

阳光紫外辐射对铜藻的生长及荧光参数的影响

关万春^{1*}, 陈亨¹, 王铁杆², 陈少波², 徐军田³

(1. 温州医科大学生命科学院, 浙江温州 325035;

2. 浙江省海洋水产养殖研究所, 浙江温州 325005;

3. 淮海工学院海洋学院, 江苏连云港 222005)

摘要: 为了探讨近年来南麂列岛铜藻场衰退、消亡的原因以及更好的进行人工育苗恢复藻场, 实验结合阳光紫外强度日益增加的环境问题, 开展了紫外辐射对铜藻生长和光合生理影响机制的探究。实验设置3种不同阳光辐射处理: 可见光(PAR)处理(400~700 nm), 可见光加紫外辐射A(PA)处理(320~700 nm)和全波长辐射(PAB)处理(280~700 nm)。铜藻经过14 d阳光辐射适应培养后, 其生长表现为UV-A部分(PA处理中)对铜藻的RGR促进了6.7%, 且提高了藻体的叶绿素a、类胡萝卜素和UVACs含量; UV-B部分(PAB处理中)对藻体的RGR产生了8.98%的抑制, 同时抑制了铜藻色素的合成。比较3种辐射处理的快速响应曲线(RLC), PA处理下的藻体具有最高的最大电子传递速率($rETR_{max}$)和光能利用率(α)。当将藻体置于太阳模拟灯下照射1 h, 经PA适应的藻体其D1蛋白修复速率与损伤速率的比(r/k)比P处理的高13.02%, 而经PAB适应的 r/k 比P处理的低17.62%, 证明UV-A对铜藻具有正面效应。

关键词: 铜藻; 荧光参数; 正面效应; 紫外辐射

中图分类号: Q 949.24; S 917.3

文献标志码: A

虽然在过去的几十年中, 人们通过各种方式试图减缓人类活动对臭氧层的破坏, 如蒙特利尔协议中虽禁止氟化氢等卤化物的使用, 但臭氧浓度依然在持续下降^[1]。臭氧层的存在对于地表生物有着重要的意义, 阳光紫外辐射(UVR, ultraviolet radiation)穿过臭氧层时, 短波的UV-C(100~280 nm)波段被全部吸收, 而UV-B(280~315 nm)有90%左右被消减, 只有UV-A(315~400 nm)几乎全部能够透过臭氧层。所以, 臭氧层的变薄引起的紫外辐射增加这一现象引起了海洋学者的广泛关注^[2]。

大型海藻的生态位主要在潮间带, 随着潮汐变化而经受着沉水和干出两种环境变化, 这样独特的地理位置, 使其更易于受到紫外辐射的影响^[3]。但大型海藻对紫外辐射的响应受到地理

分布、种间差异和生活史阶段的影响。紫外辐射对来自不同垂直位置的3种褐藻(*Fucus spiralis*, *F. vesiculosus*, *F. serratus*)相比较, 分布在海水更深处的海藻对紫外辐射最敏感^[4]; 3种海带(*Laminaria digitata*, *L. hyperborea*和*L. saccharina*)的配子体、幼孢子体和成熟孢子体相比较, 成熟孢子对紫外辐射紫外辐射的耐受性最好^[5]。而条斑紫菜(*Porphyra yezoensis*)藻体各部位对于紫外辐射的耐受性也存在显著差异^[6]。UVR可以影响大型海藻的色素含量、蛋白质含量、光合速率、荧光参数等指标, 从而改变藻体的正常光合特性。这是因为藻体的光系统II是UVR主要靶部位, 其活性中心的关键蛋白D1在300 nm处有最大吸收峰, 所以极易受到UVR的影响^[7]。D1蛋白是光反应的电子传递关键蛋白, 蛋

收稿日期: 2015-01-22 修回日期: 2015-10-19

资助项目: 国家自然科学基金(41306106); 浙江省科技计划项目(2012C13005和2014F10005); 浙江省自然科学基金(Y16D060019); 浙江省重点实验室开发和保护沿岸生物资源项目(J2013001)

通信作者: 关万春, E-mail: gwc@wmu.edu.cn

白因UVR作用改变构象失活被蛋白酶降解,被阻断的电子传递使电子受体(Q_A)一直处于氧化状态,进而导致大量活性氧产生和色素降解^[8],从而对藻体的光合活性造成影响。但大型海藻在长期的进化过程中,产生了防御机制。如很多褐藻中主要存在的UVACs是褐藻多酚(phlorotannins)^[9-11]。褐藻多酚不仅在UVR波段有吸收峰,且具有高度抗氧化活性。在UVR的诱导后,泡叶藻(*Ascophyllum nodosum*)和北方巨藻(*Macrocystis integrifolia*)中均发现褐藻多酚的上升^[12-13]。为了清除紫外辐射产生的大量活性氧,藻细胞进化出清除ROS自由基的抗氧化系统。除了通过酶促体系(SOD、APX等)清除活性氧之外,藻细胞中还含有非酶类抗氧化剂,主要由抗坏血酸(AsA),还原性谷胱甘肽(GSH)和类胡萝卜素等。角叉藻(*Chondrus crispus*)在UVR处理后,体内类胡萝卜素含量显著增加^[14]。

