

He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射后 小麦幼苗光合作用的影响

高丽美, 李永锋, 韩榕

(山西师范大学 生命科学院, 山西 临汾 041004)

摘要: 以“晋麦 8 号”小麦幼苗为研究材料, 分别采用 He-Ne 激光(辐照剂量为 $5 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$)、增强 UV-B (辐照剂量为 $10.08 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)以及二者的复合辐照进行处理。循环处理不同天数(4、5、6、7、8 d)后, 利用电导仪、低温荧光测定法检测了小麦叶绿体电子传递速率、膜透性和荧光发射光谱的变化; 采用紫外分光光度计法分别测量了小麦叶肉细胞磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPC)、碳酸酐酶(CA)、乙醇酸氧化酶(GO)、苹果酸脱氢酶(MDH)、叶绿素酶(chlase)和 ATPase 的活性。结果表明: 增强 UV-B 辐射会使叶绿体的电子传递速率、膜透性、PEPC、CA 和 ATPase 的活性下降, GO、MDH 和 chlase 的活性升高, 从而影响叶绿体激发能的分配, 导致光合作用活性降低; 而低剂量的 He-Ne 激光辐照可以部分修复增强 UV-B 辐射对小麦叶绿体光合作用活性引起的损伤。

关键词: He-Ne 激光; UV-B 辐射; 小麦; 电子传递速率; 光合作用

中图分类号: Q945 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2011)01-0117-07

Effects of He-Ne laser on photosynthesis of wheat seedlings exposed to enhanced UV-B radiation

GAO Li-Mei, LI Yong-Feng, HAN Rong

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

Abstract: The wheat seedlings(jinmai 8) were 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 He-Ne laser irradiation and enhanced UV-B radiation. After being treated for different days(4,5,6,7,8 d)circularly, the changes of the rate of electron transport and relative permeability of chloroplasts membrane, fluorescence emission spectrum were tested with electric conductor and low temperature fluorescence spectrometry. The activities of phosphoenolpyruvate carboxylase(PEPC), carbonic anhydrase(CA), glycolate oxidase(GO), malate dehydrogenase(MDH), chlorophyllase(chlase)and ATPase were measured by photometer. The results showed that the rate of electron transport, the activities of PEPC, CA and ATPase had declined by enhanced UV-B radiation. However, the relative permeability of chloroplasts membrane, the activities of GO, MDH and chlase had increased by enhanced UV-B radiation. Distribution of excitation energy also changed. So the photosynthetic activities of chloroplasts were almost lost. However, the certain dose of He-Ne laser irradiation could partly repair these damages induced by enhanced UV-B radiation.

Key words: He-Ne laser; UV-B; wheat; the electron transport rate; photosynthesis

臭氧层被破坏导致的 UV-B 辐射增强, 引起了科学界的广泛关注(张富存等, 2003)。近几年, 国内外学者对紫外线辐射增强对农作物的影响已进行了大量研究, 结果发现紫外线辐射增强会大大影响农

收稿日期: 2010-03-21 修回日期: 2010-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(37671061); 山西省自然科学基金(2008011059-1)[Supported by the National Natural Science Foundation of China (30671061); Nature Science Foundation of Shanxi Province(2008011059-1)]

作者简介: 高丽美(1979-), 女, 山西省昔阳人, 硕士, 主要从事植物分子细胞生物学研究, (E-mail)limeigao1122@126.com.

作物的生长发育,具体体现为 UV-B 辐射会使作物植株矮化、株型缩小,抑制根、茎、叶的生长和干物质的积累,改变根冠比、解除顶端优势,推迟作物生长发育进程等。另外,紫外线辐射增强还会极大地抑制作物的净光合速率和蒸腾速率等生理生化效应(郑有飞等,1996)。目前及今后,如何修复由于 UV-B 增强对作物导致的辐射损伤是一个急需解决的问题。较高的有效光合辐射(PAR)、CO₂ 浓度和较低的 N 浓度能减少 UV-B 辐射增强对作物的损伤效应(赵广琦等,2003)。然而,紫外吸收物则能有效阻止 UV-B 增强对植物细胞造成的辐射损伤(Robberecht 等,1980)。一定剂量的激光辐照能加速植物的新陈代谢和生长(Robberecht 等,1980; Klebanov 等,1998)。

