

文章编号: 0258-7025(2009)03-758-07

He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射 小麦类囊体膜特性的影响

郭君瑜 韩 榕

(山西师范大学生命科学院, 山西 临汾 041004)

摘要 对“晋麦 8 号”小麦幼苗分别采用 $5 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$ He-Ne 激光辐照, $10.08 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 增强 UV-B 辐射及二者组合处理。经研究发现: 增强 UV-B 辐射可引起小麦叶片类囊体膜光吸收能力减弱, 偶联因子(ATPase)(Mg^{2+} -ATPase 和 Ca^{2+} -ATPase)活性降低和光合磷酸化(环式和非环式)活性抑制, 说明增强 UV-B 辐射引起小麦类囊体膜损伤。而一定剂量的 He-Ne 激光辐照可部分修复增强 UV-B 对小麦类囊体膜的损伤, 使叶片类囊体膜光吸收能力升高, ATPase(Mg^{2+} -ATPase 和 Ca^{2+} -ATPase)活性升高, 光合磷酸化(环式和非环式)活性受到激活。SDS-PAGE 结果表明, 各处理组类囊体膜多肽成分与对照没有明显变化, 增强 UV-B 辐射可导致多肽含量减少, 而 He-Ne 激光辐照可使多肽含量有所增加。

关键词 医用光学与生物技术; 小麦; UV-B 辐射; He-Ne 激光; 类囊体膜

中图分类号 Q631; Q945.11 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093603.0758

Effects of He-Ne Laser on Thylakoid Membrane Characteristic of Wheat Seedling Exposed to Enhanced UV-B Radiation

Guo Junyu Han Rong

(College of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004, China)

Abstract The seedling of wheat (jinmai 8) was exposed to He-Ne laser ($5 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$), enhanced UV-B radiation ($10.08 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) and the combined treatment of He-Ne laser irradiation and enhanced UV-B radiation. The research discovers, light absorbability of thylakoid membrane of wheat seedling leaves is decreased by enhanced UV-B radiation, Mg^{2+} -ATPase and Ca^{2+} -ATPase activity are also depressed. Activity of photophosphorylation(PSP), cyclic PSP and non-cyclic PSP, is restrained by enhanced UV-B radiation. The enhanced UV-B radiation causes damage on thylakoid membrane of wheat seedling. But certain amounts of He-Ne laser can partially repair UV-B damage on thylakoid membrane wheat seedling leaves, and reconstruct light absorbability of thylakoid membrane of wheat seedling. Mg^{2+} -ATPase and Ca^{2+} -ATPase activity are also raised. Cyclic PSP and non-cyclic PSP activity is increased by He-Ne laser. The SDS-PAGE result shows that different treatment groups can not induce obvious differences on the polypeptide compositions of thylakoid membrane, which will be reduced by enhanced UV-B radiation, but increased after He-Ne laser radiation.

Key words medical optics and biotechnology; wheat; ultraviolet-B radiation; He-Ne laser; thylakoid membrane

1 引言

光是植物光合作用的基本能源, 光不足会限制光合作用的速度。但光过量会造成光胁迫, 使光合

作用受到抑制。随着大气污染, 臭氧层破坏, 直接导致到达地表的太阳紫外辐射(UV)的增强。UV-B 对植物的光合系统伤害越来越严重, 植物自身虽然

收稿日期: 2008-05-13; 收到修改稿日期: 2008-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(30671061)和山西省自然科学基金(2008011059-1)资助项目。

作者简介: 郭君瑜(1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事植物细胞学方面的研究。E-mail: guojunyul0@163.com

导师简介: 韩 榕(1962-), 男, 教授, 博士, 主要从事环境植物学方面的研究。

E-mail: hanrong@dns.sxnu.edu.cn(通信联系人)

可以进行部分修复与适应,但还会对光合系统造成严重伤害,使光合速率下降,造成农作物减产。张琴等^[1]研究表明一定剂量的 He-Ne 激光可以对增强 UV-B 造成的离体叶绿体损伤进行修复。类囊体膜是叶绿体光能吸收、传递和转换的结构基础,因此叶片中类囊体膜的变化是反映植物光合能力的一个重要指标。本文通过提取的小麦叶片类囊体膜,来研究 UV-B 辐射和 He-Ne 激光对光合系统的影响,

分析对光合作用影响的机制。

2 材料和方法

晋麦 8 号 (*Triticum aestivum*), 由山西省农业科学院小麦研究所提供。

共设对照(CK)、UV-B 处理(B)、激光处理(L)、UV-B 和激光复合处理(BL)4 组。各组处理方法如表 1 所示。

表 1 各处理组的设置及处理程序

Table 1 Establishment and procedure of the different treatment

Treatment	Light/(h/d)	UV-B radiation/(h/d)	He-Ne radiation/(min/d)	Dark culture/(h/d)
CK	8	—	—	16
B	8*	8	—	16
BL	8*	8	2	16
L	8	—	2	16

Note: * with UV-B radiation at the same time.

