

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2011.01108

螺旋藻对短期增强 UV-B 辐射的生理生化响应

薛林贵, 石小霞, 褚可成, 陈志梅, 李师翁

兰州交通大学 化学与生物工程学院, 甘肃 兰州 730070

摘要: 通过生物化学和对比分析的方法, 研究了短期增强 UV-B 辐射对钝顶螺旋藻(*Spirulina platensis*)794 光合色素、丙二醛(MDA)、类菌孢素氨基酸(MAAs)以及脯氨酸含量的影响。研究结果显示, 与未经过 UV-B 辐射处理的藻细胞相比, 增强的 UV-B($240 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)辐射可导致藻细胞叶绿素 a 和类胡萝卜素以及藻胆蛋白含量下降, 以及 MDA 含量显著变化($P < 0.05$), 表明螺旋藻对 UV-B 辐射敏感, UV-B 辐射对藻细胞光合色素具有抑制和破坏作用, 对螺旋藻的膜系统也产生重要影响。而 UV-B 辐射可导致 MAAs 含量增加, 脯氨酸含量随辐射时间的延长而提高, 说明增强 UV-B 辐照能诱导藻细胞屏蔽色素合成以及抗逆物质脯氨酸的累积, 这可能是螺旋藻对 UV-B 胁迫所做出的适应性反应。

关键词: 螺旋藻; UV-B; 光合色素; MDA; 脯氨酸; MAAs

中图分类号: X171

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2011)05-1108-07

平流层臭氧衰减导致辐射到地球表面的 UV-B (280~320 nm)增强, 其所引起的植物生物学效应是近年来国内外全球变化研究的热点问题之一。虽然有报道认为破坏臭氧层物质的释放量已得到一定控制, 但臭氧层的恢复仍需要相当长的时间。研究表明, UV-B 对植物的生物量、生长发育、生理生化等具有多方面的影响。国内外已研究的 400 多种植物中, 有 2/3 以上都不同程度地受到了紫外线辐射增强的伤害^[1], 但研究对象大多是以陆地高等植物为主^[2], 对低等植物尤其是原核微生物的研究较少^[3]。

蓝藻也称为蓝细菌, 是地球上最早的光合放氧的单细胞原核生物, 作为水生态系统中主要的生物量生产者, 蓝藻在水生态中占有重要的地位。据报道 10% 的 UV-B 可以穿透清澈的湖水到达 20 m 深处^[4], 说明 UV-B 增强对水生生物及水生生态系统都有重要影响。许多研究表明, UV-B 辐射增强会使蓝藻生物量减少、蛋白质损伤, 抑制一系列生理生化过程^[5-6]。另一方面, 蓝藻作为

地球上古老的物种, 在长期的进化过程中已形成一定的 UV-B 适应机制, 对增强 UV-B 有一定的适应力, 其适应机理包括垂直迁移、UV 屏蔽色素的形成、细胞抗氧化酶活性的提高、抗逆物质的积累以及损伤修复等。光合色素既是蓝藻光合作用重要的吸收光能和转化能量的色素, 又是重要的屏蔽色素, 其含量既直接影响蓝藻的光合效率, 同时也影响细胞内关键大分子的保护。丙二醛(malondialdehyde, MDA)是植物在逆境条件下膜脂过氧化作用的产物之一, 作为膜脂过氧化的指标, 反映细胞膜被伤害的程度或植物对逆境条件反应的强弱。脯氨酸(proline, Pro)是植物细胞在逆境条件下积累的一种抗逆物质, 是反映植物抗逆性的重要指标。类菌孢素氨基酸(mycosporine-like amino acids, MAAs)是一种水溶性物质, 在很多蓝藻中都大量存在, 对 UV-B 有较高的吸收能力, 是一种重要的保护色素^[7]。蓝藻对 UV-B 具有较强的耐受性和适应性, 主要原因之一就是在 UV-B 辐射诱导下, 吸收 UV-B 的物质在藻体细胞

收稿日期: 2011-01-03; 修订日期: 2011-04-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(30870384; 30960063); 甘肃省科技支撑计划项目(090NKCA079).