叶绿体是植物细胞进行光合作用的重要场所,而叶绿体电子传递速率、色素蛋白、光合作用碳同化相关酶等则是光合作用过程中的关键物质成分。UV-B 辐射增强会造成小麦生长和产量明显下降,其原因之一可能与小麦幼苗叶片的光合能力下降有关(孙林等,2004)。增强 UV-B 辐射和 He-Ne 激光对植物体生长发育(Qi 等,2002),基因组 DNA(Han 等,2002a,b,2003),叶绿体的活性(Zhang 等,2006a,b)具有损伤和修复效应,UV-B 辐射和 He-Ne 激光会影响小麦体细胞分裂的发生(韩榕等,2002),缓解膜脂过氧化作用(王小花等,2008),影响小麦幼苗糖代谢途径(张娟等,2008)等。而关于增强 UV-B 辐射和 He-Ne 激光辐照对叶绿体光合作用各类关键酶以及荧光激发能分配等方面的影响,至今还未见报道(张琴等,2008)。因此,本研究试图通过对正常条件下小麦植株和增强 UV-B 辐照及 He-Ne 激光辐照后的小麦植株叶片中的各类光合作用相关因子的活性和含量进行检测,研究 UV-B 辐射增强引起小麦产量下降的原因,以进一步探讨 He-Ne 激光对光合作用系统的修复效应及其机制,从而为生产实践提供一定的理论基础和实践指导。

1 材料和方法

1.1 研究材料

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

1.2 研究方法

1.2.1 材料处理设置 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。各组具体处理方法如表 1 所示。

表 1 各处理组的设置及处理程序
Table 1 The establishment and treatment procedure of different groups

处理组 Treatment	光照 Light (h/d)	UV-B 辐射 UV-B radiation (h/d)	激光辐照 He-Ne laser irradiation (min/d)	暗培养 Dark culture (h/d)
CK	8	—	—	16
B	8*	8	—	16
BL	8*	8	2	16
L	8	—	2	16

注: * 与 UV-B 辐射同时进行。

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

1.2.2 种子的萌发 选取籽粒饱满,大小均一的小麦种子,经 0.1% 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℃ 条件下培养,待种子露白时处理。

1.2.3 增强 UV-B 辐射处理 UV-B 辐射剂量为 10.08 kJ·m⁻²·d⁻¹,采用紫外辐照计(UV-B 型,北师大光电仪器厂)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,30W,297nm),将其垂直悬于培养皿的上方,通过调整 UV-B 灯与植物培养皿之间的距离控制 UV-B 辐射的剂量。

1.2.4 He-Ne 激光辐照 西北大学光电研究所制造的 He-Ne 激光器(MSHN-A-B450MM)波长 632.8 nm,光斑直径 2 mm。通过可溶性蛋白含量的测定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℃ 条件下继续培养。

1.2.5 小麦叶绿体膜相对透性的测定 参考王邦锡等(1995)方法,将叶绿体反应液离心获得叶绿体沉淀,悬浮于 0.4 mol/L 甘露醇中 2 h,用 DDS-11A 电导仪测定叶绿体悬浮液煮沸前后的电导率,以样品煮沸后电导率占煮沸前电导率的百分比表示叶绿体膜相对透性。

1.2.6 小麦叶绿体电子传递速率的测定 用 Clark 氧电极仪按 Tripathy & Monhanty(1980)法测定。

1.2.7 小麦叶绿体各类酶活性的测定 磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPC)按 Sayre 等(1979)方法稍做改进制备酶的提取液进行提取,活性的测定用

Blanke 等(1992)酶偶联法测定。参照朱广廉等(1990)的方法提取乙醇酸氧化酶(GO)。苹果酸脱氢酶(MDH)参考 Soussi 等(1998)方法提取。碳酸酐酶(CA)活力的测定采用 pH 计法(Wilbur 等, 1948)。叶绿素酶(chlase)的提取参照 Minguez Mosquera 等(1994)的方法, Chlase 活性测定参照 Amir Shapira 等(1987)的方法。ATP 酶活性的测定参考张志良等(2002)方法略加改进。

1.2.8 叶绿体荧光光谱分析 采用日本产 Model F-2500 型荧光分光光度计测定低温小麦叶绿体发射光谱, 激发波长为 480 nm, 激发缝宽 10 nm, 发射缝宽 5 nm。

1.3 数据统计与分析

各相关因子含量或活性测定重复 3 次, t 检验进行差异显著性比较, 其中 $P < 0.05$ 表示差异显著; $P < 0.01$ 表示差异极显著; $P > 0.05$ 表示差异不显著。

2 结果与分析

2.1 He-Ne 激光和 UV-B 辐射对小麦叶绿体膜透性的影响

通过对反应膜相对透性的膜电导率测定(图 1), 结果表明, He-Ne 激光辐照小麦幼苗能使叶绿体膜电质泄漏率显著下降($P < 0.05$), 可能由于 He-Ne 激光的辐照能清除具毒害作用的活性氧自由基, 防止膜脂质过氧化。而 UV-B 处理后膜电导率显著增加($P < 0.05$), Philip 等(1996)研究也表明 UV-B 辐射引起膜的离子泄漏, 这与该研究的结果一致。每天经过 UV-B 处理后再用 He-Ne 激光照射 2 min(BL 组), 激光处理会使膜电导率比 B 组有所降低, 差异显著($P < 0.05$), He-Ne 激光对膜的最终效应是减小 UV-B 辐射造成的膜电解质泄漏率。