选取籽粒饱满、大小均一的小麦种子,经质量分数为 0.1% 的 HgCl₂ 表面消毒后,培养于盛有湿滤纸的培养皿内,每盘 30 粒。设三次重复,25℃ 培养,待种子露白时处理。

UV-B 辐射强度为 10.08 kJ·m⁻²·d⁻¹,采用紫外辐射计(UV-B 型,北京师范大学光电仪器厂)对 UV-B 辐射功率密度进行测定,仪器预先用 742 型辐射强度测定仪(Optronics Laboratories Orlando, FL, USA)进行校正。紫外 B 发生用紫外 B 灯(秦牌,宝鸡制造,30 W,297 nm),将其垂直悬于培养皿上方,通过调整 UV-B 灯与植物培养皿之间的距离来控制 UV-B 辐射强度。

He-Ne 激光器(MSHN-A-B450MM,西北大学光电研究所制造)波长为 632.8 nm,光斑直径 2 mm。通过可溶性蛋白与可溶性糖的合成含量的测定^[2],选用较大刺激效应剂量 5 mW·mm⁻²,120 s,25℃。激光辐照处理安排在夜间进行,以排除杂光影响,激光处理后立即转入暗处 25℃ 培养。

类囊体膜的制备根据 Dunahay 等^[3]的方法,稍作修改。叶片加入 30 mL 预冷的 STN 缓冲液(50 mmol·L⁻¹ Tris-HCl pH 7.8, 0.4 mol·L⁻¹ 蔗糖, 5 mmol·L⁻¹ MgCl₂, 10 mmol·L⁻¹ NaCl, Tris 为三羟基氨基甲烷)于冰浴中研磨,匀浆液用 4 层纱布过滤,滤液在 500×g ($g = r \times 11.18 \times 10^{-6} (r/m)^2$, r 为有效离心半径), 0℃ 下离心 2 min,取上清在 3000×g, 0℃ 下离心 5 min,弃上清。沉淀

用 STN 悬浮,然后在 3800×g, 0℃ 下离心 7 min,弃上清,沉淀再用 TN (50 mmol·L⁻¹ Tris-HCl pH 7.8, 5 mmol·L⁻¹ MgCl₂, 10 mmol·L⁻¹ NaCl) 悬浮,即为类囊体膜悬浮液。叶绿素浓度控制在 0.5 mg/mL,在冰箱中保存备用。

参照陈阳等^[4]的方法,在 722 型分光光度计上进行,波长扫描范围 400~750 nm。

参照李有则等^[5]的方法,稍作改进。反应液(25 mmol·L⁻¹ Tris-HCl pH 7.8, 30 mmol·L⁻¹ NaCl, 6 mmol·L⁻¹ MgCl₂) 0.4 mL, 5 mmol·L⁻¹ ADP-Na₂ 0.2 mL, 0.06 mmol·L⁻¹ PMS 0.2 mL(测环式光合磷酸化)或 1 mmol·L⁻¹ K₃Fe(CN)₆(测非环式光合磷酸化), 8 mmol·L⁻¹ 磷酸氢钾 0.2 mL, 类囊体膜悬浮液 0.3 mL, H₂O 0.2 mL 组成,总体积为 1.5 mL (含 150 μg 叶绿素)。光照反应时间 8 min,温度 20℃,暗对照的反应条件除不进行光照外其他不变。通过测定反应液中无机磷的减少来计算三磷酸腺苷(ATP)的增加量,光合磷酸化速率以 μmol ATPase·mg⁻¹ chl·h⁻¹ 为单位

参照黄卓辉^[6]的方法,用 722 型可见分光光度计测定 660 nm 处 OD 值,并分别计算 Mg²⁺-ATPase 和 Ca²⁺-ATPase 活性(μmol Pi·mg⁻¹ chl·h⁻¹),以不照光为对照。

