 ^b	13.56 ± 2.49 ^b
120 min PAB 处理	12.26 ± 0.75 ^a	2.12 ± 0.16 ^a	14.66 ± 0.29 ^c	19.40 ± 0.26 ^c
中部 middle				
处理前 before treatment	9.37 ± 0.58 ^a	1.66 ± 0.05 ^a	6.29 ± 0.55 ^a	8.19 ± 0.89 ^{ab}
120 min PAR 处理	6.81 ± 1.41 ^a	1.69 ± 0.01 ^a	7.52 ± 1.64 ^a	10.08 ± 2.60 ^a
120 min PAB 处理	8.94 ± 1.37 ^a	1.77 ± 0.34 ^a	2.22 ± 0.97 ^b	4.99 ± 1.17 ^b
基部 basal				
处理前 before treatment	9.20 ± 0.91 ^a	1.64 ± 0.17 ^a	12.04 ± 2.58 ^a	15.81 ± 3.85 ^a
120 min PAR 处理	8.56 ± 0.78 ^a	1.70 ± 0.11 ^a	7.01 ± 1.19 ^b	9.27 ± 1.89 ^b
120 min PAB 处理	10.61 ± 1.54 ^a	1.72 ± 0.58 ^a	6.69 ± 0.33 ^b	8.21 ± 2.41 ^b

注: *Chl. a*: 叶绿素 a; *Car*: 类胡萝卜素; PE: 藻红蛋白; PC: 藻蓝蛋白。不同的上标表示不同辐射处理间差异的显著性 ($P < 0.05$)。

Notes: *Chl. a*: chlorophyll a; *Car*: Carotenoid; PE: Phycoerythrin; PC: Phycocyanin. Different superscripts denote significant differences at the $P < 0.05$ during different radiation treatment.

应存在着差异。PAB 和 PAR 处理 120 min 后,梢部、中部、基部藻体的 *Chl. a*、*Car* 的含量变化不显著 ($P > 0.05$)。而 PE 和 PC 的含量在处理前后差异较大,梢部 PE、PC 含量显著升高 ($P < 0.05$),且 PAB 处理对 PE、PC 诱导升高要显著大于 PAR 处理 ($P < 0.05$),PAB 处理后的 PE、PC 含量分别为处理前的 4.6 倍和 4.9 倍。藻体中部经 PAB 辐射处理后 PE 和 PC 含量均表现下降,这与梢部有很大不同,但 PAR 辐射处理的效果与梢部的趋势一致,只使 PE 和 PC 含量有小幅上升 ($P > 0.05$)。藻体基部经辐射处理后 PE 和 PC 含量的变化趋势和梢部的情况恰好相反,PAB 和 PAR 处理均导致 PE 和 PC 含量显著下降 ($P < 0.05$),尽管 PAB 处理和 PAR 处理之间没有显著差异,PAB 处理下降的幅度要更大些。

为探讨紫外辐射能否诱发藻体的紫外吸收物质的生成,对藻体进行 PAR 和 PAB 辐射处理。根据提取液最大吸收峰 (334 nm) 的 OD 值与叶片面积的比值发现,120 min 的 PAR 和 PAB 辐射并没有引起紫外吸收物质含量的增加,但不同部位间紫外吸收物质的初始含量并不相同,呈现出从梢部到基部递减的趋势 (图 4)。

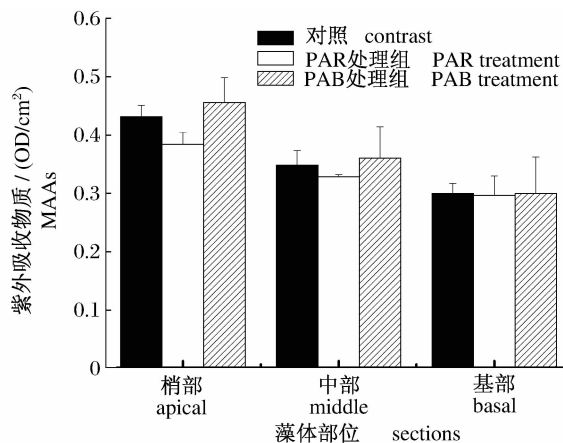


图 4 条斑紫菜藻体不同部位在 PAR 辐射和 PAB 辐射处理后,紫外吸收物质变化情况

Fig. 4 Changes of MAAs of different blade parts in *P. yezoensis* during PAR and PAB treatment