铜藻[*Sargassum horneri*(Turn)C. Agardh]隶属褐藻门(Phaeophyta),马尾藻属(*Sargassum*),在我国沿海不连续分布,多数为一年生,通过有性繁殖来繁衍后代。该物种生长快速,能营造巨大海藻场为其他生物提供栖息、避敌和繁殖的场所。此外,铜藻在快速生长的同时能从周边海水中吸收大量N、P等营养盐,这对于净化水质具有良好的作用。而且铜藻还可作为饵料对鲍鱼、刺参等珍贵食材进行饲养,缓解养殖方面对马尾藻需求,有着较好的经济效益。但近年来,铜藻作为标志性物种,在南麂列岛联合国海洋生态自然保护区内却大面积衰退。所

以,有必要研究UVR对铜藻生长及光合生理的影响,从而进一步探讨其衰退的原因。

1 材料与方法

1.1 实验材料

铜藻幼苗采集于浙江海洋水产养殖研究所洞头基地(27° 85' N, 121° 16' E),保湿带回实验室。置于自然海水中的藻苗在温度20 °C、光强100 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光照培养箱(GTX-430E, 江南仪器厂, 中国)下适应24 h之后,选取形态大小相近、健康的藻体用于实验。

1.2 实验方法

挑选总鲜重(1 ± 0.05) g的铜藻幼苗加入装有600 mL自然海水(根据南麂列岛海域的氮含量确定 NO_3^- 浓度为56 $\mu\text{mol/L}$,并用 NaH_2PO_4 加富 PO_4^- 至50 $\mu\text{mol/L}$,确保营养盐的充足)的石英管中。在室外阳光辐射的条件下通气(通气量约为300 mL/min)培养,流水水浴控温(10 °C)。实验时间为2014年1月5日至2014年1月18日,实验期间阳光辐射由光谱辐射仪(Model PMA2100, Solar Light Company, America)全日候监测(图1-10)。

阳光辐射处理 藻体暴露于3种光辐射处理:(1) P处理。石英管用Ultraplan 395膜(UV Opak, Digefra, Munich, Germany)包裹,395膜只能透过波长395 nm以上的光,使石英管内藻体只能接受可见光(PAR)。(2) PA处理。石英管用Folex320膜(Montagefolie, Germany)包裹,320膜只能透过波长320 nm以上的光,藻体接收到的是

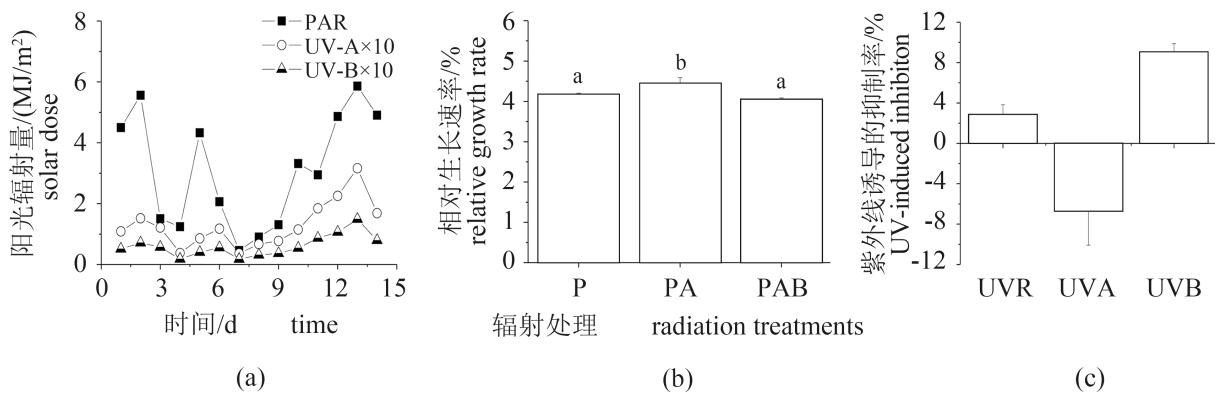


图1 2014-1-5至2014-1-18期间阳光辐射强度(a)、铜藻相对生长速率(b)和不同辐射对铜藻生长的抑制率(c)

Fig. 1 The solar dose between 2014-1-5 to 2014-1-18 (a), the RGR of *S. horneri* after fitting 14 days under three different radiation treatments P, PA, PAB (b) and the inhibition to growth under UVR, UVA and UVB(c)

PAR+UV-A光辐射。(3)PAB处理。石英管用 Ultraphan295膜(UVopak, Germany)包裹, 藻体可直接接受PAR+UVR的全波段阳光辐射。每个辐射处理下3个重复。

相对生长速率(RGR, relative growth rate)

实验期间每隔2天更换一次培养基并清洗藻体。于实验开始和结束分别称量藻体鲜重(称量前用纱布吸干表面水分), 用于计算相对生长速率。

$$RGR = 100 \times (\ln N_t - \ln N_0) / t \quad (1)$$

式(1)中, t 为培养天数; N_t 和 N_0 分别为培养 t 天和初始的鲜重。

紫外辐射对生长的抑制公式如下:

$$\ln h_{UVR} = (R_{PAR} - R_{PAB}) / R_{PAR} \times 100\% \quad (2)$$

$$\ln h_{UV-A} = (R_{PAR} - R_{PA}) / R_{PAR} \times 100\% \quad (3)$$

$$\ln h_{UV-B} = (R_{PA} - R_{PAB}) / R_{PA} \times 100\% \quad (4)$$

式(2,3,4)中 $\ln h_{UVR}$ 、 $\ln h_{UV-A}$ 和 $\ln h_{UV-B}$ 分别代表UVR、UV-A以及UV-B对藻体生长的抑制率, R_{PAR} 、 R_{PA} 和 R_{PAB} 代表PAR、PA和PAB处理下铜藻的RGR。