2.2 He-Ne 激光和 UV-B 辐射对小麦叶绿体电子传递速率的影响

图 2 显示, 与 CK 组比较, L 组电子传递速率增加 14.6%, 说明 He-Ne 激光处理可以提高叶绿体的电子传递速率; B 组电子传递速率降低 46.5%, UV-B 辐照抑制叶绿体的电子传递速率, 可能是 UV-B 辐射引起膜的离子泄漏, 从而影响电子传递; BL 组与 B 组相比较, 电子传递速率增加 28.2%, 说明 He-Ne 激光可以从一定程度上减小由于增强 UV-B 辐射引起的电子传递速率的抑制程度。

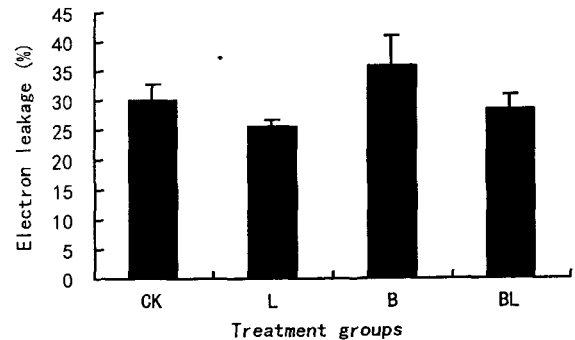


图 1 不同处理组电介质泄漏率

Fig. 1 Electrolyte leakage in different treatment

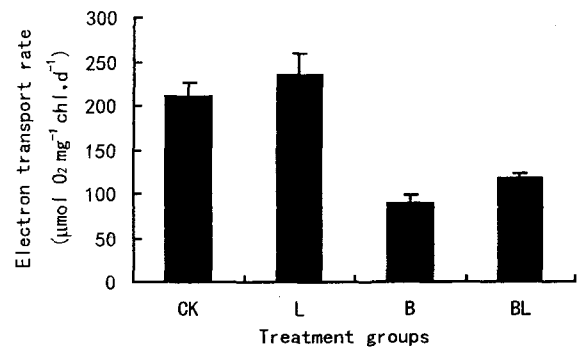


图 2 不同处理组电子传递速率

Fig. 2 Electron transport rates in different treatments

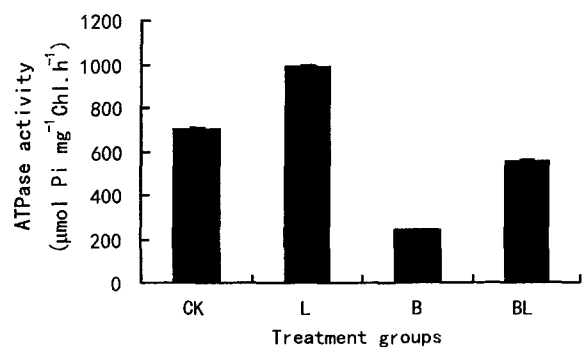


图 3 不同时间处理组的 ATP 酶活性变化

Fig. 3 ATPase activity in different treatments

2.3 He-Ne 激光和 UV-B 辐射对小麦光合作用各类酶活性的影响

从图 3 看出, 不同处理组中, 叶绿体 ATP 酶活性不同, 随着处理时间的延长, ATP 酶活性逐渐降低, 激光处理的 L 组比 CK 组的活性要高($P < 0.05$), 说明 He-Ne 激光对 ATP 酶具有激活作用, B 组 ATP 酶活性比 CK 组显著下降($P < 0.01$), 通过 UV-B 辐射处理后再经 He-Ne 激光辐照处理, 酶活性

会有所升高($P < 0.05$)。

不同处理组中,各处理组 PEPC 活性基本呈逐渐下降趋势。BL 组 PEPC 活性高于 B 组,但低于 CK 组(图 4)。辐射处理 8d 后,B 组 PEPC 活性下降到处理 4 d 后的 8.93%,与 CK 组相比较($t_{CK,B} = 3.5, P < 0.05$)差异显著;L 组 PEPC 活性降低到处理 4 d 后的 69.23%,相对 CK 组($t_{L,CK} = 3.88, P > 0.05$),差异不显著。BL 组较 CK 组($t_{CK,BL} = 3.53, P < 0.05$)活性低,且差异显著;较 B 组($t_{BL,B} = 1, P > 0.05$)活性高,且差异不显著。因此,增强 UV-B 辐射会抑制小麦幼苗 PEPC 活性,He-Ne 激光辐照可以部分修复这种抑制作用。

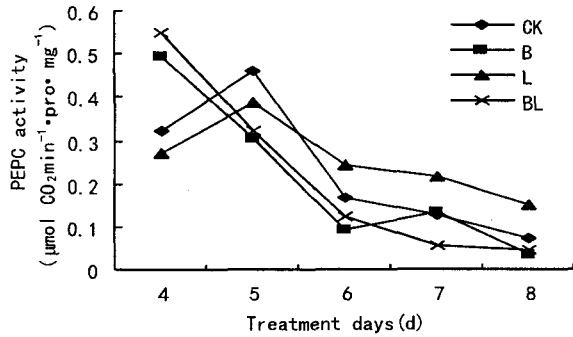


图 4 He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射小麦 PEPC 酶活性的影响

Fig. 4 Effects of He-Ne laser on PEPC activity of wheat seedling exposed to enhanced UV-B radiation