作者简介: 薛林贵(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事蓝藻逆境生理、信号传导等方面的工作。E-mail: xuelg@mail.lzjtu.cn

中大量被合成^[8],使UV-B在进入细胞之前就被减弱或滤除。

UV-B辐射对植物生理生化效应的研究,大多采用设定一定的UV-B辐照剂量^[9]或模拟臭氧层衰减5%后的辐射增加量处理^[10]。青藏高原气候环境变化导致臭氧层变薄,使得到达地面的UV-B辐射增强,强UV-B辐射是青藏高原的主要环境胁迫因子,本研究以实地测定的8-10月份青海湖UV-B辐射强度为依据,设定UV-B辐射处理强度为240 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$,以钝顶螺旋藻(*Spirulina platensis*)794为材料,通过测定其光合色素、MDA、MAAs和脯氨酸含量的变化,探讨了短期增强UV-B辐射对藻细胞的影响,以及螺旋藻对增强UV-B辐射的适应机制。

1 材料和方法

1.1 实验材料

钝顶螺旋藻794(*Spirulina platensis*)从中国科学院水生生物研究所菌种库购买。采用AB培养基,在藻种培养平台进行培养,10%接种量,培养温度为 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$,光照强度4 000 lx,光周期为12D 12L。测定培养藻液的 OD_{540} 为 1.934 ± 0.01 时,即可进行UV-B处理。

1.2 UV-B辐射处理

将50 mL培养藻液置于培养皿(直径15 cm,深度1.5 cm)中,在培养皿上方用紫外灯垂直照射处理,使用4根30 W的UV-B(312 nm)灯管(南京华强电子有限公司制造),灯管用0.13 mm醋酸纤维素膜过滤光线以除去280 nm以下的UV-C的影响。通过调整培养皿离紫外灯高度来确定UV-B强度。UV-B辐射强度为240 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 即2.4 $\text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,UV-B强度用UV-B型紫外辐射强度仪(北京师范大学生产)测定,处理时间分别为0(对照组)、0.5、1.5、2.5、3.5 h,其辐射总剂量分别达到0、4 320、12 960、21 600、30 240 J/m^2 。培养皿用0.8 μm 的微孔滤膜分成上下两层,含有藻体的培养液在微孔滤膜的上层,不含藻体的培养液过滤在微孔滤膜的下层。每个处理3个重复,处理后的材料立即进行相关生理生化指标的测定。

1.3 测定方法

1.3.1 叶绿素和类胡萝卜素含量测定 测定参照lichtenthaler^[11]的方法,将螺旋藻细胞过滤收集于研钵中,加入预冷的95%乙醇10 mL研磨,3 500 r/min离心15 min,以95%乙醇为对照,分别测定665、470 nm的光密度值(OD)。

1.3.2 藻胆素含量的测定 参照刘华等^[12]的方法,略有改动。藻体液氮研磨,加入4 mL磷酸缓冲液(0.2 mol/L, pH 7.0),10 000 r/min离心10 min,取上清液测定652、620、562 nm的OD值。藻胆蛋白含量按以下公式计算:

藻蓝蛋白(PC, mg/mL) = $0.187 \times \text{OD}_{620} - 0.089 \times \text{OD}_{652}$

异藻蓝蛋白(APc, mg/mL) = $0.196 \times \text{OD}_{652} - 0.041 \times \text{OD}_{620}$

藻红蛋白(PE, mg/mL) = $0.104 \times \text{OD}_{562} - 0.253 \times \text{PC} - 0.088 \text{APc}$

1.3.3 MAAs含量的测定 参照杨顶田等^[13]的方法,50 mL藻液过滤,加入5 mL 100%甲醇避光室温浸提2 h,3 000 r/min离心10 min,取上清液测定波长340 nm下的OD值。

1.3.4 MDA含量的测定 参考王爱国等^[14]的方法,称取0.2 g藻体,液氮研磨,加入3 mL的磷酸缓冲液(50 mmol, pH值为7.8,含1%聚乙二醇烷酮)及少量石英砂,于冰浴中研磨提取,匀浆液以10 000 r/min 4 $^\circ\text{C}$ 离心20 min,其上清液即为MDA提取液。取1 mL MDA提取液,加3 mL 27%三氯乙酸和1 mL 2%TBA。混和液在沸水浴中保温30 min后,立即置于冰浴中冷却,然后离心10 min,于波长532 nm和450 nm下测定OD值。