参照 Laemmli 的方法^[7],分离胶体积分数为 15%,浓缩胶体积分数为 5%,分别加 6 mol/L 尿素提高分辨率。类囊体膜制备液以 12000×g, 4℃

下离心 5 min,得到的沉淀中加入等体积的样品缓冲液,每泳道样品含 5 μg 叶绿素,进行电泳。标准蛋白分子量分别为 67 kDa(牛血清白蛋白),45 kDa(卵清白蛋白),35 kDa(胃蛋白酶),23.3 kDa(胰蛋白酶)。

3 结果与分析

类囊体膜在不同处理后,440 nm, 680 nm 处有明显的吸收峰,472 nm 处有一肩峰(如图 1 所示),各峰值分别代表 PS II 核心蛋白作用中心色素聚光叶绿素 a 和脱镁叶绿素 a (439 nm)、类胡萝卜素(472 nm)、叶绿素 a (681 nm)对光能的相对吸收能力^[8]。

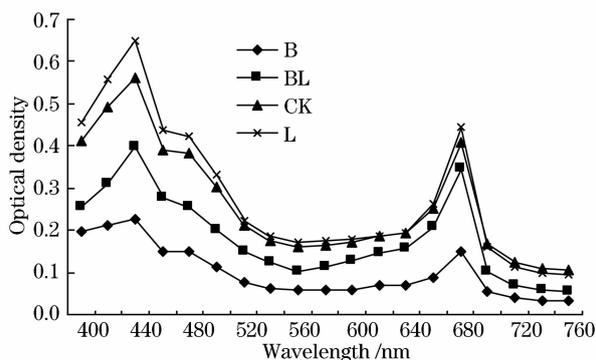


图 1 不同处理类囊体膜室温吸收光谱的影响

Fig.1 Absorption spectrum of thylakoid membrane of different treatment at room temperature

各处理组变化趋势基本一致,但其吸收峰有明显差异。囊体膜室温吸收光谱如图 1 所示,440 nm 和 680 nm 处,单独 UV-B 辐射(B 组)光吸收能力明显低于对照组,差异极显著($P < 0.01$);而单 He-Ne 激光处理(L 组)光吸收能力略高于对照(CK 组),差异不显著($P > 0.05$)。He-Ne 激光和 UV-B 辐射复合处理(BL 组)类囊体膜光吸收能力低于对照(CK 组),差异显著($P < 0.05$);而高于单独 UV-B 辐射(B 组),差异极显著($P < 0.01$)。各处理组光吸收能力始终保持 $L > CK > BL > B$ 的趋势。说明增强 UV-B 辐射使类囊体膜电子传递受阻,而一定剂量的 He-Ne 激光在一定程度上可解除这种抑制,促进其电子传递。

由图 2(a),(b)可知,经不同处理后类囊体膜环式(+PMS)和非环式光合磷酸(+FeCy 或 MV)反应活性基本趋势相同,都是处理 4 d 后活性明显升高到达峰值,然后逐渐下降。

不同处理环式光合磷酸化活性影响结果如图 2 (a)所示,辐射第 5 d 时反应活性达到最大。辐射第

5 d 时,B 组环式光合磷酸化活性升高达到 4 d 的 1.98%,但还是低于 CK 组,差异极显著($t_{CK,B} = 16.93, P < 0.01$);而 L 组反应活性升高到 4 d 的 1.44%且略高于 CK 组,差异不显著($t_{L,CK} = 3.8, P > 0.05$)。BL 组反应活性升高到 4 d 的 1.69%,但还是明显低于 CK 组($t_{CK,BL} = 9.70, P < 0.01$);而高于 B 组($t_{BL,B} = 6.62, P < 0.01$),均达到差异极显著。然后随着处理天数的增加,各处理组反应活性都逐渐下降且始终保持 $L > CK > BL > B$ 的趋势。

