

文章编号:1004-4213(2010)09-1582-6

增强 UV-B 辐射对植物光能传递过程的影响*

刘晓¹, 贺俊芳², 姬倩茹¹, 岳明^{1,†}

(1 西北大学 西部资源生物与现代生物技术教育部重点实验室, 西安 710069)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

摘要:为探讨增强的紫外线-B (280~315 nm)辐射对光合作用原初光能传递的光物理过程的影响,对菠菜类囊体膜及光系统 II 的吸收光谱、稳态荧光发射谱进行了分析.结果显示在实验条件下(温室,紫外线-B 施加于植物成熟期,紫外线-B 剂量 $1.152 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),增强紫外线-B 辐射并没有抑制原初光能传递过程,植物通过一系列调节机制(增强吸收短波光色素的吸收强度,调节两个光系统间能量分配,变化光合系统中色素蛋白构象、位置)保证了原初光能传递的光物理过程,将能量传递到反应中心用于光合作用.

关键词:UV-B;类囊体膜;光系统 II;稳态荧光光谱;光能传递过程

中图分类号:Q631

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103909.1582

0 引言

自 1974 年美国学者 Rowland 和 Molina 揭示臭氧层减薄机理以来,有关紫外线-B(Ultraviolet-B, UV-B)增强对植物及生态系统影响的研究已做了大量工作.由于光合作用的变化直接影响植物生长及作物产量,成为人们研究最多的生理过程^[1-2].叶绿素荧光辐射是光合系统所吸收能量的损耗方式之一,该过程与热损耗以及用于光合作用的能量之间相互竞争,故常被作为研究光合过程不同水平的重要指标,同时也是研究各种干旱、污染以及 UV-B 辐射等逆境对植物影响的有利手段^[3-4].UV-B 对植物影响的叶绿素荧光分析多采用脉冲-振幅-调制(Pulse-Amplitude-Modulation, PAM)叶绿素荧光仪,通过对 F_0 , F_m , F_v 等指标以及由此计算出的光系统 II(Photosystem, PSII)量子产量(F_0/F_m),光化学淬灭(Q_p),非光化学淬灭(Q_n)参量的分析来探讨 UV-B 辐射对此计算出的光系统 II(Photosystem, PSII)量子产量(F_0/F_m),光化学淬灭(Q_p),非光化学淬灭(Q_n)参量的分析来探讨 UV-B 辐射对碳固定,氧气释放,光合电子传递链,呼吸速率以及光化学反应等过程的影响.而运用荧光光谱分析增强 UV-B 辐射对光合原初能量传递光物理过程的影响的研究相对较少有人涉及^[5-8].本研究拟运用稳态荧光光谱技术,研究增强 UV-B 处理对植物类囊体膜,尤其是 PSII 原初光能传递的光物理过

程的影响,为全面了解植物光合作用对 UV-B 辐射的响应机制提供实验依据.

1 材料和方法

1.1 实验材料及 UV-B 辐射

实验所用菠菜种子购于市场,实验在西北大学生命科学学院平台温室进行.将预处理的菠菜种子播种于 50 个 $31 \times 21 \text{ cm}$ 的塑料花盆中.待种子萌发后进行拣苗处理,保证每个花盆中留 3 株幼苗.为尽量减小环境因素的影响,每周变换每个花盆的位置.当菠菜的第五对真叶完全展开后,将 50 盆植株分成对照组(CK 组)和处理组(UVB 组).处理组补充 UV-B 辐射处理,对照组始终无 UV-B 辐射.

补充的 UV-B 辐射由 UV-B 荧光灯提供(40 W, 秦牌, 宝鸡),以正午为分界,每天补充 UV-B 照射 8 h,共处理 7 天.照射时荧光灯管附以 0.13 mm 醋酸纤维素膜以滤去紫外线-C(Ultraviolet-C, UV-C)后悬挂于植株正上方,补加的 UV-B 辐射剂量为 $1.152 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,调节灯管与植株顶端的距离以保证辐射剂量.对照组上方仅悬挂灯架.

1.2 类囊体膜及 PSII 的提取

UV-B 辐射组经 UV-B 处理 7 天后,于次日清晨采摘对照组和处理组叶片用于类囊体膜及 PSII 颗粒的提取,类囊体膜提取方法参照王晓静^[9],PSII 提取方法参照杜林方^[10].