1.3.5 脯氨酸含量测定 脯氨酸含量的测定参考李合生等^[15]的磺基水杨酸法,取0.4 g鲜重材料,加入4 mL 3%磺基水杨酸,在沸水浴中提取10 min(提取过程中经常摇动),冷却后10 000 r/min离心10 min,上清为脯氨酸的提取液。取2 mL提取液,加入2 mL冰醋酸和2 mL酸性茚三酮,于水浴中加热30 min,冷却后加入4 mL甲苯,震荡30 s,静置片刻,上层为脯氨酸红色甲苯溶液。取上层脯氨酸红色甲苯溶液于520 nm下比色,以甲

苯为空白对照,由标准曲线测定提取液中脯氨酸的浓度,计算出单位鲜重样品的脯氨酸含量。

1.4 数据处理

应用 SPSS11.5 进行统计分析。结果以 $\bar{x} \pm SD$ 表示,当 $P < 0.05$ 时认为差异显著。

2 结果与分析

2.1 增强 UV-B 对螺旋藻叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

从图 1 和图 2 中可以看出,UV-B 辐射对螺旋藻叶绿素 a 和类胡萝卜素均有显著的影响。结果显示,UV-B 处理初期螺旋藻叶绿素 a 和类胡萝卜素含量出现极显著($P < 0.01$)的下降。随着辐射时间的延长,螺旋藻叶绿素 a 和类胡萝卜素含量出现微弱的上升趋势。与对照组相比,UV-B 辐射极显著抑制了螺旋藻叶绿素 a 和类胡萝卜素含量,处理组叶绿素 a 和类胡萝卜素含量始终低于对照组($P < 0.01$)。显微镜观察发现,UV-B 照射下螺旋藻藻丝拉伸变长、排列松散。

2.2 增强 UV-B 对螺旋藻藻胆蛋白含量的影响

藻胆蛋白是螺旋藻主要的捕光色素复合物,主要包括藻蓝蛋白(PC)和异藻蓝蛋白(APc),在 UV-B 波段有很强的吸收。图 3 为不同时间 UV-B 辐射处理对螺旋藻藻胆蛋白含量的影响。结果表

明,在增强 UV-B 辐射下随着辐射时间的延长,螺旋藻细胞内藻胆蛋白含量逐渐降低。与对照组相比较,UV-B 处理 0.5 h 后 PC 和 APc 含量分别下降 18.37%和 19.81%,处理 3.5 h 后分别仅为对照组的 65.28%和 66.27%。

2.3 增强 UV-B 对螺旋藻 MAAs 含量的影响

MAAs 是一类水溶性物质,对紫外线有强烈的吸收作用,是一种 UV-B 屏蔽色素。在很多蓝藻中都大量存在。本研究发现,在增强 UV-B 辐射初期 MAAs 含量极显著下降($P < 0.01$),处理 0.5 h 后 MAAs 含量为对照组的 85.53%(图 4)。而随着处理时间的延长,MAAs 含量又逐渐上升,处理 3.5 h 后含量为对照组的 93.17%,但仍显著低于对照组($P < 0.01$)。这说明 UV-B 对 MAAs 具有很强的破坏作用,同时也有较强的诱导合成作用。

2.4 增强 UV-B 对螺旋藻 MDA 含量的影响

UV-B 辐射对螺旋藻膜脂过氧化物—MDA 含量有极明显的影响。结果显示,在增强 UV-B 辐射下分别处理 0.5 h 和 1.5 h,螺旋藻 MDA 含量都极显著增加($P < 0.01$,图 5),表明增强 UV-B 辐射引起了螺旋藻膜脂过氧化作用的加剧;且随着处理时间的延长,细胞内 MDA 含量呈增长趋势。而处理 2.5 h 后,MDA 含量急剧下降,为对照组的 62.97%,处理 3.5 h 后螺旋藻细胞内 MDA 含量接