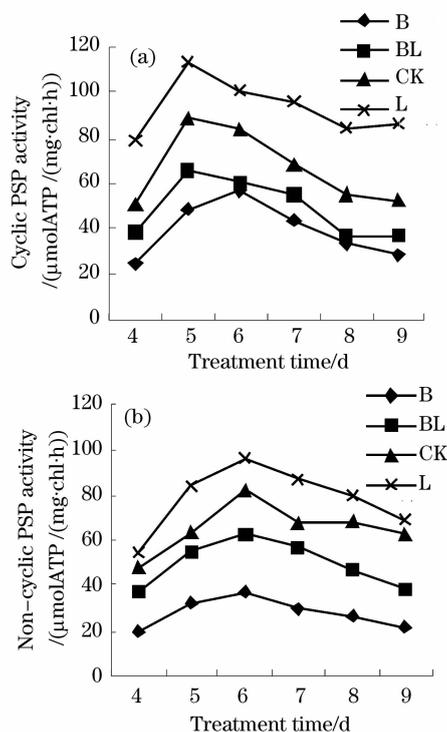


图 2 不同处理环式(a)和非环式(b)光合磷酸化活性

Fig.2 Activity of cyclic (a), non-cyclic (b)PSP by different treatments

不同处理非环式光合磷酸化活性结果如图 2 (b)所示,辐射第 6 d 时反应活性达到最大。辐射第 6 d 时,B 组非环式光合磷酸化活性升高达到 4 d 的 1.89%,但还是低于 CK 组($t_{CK,B} = 24.15, P < 0.01$);而 L 组反应活性升高达到 4 d 的 1.76%且高于 CK 组($t_{L,CK} = 7.21, P < 0.01$),均达到差异极显著。BL 组反应活性升高达到 4 d 的 1.68%,但还是明显低于 CK 组($t_{CK,BL} = 6.56, P < 0.01$);而高于 B 组($t_{BL,B} = 8.68, P < 0.01$),也均达到差异极显著。然后各处理组反应活性都逐渐下降且始终保持 $L > CK > BL > B$ 。说明 UV-B 辐射对小麦环式光合磷酸化活性有抑制作用,但对非环式光合磷酸化活性有更强烈的抑制。而 He-Ne 激光可以

部分恢复其活性,也是对非环式光合磷酸化的恢复能力更强一些。由此可知,He-Ne 激光和 UV-B 辐射主要影响非环式光合磷酸化活性。

两种类型的 ATPase 活性结果如图 3 所示。随着处理时间的延长,各处理组始终保持 L>CK>BL>B 的趋势,而且 Ca²⁺-ATPase 活性高于 Mg²⁺-ATPase 活性。

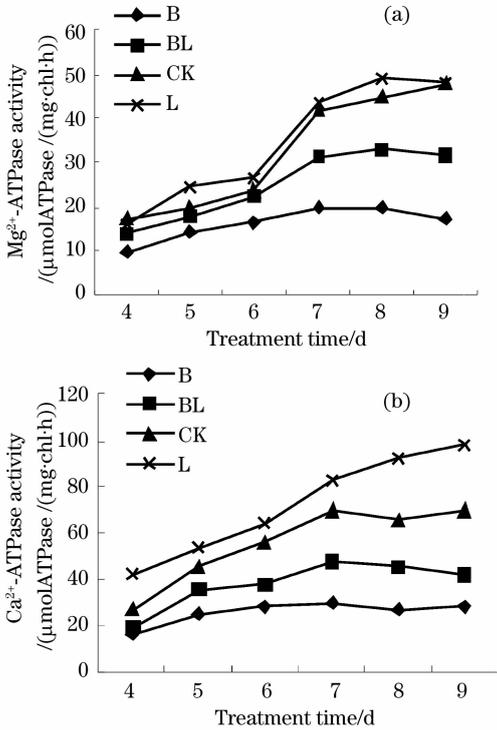


图 3 不同处理囊体膜 Mg²⁺-ATPase(a) 和 Ca²⁺-ATPase(b)活性

Fig.3 Activity of thylakoid membrane Mg²⁺-ATPase (a) and Ca²⁺-ATPase (b) by different treatments

不同处理 Mg²⁺-ATPase 活性结果如 3(a) 所示,B 组和 BL 组 ATPase 活性呈逐渐上升的趋势;而 L 组和 CK 组 ATPase 活性在处理第 7 d 时突然升高,然后呈缓慢上升的趋势。辐射第 9 d 时,B 组 ATPase 活性升高达到 4 d 的 1.73%,但还是低于 CK 组且差异极显著($t_{CK,B} = 18.11, P < 0.01$);而 L 组 ATPase 活性升高到 4 d 的 3.04%且高于 CK 组,但差异不显著($t_{L,CK} = 0.30, P > 0.05$)。BL 组 ATPase 活性升高到 4 d 的 2.28%,但还是明显低于 CK 组($t_{CK,BL} = 7.32, P < 0.01$),而高于 B 组($t_{BL,B} = 6.88, P < 0.01$),它们均达到差异极显著。