1.3 光谱测量及分析

样品吸收光谱由 Lamda35 UV/Vis Spectrometer (PerkinElmer, USA) 在室温、避光情况下测量.稳态荧光发射谱由 FLS920 全功能型激光稳态荧光光谱仪(Edinburgh Instruments Ltd.)

*国家自然科学基金(30670366)、陕西省自然科学基金 2009JQ3004 和西北大学研究生创新基金(07YJC14)资助

† Tel: 029-88302143 Email: yueming@nwu.edu.cn

收稿日期:2009-07-13

修回日期:2009-11-20

在避光情况下获得,连续光源由 Xe900 提供,激发光波长 417 nm 用以选择性激发叶绿素 a (Chlorophyll a, Chl a) 分子. 测量所用样品浓度为 30 $\mu\text{g}/\text{ml}$.

物质发光是由能级跃迁产生的,在某一跃迁能级的中心波长附近一般具有高斯线型分布,同时不同荧光物质所发射荧光光强在重叠区具有可加性,故在多种物质共存的发光体系中,其光谱可以用这些基本的谱线单元来线性组合^[11]. 为进一步分析荧光光谱的特性,本文用高斯函数分别拟合荧光光谱曲线,高斯解析已被认为是光合作用光谱解析的一种有效方法. 通过高斯解析得到各个组分条带的中心峰位,峰面积,峰强度以及带宽. 高斯解析条带与光合组分的对应关系见文献^[12-18].

首先对稳态荧光光谱曲线求二阶导数,取该二阶导数谱线的极大值位置所对应的波长作为各高斯函数的初始中心波长,运用软件 origin 6.0 进行高斯拟合分析.

2 结果与分析

2.1 类囊体膜吸收光谱

对类囊体吸收光谱进行二阶求导以细化其中重叠的吸收峰. 导数谱(图 1)显示,增强的 UV-B 辐射

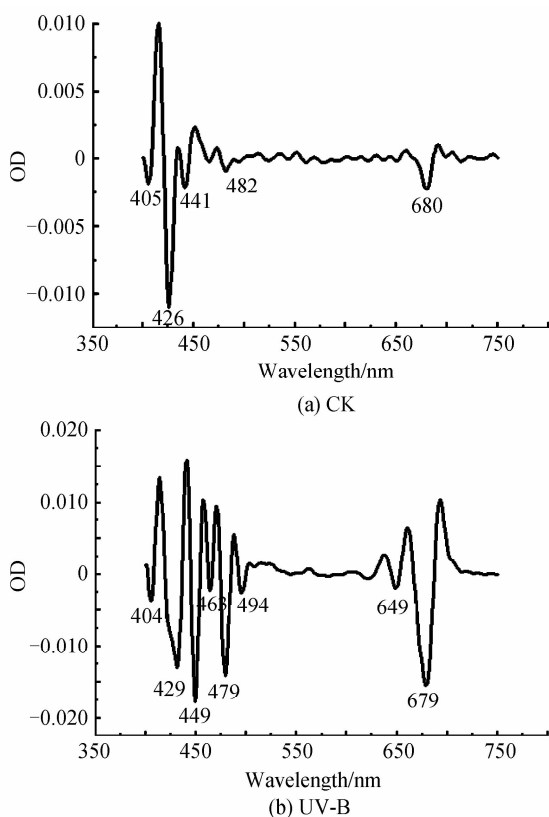


图 1 类囊体膜室温吸收光谱的二阶导数谱
Fig. 1 Second derivative spectrum of absorption spectra of thylakoid of CK and UV-B group at room temperature

处理使光谱发生明显变化. 在 CK 组中,最大吸收峰位于 426 nm,其来自 Chl a 的 $Q_y(0-0)$ 吸收,而在 UV-B 组中,蓝区表现出多个强吸收峰: 429 nm, 449 nm, 479 nm. CK 组中红区的最大吸收峰为来自 PSII 反应中心的 680 nm,而 UV-B 组中为 679 nm,且来自反应中心色素的吸收峰强度明显增强.

2.2 类囊体膜荧光发射谱

图 2(a)为 CK 及 UV-B 组的类囊体膜荧光发射谱,其中激发光源波长为 417 nm,UV-B 的荧光发射强度要高于 CK 组. 且都显示出明显的来自 PSII 的约 680 nm 发射高峰以及来自光系统 I (Photosystem I, PSI) 的约 730 nm 肩峰^[19]. PSI 和 PSII 的最大值的比例反应两个系统间的能量分配^[20],UV-B 辐射使该比值略有减少,可见两个光系统间的能量分配发生了变化.