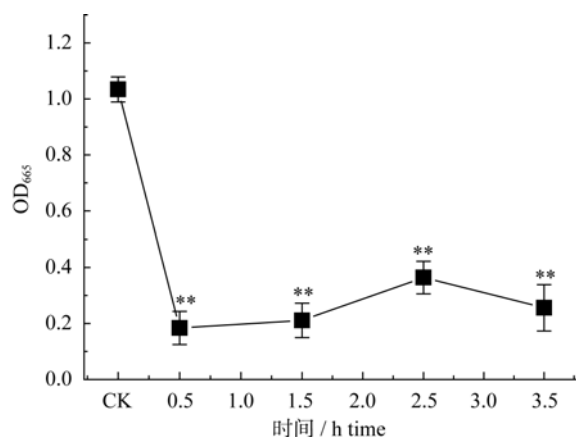


图 1 UV-B 辐射对螺旋藻叶绿素 a 含量的影响

**表示 UV-B 处理与对照(CK)之间差异显著($P < 0.01$)。

Fig.1 Effects of UV-B radiation on chlorophyll a content of *Spirulina platensis*-794

** donates significant difference between control(CK) and treatments($P < 0.01$).

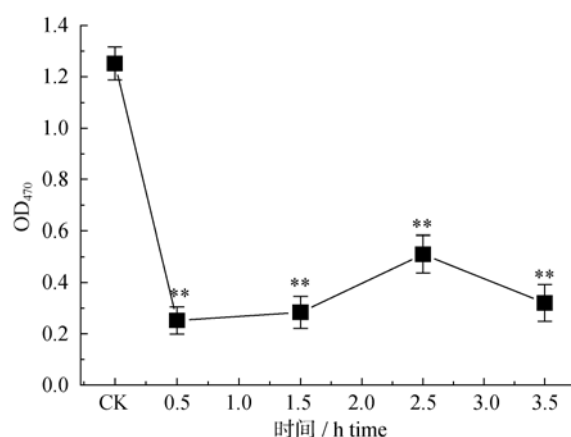


图 2 UV-B 辐射对螺旋藻类胡萝卜素含量的影响

**表示 UV-B 处理与对照(CK)之间差异显著($P < 0.01$)。

Fig.2 Effects of UV-B radiation on carotenoid content of *Spirulina platensis*-794

** donates significant difference between control(CK) and treatments($P < 0.01$).

近于对照组, 这说明藻体细胞在增强 UV-B 胁迫下, 不断地调动细胞防御系统, 产生一定的保护和适应机制, 减弱其对脂膜的损伤。

2.5 增强 UV-B 对螺旋藻脯氨酸含量的影响

增强 UV-B 对螺旋藻脯氨酸含量的影响如图 6 所示, 结果显示在短期增强 UV-B 辐射处理期间, 螺旋藻细胞内的脯氨酸含量始终高于对照组 ($P<0.01$), 并且随着处理时间的延长, 脯氨酸含量出现缓慢上升的趋势。处理 0.5 h 后脯氨酸含量快速增加, 为对照组的 295%, 处理 2.5 h 仍比对

照高出 153%。

3 讨论与结论

螺旋藻的光合色素主要包括叶绿素 a、类胡萝卜素和藻胆蛋白。大量研究证实, 在 UV-B 辐射下蓝藻叶绿素 a 和类胡萝卜素含量下降^[16-20]。本研究结果(图 1、2)也表明, 短期增强 UV-B 辐射处理下螺旋藻细胞内叶绿素 a 受到破坏, 类胡萝卜素合成受到抑制, 导致叶绿素 a 和类胡萝卜素含量减少。UV-B 辐射导致藻胆蛋白被光降解、含量