色素的测定 取整株铜藻, 称量完鲜重后用吸水纸吸干藻体表面水分后置于研钵中, 加入2 mL纯甲醇研磨成匀浆, 并用甲醇定容至10 mL。4 °C黑暗提取24 h, 5000×g离心10 min, 取上清液用紫外分光光度计(Varian Cary 50, USA)在波长280~700 nm内进行吸光值扫描, 并计算色素含量^[15]。

叶绿素a含量:

$$Chl.a \text{ (mg/g)} = 15.65 \times A_{666} - 7.34 \times A_{653} \quad (5)$$

类胡萝卜素含量:

$$Caro \text{ (mg/g)} = (1000A_{470} + 1403.57A_{666} - 3473.87A_{653}) / 221 \quad (6)$$

式(5, 6)中, A_{666} 为666 nm处吸光度, A_{653} 为653 nm处吸光度, A_{470} 为470 nm处吸光度。

紫外吸收物质(UVACs, UV-absorbing compounds)含量根据UVACs在紫外区域吸收峰的峰高H与藻体鲜重的比值来表示。

叶绿素荧光参数测定 室外阳光辐射处理开始与结束, 将藻体暴露在人工光源太阳模拟器下(模拟升高的UVR, 其中PAR=213.3 W, UV-A=14.3 W, UV-B=6.7 W)损伤60 min, 移至光强为10 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的低光条件下修复360 min。在损伤(5, 15, 30和60 min)和修复(5, 15, 30, 60, 120, 180和360 min)之后在脉冲调制式荧光仪FMS-2(Hansatech, Britain)下测定藻体荧光参数

有效光化学效率(Φ_{PSII})。UVR导致的修复速率(r)和损伤速率(k)使用Origin 8.0软件用测得的 Φ_{PSII} , 按照以下的公式进行拟合:

$$y = a + b \times \exp(-c \times t) \quad (7)$$

再结合如下的公式计算 r 和 k :

$$y = r / (r + k) + k / (r + k) \times \exp[-(r + k) \times t] \quad (8)$$

式(7, 8)中, t 为损伤时间, y 为有效光化学效率(Φ_{PSII}), a, b, c 为常数, r 为修复速率, k 为损伤速率。

经过室外阳光辐射处理的藻体在FMS-2下测定其快速光响应曲线(rapid-light curve, RLC)。RLC使用10个梯度[0, 6, 14, 35, 70, 140, 200, 300, 340, 400 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]的光化光, 每个光化光阶段时长设定为1 min。

相对电子传递速率(rETR)由以下的公式进行计算:

$$rETR = 0.5 \times \Phi_{PSII} \times PFD \quad (9)$$

式(9)中, Φ_{PSII} 为光系统II的有效光化学效率, 0.5代表光系统II吸收的光量子占总量的50%, PFD为光化光的强度。

RLC根据以下公式进行拟合:

$$y = rETR_{\max} \times [1 - \exp(-\alpha \times x / rETR_{\max})], \\ I_k = rETR_{\max} / \alpha \quad (10)$$

式(10)中, y 为rETR, x 为光强, $rETR_{\max}$ 为最大电子传递速率, α 为光能利用率, I_k 为饱和光强。

统计分析 用SPSS软件One-Way ANOVA Turkey氏检验分析各个处理之间的显著性, 显著性差异水平设置为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 不同辐射处理下的生长及色素

经过14 d的3种阳光辐射后铜藻的生长有明显的差别(图1-b), 其中PA的相对生长速率最高, 并且辐射UV-A对藻体的相对生长率促进率为6.70% ($P < 0.05$)。相比较P和PAB的相对生长率差异为不显著 ($P > 0.05$), 但UV-B的抑制率已达到了8.98% ($P < 0.05$)。

在室外长期阳光辐射适应后, 铜藻体内的Chl.a含量在PA和PAB处理下显著升高 ($P < 0.05$)。且Caro以及UVACs的含量经PA处理之后都显著提高 ($P < 0.05$); 在PAB情况下, Caro和UVACs的含量均低于PA处理60.02%和23.85% ($P < 0.05$) (图2)。