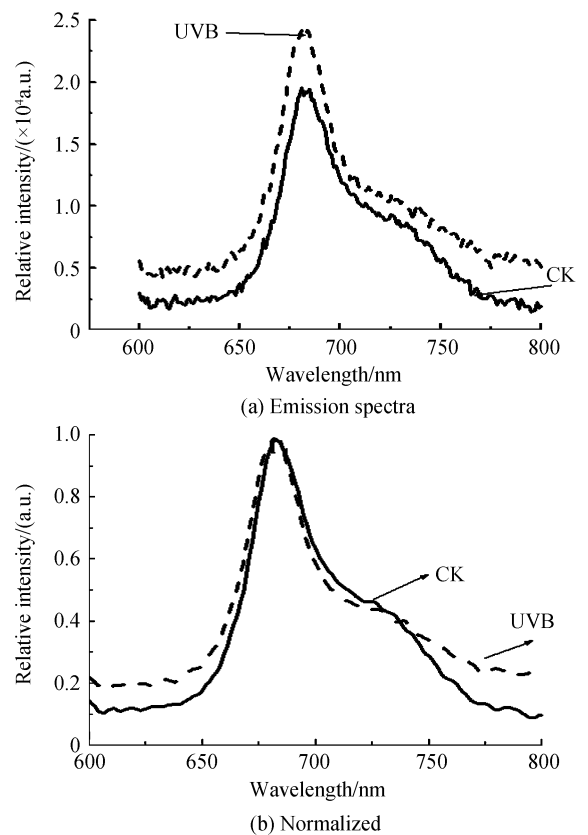


图 2 类囊体膜室温荧光发射谱及其归一化光谱
Fig. 2 Fluorescence emission spectra before and after normalized with maximum emission

将类囊体膜荧光发射谱以最大发射强度进行归一化处理(图 2b),UV-B 辐射对发射不同荧光的 Chl 分子有不同效应. 在小于 680 nm 波段,UV-B 辐射组的荧光发射增强,而在 700~736 nm 的波段,UV-B 辐射组的荧光发射强度要小于 CK 组. 大于 736 nm 波段 CK 组荧光发射强度又出现增强趋势.

2.3 PSII 荧光发射谱

许多研究已经表明 UV-B 主要伤害光合系统的

PSII^[21],本文有针对性对增强 UV-B 条件下 PSII 荧光发射谱进行分析. CK 和 UV-B 组的 PSII 荧光发射强度显示出同样的趋势,即 UV-B 组高于 CK 组(结果未显示). 为了便于比较,光谱解析前先将荧光强度进行归一化处理. 本实验中,CK 组和 UV-B 组荧光发射谱经解析都得到了 5 个光谱组分(见表 1,图 3),分别为 CK 组的 654, 663, 678, 705 和 718 nm; 以及 UV-B 组的 656, 663, 679, 706 和 717 nm. 这些发射峰分别来自于光系统中的 LHCII, PSII 的 RC 以及 PSI^[22]. 图 3 中可明显看出,在各个光谱子组分中,中心波长在 678 nm(CK)及 679 nm(UV-B)的组分具有最大面积及最强发射,其为来自反应中心的荧光发射,说明大部分能量都传递到了反应中心. 此外,UV-B 辐射使光谱组分发生了位移,并且各组分的峰面积发生了变化. 如 UV-B 辐射使来自 LHCII Chl 的 654 nm 发射红移到 656 nm,使 PSII 反应中心的 678 nm 发射峰红移到了 679 nm. 同样来自 LHCII Chl 的 663 nm 发射峰位并没有变化,但发射面积明显减少. 来在核心天线 Chl a 分子的荧光发射也受到了 UV-B 辐射的影响,从 705 nm 红移到 706 nm,且发射面积增强. 大于 710 nm 的发射峰一般被认为来自于主发射峰的

