

文章编号: 0258-7025(2007)11-1594-06

He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射小麦细胞损伤及修复效应

郝金花¹, 马晓丽^{1,2}, 王小花¹, 韩 榕¹

(¹ 山西师范大学生命科学学院, 山西 临汾 041004; ² 晋中学院, 山西 榆次 030600)

摘要 采用 $5 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$ 的 He-Ne 激光, $10.08 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的太阳紫外线 B 辐射(UV-B)及二者的组合对晋麦 8 号小麦幼苗进行处理, 5 d 后测定小麦幼苗叶片中超氧阴离子的产生速率、丙二醛(MDA)含量、小麦幼苗叶片浸出液的紫外吸收值和电导率、可溶性蛋白含量及叶绿素含量的变化, 分析 He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射引起小麦损伤的修复效应。结果显示, 与 UV-B 辐射处理比较, He-Ne 激光辐照可使小麦幼苗叶片中超氧阴离子的产生速率减小, 丙二醛含量减少, 叶片浸出液的紫外吸收值和电导率降低, 可溶性蛋白质量分数增加到 76.66% 和叶绿素质量比升高至 1.79 mg/g 。表明超氧阴离子的产生速率、丙二醛、小麦幼苗叶片浸出液的紫外吸收值和电导率、可溶性蛋白、叶绿素变化同小麦幼苗损伤修复能力相关, 从而证明一定剂量的 He-Ne 激光可以部分修复增强 UV-B 造成小麦幼苗的辐射损伤。

关键词 医用光学与生物技术; He-Ne 激光; 小麦; UV-B 辐射; 修复效应

中图分类号 Q 631 **文献标识码** A

Repair Effects and Damage of Cell of Wheat Seedlings Exposed to Enhanced Ultraviolet-B Radiation by He-Ne Laser

HAO Jin-hua¹, MA Xiao-li^{1,2}, WANG Xiao-hua¹, HAN Rong¹

(¹ College of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004, China)

² Jinzhong University, Yuci, Shanxi 030600, China

Abstract The seedlings of wheat (Jinmai 8) were exposed to He-Ne laser with $5 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$ power density, enhanced ultraviolet-B radiation (UV-B) ($10.08 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) and the combination of He-Ne laser and enhanced UV-B radiation respectively for 5 days. Changes about production rate of superoxide anion, malondialdehyde (MDA) content, ultraviolet absorption value and conductance of exosmic fluid of wheat seedlings, content of soluble protein and chlorophyll were measured to analyze the repair role of He-Ne laser irradiation. The results showed that He-Ne laser irradiation on the wheat seedlings led to the decrease of the production rate of superoxide anion, MDA content and ultraviolet absorption value and conductance of exosmic fluid of wheat seedlings. The content of soluble protein and chlorophyll increased to 76.66% and 1.79 mg/g respectively. It suggested that those changes about production rate of superoxide anion, MDA, ultraviolet absorbing value and conductance, soluble protein and chlorophyll were related to the repair capacity of the wheat seedlings. Therefore, the damage of wheat seedlings induced by enhanced UV-B radiation can be repaired partly by He-Ne laser.

Key words medical optics and biotechnology; He-Ne laser; wheat; ultraviolet-B radiation; repair effects

1 引 言

大气臭氧层减薄, 导致到达地面的太阳紫外线

B 辐射(UV-B, $\lambda = 280 \sim 320 \text{ nm}$)增强, 对地球上的生物产生一定的危害^[1~4]。UV-B 辐射增强可降低水稻叶片可溶性蛋白质的含量^[5], 使大豆胚轴蛋白

收稿日期: 2007-01-16; 收到修改稿日期: 2007-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(30671061)和山西省自然科学基金(20041101)资助项目。

作者简介: 郝金花(1980—), 女, 山西人, 硕士研究生, 研究方向为植物细胞学。E-mail: hhwrsl@yahoo.com.cn

导师简介: 韩 榕(1970—), 男, 山西人, 教授, 主要从事细胞生物学研究。E-mail: hanrong@dns.sxnu.edu.cn(通信作者)