不同处理 Ca²⁺-ATPase 活性结果如 3(b) 所示,各处理组 ATPase 活性均呈逐渐上升的趋势。辐射第 9 d 时,B 组 Ca²⁺-ATPase 升高达到 4 d 的

1.72%,但还是低于 CK 组($t_{CK,B} = 17.89, P < 0.01$);而 L 组 ATPase 活性升高达到 4 d 的 2.31%且高于 CK 组($t_{L,CK} = 7.76, P < 0.01$),均达到差异极显著。BL 组 ATPase 活性升高达到 4 d 的 2.20%,但还是明显低于 CK 组($t_{CK,BL} = 8.86, P < 0.01$);而高于 B 组($t_{BL,B} = 4.74, P < 0.05$),它们也均达到差异显著。说明 UV-B 辐射对两种类型的 ATPase 活性都有抑制作用,但对 Mg²⁺-ATPase 有更强烈的抑制。而 He-Ne 激光可以部分恢复其活性,也是对 Mg²⁺-ATPase 有更强的恢复能力。由此可知,He-Ne 激光和 UV-B 辐射主要影响 Mg²⁺-ATPase 活性。

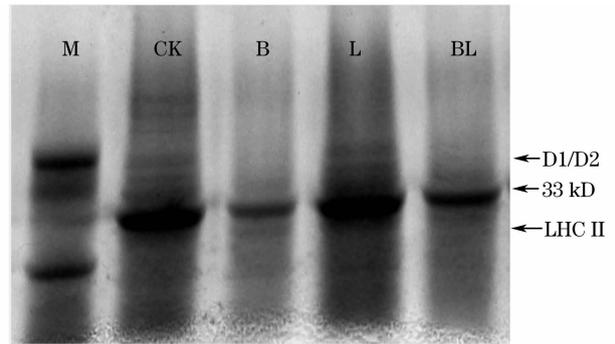


图 4 不同处理类囊体膜多肽组分的影响
Fig.4 Polypeptide components of thylakoid membranes by different treatments

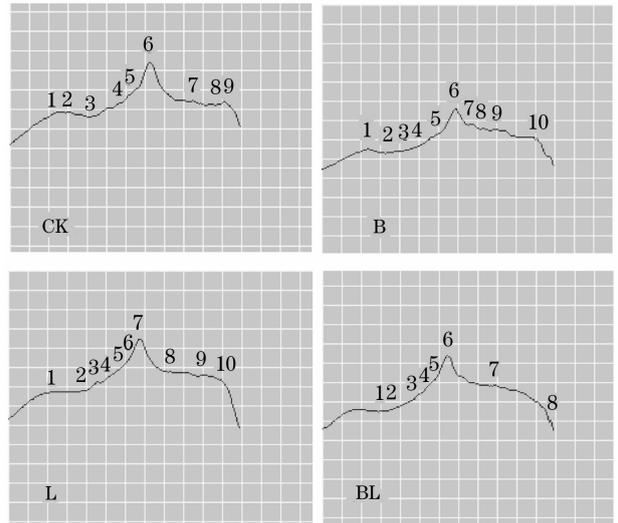


图 5 不同处理类囊体膜多肽组分 IOD 扫描图
Fig.5 IOD scanning of polypeptide components of thylakoid membranes by different treatments

不同处理小麦类囊体膜多肽组分聚丙烯酰胺(SDS-凝胶电泳)结果如图 4(M 为标准蛋白)所示,其电泳迁移率(Rf)值和积分光密度(IOD)值见表 2 (Lane 为电泳通道,Rows 为每个泳道的条带)。从

图 4,5 和表 2 可知,各处理组的类囊体膜都可分离出多条蛋白带,多肽组分大致没有发生明显的改变。各处理组大概位于 33 kD 处有一条明显的主带,代表着类囊体膜中捕光天线 LHC II 的外周蛋白,33 kD 锰稳定蛋白,以及 PS II 核心蛋白 D1/D2,分子量为 24~30 kD 的 LHC II 蛋白组分它们都有大致相同的变化趋势。与对照组(1183)比,UV-B 处理

组 IOD 值(630)减小,条带颜色变淡变细,多肽含量减小;He-Ne 激光处理 IOD 值(1598)增加,条带颜色变暗变粗,多肽含量增加;复合处理组 IOD 值(860)明显高于 UV-B 处理组(630),条带颜色变深变粗,多肽含量增加。说明 UV-B 处理后囊体膜多肽合成受到抑制,而一定剂量的 He-Ne 激光辐照解除了这种抑制。