随着处理时间的延长,小麦幼苗 GO 活性变化均呈逐渐上升趋势,且变化幅度基本保持 $L > BL > B > CK$ 。辐射处理 8 d 时,B 组 GO 活性高于 CK 组($t_{B,CK} = 3.67, P < 0.05$);L 组高于 CK 组($t_{L,CK} = 4.14, P < 0.05$),均表现为差异显著。BL 组 GO 活性高于 CK 组($t_{BL,CK} = 6.32, P < 0.01$);低于 B 组($t_{B,BL} = 9.25, P < 0.01$),均表现为差异极显著(图 5)。UV-B 辐射使小麦叶片 GO 活性明显升高,He-Ne 激光辐照则具有部分修复作用。

UV-B 辐射和 He-Ne 激光辐照对小麦 MDH 活性的影响类似 GO 活性的变化(图 6)。随着 UV-B 辐射时间延长,MDH 活性会升高,且变化幅度为 $B > BL > CK > L$ 。辐射处理 8 d 时,B 组 MDH 活性高于 CK 组($t_{B,CK} = 0.74, P > 0.05$);L 组 MDH 活性低于 CK 组($t_{CK,L} = 1.14, P > 0.05$),差异均不显著。BL 组 MDH 活性略高于 CK 组($t_{BL,CK} = 0.38, P > 0.05$);略低于 B 组($t_{B,BL} = 0.35, P > 0.05$),均表现差异不显著。He-Ne 激光辐照对其修复效应

较对 GO 活性的影响小。

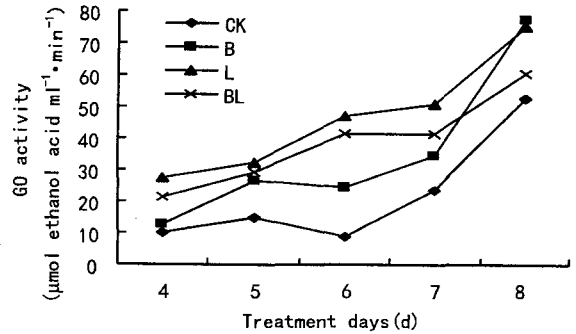


图 5 He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射小麦 GO 酶活性的影响
Fig. 5 Effects of He-Ne laser on GO activity of wheat seedling exposed to enhanced UV-B radiation

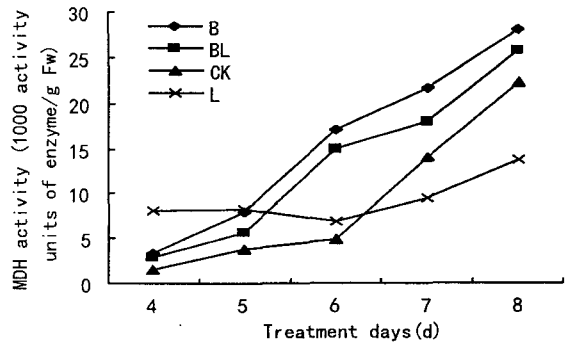


图 6 He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射小麦 MDH 酶活性的影响

Fig. 6 Effects of He-Ne laser on MDH activity of wheat seedling exposed to enhanced UV-B radiation

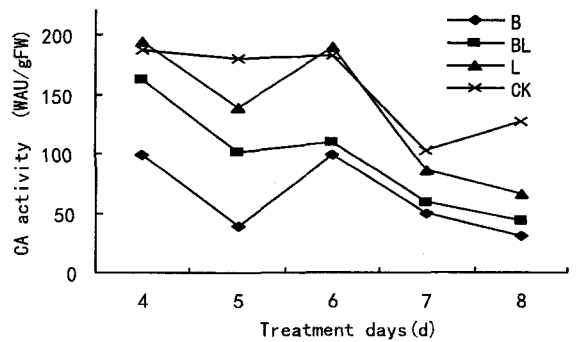


图 7 He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射小麦 CA 酶活性的影响
Fig. 7 Effects of He-Ne laser on CA activity of wheat seedling exposed to enhanced UV-B radiation

UV-B 辐射和 He-Ne 激光辐照对小麦 CA 活性的影响类似 PEPC 活性的变化(图 7)。CK 组和 L 组中,CA 活性变化基本相似。BL 组中 CA 活性始终高于 B 组,明显低于 CK 组。