含量较低强度辐射显著下降^[6], 青岛大扁藻叶绿素 a 和可溶性蛋白的含量先升高后降低, 而丙二醛 (MDA) 含量和超氧化物歧化酶活力则呈现升高的趋势^[7]。一定剂量的激光辐照使蚕豆的抗氧化酶活性提高^[8], 使菘蓝幼苗光合色素含量提高、抗逆性增强^[9,10], 降低小麦丙二醛含量^[11]。

本文用 He-Ne 激光辐射对增强 UV-B 辐射下小麦叶片浸泡液的紫外吸收值、电导率、超氧阴离子产生速率、丙二醛含量、可溶性蛋白含量, 叶绿素含量的变化作了初步的研究, 并进一步探讨了激光对 UV-B 损伤的防护机制。

2 材料与方 法

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

共设对照组 (CK), 紫外线 B 处理组 (B), He-Ne 激光处理组 (L), He-Ne 激光和紫外线 B 复合处理组 (BL) 4 组 (见表 1)。

表 1 小麦幼苗不同处理组的设置

Table 1 Different treatments of wheat seedlings

Treatment group	Illumination / (h/d)	UV-B / (h/d)	He-Ne / (min/d)	Darkness / (h/d)
CK	8	—	—	16
L	8	—	2	16
B	8*	8	—	16
BL	8*	8	2	16

* Irradiated with the UV-B radiation at the same time.

Note: h/d—radiation time in every day (unit: hour);
min/d—radiation time in every day (unit: minute).

选取籽粒饱满, 大小均匀的小麦种子, 经体积分数为 0.1% 的氯化汞表面消毒后, 培养于盛有湿滤纸的培养皿内, 30 粒/盘, 每组 3 次重复, 25 °C 培养, 种子露白时开始处理。

UV-B 辐射强度为 $10.08 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。采用紫外辐照计 (UV-B 型, 北京师范大学光电仪器厂) 对 UV-B 辐射功率密度测定, 预先用 742 型辐射强度测定仪 (Optronics Laboratories Orlando, FL, USA) 校正。将紫外-B 灯 (秦牌, 宝鸡制造, 30 W, 297 nm) 垂直悬于培养皿的上方, 调整 UV-B 灯与植物培养皿之间的距离控制 UV-B 辐射的强度。从种子露白时开始处理, 共处理 5 d。

大功率激光生物辐照仪 (南京激光仪器厂) 波长为 632.8 nm, 通过可溶性蛋白含量的测定, 选用较大刺激效应剂量 $5 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$, 120 s, 25 °C。激光

处理安排在夜间进行, 以排除杂光影响。从种子露白时开始处理, 共处理 5 d。

参照王爱国等的方法^[12], 略加修改。取 1.00 g 小麦叶片, 少量石英砂及 3 mL, 65 mmol/L 磷酸缓冲液 (pH 7.8) 研磨匀浆, 于 3000 r/min 下离心 10 min 后, 取上清液 1 mL, 加入 0.1 mL 羟胺氯化物 (10 mmol/L), 在 25 °C 反应 20 min; 之后加入 1 mL 磺胺 (17 mmol/L) 和 1 mL α -萘胺 (7 mmol/L), 在 25 °C 下反应 20 min。反应后加入等体积正丁醇抽提, 取正丁醇相液体测 530 nm 处的吸光度值。以 $\text{nmol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{ F. W.}$ (F. W. 指样重 (g)) 表示超氧阴离子产生速率。

参考李合生 (2000) 的方法^[13], 取 0.50 g 小麦叶片, 加 5% 三氯乙酸 5 mL, 研磨后所得匀浆在 3000 r/min 下离心 10 min; 取上清液 2 mL, 加 0.67% 2-硫代巴比妥酸 2 mL, 混合后在 100 °C 水浴上煮沸 30 min, 冷却后再离心一次; 分别测定上清液在 532 nm, 600 nm 和 450 nm 处的吸光度值 (A), 并按照公式: $C = 6.45 \times (A_{532} - A_{600}) - 0.56 \times A_{450}$ 计算出丙二醛的浓度 (C, 单位为 $\mu\text{mol/L}$), 再计算出单位鲜量小麦叶片组织中的丙二醛含量 ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ F. W.}$)。