3 讨论

条斑紫菜作为潮间带底栖藻类,必须随天气潮汐变化面临阳光辐射等极端环境。本研究通过藻体叶绿素荧光的最大光化学效率和光合系统的色素变化,探讨了紫外辐射对条斑紫菜叶状体不同部位在紫外辐射胁迫下可能的不同反应及其反

应机制。条斑紫菜叶状体是单层细胞所组成的没有分化的膜状体,厚度只有 40 μm 左右^[23]。在自然或人工养殖环境中,丛生的叶状体其基部、中部和梢部的营养和光照状态存在着差异。例如:梢部可以接受更高的光强,而基部因受到自我遮蔽或其它藻体的遮蔽作用而接受较弱的光强;梢部在水流中摆动幅度较大,较基部更容易获得各种营养盐。这些差异可能造成了叶状体不同部位生理和生化组成上的差异。

实验所用条斑紫菜不同部位藻体的初始最大光化学效率都在同一水平,并无显著差异。高光强下,不同光照辐射处理,均会使光化学效率受到抑制。但受抑制程度不同,PAB (PAR + UVA + UVB) 对藻体最大光化学速率抑制性较强;受抑制的程度与处理时间有关,时间越长,受抑制程度越高;将处理后藻体转移到弱光条件下,其最大光化学效率会逐渐恢复。无论如何,光合作用系统的修复过程都需要光,这在很多藻类中都得出相同的结论^[24-25]。

本实验验证了前人得出的 UV - B 对大型海藻^[10-12]和微藻^[20]都有光抑制作用的结果。最大光化学效率降低,是因为强光、较长的曝光时间、UV 辐射引起细胞产生并积累大量的活性氧,活性氧又会损坏 PS II 蛋白复合体中的 D1 和 D2 蛋白,从而阻碍了电子的传递,使最大光化学效率降低^[19-20];同时 UV 也会引起大型海藻 Rubisco 酶的活性和含量的降低,也会导致最大光化学效率下降,从而影响光合能力^[23]。研究发现,PS II 中的 D1 蛋白降解的同时还会有新蛋白的合成,但强光会抑制新的 D1 蛋白的合成,当光强降低后,D1 蛋白会得到补充,使 PS II 蛋白复合体维持在正常水平^[24],这也可以解释弱光照处理时,光化学效率会恢复,因为 D1 蛋白合成不再受到抑制。实验中 PAB 处理后的藻体弱光恢复速度也慢于 PAR 处理后的恢复速度,这可能是因为 PAB 引起了光损伤,产生的蛋白抑制剂减慢了光化学效率的恢复速度^[25]。脐形紫菜通过光调节来应对紫外辐射的对光合作用的破坏,以动态的光抑制应对 UV - A 胁迫,以持续光抑制来应对 UV - B 伤害^[16]。光抑制也是植物光保护的一种形式。但更长时间的紫外照射,PE 的荧光逐渐下降,同时伴随着色素的“漂白”,说明捕光色素复合体可能已解体甚至色素已被破坏^[26]。

从本实验结果可以看出,不同部位藻体对紫

外辐射的敏感度不同,通过比较发现,梢部藻体 PAR 处理和 PAB 处理间差异较小,基部两种处理间差异较大,也可能是因为紫菜基部的紫外吸收物质含量较低,而梢部紫外吸收物质含量较高所致,紫菜体内含有的紫外吸收物质,可以抵抗紫外辐射对藻体的伤害作用^[27]。同时,对一些大型海藻已有的研究报道中指出,藻体对 UV 辐射的敏感度与藻体的厚度有关,藻体越薄对紫外的敏感度越高,所受伤害越大^[28],这也可以部分解释条斑紫菜梢部藻体受伤害较大,恢复程度低的现象。