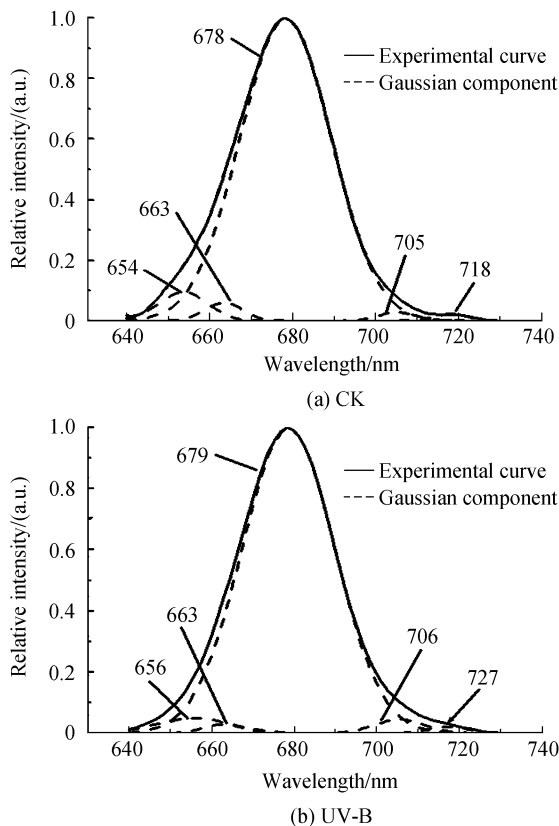


图 3 PSII 室内荧光发射谱的高斯解析光谱
Fig. 3 Gaussian deconvolution of fluorescence emission spectra

表 1 PSII 荧光发射谱高斯解析结果

Table 1 Results of Gaussian fluorescence emission spectra about photosystem II (PSII)

Peak	Center	Area	Width	Height
CK				
1	654	1.389 8	11.551	0.096 005
2	663	0.683 08	9.061 7	0.060 145
3	678	27.498	21.956	0.999 25
4	705	0.316 86	8.418 1	0.030 033
5	718	0.228 03	8.698 8	0.020 915
UVB				
1	656	1.110 2	8.167	0.048 757
2	663	0.341 36	9.234 1	0.029 496
3	679	28.089	22.459	0.997 88
4	706	0.686 13	12.024	0.045 53
5	717	0.268 39	10.014	0.021 384

振动副带^[22-23], UV-B 辐射使 718 nm 蓝移到 717 nm,峰面积变化不大.

实验结果表明在本实验条件下(温室,UV-B 施加于植物成熟期,UV-B 剂量 $1.152 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),低剂量的增强 UV-B 辐射对原初光能传递的光物理过程并没有造成抑制,反而作为一种刺激,保证了光能传递到达反应中心用于光合作用.

在本实验中,UVB 处理后,类囊体膜以及 PSII 的荧光发射相对 CK 组都增强,并未出现荧光淬灭现象,该结果与部分研究结果不一致^[6,24],这与不同实验条件的差异有关(如植物生长环境:温室还是大田环境;施加增强的 UV-B 的时期以及实验使用的 UV-B 辐射剂量). 植物光合系统(如外周天线(LHCII))及和光合作用相关的酶类的状态随叶龄变化,多数研究在植物苗期进行增强的 UV-B 辐射,在叶片的早期阶段,增强 UV-B 辐射会造成 Rubisco 合成能力下降^[25]. 植物缺乏 Rubisco 和良好聚集态的 LHC II 会使得光系统能量传递过程受到影响,特别影响到反应中心之前的能量耗散过程,这可能会对反应中心造成伤害. 此外,如果受损的反应中心未能及时修复,光合作用会被抑制. 在本实验中,在植物的成熟期施加增强 UV-B 辐射,发育良好的光合系统以及酶系统有能力通过调节机制去抵御 UV-B 并适应逆境. 这是本实验中未观察到荧光淬灭的原因之一.

此外,研究发现 UV-B 辐射对于植物叶绿体基粒的正常发育是必需的. YU 发现在没有 UV-B 的可见光下生长的植物叶绿体基粒发育不良,并且在有 UV-B 条件下生长的 PS II 的放氧活性要比无 UV-B 下的高^[26]. 本实验中,植物在温室中生长,对

照组自始至终未接受到 UV-B 辐射. 温室环境影响了叶绿体正常发育, 进而影响光合作用. 相对而言, UV-B 辐射条件下的叶绿体基粒生长状态好于对照组, 利于光合作用顺利进行, 因而 UV-B 组比对照组的荧光发射强.