表 2 不同处理类囊体膜多肽组分分析

Table 2 Analysis of pypeptide components of thylakoid membranes by different treatment

Lanes	Lane CK		Lane B		Lane L		Lane BL	
Rows	Rf	IOD	Rf	IOD	Rf	IOD	Rf	IOD
r1	0.38	55	0.37	40	0.36	38	0.41	12
r2	0.41	96	0.43	5	0.45	39	0.44	18
r3	0.49	24	0.49	15	0.49	45	0.51	17
r4	0.56	62	0.51	18	0.52	16	0.53	20
r5	0.60	55	0.58	34	0.56	77	0.57	78
r6	0.66	564	0.64	231	0.60	92	0.61	342
r7	0.79	85	0.68	70	0.63	584	0.75	358
r8	0.87	16	0.72	31	0.72	323	0.93	15
r9	0.89	226	0.75	129	0.82	215		
r10			0.89	57	0.88	169		

4 讨论

叶绿体类囊体膜是基本的光合膜系统,是光合作用的重要场所,包含有捕光并将光能转化为化学能所需的色素蛋白复合酶系统^[9]。Brandle 等^[10]认为 UV-B 辐射可导致叶绿体膜结构的破坏,并破坏了叶绿体的超微结构。本研究表明增强 UV-B 辐射引起小麦类囊体膜光吸收能力明显变小,可能是因为 UV-B 辐射导致类囊体膜电子传递受到抑制,从而引起基粒发育不良,类囊体数目减少,所以其光谱特性也随之发生了变化,最终造成整个光合系统的光合能力都受到抑制。

研究表明 UV-B 使光合磷酸化中电子传递受到抑制,明显影响光合磷酸化的速率。原因可能是 Vu 等^[11]认为环式磷酸化解偶联作用是导致光能转化效率降低的原因。另也有荧光学研究表明^[12],UV-B 抑制电子传出 PS II,可能 D1, D2 受损是引起电子传递能力减小的直接原因^[13,14],或与 ATP 合成酶含量、活性降低及细胞色素 f 受影响有关^[15]。本研究中 UV-B 辐射对非环式光合磷酸化有强烈的抑

制,由于非环式在光合磷酸化中占主要地位,所以造成光能转化成 ATP 的效率降低,使暗反应得不到足够的 ATP,从而阻抑了光合作用的进行。

增强 UV-B 造成 ATPase 活性下降,尤其是 Mg^{2+} -ATPase 活性的降低,可能对于维持逆境胁迫下类囊体膜的稳定性和光合作用的正常进行有利。这与唐旭东等^[16]研究结果基本一致,UV-B 引起微粒体 Ca^{2+} -ATPase, Mg^{2+} -ATPase 活性的降低,主要是由于 UV-B 导致了蛋白质色氨酸基团的光氧化,引起蛋白质结构变化^[17]。在增强 UV-B 胁迫下类囊体膜结合的酶也是 UV-B 伤害的最初对象之一,这就使得正常酶的合成与分解之间的平衡受到破坏。虽然微粒体与叶绿体不同,但二者均是膜系统,所以可能引起伤害机制是相似的。

UV-B 辐射引起捕光色素蛋白复合物的缺乏,导致类囊体膜结构的改变,从而减弱 PS I 和 PS II 的捕光能力,最终导致光合速率降低。已有研究表明由于 PS II 氧化侧链的锰簇复合物也参与了电子传递,33 kD 锰稳定蛋白在胁迫后减少会影响到电

子传递^[18]。也有研究已经表明:当热耗散等其他一些保护机制不能有效地保护光合结构时,D1 蛋白的修复可被看作是反应中心防御强光破坏的最后一道防线^[19]。本研究中激光增加了类囊体膜多肽的含量,从而影响了类囊体的各种特性,可能是激光加强了 D1 蛋白的修复。

5 结 论

激光已被应用于各个领域,如环境检测^[20]、卫星通信^[21]等。也已有许多关于激光作用于植物的研究报道^[22,23],如微生物突变株诱变修复^[24]、细胞损伤及修复^[25]、提高酶的活性以及增强植物的抗氧化性^[26]等。主要是因为激光可以产生磁场,磁场通过许多方式影响蛋白质、酶及生物分子的结构,从而导致生物活性的变化。He-Ne 激光是一种比较常用的低功率激光,对生物体具有穿透性,在其经过组织过程中不断地散射和衰减,激光辐射可影响到细胞功能,如增加 ATP 及蛋白合成,促进细胞运动和提高膜电位。