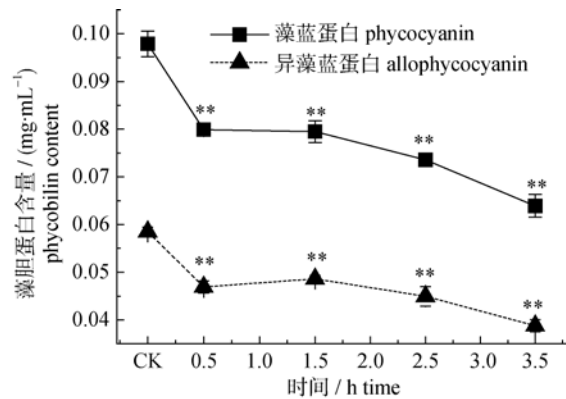


图 3 UV-B 辐射对螺旋藻藻胆蛋白含量的影响
**表示 UV-B 处理与对照(CK)之间差异显著($P<0.01$).
Fig.3 Effects of UV-B radiation on phycocyanin and allophycocyanin content of *Spirulina platensis*-794
** donate significant difference between control and treatments($P<0.01$).

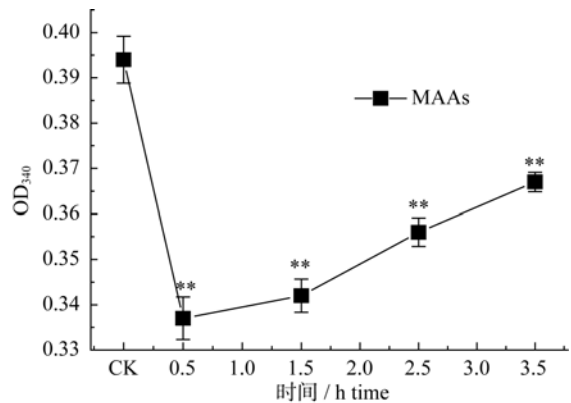


图 4 UV-B 辐射对螺旋藻类菌胞素氨基酸(MAAs)含量的影响
**表示 UV-B 处理与对照(CK)之间差异显著($P<0.01$).
Fig.4 Effects of UV-B radiation on mycosporine-like amino acids (MAAs) content of *Spirulina platensis*-794
** donate significant difference between control and treatments($P<0.01$).

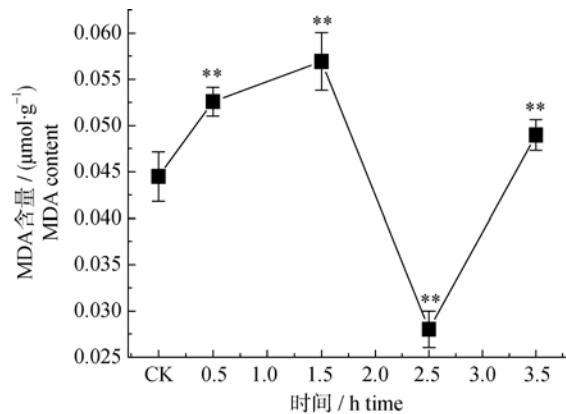


图 5 UV-B 辐射对螺旋藻丙二醛(MDA)含量的影响
**表示 UV-B 处理与对照之间差异显著性($P<0.01$).
Fig.5 Effects of UV-B radiation on malondialdehyde (MDA) content of *Spirulina platensis*-794
** donate significant difference between control and treatments($P<0.01$).

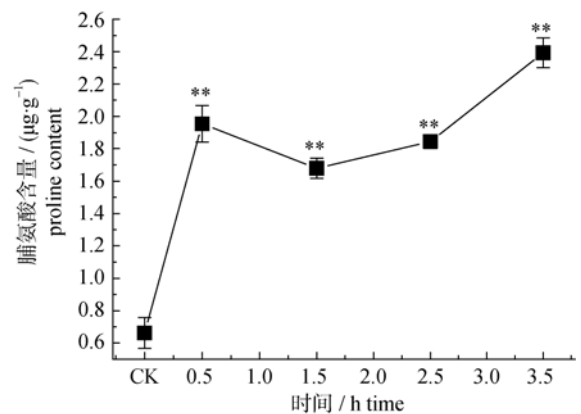


图 6 UV-B 辐射对螺旋藻脯氨酸含量的影响
**表示 UV-B 处理与对照之间差异显著($P<0.01$).
Fig.6 Effects of UV-B radiation on proline content of *Spirulina platensis*-794
** donate significant difference between control and treatments($P<0.01$).

