

阳光紫外辐射对室内水培发状念珠藻生理特性的影响

赖永忠¹ 高坤山^{1,2}

(1. 厦门大学近海海洋科学国家重点实验室, 厦门 361005;

2. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要:发状念珠藻 (*Nostoc flagelliforme* Bomet & Flahault) 是一种重要的陆生经济蓝藻, 室内培育出的原植体如何适应阳光辐射的问题尚需探讨。为此, 作者将室内水培发菜置于阳光下培养, 测定了其生长、有效光化学效率 ($\Delta F/F_m'$) 和色素的变化。结果表明, 较高的可见光 (PAR, 395—700 nm) 和紫外辐射 (UVR, 280—395 nm) 均导致水培发菜的 $\Delta F/F_m'$ 下降。第 1 天中午, PAR 和 UVR 分别使 $\Delta F/F_m'$ 下降了 54% 和 13%; 傍晚, $\Delta F/F_m'$ 有部分恢复。UVR 对发菜适应阳光 2 d 后的生长无负面作用。发菜在适应全阳光辐射期间, 紫外吸收物质 (Scytonemin 和 Mycosporine-like amino acids) 含量不断增加, 9 d 后, 分别增加了 124 倍和 9 倍。这些紫外吸收物质的增加对发菜细胞降低光抑制, 适应阳光辐射, 起到了重要作用。本研究的结果可为水培发菜室外培养方法的建立提供一定的理论依据。

关键词:发菜; 紫外辐射; 生长; 有效光化学效率; 紫外吸收物质

中图分类号: Q494 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2009)03-0435-07

发状念珠藻 (*Nostoc flagelliforme* Bomet & Flahault), 俗称发菜, 是一种陆生经济蓝藻, 属蓝藻门 (Cyanophyta)、蓝藻纲 (Cyanophyceae)、段殖体目 (Homogonales)、念珠藻科 (Nostocaceae)、念珠藻属 (*Nostoc*)^[1]。在中国, 发菜主要分布于西部和西北部地区的干旱与半干旱荒漠草原地带^[2], 其固氮作用对该地带的生态平衡起着重要作用。近年来, 有关生理学的研究表明, 干燥发菜吸水后, 其光合活性的恢复对光有依赖性^[3], 恢复程度与速度受光强^[3]、 K^+ 浓度^[4] 等的影响。发菜在水中能利用 HCO_3^- 作为碳源^[5]。对发菜人工栽培的研究表明, 适度的水分^[6]、适当的光强^[6,7]、提高 CO_2 浓度^[6] 和间歇性的干出处理^[7] 等有利于发菜的生长。而 N、P 和 Ca^{2+} 缺乏会显著降低发菜细胞的比生长速率^[8]。另外, 对发菜天然产物的研究发现, 其酸性多糖 (Nostoflan) 有抗病毒活性^[9]。室内条件下培养的发菜细胞, 其胞外多糖的单糖组成与天然藻体的不同^[10]。发菜类囊体膜^[11] 和质膜^[12] 含较多的不饱和脂肪酸 (占膜总脂肪酸的 66% 以上), 特别是十六

碳烯酸和亚麻酸。

Gao 和 Ye 的研究^[7] 表明, 发菜在液体中培养时, 原植体解体的原因与细菌的繁殖有关, 增加干燥失水频率能延迟解体。另外, 从压碎的原植体中分离出的游离念珠细胞, 能在液体培养基中生长发育成原植体, 该原植体不会被细菌解体^[7]。这种水培的发菜原植体, 从资源增殖的角度来看, 可作为种质进行扩增, 用于恢复发菜的资源或用于人工栽培。为此, 有必要研究其移植室外后适应阳光辐射的生理特性。已有研究表明, 阳光紫外辐射 (UVR, 280—400 nm) 可降低浮游植物的光合作用速率^[13], 限制蓝藻的生长^[14] 并影响蓝藻的形态^[16]。本研究的目的是探讨阳光 UVR 对水培发菜生长、有效光化学效率和色素的影响。

1 材料与方法

1.1 水培发菜的获得与扩大培养 根据文献 [7] 中的方法, 用 BG₁₁ 培养基^[16], 在光强为 50—70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, 温度 25 $^{\circ}\text{C}$, 光暗周期 12h/12h 的条件下, 培养水培

收稿日期: 2007-05-08; 修订日期: 2008-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 90411018) 资助