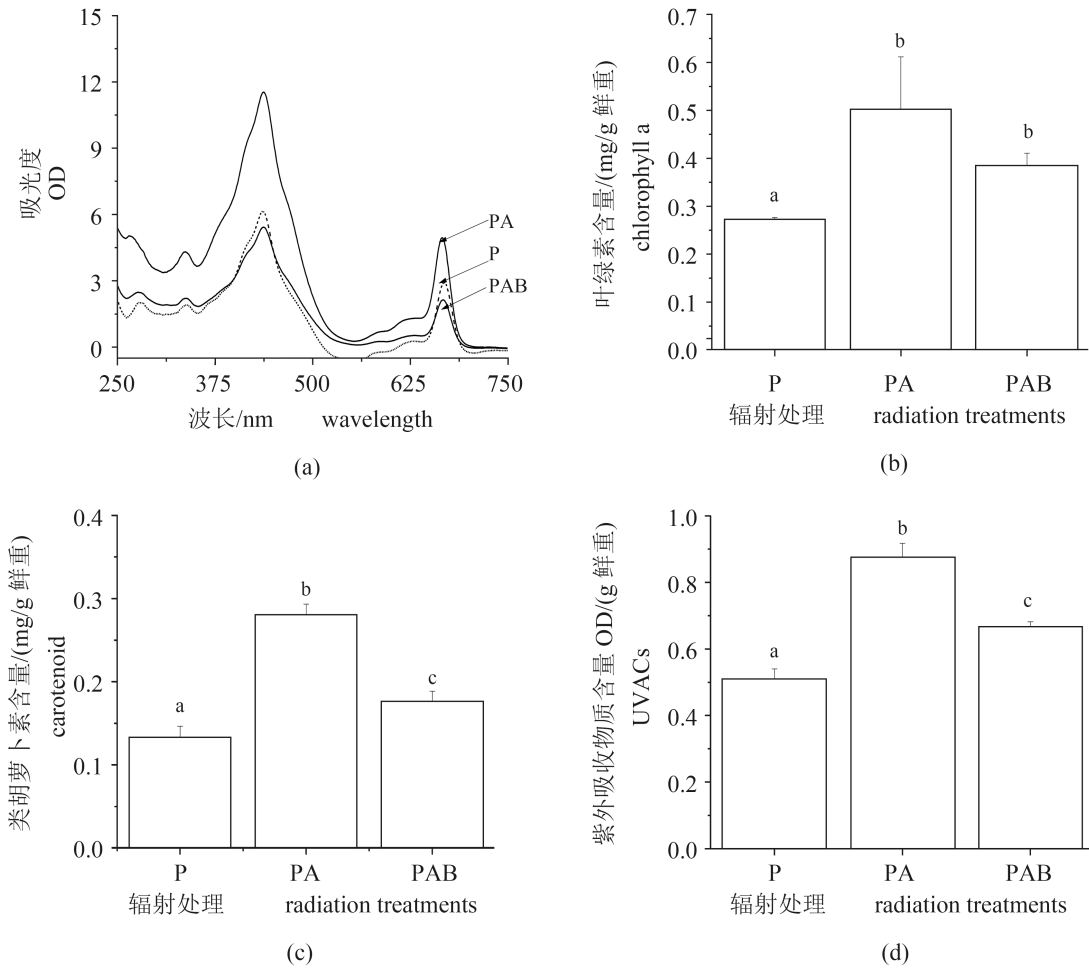


图2 不同辐射处理下, 色素扫描图谱(a), 铜藻的叶绿素a(b), 类胡萝卜素(c)含量和紫外吸收物质(d)

Fig. 2 The scan wavelength from 250 to 750 nm about pigments (a), the contents of Chlorophyll a (b), Carotenoid (c) and UVACs (d) of *S. horneri* under PAR, PA and PAB three different treatments for 14 days, respectively

2.2 不同辐射处理下的快速光响应曲线

通过快速光响应曲线(图3)计算得到不同辐射处理的最大电子传递速率 $rETR_{max}$ 、光能利用效率 α 和饱和光强 I_k (表1)。相对P处理, PA显著促进藻体最大电子传递速率和光能利用效率($P < 0.05$), 增长率分别为65.27%和99.63%, 而PAB的电子传递效率降低了13.14%($P < 0.05$)。PA和PAB对于饱和光强均无显著影响($P > 0.05$)。

2.3 不同辐射处理下的损伤-修复

铜藻经太阳模拟灯下暴露1 h后(图4), 未经阳光辐射的铜藻经受增强的不同辐射处理, 其 Φ_{PSII} [10 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]修复6 h后, P和PA处理均能恢复至初始水平, 但PAB仍为初始的78.24%。室外适应14 d的铜藻经损伤后其 Φ_{PSII} 均下降为初始值的70%~75%, 低光修复后都能达到95%左右。

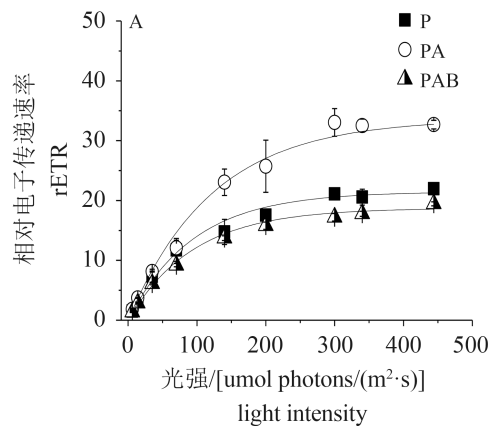


图3 不同辐射处理下铜藻的电子传递速率

Fig. 3 The electron transport rates of *S. horneri* exposure with three different radiations

计算太阳模拟灯辐射1 h内铜藻D1蛋白的损伤与修复速率的比值可知, 未经阳光紫外辐射

表 1 根据图3拟合获得不同辐射处理下培养的铜藻最大相对电子传递速率($rETR_{max}$)、光能利用率(α)及饱和光强(I_k)

Tab. 1 Photosynthetic parameters derived from figure 3 of *S. horneri* cultured under different radiation treatments

辐射处理 radiation treatments	最大相对电子传递速率 $rETR_{max}$	光能利用率 α	饱和光强 I_k
P	21.62±0.11 ^a	0.22±0.04 ^a	102.57±23.77 ^a
PA	25.89±0.28 ^b	0.31±0.05 ^b	83.81±13.45 ^a
PAB	18.78±0.39 ^c	0.18±0.01 ^a	103.16±8.54 ^a