按照王勋棱等 (1993) 的方法^[14], 取不同处理组的小麦叶片, 从距叶尖 8 cm 处剪下, 分为 2 组, 迅速放入去离子水中, 用塑料网压入水中, 25 ± 2 °C 放置, 30 min 后取出, 用去离子水冲洗三次, 吸干。准确称取 0.20 g 放于盛有 5 mL 去离子水的加塞试管中, 在培养室中培养 16 h, 倒出浸泡液, 分成 2 份, 一份在紫外可见分光光度计下测定 264 nm 处的吸光值, 另一份测定浸泡液的电导率。

准确称取 1.00 g 小麦幼苗叶片加提取缓冲液 2 mL^[15]。每 100 mL 0.1 mol/L 的 Tris-HCl (pH 8.0) 缓冲液中含 0.5 mol/L 蔗糖, 0.06 mol/L 抗坏血酸, 0.006 mol/L β -巯基乙醇。冰浴中研磨, 将匀浆液装入 1.5 mL 的离心管中在 0 °C 以 9000 r/min 离心 15 min 取上清液, 保存于 -20 °C 冰箱中备用。可溶性蛋白质的含量测定采用紫外吸收法^[13]。

称取小麦叶片 0.20 g, 加 3 mL 体积分数为 95% 的乙醇及少量石英砂和碳酸钙粉^[13], 用分光光度计法, 以体积分数为 95% 的乙醇为对照, 测定提取液在波长 663 nm, 646 nm 和 470 nm 下的吸光度值。按照公式计算叶绿素浓度后再计算组织中单位鲜重的叶绿素含量, 以 mg/g F. W. 表示。

所有生理生化指标测定均重复 3 次, 用 Excel

2003 统计数据,作方差分析(Analysis of Variance, ANOVA),进行差异显著性比较。

3 结 果

图 1(a)表明不同处理对超氧阴离子产生速率的影响不同。方差分析得出,单独 UV-B 处理(B)能够使超氧阴离子产生速率升高为 $359.73 \text{ nmol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{ F. W.}$ ($F = 584.03 > F_{0.01} = 11.26$);而单独 He-Ne 激光辐照(L)使超氧阴离子产生速

率降低至 $302.32 \text{ nmol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{ F. W.}$ ($F = 66.70 > F_{0.01} = 11.26$)。如果 UV-B 辐射后再施以 He-Ne 激光辐照(BL),使超氧阴离子产生速率的减小达到 $349.67 \text{ nmol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{ F. W.}$ ($F = 6.25 > F_{0.05} = 5.12$)。说明不同 UV-B 处理和 He-Ne 激光处理对超氧阴离子产生速率的影响达到了极显著水平,并且二者复合处理(BL 处理)也达到显著水平,即 He-Ne 激光对 UV-B 造成的小麦幼苗超氧阴离子产生速率的产生有一定的减缓作用。