不同处理组小麦幼苗 chlase 活性变化如图 8 所示。各处理 6 d 前变化不大,随着辐射处理延长,各处理组第 6 天后 chlase 活性均呈上升趋势,且变化幅度表现为 $B > BL \approx CK > L$ 。辐射处理 8 d 后, B 组中 chlase 活性略高于 CK 组 ($t_{B,CK} = 2.81, P > 0.05$); L 组中 chlase 活性略低于 CK 组 ($t_{CK,L} = 3.93, P > 0.05$),均表现为差异不显著。BL 组 chlase 活性略高于 CK 组 ($t_{BL,CK} = 0.41, P > 0.05$),差异不显著;但低于 B 组 ($t_{B,BL} = 3.20, P < 0.05$),差异显著。由此可见,UV-B 辐射会使小麦叶片 chlase 活性升高,而 He-Ne 激光辐照可部分抑制 chlase 活性。

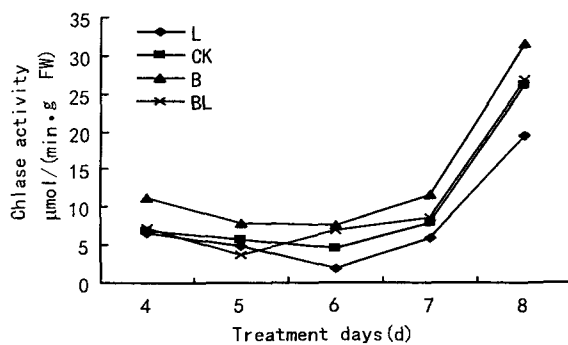


图 8 He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射小麦 chlase 酶活性的影响

Fig. 8 Effects of He-Ne laser on chlase activity of wheat seedling exposed to enhanced UV-B radiation

2.4 He-Ne 激光和 UV-B 辐射对小麦叶绿体激发能分配的影响

小麦叶绿体在低温下有两个荧光发射峰,分别位于 685 nm 和 736 nm 处。F685(686)与光系统 II 有关,而 F736(743)来源于光系统 I 天线色素蛋白复合物。图 9 结果表明,He-Ne 激光辐照和增强 UV-B 辐射对小麦叶绿体发射峰有影响。与 CK 组相比,L 组的 F685/F736 增加,说明 He-Ne 激光辐照对光系统 II 的影响更大些。B 组的 F685/F736 变小,说明 UV-B 胁迫减少了激发能从捕光色素蛋白复合物向光系统 II 的传递;BL 组的 F685/F736 比 B 组有所升高。因而,He-Ne 激光能够减小由于增强 UV-B 辐射引起的激发能分配的改变程度。

3 讨论

叶绿体是植物体细胞重要的产能细胞器。光合作用则是进行能量转化的主要途径,通常情况下,叶绿体光合作用的效率直接影响植株个体的生长发育

状况。然而,制约植物细胞光合作用发生过程的因素是多方面的。首先,光合作用会受到细胞内多种酶的调控。在植物体中,不仅存在大量的 RuBP 羧化酶(RuBPC),还分布有 PEP 羧化酶(PEPC)、苹果酸脱氢酶(MDH)、乙醇酸氧化酶(GO)、碳酸酐酶(CA)、叶绿素酶、ATPase 等多种碳代谢的相关酶(Hibberd 等,2002;Sheehy 等,2000),这些酶的活性和代谢的发生都影响和制约着光合作用的有效进行。本研究发现,与对照组相比,增强 UV-B 辐射后,小麦叶片细胞中的 PEPC、CA 和 ATPase 的活性下降,GO、MDH 和 chlase 的活性升高。因此,增强 UV-B 辐射对酶活性的影响可能是引起光合作用效率下降的关键因素之一。

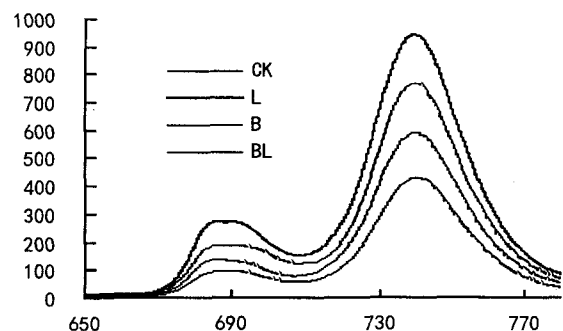


图 9 不同处理组的叶绿体荧光的发射光谱,包括 CK 组,L 组,B 组,BL 组,激发波长为 480 nm

Fig. 9 Effects of different treatments on the fluorescence emission spectra of chloroplasts isolated from wheat, excitation wavelength at 480 nm