韩榕等^[27]研究证明 He-Ne 激光辐照可以部分修复 UV-B 对小麦的损伤。本研究结果表明,He-Ne 激光辐照对 UV-B 造成类囊体膜的破坏,ATPase 酶活性降低及光合磷酸化速率减弱都有一定的修复作用。可能是酶的光激活:一个光子可激活一个酶分子,激活酶分子转而又能产生成千上万个物质分子,这就是为引发光生物效应提供了巨大的放大倍数。也有人认为是通过蛋白质构型变化或某些片段的切除而实现的^[28]。这样激光处理组的生化代谢和光合作用的进程必然快于对照组。

参 考 文 献

- Zhang Qin, Han Rong. Effects of He-Ne laser and enhanced UV-B radiation on photochemical activities of chloroplasts in wheat (in Vitro)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3): 537~542
张琴,韩榕.增强 UV-B 辐射和 He-Ne 激光辐照对小麦离体叶绿体光化学活性的影响[J]. *光子学报*, 2008, **37**(3): 537~542
- Han Rong. Repair effects and mechanism of He-Ne laser irradiation on the wheat radiated by enhanced UV-B radiation [D]. Xi'an: Northwest University, 2002
韩榕. He-Ne 激光对小麦幼苗增强 UV-B 辐射损伤的修复效应及机理[D]. 西安:西北大学, 2002
- T. G. Dunahay, L. A. Staehelin, M. Saebert. Structural, biochemical and biophysical characterizations of four oxygen evolving photosystem II preparations from spinach [J]. *Biochemical et Biophysical Acta Biomembranes*, 1984, **764**:179~193
- Chen Yang, Zeng Fuli. Responses of photosynthetic electron transfer to water stress in cucumber leaves[J]. *Acta Botanica*

- Boreali-Occidentalia Sinica*, 2001, **21**(3):456~461
陈阳,曾福礼. 黄瓜叶片光合电子传递对水分胁迫的响应[J]. *西北植物学报*, 2001, **21**(3):456~461
- Li Youze, Wei Jiamian. Measurement of chloroplast photophosphorylation activity[A]. *A Guide of Modern Plant Physiological Experiment*[M]. Beijing: Science Press, 1999. 106~107
李有则,魏家绵. 叶绿体光合磷酸化活性测定[A]. *现代植物生理学实验指南*[M]. 北京:科学出版社, 1999. 106~107
- Huang Zuohui. Measurement of activity of ATPase[A]. *Plant Physiology Experiment Handbook* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985. 111~115
黄卓辉. 叶绿体偶联因子腺苷三磷酸酶(ATPase)活力的测定[A]. *植物生理学实验手册*[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1985. 111~115.
- U. K. Laemmli. Cleavage of structural proteins during the head of faceriphage T4[J]. *Nature*, 1970, **227**:680~685
- Lu Congming, Zhang Qide. The effects of water stress on distribution of excitation energy and efficiency of primary conversion of light energy of photosystem II in wheat chloroplasts[J]. *Acta Biophysica Sinica*, 1995, **11**(1):83~88
卢从明,张其德. 水分胁迫对小麦叶绿体激发能分配和光系统 II 原初光能转换的影响[J]. *生物物理学报*, 1995, **11**(1):83~88
- Jian Lingcheng. New progress in the study of cold resistance in plant[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1992, **9**(3):17~22
简令成. 植物抗寒机理研究的新进展[J]. *植物学通报*, 1992, **9**(3):17~22
- J. R. Brandle, W. F. Campbell, W. B. Sisson *et al.*. Net photosynthesis electron transport capacity and ultrastructure of Pisum sativum L. exposed to ultraviolet-B radiation[J]. *Plant Physiol.*, 1977, **60**(1):165~169
- C. V. Vu, L. H. Allen. Effects of supplemental UV-B radiation on primary photosynthetic carboxylating enzymes and soluble proteins in leaves of C3 and C4 crop plants[J]. *Physiol. Plant*, 1982, **55**:11~15
- Paul R. Battaklia. Differential effects of short-term exposure to ultraviolet-B radiation upon photosynthesis in cotyledons of a resistant and a susceptible species[J]. *Int. J. Plant Sci.*, 2000, **161**(5):771~778
- M. I. Wilson, B. M. Greenberg. Protection of the D1 photosystem II reaction center protein from degradation in ultraviolet radiation following adaptation of Brassica napus L. to growth in ultraviolet-B [J]. *Photochem. Photobiol.*, 1993, **57**:556~563
- T. S. Bubu, Mak Jansen. Amplified degradation of photosystem II D1 and D2 proteins under a mixture of photosynthetically active radiation and UV-B radiation: dependence on redox status of photosystem[J]. *Photochem. Photobiol.*, 1999, **69**: 553~559
- A. Strid, W. S. Chow. Effects of supplementary ultraviolet-B radiation on photosynthesis in Pisum sativum [J]. *J. Chem. Biophys. Acta*, 1990, **1020**:260~333
- Tang Xudong, An Lizhe, Wang Xunling. Effects of enhanced UV-B radiation on properties of microsomal membrane of broad bean leaves[J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1998, **24**(2): 171~176
唐旭东,安黎哲,王勋陵. 增强 UV-B 辐射对蚕豆叶片微粒体膜一些性质的影响[J]. *植物生理学报*, 1998, **24**(2):171~176
- Walrant, Santus R.. Ultraviolet and N-formylkynurenine sensitized photoinactivation of bovine carbonic anhydrase an internal photodynamic effect[J]. *Photochem. Photobiol.*, 1974, **20**:455~460
- F. A. Wollman, L. Minai, R. Nechushtai. The biogenesis and assembly of photosynthetic proteins in thylakoid membranes [J]. *Biochim. Biophys. Acta*, 1999, **1411**(1):21~85