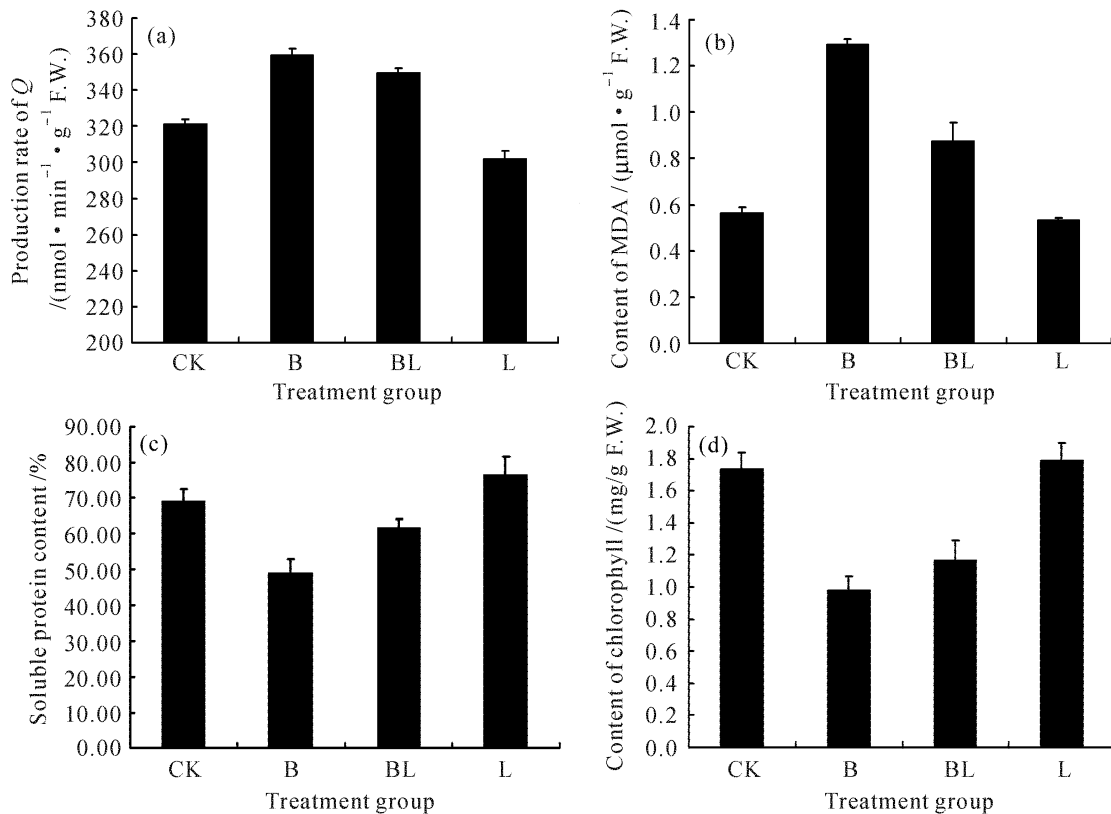


图 1 He-Ne 激光与增强 UV-B 辐射对小麦的影响

(a) 超氧阴离子产生速率;(b) 丙二醛含量;(c)可溶性蛋白含量;(d) 叶绿素含量

Fig. 1 Influence on production rate by He-Ne laser and enhanced UV-B radiation on wheat seedlings

(a) superoxide anion production rate; (b) MDA content; (c) soluble protein; (d) chlorophyll content

不同处理对丙二醛含量的影响结果见图 1(b)。方差分析结果表明,单独 UV-B 处理能够引起丙二醛含量明显升高到 $1.29 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ F. W.}$ ($F = 241.83 > F_{0.01} = 11.26$);而单独 He-Ne 激光辐照处理则使丙二醛含量降低为 $0.53 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ F. W.}$ ($F = 26.84 > F_{0.01} = 11.26$)。UV-B 辐射后再进行 He-Ne 激光辐照(BL),丙二醛含量仅为单独 UV-B 处理组(B)的68.2% ($0.88 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ F. W.}$) ($F = 18.52 > F_{0.01} = 11.26$)。说明 UV-B 处理,He-Ne 激光处理以及二者复合处理对丙二醛的影响均达到了极显著水平。由此可见,增强 UV-B 辐射加剧了小麦幼苗膜脂过氧化,He-Ne 激光辐照能够在一定