藻体梢部中色素辐射后变化较大,PE、PC 的波动较 *Chl. a*、*Car* 幅度大。PE、PC 是捕光色素,起到吸收和传递光能的作用,并在细胞中聚集成特殊的颗粒,有规则的排列在类囊体表面。所以 UV 辐射处理后,最先受影响的是 PE 和 PC^[29-30]。实验处理时间较短,所以对 *Chl. a* 和 *Car* 影响较小,其中 *Car* 有光保护作用,可以进一步保护 *Chl. a* 免受 UV 辐射的损害。FIGUEROA 等^[5]和 AGUILERA 等^[6]发现更长时间的 PAB 处理会引起 *Chl. a*、*Car*、PE、PC 的下降。梢部、中部、基部藻体的差异可能是因为不同部位藻体细胞组成及生长环境的细微差异所致。

紫菜体内含有的紫外吸收物质(MAAs)可以在强光条件下保护藻体,减弱 UVR 对藻体的影响^[11]。有研究指出,红藻(*Devaleraea ramentacea*)暴露 PAR 和 PAR + UV - A 辐射时,紫外吸收物质并没有变化,而 PAR + UV - A + UV - B 辐射处理引起紫外吸收物质含量增加^[31]。本实验中,紫外辐射并没有引起紫外吸收物质的进一步升高。GRÖNIGER 等^[32]也发现紫外辐射并没有引起脐形紫菜紫外吸收物质含量的增加,可能是因为初始含量太高所致。

生活在潮间带的海藻,避免不了紫外辐射,在长期的进化过程中,会形成一定的保护机制。比如孔石莼藻体不同部位细胞形态及 UV 辐射响应机制的不同,更有利于藻体的快速生长和存活^[10]。在紫外或强光下,条斑紫菜的 PS II 受到明显的抑制,这种光抑制可以降低 PS II 的光量子产量,使吸收的过多的能量通过热耗散来消除光的有害作用^[14]。

紫外辐射处理后,条斑紫菜不同部位藻体的生理生化的变化趋势不同,有着各自的特性。条斑紫菜不同部位生理和生化组成的差异应是其所

处的环境差异造成的,遮蔽作用可能使基部的色素组成与梢部不同,对紫外和强光的适应也不同。梢部较基部含有较多的紫外吸收物质,对紫外和强光的抵抗力较强。总的来说,条斑紫菜不同部位藻体光合生理特性存在较大差异。阳光的遮蔽作用,积累紫外吸收物质和动态光抑制作用可能是条斑紫菜应对紫外辐射的主要策略。

参考文献:

- [1] 张寒野,何培民,陈婵飞,等. 条斑紫菜养殖对海区中无机氮浓度影响[J]. 环境科学与技术,2005,28(4):44-45.
- [2] 王革丽,吕达仁,杨培才. 人类活动对大气臭氧层的影响[J]. 地球科学进展,2009,24(3):331-337.
- [3] GOMÉZ I, WIENCKE C, THOMAS D N. Longitudinal profiles of growth, photosynthesis and light independent carbon fixation in the Antarctic brown alga *Ascoseira mirabilis*[J]. Botanica Marina, 1995,38(6):157-164.
- [4] SRENGEL D B, DRING M J. Seasonal variation in the pigment content and photosynthesis of different thallus regions of *Ascophyllum nodosum* (Fucales, Phaeophyta) in relation to position in the canopy[J]. Phycologia, 1998,37(4):259-268.
- [5] FIGUEROA F L, SALLES S, AGUILERA J, et al. Effects of solar radiation on photoinhibition and pigmentation in the red alga *Porphyra leucosticte* [J]. Marine Ecology Progress Series, 1997, 151: 81-90.
- [6] AGUILERA J, FIGUEROA F L, HÄDER D, et al. Photoinhibition and photosynthetic pigment reorganisation dynamics in light/ darkness cycles as photoprotective mechanisms of *Porphyra umbilicalis* against damaging effects of UV radiation [J]. Scientia Marina, 2008, 71(1):87-97.
- [7] GOMÉZ I, WIENCKE C, THOMAS D N. Variations in photosynthetic characteristics of the Antarctic marine brown alga *Ascoseira mirabilis* in relation to thallus age and size [J]. European Journal of Phycology, 1996, 31:167-172.
- [8] KHOTIMCHENKO S V, KULIKOVA I V. Lipids of different parts of the lamina of *Laminaria japonica* Aresch [J]. Botanica Marina, 2000, 43(1):87-91.
- [9] GODÍNEZ-ORTEGA J L, SNOEIJIS P, DANIEL R, et al. Growth and pigment composition in the red alga *Halymenia floresii* cultured under different light qualities [J]. Journal of Applied Phycology, 2008, 20