近来越来越多的研究表明只有高水平的 UV-B 辐射才会抑制光合作用. 即使在高剂量 UV-B 辐射下, 光合系统仍然可以通过一些调节途径来保证光合作用的进行(如产生吸收 UV-B 辐射的黄酮类化合物)^[27-28]. 在本实验中, UV-B 辐射的剂量远低于大多数研究所施加的剂量^[29-30], 可能低剂量的 UV-B 辐射作为一种弱胁迫, 反而刺激了光合系统, 这种现象也在很多微藻中被观察到^[31].

实验中经过 7 天的 UV-B 辐射, 菠菜在其生长过程中调整一系列机制以维持光合作用. 类囊体膜吸收光谱显示, 吸收光谱在蓝区发生明显的变化, 说明蓝区的 Chl 分子对 UV-B 更敏感, UV-B 辐射使更多吸收蓝区短波光的色素分子参与光能的吸收, 这无疑是光合系统对增强的 UV-B 辐射的适应机制之一. 此外, 来自 PSII 反应中心的 Chl a 分子的吸收峰发生蓝移, 可见 UV-B 辐射使其构象或与蛋白间位置发生改变. 荧光发射谱还显示出增强的 UV-B 辐射对于 PSI 和 PSII 的效应有所不同, 且两个光系统间的能量重新分配, 能量向 PSI 的分配增多, 这也是防止过多光能对 PSII 损伤的途径之一, 代表一种 PSII 的长期调控机制. 是两个光系统之间随着光强的变化而发生状态转换的体现. 关于 PSII 向 PSI 分配激发能目前有多种说法: 一是强光下 LHC II 的磷酸化, PSI α 部分转化为 PSII β 形式, 缩小了 PSII 光吸收截面, 减少 PS II 对光能的吸收; 二是 PSII β 从类囊体的基粒片层区转移到基质片层区, 与磷酸化的 LHCI 结合后再与 PSI 形成复合体, 在该复合体中完成光能从 PSII 向 PSI 的分配; 三是天线移动假说, 即部分 LHCI 从富含 PS II 的基粒片层区移动到富含 PSI 的间质片层区, 扩大 PSI 的光吸收截面, 使吸收的激发能有利于向 PSI 分配^[32].

关于荧光光谱解析出的组分有不同的看法, 张景民等指出, 理论上不同实验条件下解析出的各个光谱组分所处的相应波长位置应该固定不变, 而其峰面积却随着实验条件的改变而发生相应的变化, 且其峰面积等于其相对荧光量子产量比^[33]. 而众多实验证明不同实验条件下光谱组分的波长位置会发生相应的变化^[34-36]. 本实验表明, 实验条件变化会导致解析出的各个光谱组分的峰位和(或)面积发生改变, 这也反应了不同实验条件下, 色素分子能量传递过程中的变化. 当 417 nm 光激发 PSII, 光能主要被

Chl a 分子吸收, Chl a 分子通过 Förster 机制和 Dexter 电子交换和激子机制为主进行能量传递, 激发能传递机理与蛋白-色素复合物内色素分子的排列方式和构型有关^[37]. UV-B 辐射可以造成 PSII 核心复合物聚集态降低; D1 蛋白特定的位点降解; CP43 从核心复合物上解聚; 损伤的 PSII 从基粒向基质片层迁移等, 使 PSII 发生光抑制^[38], 而光合系统中 LHCI, 核心天线以及反应中心通过调节其中色素蛋白的构象及之间的位置信息来适应增强的 UV-B 辐射, 从而保证光合作用.

3 结论

为探讨增强的 UV-B 辐射对光合作用原初光能传递的光物理过程的影响, 对菠菜类囊体膜吸收和荧光光谱以及 PSII 的荧光发射谱进行了分析. 结果显示在本实验条件下, 植物在增强 UV-B 辐射伴随的生长过程中发展出一系列调节机制保证光合作用. 如类囊体膜中吸收短波长光的色素吸收增强, 同时光能在两个光系统间重新分配, 倾向于增加能量向 PSI 的流动, 保证 PSII 不发生光抑制. 此外, 光合系统的各个单元通过调节色素蛋白构象及位置来应对增强的 UV-B 辐射. UV-B 辐射并没有抑制原初光能传递的光物理过程, 反而作为一种弱胁迫刺激了光合作用过程.