程度上减轻对小麦幼苗的膜损伤。

不同处理对小麦幼苗叶片浸泡液的紫外吸收值影响结果见表 2。方差分析表明,与对照(CK)相比,单独 UV-B 处理(B)使紫外吸收值明显升高,并达到差异显著水平 ($F = 55.22 > F_{0.01} = 11.26$),而单独 He-Ne 激光辐照处理(L)使紫外吸收值降低 ($F = 379.80 > F_{0.01} = 11.26$)。增强 UV-B 辐射后再进行 He-Ne 激光辐照(BL),其吸收值比单独 UV-B 处理组(B)明显偏低并达到差异极显著水平 ($F = 45.56 > F_{0.01} = 11.26$)。由此说明 UV-B 处理、激光处理以及二者复合处理(BL 处理)对小麦叶片的影响均达到了极显著水平。

表 2 中方差分析结果表明,单独 UV-B 处理使电导率明显升高并达到差异极显著水平 ($F = 4.95 \times 10^3 > F_{0.01} = 11.26$),而单独 He-Ne 激光辐照处理使电导率降低,差异显著 ($F = 2.22 \times 10^5 > F_{0.01} = 11.26$)。UV-B 辐射后再施以 He-Ne 激光辐照(BL),其电导率比单独 UV-B 处理组(B)明显偏低,并达到差异极显著水平 ($F = 4.93 \times 10^3 > F_{0.01} = 11.26$)。由此说明 UV-B 处理、激光处理以及二者复合处理(BL 处理)对小麦叶片的影响均达到了极显著水平。

表 2 不同处理对小麦叶片浸出液电导率和紫外吸收值的影响

Table 2 Effects on conductance and ultraviolet absorption value (A264) of exosmic fluid of wheat seedlings under different treatments

Treatment group	Conductance / ($\mu\Omega \cdot g^{-1}$ F. W.)	Ultraviolet absorbing value (A264)
CK	144.6583 ± 128.7433	0.03565 ± 0.017681
B	2150.833 ± 569.2031*	0.52517 ± 0.13247*
BL	1630.833 ± 363.2795*	0.26060 ± 0.14230*
L	144.0833 ± 123.2953*	0.02295 ± 0.01393*

Note: * means significant difference.

图 1(c)中方差分析表明,增强 UV-B 辐射明显抑制萌发期小麦可溶性蛋白合成,可溶性蛋白含量为 48.95 ($F = 12.07 > F_{0.01} = 11.26$),仅为对照组(69.08)的 70.6%,而单独 He-Ne 激光辐照却使可溶性蛋白的合成活性升高达到 76.66 ($F = 34.74 > F_{0.01} = 11.26$)。UV-B 辐射后再施以 He-Ne 激光辐照(BL),其合成活性增强,其含量为 61.93,比单独 UV-B 处理组(B)明显升高 ($F = 83.26 > F_{0.01} = 11.26$)。说明 UV-B 处理、激光处理以及二者复合处理(BL 处理)对可溶性蛋白含量的影响均达到了极显著水平。由此可见,增强 UV-B 辐射使小麦幼苗损伤加剧,He-Ne 激光辐照能够在一定程度上减轻对小麦幼苗的损伤。

图 1(d)通过方差分析表明,增强 UV-B 辐射明显抑制萌发期小麦总叶绿素含量,增强 UV-B 辐射处理使叶绿素含量为 0.98 mg/g F. W., 低于对照组(1.73 mg/g F. W.) 43.7%,并达到差异极显著水平 ($F = 309.20 > F_{0.01} = 11.26$)。增强 UV-B 辐射后再以 He-Ne 激光(BL)进行辐照叶绿素含量高于 B 组 19.7%,低于对照组 32.6%,并达到差异显著水平 ($F = 93.48 > F_{0.01} = 11.26$); 单独 He-Ne 激光组叶绿素含量(1.79 mg/g F. W.) 高于对照组

3.2%,且差异显著 ($F = 9.52 \times 10^3 > F_{0.01} = 11.26$)。说明 UV-B 处理、激光处理以及二者复合处理(BL 处理)对叶绿素含量的影响均达到了极显著水平。因此,增强 UV-B 辐射使小麦幼苗叶绿素的合成损伤加剧,He-Ne 激光辐照能够在一定程度上减轻对小麦幼苗的损伤,促进小麦进行光合作用。