作者简介: 赖永忠 (1982—), 男, 广东省兴宁人; 硕士研究生; 主要从事藻类生理学研究。E-mail: yzhilai@163.com

通讯作者: 高坤山, E-mail: ksgao@stu.edu.cn

发菜原植体。收集藻体长度介于 350—650 μm 的水培发菜作为实验材料。

1.2 阳光辐射处理及培养条件 用石英管(长 16.0cm,直径 3.6cm)作为培养容器,石英管外包裹不同的滤光膜,使水培发菜接受不同的阳光辐射处理:(1)P(PAR, 395—700nm)处理,石英管用 Ultra-phan Film 395 滤光膜(UV Opak, Digefra, Munich, Germany)包裹;(2)PA(PAR + UV-A, 320—700nm)处理,石英管用 Folex 320 滤光膜(Montagefolie, Folex, Dreieich, Germany)包裹;(3)PAB(PAR + UV-A + UV-B, 280—700nm)处理,石英管外不包裹任何滤光膜。这些滤光膜的透光光谱已有报道^[17],每种处理设置三个重复。培养过程中,石英管放在含流动自来水的水槽中,以控制培养温度(24—30 $^{\circ}\text{C}$)。管内通入过滤空气(0.2 μm 过滤头)进行充气(每分钟约 0.5L)培养。实验从 2006-09-30 傍晚 18:00 开始,持续 9d。

1.3 生长的测定 实验期间,每天傍晚 18:00,从每个石英管中取出 5mL 藻液,过滤,用已知干重 m_0 (mg)的普通滤纸收集水培发菜,藻体连同滤纸一起在 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中放置 24h,烘干后转入干燥器中,冷却后的样品用电子天平(AUW120D, Shimadzu, Japan)称得总干重 m_1 (mg),得所取藻液中发菜藻体的净干重 $m (=m_1 - m_0)$,藻体净干重除以藻液体积得藻体的生物量密度 c (mg/mL),以 c 的变化反映藻体的生长情况。

1.4 光合活性的测定 水培发菜的光合活性用有效光化学效率 ($\Delta F/F_m'$) 衡量。从每个石英管取 3mL 光适应状态下的藻液,用叶绿素荧光仪(PAM-WATER-ED, Walz, Germany)测定其最大荧光 F_m' 和稳态荧光 F_t ,所用饱和脉冲强度为 5600 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ (持续 0.8s)。每种处理测定 6 个值,由如下公式^[18]计算得到 $\Delta F/F_m'$:

$$\Delta F/F_m' = (F_m' - F_t) / F_m'$$

PAR 和 UVR 对有效光化学效率的相对抑制率计算公式如下:

$$\text{PAR 的相对抑制率} (\%) = 100 \times (P_0 - P_p) / P_0,$$

$$\text{UVR 的相对抑制率} (\%) = 100 \times (P_p - P_{\text{PAB}}) / P_0,$$

P_0 代表藻体在阳光辐射处理前的 $\Delta F/F_m'$; P_p 和 P_{PAB} 分别代表藻体在 P 和 PAB 处理下的 $\Delta F/F_m'$ 。

1.5 色素含量的测定 用 100%甲醇提取水培发

菜所含叶绿素 a (Chl a) 和水溶性紫外吸收物质 (Mycosporine-like amino acids, MAAs, 吸收峰介于 310—360nm), 用 100%丙酮提取其 Chl a 、类胡萝卜素 (Carotenoids, 吸收峰在 490nm) 和脂溶性紫外吸收物质 (伪枝藻素 Scytonem in, 吸收峰在 384nm)。取样测定室内水培发菜生长的同时, 从每个石英管取两份藻液 (各 3mL), 过滤用普通滤纸收集藻体。藻体在弱光下研磨后, 在 4 $^{\circ}\text{C}$ 下, 用 10mL 100%甲醇或 10mL 100%丙酮提取 24h。提取液离心 (4830r/min) 20min 后, 用可见紫外分光光度计 (UV-2501PC, Shimadzu, Japan) 扫描上清液吸收光谱。根据 Porra^[19] 给出的公式推算甲醇提取液中 Chl a 的浓度, MAAs 含量以其吸光值与 Chl a 含量的比值 (MAA/Chl a) 推测。根据文献 [20] 中所用的方法计算丙酮提取液中 Chl a 、类胡萝卜素和 scytonem in 的含量。

1.6 阳光辐射的监测 采用光谱辐射仪 (Eldonet, Real Time Computer Inc., Germany) 实时监测阳光辐射强度, 仪器安装在汕头大学海洋生物研究所楼顶 (116.6 $^{\circ}\text{E}$, 23.3 $^{\circ}\text{N}$)。该光谱辐射仪可同时监测阳光 PAR (400—700nm)、UV-A (315—400nm) 和 UV-B (280—315nm) 三种波段的辐射强度, 每秒钟测定一次, 每分钟记录一次平均值^[21]。