- (3):253–260.
- [10] HAN T, HAN Y. Thallus differentiation of photosynthesis, growth, reproduction, and UV – B sensitivity in the green alga *Ulva pertusa* (Chlorophyceae) [J]. *Journal of Phycology*, 2003, 39:712–721.
- [11] JIANG H X, GAO K S, HELBLINGS W. UV-absorbing compounds in *Porphyra haitanensis* (Rhodophyta) with special reference to effects of desiccation [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2008, 20(4):387–395.
- [12] BAKER N R, BOWYER J R. Photoinhibition of photosynthesis; from molecular mechanisms to the field [J]. *Environmental Plant Biology Series*, 1994, 133(2):471–492.
- [13] KRAUSE G H, WEISS E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis; the basics [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1991, 42:313–349.
- [14] WOOD W F. Effect of solar ultraviolet radiation on the kelp *Eklonia radiata* [J]. *Marine Biology*, 1987, 96:143–150.
- [15] KARSTEN U, SAWALL T, HANELT D, *et al.* Contents of UV absorbing mycosporine-like amino acids in macroalgae from polar to warm-temperate regions [J]. *Botanica Marina*, 1998, 41:443–453.
- [16] KARENTZ D, DUNLAP W C, BOSCH I. Temporal and spatial occurrence of UV – absorbing mycosporine-like amino-acids in tissues of the Antarctic sea urchin *Sterechinus neumayeri* during springtime ozone-depletion [J]. *Marine Biology*, 1997, 129(2):343–353.
- [17] 冯琛,路新枝,于文功. 逆境胁迫对条斑紫菜生理生化指标的影响 [J]. *海洋湖沼通报*, 2004, 3:22–26.
- [18] GERBER S, HÄDER D P. Effects of artificial UV – B and simulated solar radiation on the flagellate *Euglena gracilis*: physiological, spectroscopical and biochemical investigations [J]. *Acta Protozoologica*, 1995, 34:13–20.
- [19] GENTY B E, BRIANTAIS J M, BAKER N R. Relative quantum efficiencies of the two photosystems of leaves in photorespiratory and nonphotorespiratory conditions [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 1990, 28(1):1–10.
- [20] WEIS E, BERRY J. Quantum efficiency of photosystem II in relation to energy-dependent quenching of chlorophyll fluorescence [J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1987, 894(2):198–208.
- [21] WELLBURN A R. The spectral determination of chlorophyll a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution [J]. *J Plant Physiol*, 1994, 144:307–313.
- [22] BEER S, ESHEL A. Determining phycoerythrin and phycocyanin concentrations in aqueous crude extracts of red algae [J]. *Aust J Mar Freshwater Res*, 1985, 36:785–792.
- [23] 曾成奎,王素娟,刘思俭,等. 海藻栽培学 [M]. 上海:上海科学技术出版社,1985:227.
- [24] ROLEDA M Y, HANELT D, WIENCKE C. Growth and DNA damage in young *Laminaria sporophytes* exposed to ultraviolet radiation; implications for depth zonation of kelps of Helgoland (North Sea) [J]. *Marine Biology*, 2006, 148(6):1210–1211.
- [25] VAN DE POLL W H, EQQERT A, BUMA G J, *et al.* Effects of UV – B induced DNA damage and photoinhibition on growth of temperate marine red macrophytes; habitat-related differences in UV – B tolerance [J]. *Journal of Phycology*, 2001, 37(1):30–37.
- [26] SINHA R P, HÄDER D P. Life under solar UV radiation in aquatic organisms [J]. *Advances in Space Research*, 2002, 30(6):1547–1556.
- [27] 姜红霞,高坤山. 干出和紫外辐射对坛紫菜光合作用的影响 [J]. *自然科学进展*, 2009, 19(8):835–840.
- [28] HALLDAL P. Ultraviolet action spectra of photosynthesis and photosynthetic inhibition in a green and a red alga [J]. *Physiologia plantarum*, 1964, 17(2):414–421.
- [29] DRING M J, MAKAROV V, SCHOSCHINA E, *et al.* Influence of ultraviolet-radiation on chlorophyll fluorescence and growth in different life-history stages of three species of *Laminaria* (Pheophyta) [J]. *Marine Biology*, 2004, 126(2):183–191.
- [30] SINHA R P, SINHA J P, GRÖNIGER A, *et al.* UV-protectants in cyanobacteria [J]. *Plant Science*, 2008, 174(3):278–289.
- [31] KARSTEN U, BISCHOF K, HANELT D, *et al.* The effect of ultraviolet radiation on photosynthesis and ultraviolet-absorbing substances in the endemic Arctic macroalga *Devaleraea ramentacea* (Rhodophyta) [J]. *Plant Physiology*, 1999, 105(1):58–66.
- [32] GRÖNIGER A, HALLIER C, HÄDER D P. Influence of UV radiation and visible light on *Porphyra umbilicalis*: Photo-inhibition and MAA concentration [J]. *Journal of Applied Phycology*, 1999, 11:437–445.