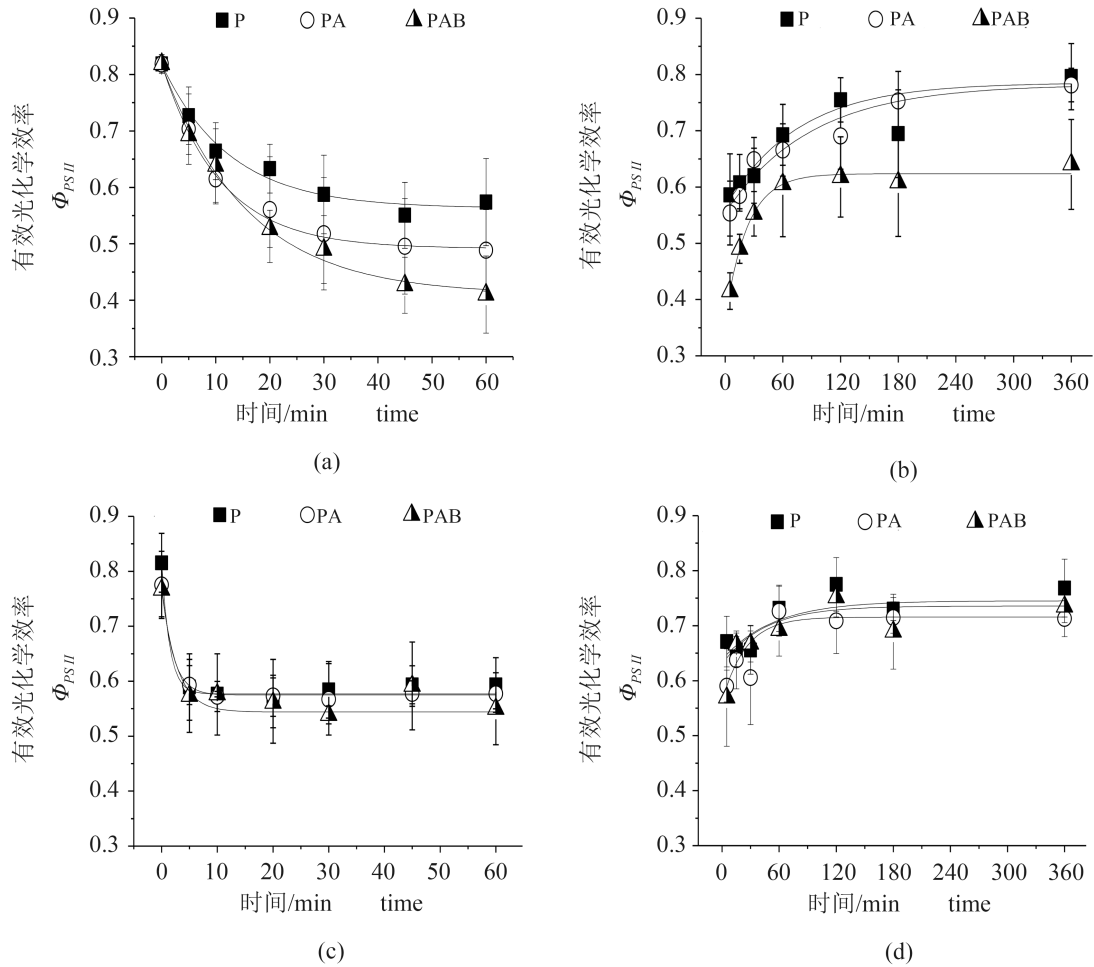


图 4 不同辐射处理下初始铜藻的损伤(a)和修复(b)及适应14天后铜藻的损伤(c)和修复(d)

Fig. 4 The damage with PAR, PA and PAB irradiance for 60 min and the recovery under 10 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ low light for 360 min of *S. horneri* before (a, b) or after accommodate (c, d) to different solar light

适应的铜藻，其PAB的 r/k 值比P和PA分别降低了62.84%和52.11% ($P < 0.05$)；而经过14 d阳光辐射适应后，PA超出P的值13.02% ($P < 0.05$)，PAB比P低17.62% ($P < 0.05$)，这是因为经过14 d适应后，D1蛋白的 r 显著高于未经过阳光辐射适应的缘故 ($P < 0.05$) (图5-a)。比较实验开始与结束，P的 r/k 并无明显的差异，PA提高了50.51% ($P < 0.05$)，PAB也相应提高了71.28% ($P < 0.05$)。

3 讨论

比较可见光(P)与添加紫外辐射(PA和PAB)的情况，添加UV-A对铜藻的生长具有正面效应，而UV-B的加入则对生长存在抑制。根据靶理理论，一般认为UV-A光子所含能量对藻的PS II而言是过剩的，容易造成光损伤，另外，UV-B比UV-A光波长更短，其能量会造成更为严重损