其次,类囊体膜的生理特征和电子传递效率会影响光合作用的发生。类囊体膜是植物进行光合放氧的重要器官,类囊体膜上存在着活跃的电子传递体系。UV-B 照射叶绿体时可能会产生更多的活性氧,氧化胁迫下叶绿体的功能与结构直接受到活性氧的损伤,引起 PSII 的放氧活性的丧失,天线组分和反应中心蛋白组分相应减少,PSII 光合反应中心被破坏(Hideg 等,1996;Murphy 等,1975;习岗等,2005),电子传递过程受到严重抑制。Mateja 也认为 UV-B 辐射能使叶绿体电子传递明显制止。而 Sreeus 等(1994)发现,UV-B 辐照叶绿体的一个更早期的后果是类囊体膜的离子渗透性增加,这一现象导致类囊体跨膜的电动势减少或消失。这种低离子渗透性的恢复很慢,表明可能有一个来自电子传递的部分非偶联的 ATP 合成。对于一个需要修复的系统,有限的 ATP 供应对于 ATP 依赖的蛋白质

合成、转运及装配的影响将是十分严重的(张琴等, 2008), 进而使植物光合作用效率受抑。该研究采用 $10.08 \text{ KJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的增强 UV-B 辐射处理小麦细胞叶绿体, 结果表明, 经过增强 UV-B 辐射处理后, 叶绿体膜的相对透性也会增强, 电子传递速率会明显降低, 同时还会影响叶绿体中激发能的分配和光合膜的物理特性, 从而导致细胞光合作用活性丧失。

颜红金等(2001)则指出, 激光光子能代替酶激活 ATP 产生, 进而恢复类囊体膜 ATP 酶活性, 并产生有关的生物效应。本研究利用 He-Ne 激光辐照缓解由增强的 UV-B 辐照引起的 ATP 短缺, 提供一定量的 ATP 分子, 从而促进光合作用系统修复。BL 组的研究结果表明, 与 B 组结果比较, PEPC、CA 和 ATPase 的活性显著升高, GO、MDH 和 chlase 的活性则明显下降, 光合膜的渗透性下降, 电子传递速率增强。因此, 低剂量的 He-Ne 激光辐照可以部分修复增强 UV-B 辐射对小麦叶绿体引起的生理损伤。He-Ne 激光可能是通过电磁效应发生作用。它可以通过多种方式影响蛋白质、酶及其它生物分子的结构和组成, 从而导致酶活性的变化(Qi 等, 2000; 蔡素雯等, 1994; 韩榕等, 2001)。利用 He-Ne 激光和增强 UV-B 处理离体叶绿体, 有利于探索 He-Ne 激光对损伤叶绿体的修复程度和修复机理。利用人工的方法修复由于 UV-B 辐射引起叶绿体损伤的研究, 对工农业生产的发展、生态环境保护以及深入研究光合作用的机理都具有重要的理论和实际意义。

参考文献:

朱广廉, 钟海文, 张爱琴. 1990. 乙醇酸氧化酶(GO)活性的测定 [M]//朱广廉. 植物生理学实验. 北京: 北京大学出版社: 76-79

Amir Shapira D, Crolschmidt EE, Altman A. 1987. Chlorophyll catabolism in senescing plant tissue; *In vivo* breakdown intermediates suggest different degradative pathways for Citrus fruit and parsley leaves[J]. *Froc Nat Accad Sci USA*, **84**: 1 901-1 905

Blanke MM, Ebert G. 1992. Phosphoenolpyruvate carboxylase and carbon economy of apple seedlings[J]. *J Exper Bot*, **43** (252): 965-968

Cai SW(蔡素雯), Zhao XS(赵雪松), Lu FT(卢风涛). 1994. The influence of He-Ne laser irradiation on the active oxygenmetabolism of corn seedlings(He-Ne 激光辐照对玉米幼苗活性氧代谢的影响)[J]. *Chin J Lasers*(中国激光), **21**(9): 767-769

Germ M, Kreft I, OSVALD J. 2005. Influence of UV-B exclusion and selenium treatment on photo-chemical efficiency of photosystem II, yield and respiratory potential in pumpkins(*Cucurbita pepo*)[J]. *Plant Physiol Biochem*, **43**(5): 445-448

Han R, Wang XL, Yue M. 2002. Influence of He-Ne laser irradiation

on the excision repair of cyclobutyl pyrimidine dimers in the wheat DNA[J]. *Chin Sci Bull*, **47**(6): 435-438

Han R(韩榕), Wang XL(王勋陵), Yue M(岳明), et al. 2002. Effects of the enhanced UV-B radiation on the body cell mitosis of the wheat(增强 UV-B 辐射对小麦体细胞分裂的影响)[J]. *Acta Genet Sin*(遗传学报), **29**(6): 537-541

Han R(韩榕), Wang XL(王勋陵), Yue M(岳明). 2002. Influence of He-Ne laser irradiation on the damage and repair of wheat seedling by enhanced UV-B radiation(He-Ne 激光对小麦 DNA UV-B 损伤修复的影响)[J]. *Chin J Lasers*(中国激光), **29**(9): 859-863

Han R(韩榕), Wang XL(王勋陵), Yue M(岳明). 2001. The Influence of He-Ne laser irradiation on the damage and repair of wheat seedlings by enhanced UV-B radiation(He-Ne 激光对小麦幼苗增强 UV-B 辐射损伤修复的影响)[J]. *Acta Photo Sin*(光子学报), **30**(10): 1 182-1 187