参考文献

- [1] BISCHOF K, PERALTA G, KRABS G, *et al.* Effects of solar UV-B radiation on canopy structure of Ulva communities from southern Spain[J]. *J Experimental Botany*, 2002, **53** (379): 2411-2421.
- [2] KAKANI V G, REDDY K R, ZHAO D, *et al.* Effects of ultraviolet-B radiation on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) morphology and anatomy[J]. *Annals Botany*, 2003, **91**(7): 817-826.
- [3] BAKER N R, ROSENQVIST E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities [J]. *J Experimental Botany*, 2004, **55**(403):1607-1621.
- [4] HULSEN K, TOP E M, HOFTE M. Biodegradation of linuron in a phaseolus bioassay detected by chlorophyll fluorescence[J]. *New Phytologist*, 2000, **154**(3): 821-829.
- [5] GÓMEZ I, FIGUEROA F L. Effects of solar UV stress on chlorophyll fluorescence kinetics of intertidal macroalgae from southern Spain: a case study in Gelidium species [J]. *J Applied Phycology* 1998, **10**(3): 285-294.
- [6] LIN Wen-xiong, WU Xing-chun, LIANG Yi-yuan, *et al.* Effects of enhanced UV-B radiation stress on kinetics of chlorophyll fluorescence in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, **10**(1): 8-12.
林文雄, 吴杏春, 梁义元, 等. UV-B 辐射胁迫对水稻叶绿素荧光动力学的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2002, **10**(1): 8-12.
- [7] PRABHA G L, KULANDAIVELU G. Induced UV-B resistance against photosynthesis damage by adaptive mutagenesis in *synechococcus* PCC 7924 [J]. *Plant Science*, 2002, **162**(55): 663-669.