下降已有报道^[21-24]。毕海等^[25]对经历了紫外线辐射的钝顶螺旋藻进行三维荧光光谱分析,结果表明紫外线辐射处理后,藻体细胞内藻胆蛋白合成受到抑制,纯度下降,藻蓝蛋白结构也发生明显变化。本研究结果显示,在短期增强 UV-B 辐射下,螺旋藻藻胆蛋白含量随处理时间的延长逐渐下降,说明 UV-B 辐射导致藻胆蛋白降解、含量下降,这与相关报道基本一致。

MAAs 既可作为屏蔽物质滤除过多的 UV-B,也可以作为抗氧化剂,防止 UV-B 诱导产生活性氧对细胞造成伤害^[26],富含 MAAs 的细胞对 UV-B 辐射有较强的耐受性。Sinha 等^[27]发现 UV-B 辐射可诱导节球藻属 *Nodularia baltica*、*N. Harveyana* 和 *N. spumigena* 合成 2 种 MAAs(shinorine 和 porphyra-334)。本研究结果(图 4)进一步证明,在增强 UV-B 胁迫下,螺旋藻细胞内诱导合成的 MAAs 主要为 shinorine 和 porphyra-334,说明增强 UV-B 对螺旋藻 MAAs 有诱导合成作用。螺旋藻能够通过合成屏蔽色素 MAAs,增加对 UV-B 的滤除作用,从而增强了其对增强 UV-B 的耐受性。

脯氨酸是重要的抗逆物质,植物在逆境胁迫下可以通过增加细胞内脯氨酸的含量来增加植物的抗性。Smirnoff 等^[28]发现,植物体内脯氨酸可能有清除活性氧的作用。蒋明义等^[29]也认为氧化胁迫下脯氨酸的积累可能是植物抗氧化损伤的一种保护机制。在低强度 UV-B 辐射条件下,植物体内的游离脯氨酸含量升高^[30-31]。本研究中,高强度 UV-B 短期处理后,与对照组相比较,螺旋藻细胞脯氨酸含量明显上升,说明蓝藻在增强 UV-B 辐射胁迫下,也能够通过积累脯氨酸,清除 UV-B 胁迫所产生的活性氧等,减轻氧化损伤程度,以适应逆境胁迫。

MDA 浓度表示膜的过氧化程度和膜系统的损伤程度,常被用作评价胁迫程度的生理指标。本研究中 UV-B 辐射增强使 MDA 含量发生显著增加(图 5),表明藻细胞膜脂的损伤增强;后期 MDA 含量减少,说明藻体细胞调动了一系列防御和保护机制来减轻脂膜过氧化。

综上所述,高强度 ($240 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)UV-B 辐射

能够对螺旋藻的生理生化反应产生影响。UV-B 辐射使螺旋藻光合色素含量下降、MDA 的含量升高、膜脂损伤增强。同时 UV-B 辐射诱导藻细胞屏蔽色素 MAAs 合成以及促进脯氨酸的累积,这种变化是螺旋藻抵抗增强 UV-B 胁迫所做出的适应性反应,是螺旋藻对增强 UV-B 胁迫的适应性机制之一。

以上研究结果表明,增强的 UV-B 胁迫可引起螺旋藻光合色素和藻胆蛋白含量下降,并进一步证明 UV-B 可对原核生物螺旋藻细胞产生伤害作用^[3];MDA 含量变化表明 UV-B 对螺旋藻的膜系统也产生重要影响;MAAs 和脯氨酸含量增加表明螺旋藻在遭受 UV-B 辐射时,能够主动合成一些保护细胞的物质,对 UV-B 胁迫做出适应性反应。

参考文献:

- [1] 陈海燕,陈建军,何永美,等.连续两年 UV-B 辐射增强对割手密叶绿素含量的影响[J].武汉植物学研究,2006,24(3):277-280.
- [2] Rozema J, Björn L O, Bornman J F, et al. The role of UV-B radiation in aquatic and terrestrial ecosystems-an experimental and functional analysis of the evolution of UV-absorbing compounds [J]. Photochem Photobiol B: Biol, 2002 (66) : 2-12.
- [3] Xue L, Zhang Y, Zhang T, et al. Effects of enhanced ultraviolet-B radiation on algae and cyanobacteria[J]. Critic Rev Microbiol, 2005, 31(2): 79-89.
- [4] Kirk J T O. Optics of UV-B radiation in natural waters [J]. Arch Hydrobiol, 1994, 43: 1-16.
- [5] Suers B G, Joshi P C, Viswathan P N. UV-B-induced reduction in biomass and overall productivity of cyanobacteria [J]. Biochem Biophys Res Commun, 1998, 244: 138-142.
- [6] Solheim B, Johansen U, Callaghan T V, et al. The nitrogen fixation potential of arctic cryptogam species is influenced by enhanced UV-B radiation [J]. Oecologia, 2002, 133(1): 90-93.
- [7] Sinha R P, Häder D P. UV-protectants in cyanobacteria[J]. Plant Sci, 2008, 174: 278-289.
- [8] Sfichi-Duck L, Ioannidis N E, Kotzabasis K. Fast and reversible response of thylakoid-associated polyamines during and after UV-B stress: a comparative study of the wild type and a mutant lacking chlorophyll b of unicellular green

- alga[J]. *Scenedesmus Obliquus* Planya, 2008, 228(2): 341–353.
- [9] 缪锦来, 李光友, 侯旭光, 等. UV-B 辐射对南极冰藻中抗辐射物质的诱导作用[J]. 高技术通讯, 2002(4): 92–95.
- [10] 吴兵, 韩发, 岳相国, 等. 长期增强 UV-B 辐射对高寒草甸植物光合速率和抗氧化系统的影响[J]. 西北植物学报, 2005, 25(10): 2010–2016.
- [11] Lichtenthaler H K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes [C]// Packer L, Douce R. *Methods in enzymology*. New York: Academic Press, 1987, 148: 350–382.
- [12] 刘华, 乔辰. 鄂尔多斯高原碱湖的螺旋藻与引进种光合作用的比较研究[J]. 自然科学进展, 2003, 13(3): 321–323.
- [13] 杨顶田, 陈伟明, 张运林, 等. 太湖梅梁湾水体中紫外线状况及藻体内 MAAs 的检测[J]. 武汉植物学报, 2004, 22(3): 264–268.
- [14] 王爱国, 邵从本, 罗广华. 丙二醛作为脂质过氧化物指标的探讨[J]. 植物生理学通讯, 1986, (2): 55–57.
- [15] 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 164–169.
- [16] Suresh B G, Joshi P C, Viswanathan P N. UV-B-induced reduction in biomass and overall productivity of cyanobacteria[J]. *Bichen Biophy Res Commun*, 1998, 244: 138–142.
- [17] Preuss S B, Britt A B. A DNA-damage-induced cell cycle checkpoint in *Arabidopsis*[J]. *Genetics*, 2003, 164: 323–334.
- [18] Takeuchi A, Yamguchi T, Hidema J, et al. Changes in synthesis and degradation of rubisco and LHC II with leaf in rice (*Oriza sativa* L.) grown under supplementary UV-B radiation[J]. *Plant Cell Environ*, 2002, 25: 695–706.
- [19] 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: 5004–5013.
- [20] 林兴权, 潘彩萍, 王波. 紫外光辐照抑制蓝藻生长的研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(7): 94–97.
- [21] Lao K Q, Alexander N G. Ultraviolet-B photodestruction of a light-harvesting complex[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1996, 93: 5258–5263.
- [22] Sinha R, Kumar A, Tyagi M B, et al. Ultraviolet-B-induced destruction of phycobiliproteins in cyanobacteria[J]. *Physiol Mol Biol Plants*, 2005, 11: 313–319.
- [23] Sinha R P, Lebert M, Kumar A, et al. Distintegration of phycobilisomes in a rice field cyanobacterium *Nostoc* sp. following UV irradiation [J]. *J Photochem, Photobiol B: Biol*, 1995, 37(4): 697–706.
- [24] Bhandari R, Sharma P K. High-light-induce changes on photosynthesis, pigments, sugars, lipids and antioxidant enzymes in freshwater (*Nostoc spongiaeforme*) and marine (*Phormidium corlum*) cyanobacteria[J]. *Photochem Photobiol*, 2006, 82: 702–710.
- [25] 毕海, 张光明, 王伟. 紫外辐照对钝顶螺旋藻藻蓝蛋白的影响研究[J]. 农业环境学报, 2007, 26(3): 1033–1039.
- [26] Dun W C, Yamamoto Y. Small-molecule antioxidants in marine organisms: antioxidant activity of mycosporine glycine[J]. *Comp Biochem Physiol*, 1995, 112: 105–114.
- [27] Sinha R P, Ambasht N K, Sinha J P, et al. UV-B-induced synthesis of mycosporine-like amino acids in three strains of *Nodularia* (cyanobacteria)[J]. *Photochem Photobiol B Biol*, 2003, 71: 51–58.
- [28] Smirnoff N, Cumbes Q J. Hyddroxyl radical scavenging activity of compatible solutes [J]. *Phytochemistry*, 1989, 28: 1057.
- [29] 蒋明义, 郭绍川, 张学明. 氧化胁迫下稻苗体内积累的脯氨酸的抗氧化作用[J]. 植物生理学报, 1997, 23(4): 347–352.
- [30] 刘清华, 钟章成. 紫外线-B 辐射对银杏活性氧代谢及膜系统的影响[J]. 西华师范大学学报, 2007, 28(2): 148–152.
- [31] Parvanova D, Ivanov S, Konstantinova T, et al. Transgenic tobacco plants accumulating osmolytes show reduced oxidative damage under freezing stress[J]. *Plant Physiol Biochem*, 2004, 42(1): 57–63.