Han R(韩榕), Wang XL(王勋陵), Yue M(岳明). 2003. The influence of He-Ne laser irradiation on unscheduled DNA synthesis in the wheat seeds damaged by enhanced UV-B radiation(He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射损伤小麦 DNA 非按期合成的影响)[J]. *Acta Agron Sin*(作物学报), **29**(4): 633-636

Hideg E, Vass I. 1996. UV-B induced free radical production in plant leaves and isolated thylakoid membranes[J]. *Plant Sci*, **115**(2): 251-260

Hibberd JM, Quick WP. 2002. Characteristics of C4 photosynthesis in stems and petioles of C3 flowering plants[J]. *Nature*, **415**: 451-453

Juszczak IM, Rychter AM. 2002. Pyruvate accumulation during phosphate deficiency stress of bean roots[J]. *Plant Physiol Biochem*, **40**(9): 783-788

Klebanov G, Kapitanov AB, Tessikin YA. 1998. The antioxidant properties of lycopene[J]. *Biologicheskije Membrany Moscow*, **2**: 22

Minguez mosquera MI, Gandulrojas B, Gallardo-guerrero LG. 1994. Measurement of chlorophyllase activity in olive fruit(*Olea europaea*)[J]. *Biochem*, **116**: 263-268

Murphy TM, Will ekens H. 1975. Inhibition of protein synt hesis in cultured tobacco cells by radiation[J]. *Photochem Photobiol*, **21**(4): 219-225

Qi Z, Yue M, Wang XL. 2000. Laser pretreatment protect cells of broad bean from UV-B radiation damage [J]. *J Photochem Photobiol B; Biology*, **59**(123): 33-37

Qi Z, Yue M, Han R, et al. 2002. The damage repair role of He-Ne laser in plant exposed to different intensities of ultraviolet-B irradiation[J]. *Photochem & Photobiol*, **75**(6): 680-686

Robberecht R, Caldwell MM, Billings DW. 1980. Leaf ultraviolet optical properties along a latitudinal gradient in the arctic-alpine life zone[J]. *Ecology*, **61**: 612-619

Sayre RT, Kennedy RA. 1979. Photosynthetic enzyme activities and localization in *Mollugo verticillata* populations differing in the leaves of C3 and C4 cycle operation[J]. *Plant Physiol*, **64**: 293-299

Sheehy JE, Mitchell PL, Hardy B. 2000. Redesigning rice photosynthesis to increase yield[J]. *Phillippines; Elsevier Science*, 193-204