1.7 数据分析 实验数据以平均值 $\pm$ 标准偏差表示, 差异显著性采用 One-way ANOVA 分析, 显著水平设为 $p < 0.05$ 。

2 结果

2.1 阳光 UVR 对光合活性的影响

室内水培发菜在阳光辐射下培养的第 1 天, 其有效光化学效率 ($\Delta F/F_m'$) 上午随阳光辐射强度的增加而下降, 下午随阳光辐射强度下降而逐渐回升 (图 1)。 $\Delta F/F_m'$ 在中午 (14:00) 最低, P、PA 和 PAB 处理下的值分别降到初始值 (0.42) 的 46%、36% 和 33%; 到傍晚 18:00, 恢复到初始值的 86% (P)、85% (PA) 和 74% (PAB), P 和 PA 处理下的值显著高于 PAB 处理 ($p < 0.05$) (图 1b)。在 9d 的培养期间, 天气比较晴朗 (除第 4 和第 9 天外) (图 2a), 每天中午 12:00 时测得的 $\Delta F/F_m'$ 在各种处理下均维持在 0.14—0.29 之间 (图 2b), 由 PAR 引起的 $\Delta F/F_m'$ 下降幅度介于 31%—53%, 而 UVR 导致

的为 5%—18%。P 处理下的 $\Delta F/F_m'$ 显著大于 PA 和 PAB 处理 ($p < 0.05$), PA 处理显著大于 PAB 处理 ($p < 0.05$) (图 2b)。第 9 天是阴天,中午阳光辐射较弱,使得藻体 $\Delta F/F_m'$ 比其他天高 (图 2b)。

2.2 阳光 UVR 对生长的影响

将室内水培发菜转移到阳光辐射下培养 1d 后,其生物量密度明显下降,降至初始值 (0.23mg/mL) 的 65%—79% (图 2c)。第 2 天起则持续增加,培养 9d 后,增大至初始值的 3.3 (P)、2.8 (PA) 和 2.9 (PAB) 倍,三种辐射处理间无显著差异 ($p > 0.05$) (图 2c)。

2.3 阳光 UVR 对色素的影响

水培发菜在室内培养时,一般呈现绿色或深绿色,转移到阳光辐射下培养则变成棕褐色,色度随培养时间的延长而加深。在实验后期,三种阳光辐射处理 (P、PA 和 PAB) 下,Chl *a* 的含量有所下降 (图 2d)。9d 后,Chl *a* 含量降至初始值 (3.2μg/mg d. w.) 的 81% (P)、88% (PA) 和 72% (PAB),但三种处理间无显著差异 ($p > 0.05$) (图 2d)。

图 3a 和图 3b 分别表示三种阳光辐射 (P、PA 和 PAB) 处理 3d 和 9d 后,室内水培发菜丙酮提取液的吸收光谱;图 3c 和图 3d 表示相应情况下,甲醇提取液的吸收光谱;其中 t_0 表示未经阳光辐射处理的水培发菜,丙酮或甲醇提取液的吸收光谱。从图 3 可知,随着水培发菜在阳光辐射下培养时间的延长,紫外波段的吸光值与 Chl *a* 含量的比例 (OD/Chl *a*) 不断增大。各种处理下,在丙酮提取液的吸收光谱中,可见代表类胡萝卜素 (490nm) 和伪枝藻素 (scytonem in, 384nm) 的吸收峰峰高随培养时间的增加而增大 (图 3a 和 b);在甲醇提取液的吸收光谱中,对应的是代表紫外吸收物质 MAA s (339nm) 的吸收峰峰高不断增大 (图 3c 和 d)。

从图 4 可看出, P、PA 和 PAB 处理下,类胡萝卜素、scytonem in 和 MAA 与 Chl *a* 含量的比例,在前 3 天不断增大,之后保持相对恒定。各种处理下培养 9d 后,Car/Chl *a* 的值,在初始值的基础上均增加了 4 倍;Scy/Chl *a* 的值增加了 74 (P)、134 (PA) 和 124 (PAB) 倍;MAA/Chl *a* 的值增加了 7 (P)、9 (PA) 和 9 (PAB) 倍。单位干重的 OD₄₉₀、OD₃₈₄ 和 MAA 值在前 5 天也是不断增大的 (结果未显示)。Car/Chl *a* 值,在实验第 1、第 2 和第 5 天, P 处理下的值显著低于 PA