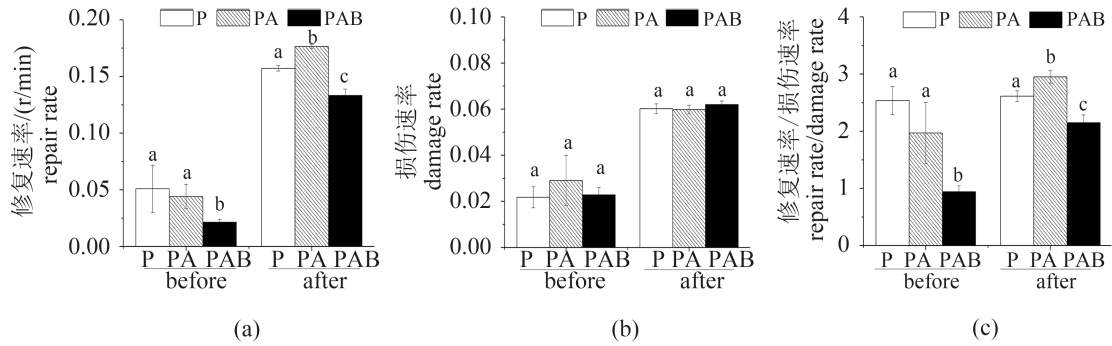


图5 不同辐射处理适应前(before)和适应后(after)铜藻的修复速率 r (a), 损伤速率 k (b)以及修复速率/损伤速率 r/k (c)

Fig. 5 The repair (a), damage rate (b) and repair rate / damage rate (c) of *S. horneri* under before or after accommodate to different radiations

伤^[16-17]。UV-A的损伤部位主要是PSII反应中心, 主要损害PSII反应中心的水氧化复合物, 该复合物是向Tyr-Z^o和P₆₈₀⁺转运电子的关键部位, 该种损害与UV-B的抑制类似^[18-19]。但Xu等^[20]的研究发现UV-A能够驱动藻体的光合放氧和光合固碳, 而UV-B则抑制该过程, 且证实UV-A和可见光PAR的利用途径相类似。紫外辐射紫外辐射在其他大型海藻的生长研究中, 在龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)和墨角藻中均观察到UV-A对藻体的生长有促进作用, 并表明UV-A的促进作用仅在可见光比例低于一定值时才存在^[10,21]。本实验在冬季开始(1月份), 阳光强度相对夏季较低, 同样观察到UV-A对铜藻的生长正面效应。

为了验证UV-A对铜藻生长的促进作用这一现象, 我们通过测定其他生理参数进行佐证。叶绿素a作为关键性的天线色素, 其含量变化是适应策略的结果^[22]。而叶绿素a的结果显示, UV-A的诱导使铜藻的叶绿素a的含量显著升高。在叶绿素a的吸收光谱中存在UV-A波段的吸收峰, 这表明叶绿素a能够直接利用UV-A^[23-24]。所以在实验期间可见光较弱的情况下, 叶绿素a在增加UV-A(PA处理)的情况下适应性的升高来获得更多光能用于生长(图2B)。Mengelt等^[25]研究发现, UV-A能促进藻体的光合固碳, 且发现只有在UV-A的长波段(340~400 nm)下才起促进作用。对褐藻(*Fucus spiralis*)和绿藻(*Ulva olivascens*)的研究发现, UV-A对其光合作用起促进作用, 并提高了两种藻体内的硝酸还原酶和碳酸酐酶的活性^[26]。本实验同样观察到, PA处理下藻体具有最大电子传递速率和光能利用率, 这表明铜藻

确实能利用UV-A进行光合作用从而提高了生长速率。

大型海藻因不存在“躲避”紫外辐射机制, 所以从进化角度而言, 藻体内必须存在屏障、保护或修复机制抵抗紫外辐射^[11]。UVACs的合成对于大型海藻抵御紫外辐射意义重大, 这类物质在紫外波段有较大的吸收峰并且自身不会受到UVR损伤, 起到捕获紫外辐射的作用^[27]。有研究表明, UVACs还能同天线色素一样将能量传递到光合作用中心^[28]。UV-A辐射对龙须菜的UVACs的合成有显著的促进作用^[29]。类胡萝卜素在藻体中起着清除活性氧, 保护植物光合系统和膜结构的重要作用^[30]。另外, 类胡萝卜素所吸收的光能约50%传递给叶绿素a, 充当叶绿素的辅助色素^[31]。上述两类重要色素在UV-A的激发下, 在藻体中的含量显著上升, 说明铜藻很好地适应UVR的照射, 通过启动自身保护措施减少UVR的光损伤。对比室内低光培养和室外长期适应阳光的铜藻幼苗对紫外辐射的响应发现, 紫外辐射照射下室内的藻体 r/k 较低, 而室外的藻体表现出PA促进。修复速率 r 与损伤速率 k 的比例决定了藻体收到紫外抑制的程度^[32], PA下的 r/k 升高主要由于 r 的升高, 表示铜藻减轻UV-A的光损伤是通过提高修复速率, 如提高D1蛋白的周转速率来实现的。

铜藻作为南麂列岛海洋生物自然保护区一种重要的大型海藻, 近几年来因随洋流漂移、全球气候变化或人类活动等原因导致铜藻场大面积消失, 所以需进行人工育苗重建铜藻场^[33-34]。因此, 学者们已经开始关注该科学问题探讨铜

藻的繁殖、育苗以及铜藻对海水酸化的响应^[34-35]。本实验主要从紫外辐射角度探讨铜藻幼苗的响应机制,结果发现在较低阳光辐射下,UV-A对铜藻生长具有促进作用,而UV-B则抑制。所以认为在未来紫外辐射逐步增强的情况之下,人工育苗的藻种从室内移至室外培养和移植海上原位时需逐渐增加紫外辐射强度,提高铜藻对自然阳光紫外辐射的适应力,以增加铜藻移植的成活率,加快铜藻场的修复。