4 讨 论

增强 UV-B 辐射下,植物不可避免地要产生自由基和 H_2O_2 等活性氧^[16],而活性氧的累积可直接或间接地攻击膜上生物大分子,导致膜伤。本文研究表明,UV-B 处理促进了超氧阴离子产生速率的提高,细胞内活性氧的产生增多。UV-B 处理促进了小麦幼苗脂质过氧化作用,使丙二醛含量增加,细胞膜透性增加,小麦叶片浸泡液的紫外吸收值和电导率明显升高。紫外吸收值越大,电导率越高,说明溶液中的电解质越多,即从叶片渗出的离子愈多,表明膜结构完整性遭到破坏,膜透性增加,膜系统受到伤害,引起小麦叶片中的糖、氨基酸以及其他离子的渗漏。在 UV-B 处理的小麦幼苗中,细胞内活性氧的大量积累使膜脂过氧化作用加剧,促使膜透性增加,最终导致伤害效应。这一结果验证了 Stapleton 关于植物 UV-B 效应的膜伤害假说^[17],并且与赵广琦等^[18]的研究结果一致。

可溶性蛋白是存在于细胞中的由多种酶系构成的非膜结合蛋白体系。UV-B 辐射增强导致植物可溶性蛋白质含量显著降低,尤其是核酮糖 1,5-二磷酸羧化加氧酶(Rubisco)含量的下降^[19]。Rubisco 是光合作用关键酶,占植物叶片可溶性蛋白的 50% 以上。UV-B 辐射使小麦叶片可溶性蛋白大幅度减少,可能与 UV-B 破坏 Rubisco 有关。UV-B 辐射使小麦幼苗叶片的总叶绿素含量显著降低,破坏了植物的光合色素,从而导致植物光合能力的下降。

当一定剂量的 He-Ne 激光作用于 UV-B 辐射后的小麦幼苗,结果则出现逆转,超氧阴离子产生速率减小,丙二醛含量下降,植物叶片浸泡液的紫外吸收值减小,电导率降低。已有研究表明,一定剂量的激光辐照可使 UV-B 辐射损伤后大豆^[20]、蚕豆^[21]的丙二醛含量降低,电导率降低^[22],提高可溶性蛋白的合成速率^[23],使叶绿素含量升高。这与本文研究结果相符,表明 He-Ne 激光在防止植物细胞膜损伤上发挥了作用。当 He-Ne 激光处理和增强 UV-B 辐射复合处理时,可能是由于 He-Ne 激光辐照促进

细胞中由多种酶系构成的非膜结合蛋白体系合成能力增强,提高的氧化酶活性和氧化物质含量弥补了UV-B辐射造成的氧化能力减退,恢复了被UV-B辐射破坏的活性氧-抗氧化系统之间的动态平衡,促进叶绿素的合成,提高光合效率,维持了植物的正常代谢活动,有利于作物的生长发育。

低功率激光特别是可见光范围的激光,其产生的热和压力很少,对生物体影响主要表现为光效应和电磁场效应^[24]。王晶等^[25]研究表明,激光可能作用于酶分子,使酶的电子-构像之间的相互作用发生改变而促进酶活性的提高。激光可以直接影响蛋白、酶-酶作用物复合体及生物分子结构,从而诱导酶的合成,使酶活性发生变化;也可通过这些酶或直接作用于细胞中脱氧核糖核酸(DNA),使脱氧核糖核酸发生改变,通过转录将信息传给核糖核酸(RNA),使转录活动增强,产生新的酶或其他蛋白质分子,来提高抗逆性。也有人^[26]认为酶的激活或钝化是通过蛋白质构型变化或某些片段的切除而实现的。当敏感性化学键、氨基酸及其侧链位于酶分子结构的外层时,激光光子就会对它们发生作用。但究竟是He-Ne激光直接作用使分子结构发生变化,还是从转录水平上对UV-B辐射造成的损伤进行修复,还有待于进一步的研究。