- [8] LIU Li-xia, Xu Shou-min, WOO K C. Solar UV-B radiation on growth, photosynthesis and the xanthophyll cycle in tropical acacias and eucalyptus [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, **54**(2): 121-130.
- [9] WANG Xiao-jin, ZHANG Yu, ZHANG Li-xing, *et al.* Narielastine effects on chlorophyll fluorescence parameters and thylakoid-membrane protein complexes in in vitro virescent cotyledons of radish [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, **26**(2): 0259-0265.
王晓静, 张裕, 张立新, 等. NCS对离体萝卜子叶转绿期间叶绿素荧光参数及类囊体膜蛋白复合物的影响[J]. 西北植物学报, 2006, **26**(2): 0259-0265.
- [10] DU Ling-fang. Preparation and storage of PS II particles with high oxygen-evolution activity [J]. *Plant Physiology Communications*, 1995, **31**(3): 212-215.
杜林方. 具高放氧活性的PSII颗粒的制备及保存[J]. 植物生理学通讯, 1995, **31**(3): 212-215.
- [11] SHENG Lan-sun, BAI Mei. Study on the spectral interference and correction method in ICP-AES [J]. *J Data Acquisition and Processing*, 1989, **4**(A10): 72-76.
沈兰苏, 白梅. ICP-AES中光谱干扰及其校正方法的研究[J]. 数据采集与处理, 1989, **4**(A10): 72-76.
- [12] GARLASCHI F M, ZUCHELLI G, GIAVAZZI P. Gaussian band analysis of absorption, fluorescence and photobleaching difference spectra of D1/D ~ cyt b-559 complex [J]. *Photosynth Res*, 1994, **41**(3): 465-473.
- [13] VASIL'EV S, ORTH P, ZOUNI A, *et al.* Excited-state dynamics in photosystem II: Insights from the X-ray crystal structure [J]. *PNAS*, 2001, **98**(15): 8602-8607.
- [14] GROOT M L, FRESE R N, DE WEERD F L, *et al.* Spectroscopic properties of the CP43 core antenna protein of photosystem II [J]. *Biophys J*, 1999, **77**(6): 3328-3340.
- [15] GOPAL R, MISHRA K B, ZEESHAN M, *et al.* Laser-induced chlorophyll fluorescence spectra of mung plants growing under nickel stress [J]. *Curr Sci*, 2002, **83**(7): 880-884.
- [16] LIU Z F, YAN H C, WANG K B, *et al.* Crystal structure of spinach major light-harvesting complex at 2.72 Å resolution [J]. *Nature*, 2004, **428**(3): 287-292.
- [17] MISHRA K B, GOPAL R. Study of laser-induced fluorescence signatures from leaves of wheat seedlings growing under cadmium stress [J]. *Gen Appl Plant Physiol*, 2005, **31**(3-4): 181-196.
- [18] WEN X G, GONG H M, LU C M. Heat stress induces an inhibition of excitation energy transfer from phycobilisomes to photosystem II but not to photosystem I in a cyanobacterium *Spirulina platensis* [J]. *Plant Physiol Bioch*, 2005, **43**(4): 389-395.
- [19] XU Si-chuan, AI Xi-chen, SHUN Zhao-yong, *et al.* Ultrafast spectroscopic studies on the isolated PS II particles from pseudo ginseng, water hyacinth and spinach leaves [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2001, **59**(6): 937-944.
徐四川, 艾希成, 孙照勇, 等. 水葫芦、三七和菠菜光系统亚颗粒的分离及超快光谱的研究[J]. 化学学报, 2001, **59**(6): 937-944.
- [20] VELITCHKOVA M, POPOVA A. High light-induced changes of 77 K fluorescence emission of pea thylakoid membranes with altered membrane fluidity [J]. *Bioelectrochemistry*, 2005, **67**(1): 81-90.
- [21] VASS I, KIRILOVSKY D, PEREWOSKA I, *et al.* UV-B radiation induced exchange of the D1 reaction centre subunits produced from the psbA2 and psbA3 genes in the cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6803 [J]. *European Journal of Biochemistry*, 2000, **267**(9): 2640-2648.
- [22] CAI Xia, WANG Shui-cai, HE Jun-fang, *et al.* Effect of temperature ascending on energy transfer of Chl a in CP47 and CP47/D1/D2/Cyt b559 of PS II [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, **23**(7): 853-855.
蔡霞, 王水才, 贺俊芳, 等. 温度升高对PSII中CP47和CP47/D1/D2/Cyt b559 Chl a能量传递的影响[J]. 西北植物学报, 2003, **23**(7): 853-855.
- [23] LIU Xiao, WANG Shui-cai, HE Jun-fang, *et al.* Fluorescence spectra properties of PS II particle complex at low temperature [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2004, **33**(1): 60-64.
刘晓, 王水才, 贺俊芳, 等. PSII颗粒复合物低温荧光光谱特性[J]. 光子学报, 2004, **33**(1): 60-64.
- [24] UNDERWOOD G J C, NILSSON C, SUNDÅCK K, *et al.* Short-term effects of UV-B radiation on chlorophyll fluorescence, biomass, pigments, and carbohydrate fractions in a benthic diatom mat [J]. *J Phycology*, 1999, **35**(4): 656-666.
- [25] TAKEUCHI A, YAMAGUCHI T, HIDEWA J, *et al.* Changes in synthesis and degradation of Rubisco and LHCII with leaf age in rice (*Oryza sativa* L.) growing under supplementary UV-B radiation [J]. *Plant Cell Environment*, 2002, **25**(6): 695-706.
- [26] YU S G, BJÖRN L O. Ultraviolet B stimulates grana formation in chloroplasts in the African desert plant *Dimorphotheca Pluvialis* [J]. *J Photochemistry Photobiology B: Biology*, 1999, **49**(1): 65-70.
- [27] ALLEN D J, NOGUES S, MORISON J I L, *et al.* A thirty percent increase in UV-B has no impact on photosynthesis in well-watered and droughted pea plants in the field [J]. *Global Change Biology*, 1995, **5**(2): 235-244.
- [28] SHI S B, LI W Y, HUI M, *et al.* Photosynthesis of *Saussurea superba* and *Gentiana straminea* is not reduced after long-term enhancement of UV-B radiation [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, **51**(1): 75-83.
- [29] XIONG F S. Evidence that UV-B tolerance of the photosynthetic apparatus in microalgae is related to the D1-turnover mediated repair cycle in vivo [J]. *J Plant Physiology*, 2001, **158**(3): 285-294.
- [30] FENG H Y, AN L Z, CHEN T, *et al.* The effect of enhanced ultraviolet-B radiation on growth, photosynthesis and stable carbon isotope composition ($\delta^{13}C$) of two soybean cultivars (*Glycine max*) under field condition [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, **49**(1): 1-8.
- [31] CAI Heng-jiang, TANG Xu-er, ZHANG Pei-yu, *et al.* Effects of UV-B radiation on the growth and physiological characteristics of *Platymonas gelgolandica* [J]. *Advances in Marine Science*, 2005, **23**(4): 460-465.
蔡恒江, 唐学玺, 张培玉, 等. UV-B辐射对青岛大扁藻生长及其某些生理特性的影响[J]. 海洋科学进展, 2005, **23**(4): 460-465.
- [32] WEI Ai-li, WANG Zhi-min. Research advances of molecular mechanism of photoinhibition and photodamage mechanism in PS II of higher plants [J]. *Acta Botanica Boreali Occident Sinica*, 2004, **24**(7): 1342-1347.
魏爱丽, 王志敏. 高等植物PSII的光抑制与光破坏研究进展[J]. 西北植物学报, 2004, **24**(7): 1342-1347.
- [33] ZHANG Jin-min, ZHAO Jin-quan, JIANG Li-jin. Study of energy transfer mechanism in phycobilisomes-thylakoid membrane complex-the state conversion technology and