处理 ($p < 0.05$),第 1 和第 5 天, P 处理下的值显著低于 PAB 处理 ($p < 0.05$),而 PA 与 PAB 处理间差异不显著 ($p > 0.05$);到实验后期 3 种辐射处理间都无显著差异 ($p > 0.05$) (图 4a)。Scy/Chl *a* 值,除实验第 2 和第 3 天, P 处理下的值显著低于 PAB 处理 ($p < 0.05$);在实验后期, P 处理下的值显著低于 PA 处理 ($p < 0.05$);仅在第 7 天, PAB 处理下的值显著大于 PA 处理 ($p < 0.05$) (图 4b)。MAA/Chl *a* 值,在实验的第 2 到第 5 天, P 处理下的值都显著低于 PA 和 PAB 处理 ($p < 0.05$);仅在第 5 天, PAB 处理下的值显著高于 PA 处理 ($p < 0.05$) (图 4c)。

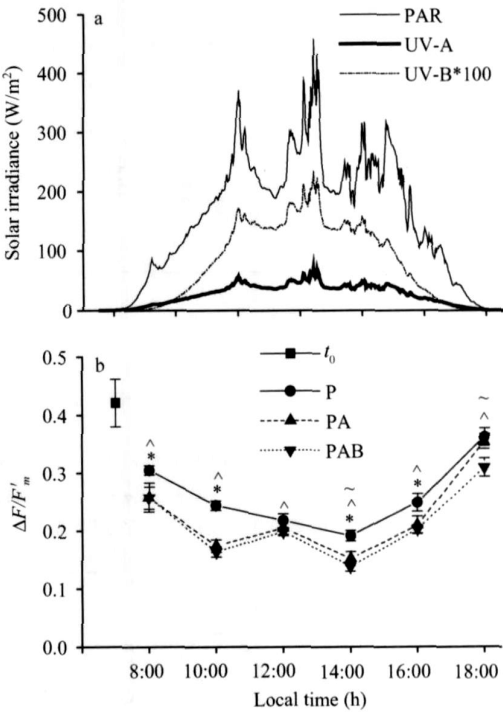


图 1 室内水培发菜在阳光辐射下培养第 1 天时,阳光 PAR、UV-A 和 UV-B 辐射强度 (a) 和藻体有效光化学效率 ($\Delta F/F_m'$) (b) 的变化

Fig. 1 Changes of solar PAR, UV-A, UV-B irradiances (a) and the effective quantum efficiency $\Delta F/F_m'$ of the aquatic-living colonies of *Nostoc flagelliforme* at the day under different solar radiation treatments
 t_0 代表阳光辐射处理前的初始值; $\Delta F/F_m'$ 表示为平均值 $\pm$ 标准偏差 ($n = 6$); “*”、“^”和“~”分别代表 P (PAR) 与 PA (PAR + UV-A)、P 与 PAB (PAR + UV-A + UV-B) 和 PA 与 PAB 处理间有显著差异 ($p < 0.05$);下同
‘ t_0 ’ represents that the initial value before the solar exposure; Bars represent standard deviation ($n = 6$); The symbols (‘*’, ‘^’, and ‘~’) over the bars indicate significant differences among the treatments; The same as follows