5 结 论

增强UV-B辐射处理使超氧阴离子产生速率升高,丙二醛含量增加,加剧了小麦幼苗膜脂过氧化作用,使细胞膜透性增加,小麦叶片浸泡液的紫外吸收值和电导率明显升高,UV-B辐射增强也使小麦幼苗叶片可溶性蛋白合成受到抑制,使叶绿素含量减少;He-Ne激光辐照则可提高可溶性蛋白的合成速率,使可溶性蛋白含量增加,促进叶绿素含量的提高,同时使超氧阴离子产生速率减小,丙二醛含量降低,小麦叶片浸泡液的紫外吸收值和电导率变小。一定剂量的He-Ne激光辐照可降低和部分修复由UV-B辐射增强对小麦造成的损伤,从而增强小麦代谢水平,有利于小麦生长发育和产量提高。

参 考 文 献

- 1 Shuchun Chuang, Weishan Lai, Jiunhong Chen. Influence of ultraviolet radiation on selected physiological responses of earthworms [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2006, **209**:4304~4312
- 2 A. R. McLeod, K. K. Newsham, S. C. Fry. Elevated UV-B radiation modifies the extractability of carbohydrates from leaf litter of *Quercus robur* [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**(1):116~126
- 3 Michael Y. Roledal, Christian Wiencke, Ulrike H. Lüder. Impact of ultraviolet radiation on cell structure, UV-absorbing compounds, photosynthesis, DNA damage, and germination in zoospores of Arctic *Saccorhiza dermatodea* [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2006, **57**(4):3847~3856
- 4 Donat P. Häder, Rajeshwar P. Sinba. Solar ultraviolet radiation induced DNA damage in aquatic organisms; potential environmental impact [J]. *Mutation Research*, 2005, **571**:221~233
- 5 Tang Lina, Lin Wenxiong, Liang Yiyuan *et al.*. Effects of enhanced ultraviolet-B radiation on soluble protein and nucleic acid in rice leaves [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, **12**(1):40~42
唐莉娜,林文雄,梁义元等. UV-B辐射增强对水稻蛋白质及核酸的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2004, **12**(1):40~42
- 6 Qiang Weiya, Tang Hongguan, Hou Zongdong *et al.*. Effect of enhanced UV-B radiation on DNA damage, repair and protein content in soybean hypocotyls [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(4):852~856
强维亚,汤红官,侯宗东等. 增强UV-B辐射对大豆胚轴DNA损伤、修复和蛋白质含量的影响[J]. *生态学报*, 2004, **24**(4):852~856
- 7 Cai Hengjiang, Tang Xuexi, Zhang Peiyu *et al.*. Effects of UV-B radiation on the growth and physiological characteristics of *Platyonas 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
- 8 Qi Zhi, Yue Ming, Wang Xunling *et al.*. Protect effect of He-Ne laser pretreatment on broad bean seeding damage by UV-B radiation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(1):91~94
齐智,岳明,王勋陵等. 激光对蚕豆幼苗紫外线-B辐射损伤的防护作用[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(1):91~94
- 9 Chen Yiping, Wang Xunling. Effects of He-Ne laser treatment seed of *isatis indigotica* on photosynthesis of seedlings [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(1):42~44
陈怡平,王勋陵. He-Ne激光处理对菘蓝幼苗光合作用的影响[J]. *激光技术*, 2004, **28**(1):42~44
- 10 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
- 11 Li Fangmin, Lu Zhiguo, Wang Xunling *et al.*. Protect effects of CO₂ laser pretreatment on wheat seedling lipid peroxidation by UV-B radiation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4):561~564
李方民,陆治国,王勋陵等. CO₂激光预处理对UV-B辐射引起的小麦幼苗脂质过氧化伤害的防护作用[J]. *光子学报*, 2006, **35**(4):561~564
- 12 Wang Aiguo, Luo Guanghua. Quantitative relation between the reaction of hydroxylamine and superoxide anion radicals in plants [J]. *Plant Physiology Communications*, 1990, **26**(6):55~57
王爱国,罗光华. 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系[J]. *植物生理学通讯*, 1990, **26**(6):55~57
- 13 Li Hesheng. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 260,185, 134
李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000. 260, 185, 134
- 14 Wang Xunling, Chen Xinyang, Lu Xiaoyun. A study on prevention of calcium to the wheat injured by ozone [J]. *Acta*

- Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1993, **13**(3):163~169
王勋陵,陈鑫阳,鲁晓云. 钙对臭氧伤害小麦的防护作用[J]. 西北植物学报, 1993, **13**(3):163~169
- 15 Wu Shaobo. Polyacrylamid gel round electrophoresis of isozymes and the proteins in plants [J]. *Communication of Plant Physiology*, 1979, **1**:30~33
吴少伯. 植物组织中蛋白质及同工酶聚丙烯酰胺凝胶盘状电泳[J]. 植物生理学通讯, 1979, **1**:30~33
- 16 Chen Tuo, Wang Xunling. Influence of enhanced UV-B radiation on H₂O₂ metabolism in wheat leaves [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1999, **19**(2):284~289
陈拓,王勋陵. UV-B 辐射对小麦叶片 H₂O₂ 代谢的影响[J]. 西北植物学报, 1999, **19**(2):284~289
- 17 Ann E. Stapleton. Ultraviolet radiation and plants; Burning questions [J]. *Plant Cell*, 1992, **4**:1353~1358
- 18 Zhao Guangqi, Wang Xunling, Zhang Liquan. Mutual effects of enhanced UV-B irradiation and doubling CO₂ on activities of cell defense enzymes and lipid peroxidation in broad bean seedlings [J]. *Chinese J. Applied & Environmental Biology*, 2005, **11**(3):296~299
赵广琦,王勋陵,张利权. 增强 UV-B 辐射和 CO₂ 倍增的交互作用对蚕豆幼苗的保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2005, **11**(3):296~299
- 19 He Junmin, She Xiaoping, Meng Zhaoni *et al.*. Reduction of rubisco amount by UV-B radiation is related to increased H₂O₂ content in leaves of mung bean seedlings [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2004, **30**(3):291~296
- 20 Zhu Xinjun. Protect and light effects of laser irradiation on the soybean radiated by enhanced UV-B radiation [D]. Xi'an: Northwest University, 2006. 23~24
朱新军. 激光对大豆 UV-B 辐射损伤防护效应及光效应的研究 [D]. 西安: 西北大学, 2006. 23~24
- 21 Qi Zhi. Repair effects and protection of laser irradiation on the horsebean radiated by enhanced UV-B radiation [D]. Xi'an: Northwest University, 2001. 32, 35
齐智. 激光对增强的 UV-B 辐射蚕豆幼苗损伤的防护及修复作用 [D]. 西安: 西北大学, 2001. 32, 35
- 22 Li Guanglin, Yang Yaling. The physiological effect of He-Ne laser to corn seedings [J]. *Laser Biology*, 1996, **5**(2):831~832
李光林,杨亚玲. 氦氖激光对玉米幼苗的生理效应 [J]. 激光生物学, 1996, **5**(2):831~832
- 23 Cai Suwen, Qi Zhi, Ma Xiaolai *et al.*. The effect of He-Ne laser irradiation on soluble protein synthesis of corn seedling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(3):284~288
蔡素雯,齐智,马小来等. He-Ne 激光对玉米幼苗可溶性蛋白合成的影响 [J]. 中国激光, 2000, **A27**(3):284~288
- 24 Xiang Yang. Study on the mechanism of laser variation and biological effect [J]. *J. Optoelectronics · Lasers*, 1994, **5**(4):87~90
向洋. 激光诱变及生物学作用机制研究 [J]. 光电子·激光, 1994, **5**(4):87~90
- 25 Wang Jing, Guo Weisheng. On laser-raised enzyme activity [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(8):765~768
王晶,郭维生. 激光提高酶活性机理探讨 [J]. 中国激光, 1997, **A24**(8):765~768
- 26 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