Soussi M, Ocana A, Liuch C. 1998. Effects of salt stress on growth,

- photosynthesis and nitrogen fixation in chick-pea(*Cicer arietinum*) [J]. *J Exper Bot*, **49**(325):1 329—1 337
- Sreeus A, Chow WS, Andreson JM. 1994. UV-B damage and protection at the molecular level in plants[J]. *Photo Res*, **39**:475—489
- Sun L(孙林), Huang HS(黄海山), Zhao XY(赵秀勇), et al. 2004. Effects of enhanced UV-B radiation on growth, development and yield of winter wheat(UV-B 辐射增强对冬小麦生长发育及产量的影响)[J]. *Rural Eco-Environ*(农村生态环境), **20**(2):24—27
- Tripathy BC, Mothanty P. 1980. Zinc-inhibited electron transport of photosynthesis in isolated barley chloroplasts [J]. *Plant Physiol*, **66**(6):1174—117
- Van hasselt PR, Wsh SC, Anderson JM. 1996. Short-term treatment of pea leaves with supplementary UV-B at different oxygen concentrations; impacts on chloroplast and plasma membrane bound processes[J]. *Plant Sci*, **120**(1):12—19
- Wang BX(王邦锡), Zhou GS(周国顺), Huang JC(黄久常). 1995. Effects of water stress on membrane lipid peroxidation of chloroplasts and thylakoid in wheat seedling(水分胁迫对小麦叶绿体和类囊体膜脂过氧化的影响)[J]. *Radical Life Sci Progress*(自由基生命科学进展), **3**:58—63
- Wang XH(王小花), Han R(韩榕). 2008. The alleviating effects of He-Ne laser on membrane lipid peroxidation in wheat seedling exposed to enhanced ultraviolet-B irradiation(He-Ne 激光对 UV-B 辐射下小麦幼苗膜脂过氧化的缓解作用)[J]. *Acta Laser Biol Sin*(激光生物学报), **17**(3):355—360
- Wibur KM, Anderson NG. 1948. Electrometric and colorimetric determination of carbonic anhydrase [J]. *J Biol Chem*, **17**(6):147—154
- Xi G(习岗), Li Y(李英), Cao YJ(曹永军). 2005. The difference of chlorophyll fluorescence dynamics process and the system of photosynthetic pigment in leaf of spinach and tobacco under the action of low level microwave electromagnetic field(低强度微波电磁场作用下菠菜和烟草光合细胞叶绿素荧光动力学过程及光合色素系统的差异)[J]. *Acta Photo Sin*(光子学报), **34**(7):1 022—1 027
- Yan HJ(颜红金), Wang ZG(王之光). 2001. Effects of low intensity laser irradiation on antioxidative system in ageing mice(低强度激光照射对老龄小鼠的抗氧化系统的影响)[J]. *Acta Laser Biol Sin*(激光生物学报), **10**(3):131—133
- Zhang FC(张富存), He YH(何雨红), Zheng YF(郑有飞), et al. 2003. Effect of enhanced UV-B radiation on wheat(UV-B 辐射增强对小麦的影响)[J]. *J Nanjing Inst Meteorol*(南京气象学院学报), **26**(4):61—67
- Zhang J(张娟), Han R(韩榕). 2008. Effects of He-Ne laser on sugar metabolism of wheat seedling exposed to ultraviolet-B radiation(He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射小麦幼苗糖代谢的代谢)[J]. *Acta Laser Biol Sin*(激光生物学报), **17**(5):577—581
- Zhang Q, Han R. 2006. The damage repair effects of He-Ne laser on intact chloroplasts(*in vitro*) exposed to enhanced UV-B radiation[J]. *Cell Res*, **16**(12):S11
- Zhang Q, Han R, Zhang YY. 2006. Effects of enhanced UV-B and He-Ne laser on chloroplasts (*in vitro*) of wheat[J]. *Cell Res*, **16**(12):S12
- Zhang Q(张琴), Han R(韩榕). 2008. Effects of He-Ne laser and enhanced UV-B radiation on photochemical activities of chloroplasts in wheat(*in vitro*)(增强 UV-B 辐射和 He-Ne 激光对小麦离体叶绿体光化学活性的影响)[J]. *Acta Photo Sin*(光子学报), **37**(3):537—542
- Zhao GQ(赵广琦), Wang XL(王勋陵), Yue M(岳明), et al. 2003. The combined effects of enhanced UV-B radiation and CO₂ on the growth and photosynthesis of broad bean seedling(增强 UV-B 辐射和 CO₂ 复合作用对蚕豆幼苗生长和光合作用的影响)[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*(西北植物学报), **23**(1):6—10
- Zheng YF(郑有飞), Yang ZM(杨志敏), Yan JY(颜景义). 1996. Biological response of crops on enhanced solar ultraviolet radiation and its estimation(作物对太阳紫外线辐射增加的生物效应及其评估)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **7**(1):107—109

(上接第 116 页 Continue from page 116)

- tisense gene technology and its application in the plant research(反义基因技术及其在植物研究上的应用)[J]. *Biotechnology Bull*(生物技术通报), **4**:78—84
- Li MC(李明春), Liu L(刘莉), Hu GW(胡国武), et al. 2003. Expression of mortierella isabellina Δ -6-fatty acid desaturase gene in γ -linolenic acid production in transgenic tobacco(深黄被孢霉 Δ -6-脂肪酸脱脂酶基因在转基因烟草中的表达)[J]. *Chin J Biotech*(生物工程学报), **19**(2):178—184
- Tian MM(田苗苗), Zhou YQ(周延清), Niu JY(牛敬媛), et al. 2005. An efficient protocol for the isolation of genomic DNA from a single dry seed of soybean(单粒干燥大豆种子基因组 DNA 提取的有效方法)[J]. *Bull Biol*(生物学通报), **40**(10):38—39
- Thelen JJ, Ohlrogge JB. 2002. Metabolic engineering of fatty acid biosynthesis in plants[J]. *Metab Eng*, **4**:12—21
- Wang GL(王关林), Zhao SJ(赵树进), Wu XR(吴新容). 2001. Molecular marker technology and its development(分子标记技术及其发展)[J]. *Chem Life*(生命化学), **21**(4):39—42
- Wang QW(王全伟), Qu M(曲敏), Zhang HL(张海玲), et al. 2008. Cloning of bean chitinase gene and its expression in transgenic tobacco(菜豆几丁质酶基因 Bchi 的克隆及其在转基因烟草中的表达)[J]. *Plant Mol Breed*(分子植物育种), **6**(1):53—58
- Yang SH(杨式华), Wang BX(王保兴), Xu GW(许国旺), et al. 2008. Rapid determination of volatile and nonvolatile organic acids in tobacco by GC/MS(烟草中挥发性和非挥发性有机酸的快速测定)[J]. *J Anal Chem*(分析科学学报), **24**(2):167—171
- Zhou YQ(周延清). 2005. ISSR and RAPD-Based genetic diversity of soybean, rehmanna and yam, cloning of *fad* gene from soybean and its *Agrobacterium-mediated* transformation(ISSR 和 RAPD 分析、*fad* 基因克隆和农杆菌介导的遗传转化)[D]. Ph. D Dissertation of Northwest University(西北大学博士论文)