

# He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射后小麦“翘根”的影响

王 燕<sup>1,2</sup> 董倩楠<sup>1</sup> 孟 菁<sup>1</sup> 张美萍<sup>1</sup><sup>1</sup>山西师范大学生命科学学院, 山西 临汾 041004<sup>2</sup>山东农业大学作物生物学国家重点实验室, 山东 泰安 271018

**摘要** 为探讨 He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射造成的小麦“翘根”的影响,采用 He-Ne 激光(辐照剂量为  $5 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$ )辐照,对增强 UV-B 辐射(辐射剂量为  $10.08 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )条件下小麦根部肌动蛋白含量、黄酮类化合物含量及种类变化进行研究。结果表明,增强 UV-B 辐射后小麦主胚根长变短,肌动蛋白及黄酮类化合物含量降低,而 He-Ne 激光组差异不明显;两种辐射的复合处理组结果低于 CK 组、高于 UV-B 处理组,“翘根”现象得到缓解;不同处理组的黄酮类化合物扩散速度不同,UV-B 组黄酮类化合物种类发生变化。肌动蛋白及黄酮类含量变化是增强 UV-B 辐射后小麦“翘根”现象产生的原因之一,He-Ne 激光对 UV-B 辐射造成的小麦“翘根”损伤具有一定的修复作用。

**关键词** 生物光学; He-Ne 激光; UV-B 辐射; 肌动蛋白; 黄酮类化合物; 小麦

**中图分类号** Q631      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.111701

## Influence of He-Ne Laser on "Root-Bending" in Wheat Induced by Enhanced UV-B Irradiation

Wang Yan<sup>1,2</sup> Dong Qiannan<sup>1</sup> Meng Jing<sup>1</sup> Zhang Meiping<sup>1</sup><sup>1</sup>School of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004, China<sup>2</sup>State Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China

**Abstract** In order to study the influence of He-Ne laser on "root-bending" in wheat caused by enhanced UV-B irradiation, the wheat seedlings were exposed to He-Ne laser with  $5 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$  power density after enhanced UV-B irradiation ( $10.08 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ). The content of actin, the content and type variety of flavonoids in wheat roots were studied. The results show that compared with those of the contrast group, the main radical length becomes shorter, the content of actin and flavonoids in the UV-B irradiation enhanced group is reduced, while the He-Ne laser treated group has no notable difference. The results of the group under simultaneous irradiation of UV-B and He-Ne laser are lower than those of the contrast group but higher than those of the UV-B irradiated group, and the "root bending" phenomenon is weakened. The migration rates of flavonoids are different in diverse groups. There appear various flavonoids varieties under UV-B irradiation. The variation in content of actin and flavonoids is one of the reason for "root bending". The damage on wheat seedlings induced by UV-B irradiation can be partially repaired by He-Ne laser irradiation.

**Key words** biotechnology; He-Ne laser; UV-B irradiation; actin; flavonoids; wheat

**OCIS codes** 170.1420; 170.5830; 040.7190

**收稿日期:** 2016-05-26; **收到修改稿日期:** 2016-07-14; **网络出版日期:** 2016-10-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(301301245)、山西省留学基金(2013-067)、山西省青年基金(2009011030-2)、山西师范大学校基金(ZR1305)、作物生物学国家重点实验室开放课题基金(2014KF03)

**作者简介:** 王 燕(1992—),女,硕士研究生,主要从事环境植物学和生物物理学等方面的研究。

E-mail: 765807191@qq.com

**导师简介:** 张美萍(1975—),女,博士,教授,主要从事环境植物学和生物物理学等方面的研究。

E-mail: mpzhang2006@163.com(通信联系人)

## 1 引言

臭氧层减薄导致到达地表的 UV-B 辐射增强,影响了植物的形态、生理、生化等<sup>[1-4]</sup>。研究表明高剂量的 UV-B 辐射使植株矮化、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<sup>[5-7]</sup>。因此,如何减轻 UV-B 辐射对植物造成的损伤成为亟待解决的科学问题。

小麦根尖组织细胞中黄酮类化合物与生长素的极性运输有关,对细胞内生长素载体的活性造成直接影响,从而影响细胞的相对生长<sup>[8]</sup>。肌动蛋白是细胞骨架的主要成分,参与细胞内众多的生理生化过程,如顶端生长、根向重力性生长、物质运输等活动<sup>[9]</sup>。韩榕等<sup>[10]</sup>研究发现,增强 UV-B 辐射使小麦幼苗产生“翘根”现象。Britt 在筛选敏感突变型拟南芥品系实验中也发现类似的“翘根”现象。陈颖等<sup>[11]</sup>的研究表明,微丝对植物细胞感受重力起到了重要作用,推测作为微丝主要成分的肌动蛋白与小麦“翘根”现象有关。

激光对生物体有一定的刺激效应和修复作用<sup>[12]</sup>。研究表明,增强 UV-B 辐射造成植物的叶绿体结构破坏、光合能力下降、同工酶活性降低,He-Ne 激光对这些负面影响均有修复作用<sup>[13-14]</sup>。适当剂量的 He-Ne 激光辐射可以缓解“翘根”对植物造成的损伤,增加抗逆性<sup>[15]</sup>,但是具体机制尚在研究中,国内外报道较少。