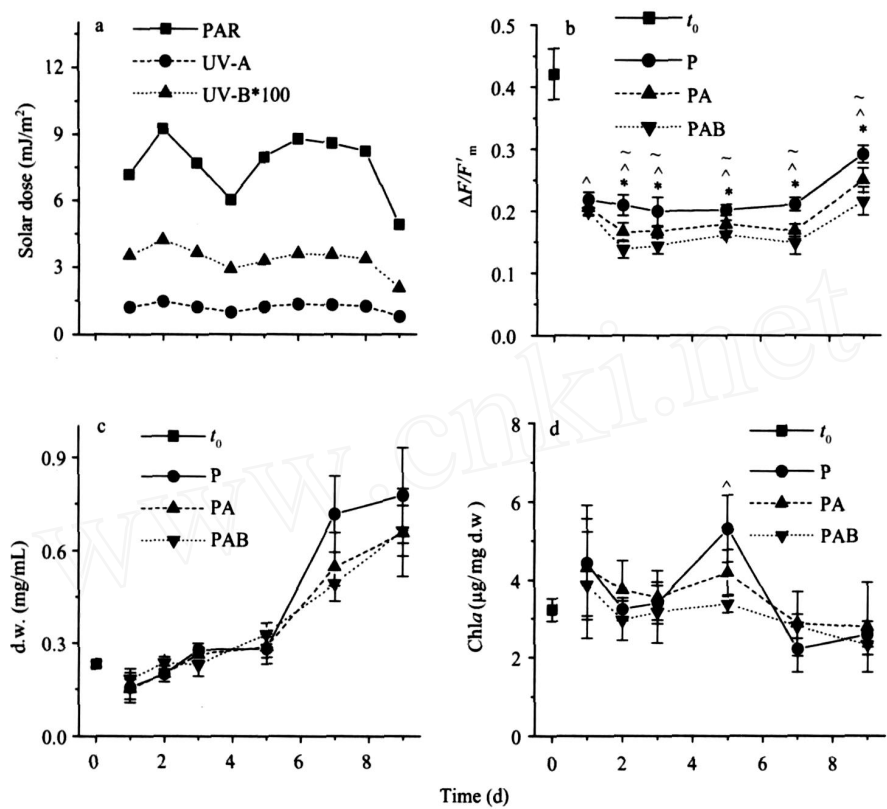


图2 实验期间 PAR、UV-A 和 UV-B 日辐射量(a),水培发菜有效光化学效率($\Delta F/F'_m$) (中午 12:00)(b),生物量密度(c)和叶绿素 a (Chl a)含量(d)的变化

Fig. 2 Daily solar PAR, UV-A and UV-B doses over the experimental period (a), effective quantum efficiency ($\Delta F/F'_m$) (b), biomass (c), and Chl a (d) of the aquatic-living colonies of *Nostoc flagelliforme*
数据为 3 或 6 个样品的平均值 $\pm$ 标准偏差 Bars represent standard deviation ($n = 3$ or 6)

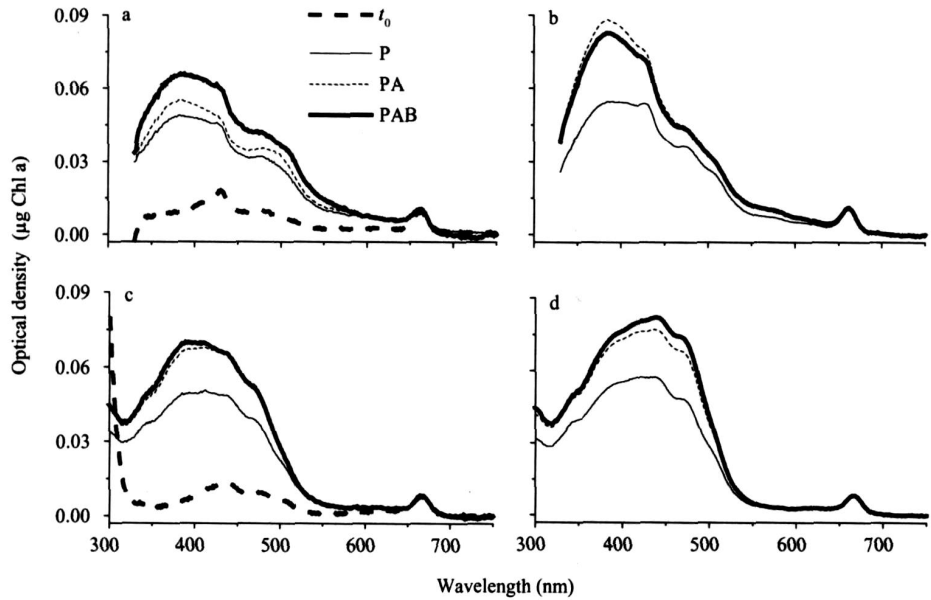


图3 P、PA 和 PAB 三种阳光辐射处理 3d(a,c)和 9d(b,d)后,室内水培发菜丙酮(a,b)或甲醇(c,d)提取液的吸收光谱
Fig. 3 Absorbing spectra of acetone (a,b) or methanol (c,d) extracted solutions for the aquatic-living colonies of *Nostoc flagelliforme*, that were exposed to different solar radiation treatments (P, PA and PAB) for day 3 (a,c) or day 9 (b,d)
各值是 3 个样品的平均值,标准偏差小于 0.01 Each value is the mean of three samples (SD < 0.01)

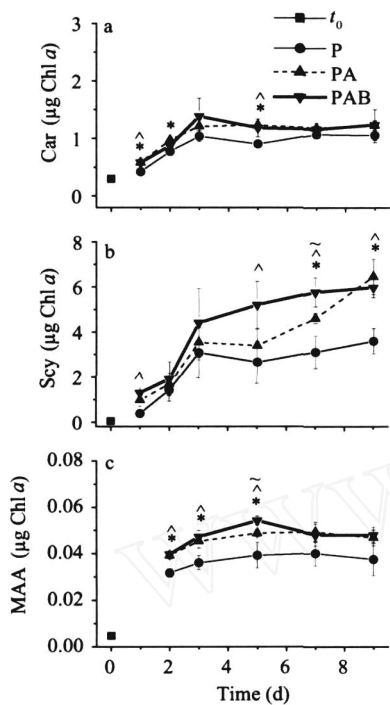


图 4 P (395—700nm)、PA (320—700nm) 和 PAB (280—700nm) 3 种阳光辐射处理下,水培发菜所含类胡萝卜素和紫外吸收物质与 Chl a 含量比例的变化