Physiological and biochemical responses of *Spirulina platensis* to short-term enhanced UV-B radiation

XUE Lingui, SHI Xiaoxia, CHU Kecheng, CHEN Zhimei, LI Shiweng

School of Chemical and Biological Engineering Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

Abstract: The amount of UV-B radiation reaching the earth's surface is increasing due to attenuation of the stratospheric ozone. Although the release of ozone-depleting material has declined significantly in the past decade, there is a considerable lag in the recovery of the ozone layer. Cyanobacteria are the oldest photosynthetic prokaryotes and play an important role in the aquatic ecosystem. UV-B can penetrate water to a depth sufficient to disrupt aquatic ecosystems. For example, the depth of water required to remove 90% of the solar radiation at 310 nm is about 20 m in the clearest ocean. Thus, a large number of cyanobacteria populate aquatic habitats that are exposed to UV-B radiation. UV-B radiation is known to affect cyanobacteria biomass by disrupting physiological and biochemical processes. However, cyanobacteria have developed mechanisms to counteract the damaging effects of UV-B, including production of UV-screening pigments [(e.g., mycosporine-like amino acids (MAAs)] and downward migration. We evaluated the effects of short-term enhanced UV-B radiation on physiological indices, including photosynthetic pigment content, MDA, MAAs, and proline, in *Spirulina platensis*. *S. platensis* were exposed to 240 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ UV-B for 3.5 h. By compared with untreated cyanobacteria cells, exposure to increased levels of UV-B radiation was associated with a reduction in chlorophyll a, carotenoid and phycobiliprotein content, with a change in MDA content. Our results suggest that increased levels of UV-B radiation causes bleaching of the photosynthetic pigment. Exposure to higher levels of UV-B was also associated with increased synthesis of MAAs and accumulation of proline. We hypothesize that this is a mitigation strategy to reduce the damaging effects of UV-B.

Key words: *Spirulina platensis*; UV-B; MAAs; photosynthetic pigment; MDA; proline