- 19 Yiping Chen, Ming Yue, Xunling Wang. Influence of He - Ne laser irradiation on seeds thermodynamic parameters and seedlings growth of *Isatis indogotica*[J]. *Plant Science*, 2005 **168**: 601~606
- 20 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. Infrared absorption spectrometer of monitoring ambient methane[J]. *Acta Optica Sinica*. , 2006, **26**(1):67~70
阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧 等. 基于可调谐激光吸收光谱的大气甲烷监测仪[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1):67~70
- 21 Liang Bo, Zhu Hai, Chen Weibiao. Simulation of laser communication channel from atmosphere to ocean[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7):1166~1172
梁波, 朱海, 陈卫标. 大气到海洋激光通信信道仿真[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7):1166~1172
- 22 Qi Z., Yue M., Wang X. L.. Laser pretreatment protects cells of broad bean from UV-B radiation damage[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B-Biology*. , 2000, **59**: 33~37
- 23 G. Klebanov, A. B. Kapitanov, Y. A. Tessikin. The antioxidant properties of lycopene[J]. *Biol. Membr. (Mosc)*, 1998, (2): 22~28
- 24 Liu Jianlong, Liu Jianjun, Yang Liansheng. Study on the breeding of alkaline amylase producing strain by ultraviolet and He-Ne laser compound mutation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):138~142
刘建龙, 刘建军, 杨连生. 碱性淀粉酶菌株的紫外线和 He-Ne 激光复合诱变的研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):138~142
- 25 Hao Jinhua, Ma Xiaoli, Wang Xiaohua *et al.*. Repair effects and damage of cell of wheat seedlings exposed to enhanced ultraviolet-B radiation by He-Ne laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34** (11): 1594~1599
郝金花, 马晓丽, 王小花 等. He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射小麦细胞损伤及修复效应[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1594~1599
- 26 Hao Jinhua, Ma Xiaoli, Wang Xiaohua *et al.*. Effects of He-Ne laser on antioxidant systems of wheat seedlings exposed to ultraviolet-B radiation [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2007, **25**(4): 350~355
郝金花, 马晓丽, 王小花 等. He-Ne 激光对 UV-B 辐射小麦幼苗抗氧化系统的影响[J]. *武汉植物学研究*, 2007, **25**(4): 350~355
- 27 Han Rong, Yue Ming, Wang Xunling. The damage repair effects of He-Ne laser on wheat seedlings exposed to enhanced ultraviolet-B irradiation[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2002, **22**(2): 263~269
韩榕, 岳明, 王勋陵. He-Ne 激光对小麦幼苗增强 UV-B 辐射损伤的修复效应[J]. *西北植物学报*, 2002, **22**(2):263~269
- 28 Zhu Xinjun, Yue Ming. The effect of the laser on the plant and its mechanism [J]. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2006, **16**(4):182~184
朱新军, 岳明. 激光对植物的作用及其机理[J]. *科技情报开发与经济*, 2006, **16**(4):182~184