Fig. 4 The ratios of carotenoids (a), scytonem in (b) and mycosporine-like amino acids (MAAs) (c) to Chl a in the aquatic-living *Nostoc flagelliforme* colonies exposed to P (395—700nm), PA (320—700nm) and PAB (280—700nm)
(a)类胡萝卜素 (Car)与 Chl a 含量比例的变化; (b) Scytonem in (Scy)与 Chl a 含量比例的变化; (c) Mycosporine-like amino acids (MAAs) 的吸光值 (MAA)与 Chl a 含量比例的变化; 3 个比值均表示为平均值 ± 标准偏差 (n = 3)
Bars represent standard deviation (n = 3)

3 讨 论

室内水培发菜的原植体,在应用于室外栽培或资源增殖时,能适应阳光辐射。在此适应过程中,水培发菜的有效光化学效率受高强度阳光 PAR 和 UVR 的抑制作用,但细胞会通过增加其紫外吸收物质 (scytonem in 和 MAAs) 的含量,以抵御阳光 UVR 所造成的负面作用。另外,从水培发菜有效光化学效率 1d 内的变化趋势来看,其中午时段内下调的有效光化学效率,到傍晚时大部分得以恢复。同时,实验第 9 天中午 12:00 时的光强较弱,藻体有效光化学效率相对于其他天有较大幅度的升高,说明光胁迫的削弱。高光条件下,藻体光合活性的下调是光保护机制散发过量激发能量的结果^[22]。

有研究表明,UVR 抑制蓝藻的生长^[14]。我们的结果显示,水培发菜适应阳光辐射 2d 后,UVR 对其生长无负面影响 (图 2c),这种变化与紫外吸收物质含量的变化相对应。紫外吸收物质的增加可以起到抵御 UVR 的作用^[23]。另外,发菜的原植体鞘及其胞外多糖也会起到一定的保护作用。对野生发菜吸水后及失水过程中的光合固碳量的研究显示,发菜耐受阳光 UVR 的能力很强,仅仅在含水量低于 5% 时,阳光 UV-B 才显著影响其光合速率^[24]。UV-B 处理下的普通念珠藻 *Nostoc commune*,其生长减慢,部分代谢能量用于合成胞外多聚糖以消减 UVR,减少了细胞所受的光抑制^[20]。UVR 对水培发菜 Chl a 的含量没有显著影响 ($p > 0.05$) (图 2d),类似的结果在 *N. commune* 中也有报道^[20]。

有报道显示,蓝藻中的类胡萝卜素可缓解 UV-A 引起的损伤^[25],高光强可诱导类胡萝卜素含量增大^[26],UV-A 和 UV-B 也使得类胡萝卜素与 Chl a 含量的比值升高^[15]。分布于蓝藻的胞外多糖上的伪枝藻素 Scytonem in,对 UV-A 有很好的屏障效果^[27],对 UV-B 也有一定的吸收^[20,23],主要由长波段的 UV-A (350—400nm) 诱导合成^[20],高于一定强度的可见光也能加快此色素的合成^[28]。另一类主要的紫外吸收物质是 MAAs,对 UVR 有吸收作用^[24],能被 UV-B^[20]、UV-A 和蓝光^[29]诱导合成。到目前为止,Scytonem in 和 MAAs 在生物体内的代谢合成途径还不清楚。我们的研究结果显示,实验后期,UVR 能显著诱导水培发菜 Scytonem in 的合成 (图 4b);前期则显著诱导其 MAAs 的合成 (图 4c)。我们的研究结果也显示,Car/Chl a、Scy/Chl a 和 MAA/Chl a 的比值在发菜适应阳光辐射的前期不断增大 (图 4)。虽然 Chl a 含量在发菜适应阳光辐射的后期下降了 (图 2d),但单位干重的类胡萝卜素和紫外吸收物质的量还是增加了 (数据未显示)。对 *N. commune* 的研究表明,在 UVR 的作用下,其 Car/Chl a、Scy/Chl a 和 OSMAA/Chl a 比值也大大增加^[21]。