- spectroscopy deconvolution methods [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, **42**(21): 2296-2299.
- 张景民,赵井全,蒋丽金.藻胆体-类囊体膜复合物内能量传递机制研究-光状态转换技术和光谱解叠方法[J].科学通报,1997,**42**(21):2296-2299.
- [34] SHAN J X, WANG J H, RUAN X, *et al.* Changes of absorption spectra during heat -induced denaturation of Photosystem II core antenna complexes CP43 and CP47: revealing the binding states of chlorophyll molecules in these two complexes[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2001, **1504**(2-3): 396-408.
- [35] CAI Xia, WANG Shui-cai, HE Jun-fang, *et al.* Low-temperature fluorescence spectroscopy and kinetics in the photosystem II core complex [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1441-1445.
- [36] JI Qian-ru, LIU Xiao, HE Jun-fang, *et al.* Stead-state fluorescence spectrum analysis of thylakoid membranes of etiolated maize seedlings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2486-2491.
- 姬倩茹,刘晓,贺俊芳,等.黄化玉米幼苗类囊体膜稳态荧光光谱分析[J].光子学报,2008,**37**(12):2486-2491.
- [37] KUANG Ting-yun. Principle and control of the process of primary light energy conversion of photosynthesis [M]. Jiangsu: Phoenix Science Press, 2003: 39.
- 匡廷云.光合作用原初光能转化过程的原理与调控[M].江苏:江苏科学技术出版社,2003: 39.
- [38] BARBATO R, FRISO G, RIGONI F, *et al.* Structural changes and lateral redistribution of photosystem II during donor side photoinhibition of thylakoids[J]. *The Journal of Cell Biology*, 1992, **119**(2): 325-335.

Effects of Ultraviolet-B Radiation on Plant Light Energy Transfer Process

LIU Xiao¹, HE Jun-fang², JI Qian-ru¹, YUE Ming¹

(1 Key Laboratory of Resource Biology and Biotechnology in Western China, Ministry of Education, Northwest University, Xi'an 710069, China)

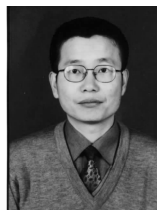
(2 State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: To clarify the effects of Ultraviolet-B (UV-B, 280-315 nm) treatment on the energy transfer process in photosynthesis, steady-state absorption and fluorescence techniques are performed on thylakoid membrane and photosystem II (PSII). The results show that under greenhouse, lower UV-B radiation levels do not inhibit light energy transfer process. Plant ensures energy reach to reaction center through a series of adjustment mechanism. These mechanisms include enhancement of absorb intensity of short-wavelength-absorption pigments, regulation of energy distribution between two photosystems and the changes of conformation and (or) location about pigment-protein system.

Key words: UV-B; Thylakoid; Photosystem II; Steady state fluorescence spectrum; Light energy transfer process



LIU Xiao was born in 1975. She received the M. S. degree from State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS. Her research interests focus on phytophysiology.



YUE Ming was born in 1967. He received his Ph. D. degree from Lanzhou University. His research interests focus on phytocoenology and plant population ecology and global change ecology, especially the effects of enhanced UV-B radiation due to ozone depletion on cropland ecosystem and competitive balance of plant population and repair of laser on damage by UV-B radiation.