Effects of UVR on the photochemical efficiency and photosynthetic pigment content of different blade parts in *Porphyra yezoensis*

FENG Zi-hui¹, LI Xin-shu^{1,2}, WEI Hua¹, HE Pei-min^{1*}

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Key Laboratory of Marine Biotechnology of Jiangsu Province, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China)

Abstract: In this study, the amount of damage to *Porphyra yezoensis* by ultraviolet radiation (UVR) was assessed by analyzing the photochemical efficiency and pigment concentration between different blade parts under laboratory conditions. All parts of the blade were exposed to either PAB (PAR + UV - A + UV - B) (280 - 700 nm) a full spectrum or partial PAR (395 - 700 nm) spectrum using cut-off glass filters. It was observed that PAB caused a more significant decrease in the optimal photochemical efficiency than PAR in all blade parts, followed by a lower recovery toward the initial values. Marked differences of the optimal photochemical efficiency between all parts of blade under UV exposure were observed. Apical parts were more resistant but had quicker recovery, basal parts were more sensitive to PAB and had slower recovery. After different radiation treatment, phycoerythrin (PE) and phycocyanin (PC) are more sensitive to PAB treatment and increased significantly in all parts of blade. The PE and PC contents of apical parts had extreme increase, while no remarkable differences of Chlorophyll a and carotenoid were observed. Determination of mycosporine-like amino acids (MAAs) before and during exposure to solar simulated irradiation showed no remarkable differences. The MAAs contents increased from basal to apical parts. Above all, the different parts of *Porphyra yezoensis* displayed bigger dissimilarity in the photosynthetic physiology characteristics. We presumed that the strategies to cope with UV radiation may including sheltering effect, accumulating UV absorbing substance and dynamic photoinhibition.

Key words: *Porphyra yezoensis*; UVR; optimal photochemical efficiency; pigment content

Corresponding author: HE Pei-min. E-mail: pmhe@shou.edu.cn