总之,高强度 PAR 和 UVR 对室内水培发菜的光合活性均有抑制作用,但它们对适应 1—2d 后的藻体生长无负面影响。发菜在适应阳光辐射的过程中,增加的类胡萝卜素、Scytonem in 和 MAAs 起到了重要的保护作用。有关水培发菜其他抵御阳光 UVR 的机制,以及与其他环境胁迫因子的关系有待进一步研究。

参考文献:

[1] Hu H J, Li R Y, Wei Y X, et al Freshwater Algae in China

- [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Publishing House, 1980, 49—56 [胡鸿钧, 李尧英, 魏印心, 等. 中国淡水藻类. 上海: 上海科学技术出版社, 1980, 49—56]
- [2] Diao Z M. Study of natural conditions and ecological physiology characteristics for growth of *Nostoc flagelliforme* in Qinghai Province [J]. *Chinese J Ecol*, 1996, **15**(1): 8—13 [刁治民. 青海发菜生长的自然条件及其生态生理学特性研究. 生态学杂志, 1996, **15**(1): 8—13]
- [3] Gao K, Qiu B, Xia J, *et al*. Light dependency of the photosynthetic recovery of *Nostoc flagelliforme* [J]. *J Appl Phycol*, 1998, **10**: 51—53
- [4] Qiu B, Gao K. Dried field populations of *Nostoc flagelliforme* (Cyanophyceae) require exogenous nutrients for their photosynthetic recovery [J]. *J Appl Phycol*, 1999, **11**: 535—541
- [5] Gao K, Zou D. Photosynthetic bicarbonate utilization by a terrestrial cyanobacterium, *Nostoc flagelliforme* (Cyanophyceae) [J]. *J Phycol*, 2001, **37**: 768—771
- [6] Gao K, Yu A. Influence of CO₂, light and watering on growth of *Nostoc flagelliforme* mats [J]. *J Appl Phycol*, 2000, **12**: 185—189
- [7] Gao K, Ye C. Culture of the terrestrial cyanobacterium, *Nostoc flagelliforme* (Cyanophyceae), under aquatic conditions [J]. *J Phycol*, 2003, **39**(3): 617—623
- [8] Bi Y H, Hu Z Y. Influence of temperature, nutrients and light intensity on the growth of *Nostoc flagelliforme* [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2004, **4**(3): 245—249 [毕永红, 胡征宇. 温度、营养和光强对发菜状珠藻生长的影响. 过程工程学报, 2004, **4**(3): 245—249]
- [9] Kanekiyo K, Lee J B, Hayashi K, *et al*. Isolation of an antiviral polysaccharide, nostoflan, from a terrestrial cyanobacterium, *Nostoc flagelliforme* [J]. *J Nat Prod*, 2005, **68**: 1037—1041
- [10] Huang Z, Liu Y, Paulsen B S, *et al*. Studies on polysaccharides from three edible species of *Nostoc* (cyanobacteria) with different colony morphologies: comparison of monosaccharide compositions and viscosities of polysaccharides from field colonies and suspension cultures [J]. *J Phycol*, 1998, **34**: 962—968
- [11] Wang M, Xu Y N, Jiang G Z, *et al*. Membrane lipids and their fatty acid composition in *Nostoc flagelliforme* cells [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2004, **2**(12): 1263—1266 [王梅, 许亦农, 姜桂珍, 等. 发菜膜脂及其脂肪酸组成. 植物学报, 2004, **2**(12): 1263—1266]
- [12] Huang H, Zhong Z P, Wang K B, *et al*. Isolation and characterization of the cytoplasmic membrane from the terrestrial cyanobacterium *Nostoc flagelliforme* [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2004, **46**(10): 1186—1191
- [13] Böhmann B, Bossard P, Uehlinger U. The influence of longwave ultraviolet radiation (UVA) on the photosynthetic activity (¹⁴C-assimilation) of phytoplankton [J]. *J Plankton Res*, 1987, **9**(5): 935—943
- [14] Quesada A, Vincent W F. Strategies of adaptation by antarctic cyanobacteria to ultraviolet radiation [J]. *Eur J Phycol*, 1997, **32**: 335—342
- [15] Wu H, Gao K, Villafañe V E, *et al*. Effects of solar UV radiation on morphology and photosynthesis of filamentous cyanobacterium *Arthrospira platensis* [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2005, **71**(9): 5004—5013
- [16] Stanier R Y, Kunisawa R, Mandel M, *et al*. Purification and properties of unicellular blue-green algae (order *Chroococcales*) [J]. *Bacteriol Rev*, 1971, **35**(2): 171—205
- [17] Figueroa F L, Salles S, Aguilera J, *et al*. Effects of solar radiation on photoinhibition and pigmentation in the red alga *Porphyra leucosticta* [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1997, **151**: 81—90
- [18] van Kooten O, Snel J F H. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology [J]. *Photosynth Res*, 1990, **24**(3): 147—150
- [19] Porra R J. The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls *a* and *b* [J]. *Photosynth Res*, 2002, **73**: 149—156
- [20] Ehling-Schulz M, Bilger W, Scherer S. UV-B-induced synthesis of photoprotective pigments and extracellular polysaccharides in the terrestrial cyanobacterium *Nostoc commune* [J]. *J Bacteriol*, 1997, **179**(6): 1940—1945
- [21] Häder D P, Lebert M, Marangoni R, *et al*. ELDONET- European Light Dosimeter Network hardware and software [J]. *J Photochem Photobiol B: Biol*, 1999, **52**(1): 51—58
- [22] Osmond C B, Chow W S. Ecology of photosynthesis in the sun and shade: summary and prognostications [J]. *Aust J Plant Physiol*, 1988, **15**: 1—9
- [23] Garcia-Pichel F, Wingard C E, Castenholz R W. Evidence regarding the UV sunscreen role of a mycosporine-like compound in the cyanobacterium *Gloeocapsa* sp. [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1993, **59**(1): 170—176
- [24] Gao K, Ye C. Photosynthetic insensitivity of the terrestrial cyanobacterium *Nostoc flagelliforme* to solar UV radiation while rehydrated or desiccated [J]. *J Phycol*, 2007, **43**(4): 628—635
- [25] Buckley C E, Houghton J A. A study of the effects of near UV radiation on the pigmentation of the blue-green alga *Gloeocapsa alpicola* [J]. *Arch Microbiol*, 1976, **107**: 93—97
- [26] Steiger S, Schäfer L, Sandmann G. High-light-dependent upregulation of carotenoids and their antioxidative properties in the cyanobacterium *Synechocystis* PCC 6803 [J]. *J Photochem. Photobiol B: Biol*, 1999, **52**(1): 14—18
- [27] Garcia-Pichel F, Sherry N D, Castenholz R W. Evidence for an ultraviolet sunscreen role of the extracellular pigment scytonem in the terrestrial cyanobacterium *Chlorogloeopsis* sp. [J]. *Photochem Photobiol*, 1992, **56**(1): 17—23
- [28] Garcia-Pichel F, Castenholz R W. Characterization and biological implications of scytonem in a cyanobacterial sheath pigment [J]. *J Phycol*, 1991, **27**: 395—409
- [29] Franklin L A, Kräbs G, Kuhlentkamp R. Blue light and UV-A radiation control the synthesis of mycosporine-like amino acids in *Chondrus crispus* (Florideophyceae) [J]. *J Phycol*, 2001, **37**(2): 257—270