参考文献:

- [1] McKenzie, R L, Aucamp P J, Bais A F, *et al.* Changes in biologically-active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface [J]. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2007, 6(3): 218-231.
- [2] Häder D P, Kumar H D, Smith R C, *et al.* Effects of solar UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change [J]. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2007, 6(3): 267-285.
- [3] Hanelt D, Wiencke C, Nultsch W. Influence of UV radiation on the photosynthesis of arctic macroalgae in the field [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology-B: Biology*, 1997, 38(1): 40-47.
- [4] Altamirano M, Flores-Moya A, Figueroa F L. Effects of UV radiation and temperature on growth of gemlings of three species of *Fucus* (Phaeophyceae) [J]. *Aquatic Botany*, 2003, 75(1): 9-20.
- [5] Dring M J, Wagner A, Lüning K. Contribution of the UV component of natural sunlight to photoinhibition of photosynthesis in six species of subtidal brown and red seaweeds [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2001, 24(11): 1153-1164.
- [6] 冯子慧, 李信书, 魏华, 等. 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[J]. *水产学报*, 2011, 35(3): 387-394.
- Feng Z H, Li X S, Wei H, *et al.* Effects of UVR on the photochemical efficiency and photosynthetic pigment content of different blade parts in *Porphyra yezoensis* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(3): 387-394 (in Chinese).
- [7] Vass I, Sass L, Spetea C, *et al.* UV-B-induced inhibition of photosystem II electron transport studies by EPR and Chlorophyll fluorescence. Impairment of donor and acceptor side Component [J]. *Biochemistry*, 1996, 35(27): 8964-8973.
- [8] Roleda M Y, Wiencke C, Lüder U H. Impact of ultraviolet radiation on cell structure, UV-absorbing compounds, photosynthesis, DNA damage, and germination in zoospores of Arctic *Saccorhiza dermatodea* [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2006a, 57(14): 3847-3856.
- [9] Dunlap W C, Shick J M. Ultraviolet radiation-absorbing mycosporine-like amino acids in coral reef organisms: a biochemical and environmental perspective [J]. *Journal of Phycology*, 1998, 34(3): 418-430.
- [10] Henry B E, Van Alstyne K L. Effects of UV radiation on growth and phlorotannins in *Fucus gardneri* (Phaeophyceae) juveniles and embryos [J]. *Journal of Phycology*, 2004, 40(3): 527-533.
- [11] Cockell C S, Knowland J. Ultraviolet radiation screening compounds [J]. *Biological reviews*, 1999, 74(3): 311-345.
- [12] Pavia H, Brock E. Extrinsic factors influencing phlorotannin production in the brown alga *Ascophyllum nodosum* [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 193(1): 285-294.
- [13] Swanson A K, Druchl L D. Introduction, exudation and the UV protective role of kelp phlorotannins [J]. *Aquatic Botany*, 2002, 73(3): 241-253.
- [14] Yakovleva I M, Titlyanov E A. Effect of high visible and UV irradiation on subtidal *Chondrus Crispus*: stress, photoinhibition and protective mechanisms [J]. *Aquatic Botany*, 2001, 71(1): 47-61.
- [15] Wellburn A R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution [J]. *Journal of Plant Physiology*, 1994, 144(3): 307-313.
- [16] Sinclair J, Park Y I, Chow W S, *et al.* Target theory and the photoinactivation of photosystem II [J]. *Photosynthesis Research*, 1996, 50(1): 33-40.
- [17] Park Y I, Chow W S, Anderson J M. Antenna size dependency of photoinactivation of photosystem II in light-acclimated pea leaves [J]. *Plant Physiology*, 1997, 115(1): 151-157.
- [18] Vass I, Turcsányi E, Touloupakis E, *et al.* The mechanism of UV-A radiation-induced inhibition of photosystem II electron transport studied by EPR and

- chlorophyll fluorescence [J]. *Biochemistry*, 2002, 41(32): 10200-10208.
- [19] Ivanova P I, Dobrikova A G, Taneva S G, *et al.* Sensitivity of the photosynthetic apparatus to UV-A radiation: role of light-harvesting complex II-photosystem II supercomplex organization [J]. *Radiation and Environmental Biophysics*, 2008, 47(1): 169-177.
- [20] Xu J T, Gao K S. Use of UV-A energy for photosynthesis in the red macroalga *Gracilaria lemaneiformis* [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2010, 86(3): 580-585.
- [21] Gao K S, Xu J T. Effects of solar UV radiation on diurnal photosynthetic performance and growth of *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) [J]. *European Journal of Phycology*, 2008, 43(3): 297-307.
- [22] Sinha R P, Klisch M, Gröniger A, *et al.* Ultraviolet-absorbing/screening substances in cyanobacteria, phytoplankton and macroalgae [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology-B: Biology*, 1998, 47(2-3): 83-94.
- [23] Moisan T A, Mitchell B G. UV absorption by mycosporine-like amino acids in *Phaeocystis Antarctica* Karsten induced by photosynthetically available radiation [J]. *Marine Biology*, 2001, 138(1): 217-227.
- [24] Orellana M V, Pelersen T W, Van Ger Engh G. UV-excited blue autofluorescence of *Pseudo-nitzschia multiseriata* (Bacillariophyceae) [J]. *Journal of Phycology*, 2004, 40(4): 705-710.
- [25] Mengelt C, Prézelin B B. UVA enhancement of carbon fixation and resilience to UV inhibition in the genus *Pseudo-nitzschia* may provide a competitive advantage in high UV surface waters [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 301(1): 81-93.
- [26] Ehling-Schulz M, Bilger W, Scherer S. UV-B-induced synthesis of photoprotective pigments and extracellular polysaccharides in the terrestrial cyanobacterium *Nostoc commune* [J]. *Journal of Bacteriology*, 1997, 179(6): 1940-1945.
- [27] Peinado N K, Díaz R T A, Figueroa F L, *et al.* Ammonium and UV radiation stimulate the accumulation of mycosporine-like amino acids in *Porphyra columbina* (Rhodophyta) from Patagonia, argentina [J]. *Journal of Phycology*, 2004, 40(2): 248-259.
- [28] Sinha R P, Klich M, Häder D P. Induction of a mycosporine-like amino acid (MAA) in the rice-field cyanobacterium *Anabaena* sp. by UV irradiation [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology-B: Biology*, 1999, 52(1): 59-64.
- [29] Xu Z G, Gao K S. NH_4^+ enhancement and UV radiation interact to affect the photosynthesis and nitrogen uptake of *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(1): 99-105.
- [30] Rao M V, Paliyath G, Ormrod D P. Different response of photosynthetic pigment, rubisco activity and rubisco protein of *Arabidopsis thaliana* exposed to UV-B and ozone [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 1995, 62(4): 727-735.
- [31] Croce R, Müller M G, Bassi R, *et al.* Carotenoid-to-Chlorophyll energy transfer in recombinant major light-harvesting complex (LHCII) of higher plants. I. femtosecond transient absorption measurements [J]. *Biophysical Journal*, 2001, 80(2): 901-915.
- [32] Litchman E, Neal P J, Banaszak A T. Increased sensitivity to ultraviolet radiation in nitrogen-limited dinoflagellates: Photoprotection and repair [J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, 47(1): 86-94.
- [33] Mizuno S, Ajisaka T, Lahbib S, *et al.* Spatial distributions of floating seaweeds in the East China Sea from late winter to early spring [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2014, 26(2): 1159-1167.
- [34] Pang S J, Liu F, Shan T F, *et al.* Cultivation of the brown alga *Sargassum horneri*: sexual reproduction and seedling production in tank culture under reduced solar irradiance in ambient temperature [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2009, 21(4): 413-422.
- [35] 包楠欧, 史定刚, 关万春, 等. CO_2 及光强对南麂列岛铜藻生长的影响[J]. *浙江农业学报*, 2014, 26(3): 649-655.
- Bao N O, Shi D G, Guan W C, *et al.* Effect of CO_2 concentration and irradiance on the growth of *Sargassum horneri* (Phaeophyceae) in Nanji Archipelago [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2014, 26(3): 649-655 (in Chinese).

Effect of the solar ultraviolet radiation on the growth and fluorescence parameters of *Sargassum horneri*

GUAN Wanchun^{1*}, CHEN Heng¹, WANG Tiegan², CHEN Shaobo², XU Juntian³

(1. Department of Marine Biotechnology, School of Life Science, Wenzhou Medical University, Wenzhou 325035, China;

2. Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325005, China;

3. School of Marine Science and Technology, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China)

Abstract: Because of the enhanced of solar UVR and the destruction of *Sargassum horneri* in Nanji archipelago, it is necessary to study the effect of solar UVR on growth and photophysiology of *S. horneri*, in order to recovery algae forest by artificial seeding. We carried out experiments using long-term exposure with three radiation treatments, photosynthetically active radiation (PAR, 400-700 nm); photosynthetically active radiation + Ultraviolet A (PA, 320-700 nm) and photosynthetically active radiation + Ultraviolet A + Ultraviolet B (PAB, 280-700 nm) respectively. Big quartz tubes with thalli, which were put into 10 °C thermostatic baths with running tap water, were exposed to three different solar radiations for 14 days acclimation. At the end of experiment, the relative growth rate (RGR) of *S. horneri* was promoted by 6.7% in UV-A (PA treatment), while was inhibited by 8.98% in UV-B (PAB treatment) compared with P treatment. The results of photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence characteristics revealed that the UV-A significantly raised the concentrations of chlorophyll a, carotenoid and UV-absorbing compounds (UVACs), but UV-B do decrease the pigments. Moreover, UV-A had a significantly positive effects on the maximum relative electron transport rates ($rETR_{max}$) and the light utilized efficiency (α). After 14 days acclimated under solar radiation, the thalli were removed indoor to re-exposed to the artificial solar lamp (PAR=213.3WUV-A=14.3WUV-B=6.7 W) in order to check the short-term response to elevated UVR. The results shown the repair rate (r) of D1 protein is faster in UV-A than in both PAR and UV-B significantly. But the damage rate (k) has not difference among three radiation treatments.

Key words: *Sargassum horneri*; fluorescence parameters; positive effect; ultraviolet radiation

Corresponding author: GUAN Wanchun. Email: gwc@wmu.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation (41306106); Research Program of Science Technology Department of Zhejiang Province (2012C13005, 2014F10005); Natural Science Foundation of Zhejiang Province (Y16D060019); Zhejiang Key Lab of Exploring and Protecting Coastal Bio-resource (J2013001)