EFFECTS OF SOLAR ULTRAVIOLET RADIATION ON PHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE AQUATIC-LIVING COLONIES OF *NOSTOC FLAGELLIFORME* CULTURED INDOOR

LA I Yong-Zhong¹ and GAO Kun-Shan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005;

2. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072)

Abstract: *Nostoc flagelliforme* Bormet & Flahault, named popularly as 'Facai' in Chinese, is a terrestrial cyanobacterium of great economic value. Although aquatic-living colonies were developed under indoor conditions, little is known whether they could and how they would adapt to solar radiation. Therefore, we exposed the colonies to different solar radiation treatments, photosynthetically active radiation (P: PAR, 395—700 nm), PAR + ultraviolet radiation-A (PA, 320—700 nm) or PAR + total ultraviolet radiation (PAB, 280—700 nm). Changes of their growth, effective quantum efficiency ($\Delta F/F_m'$) and pigments were estimated during the experimental period.

It was found that high levels of both PAR and ultraviolet radiation (UVR, 280—395 nm) reduced the $\Delta F/F_m'$ of the colonies. $\Delta F/F_m'$ was reduced about 54% by PAR and further declined 13% by UVR. The $\Delta F/F_m'$ recovered in the late afternoon. After two days' acclimation to solar radiation, the biomass of the colonies increased during the following days. UV-absorbing compounds, scytonemin and mycosporine-like amino acids (MAAs), increased by 124 and 9 times, respectively, in 9 days. Such increased UV-absorbing substances played an important role in protecting the aquatic-living colonies of *Nostoc flagelliforme* from solar UVR. The results may be useful for the mass production of the aquatic-living colonies of *Nostoc flagelliforme* under outdoor conditions.

Key words: *Nostoc flagelliforme*; Ultraviolet radiation; Growth; Effective quantum efficiency; UV-absorbing compounds