本文通过小麦根部肌动蛋白、根尖内黄酮类化合物的变化,进一步从分子水平来探讨增强 UV-B 辐射后小麦“翘根”现象的产生机制。

## 2 材料和方法

### 2.1 材料

供试材料为冬小麦 93-4736 (*Triticum aestivum* cv.),由山西省农业科学院小麦研究所提供。

### 2.2 方法

#### 2.2.1 材料处理设置

共设置正常光照组(CK),He-Ne 激光组(L),增强 UV-B 辐射组(B),以及激光和 UV-B 复合处理组(BL)四组。各组处理方法如表 1 所示。

表 1 各处理组的设置及每日处理程序

Table 1 Setting and daily disposal program of each group

Group	Illumination /h	UV-B radiation /h	He-Ne laser irradiation /min	Darkness /h
CK	8	-	-	16
B	8*	8	-	16
BL	8*	8	2	16
L	8	-	2	16

Note: \* denotes simultaneous illumination and UV-B irradiation.

#### 2.2.2 种子萌发

选取籽粒饱满,大小均一的小麦种子,经质量分数为 0.1% HgCl<sub>2</sub> 溶液表面消毒后,培养于有湿滤纸的培养皿内,每皿 30 粒,设三次重复。25 °C 恒温培养,种子露白时待处理,每个处理设置三个重复。

#### 2.2.3 UV-B 辐射处理<sup>[10]</sup>

将 UV-B 灯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 的辐射强度。采用 10.08 kJ · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup> 的辐射剂量处理萌发小麦,每天处理 8 h,共处理 4 d。

#### 2.2.4 He-Ne 激光辐照<sup>[10]</sup>

He-Ne 激光器波长为 632.8 nm,光斑直径为 50 mm,选用剂量为 5 mW · mm<sup>-2</sup>,处理时间为 120 s,处理温度为 25 °C。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 °C 培养。

#### 2.2.5 增强 UV-B 辐射组小麦“翘根”率的统计分析

参照韩榕等<sup>[10]</sup>的方法测定小麦增强 UV-B 辐射组三次重复组“翘根”率。

#### 2.2.6 发芽率及主胚根长的测定

参照韩榕等<sup>[10]</sup>的方法测定不同处理组小麦发芽率及主胚根长。

#### 2.2.7 小麦根部肌动蛋白电泳及含量的测定

参照张红等<sup>[16]</sup>的方法测定五日龄小麦幼苗根部肌动蛋白的含量。参照王小花等<sup>[17]</sup>的方法进行肌动蛋

白的电泳分析。

### 2.2.8 黄酮类化合物含量的测定及种类分析

参照赵春艳等<sup>[18]</sup>的方法对小麦根部黄酮类化合物进行测定。参照文献<sup>[19]</sup>对黄酮类化合物进行种类分析。

## 2.3 数据统计与分析

采用 Excel、SPSS 数据软件进行分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 增强 UV-B 辐射组小麦“翘根”率的统计分析

如表 2 所示,在 UV-B 辐射下,选取辐射 4 d 的小麦进行“翘根”比率统计,3 次重复处理组“翘根”比率均在 90%以上,平均值达到 95.2%,表明增强 UV-B 辐射后小麦幼苗根尖出现“翘根”现象。

表 2 增强 UV-B 辐射三次重复处理组小麦“翘根”率的统计分析

Table 2 Statistical analysis of the "root-bending" rate of wheat in three UV-B irradiation enhanced groups

Group B	No. 1	No. 2	No. 3	Mean
"Root bending" rate /%	93.3	94.4	97.8	95.2

### 3.2 He-Ne 激光和增强 UV-B 辐射对小麦根形态的影响

如图 1 所示,与对照组相比,经 UV-B 处理的小麦幼苗生长发育缓慢,株高降低,小麦根较短,根须数目较多,根色泛黄,根尖出现“翘根”现象,幼根翘起,脱离基质,小麦无法吸水而干枯至死。He-Ne 激光单独处理组(L)小麦生长较对照组长势稍弱,没有出现“翘根”现象。与 UV-B 处理组相比,激光与 UV-B 复合处理组(BL)小麦幼苗根尖“翘根”现象得到缓解,株高增加,根须数目减少。He-Ne 激光处理后,根部的“翘根”现象减弱。这与文献<sup>[10,15]</sup>等前期研究结果一致。

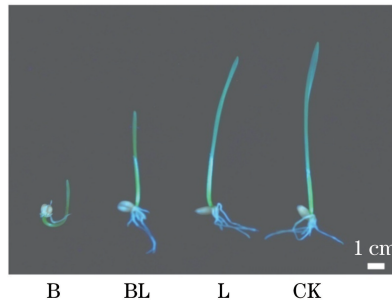


图 1 各处理组根部形态

Fig. 1 Root morphologies of the four groups

### 3.3 He-Ne 激光和 UV-B 辐射对小麦主胚根长的影响

SPSS 软件分析结果由图 2 所示,相同字母标注表示下方对应的数据没有显著差异,不同字母表示下方对应数据呈显著性差异。与 CK 组相比,B 组主胚根长显著变短( $P < 0.05$ ),L 组的主胚根长显著增加( $P < 0.05$ ),BL 组和 L 组主胚根长都比 B 组长。说明 UV-B 辐射严重影响了小麦主胚根长,He-Ne 激光可缓解 UV-B 辐射对植物造成的伤害;随着处理时间的延长,激光对辐射造成伤害的缓解作用更强。

### 3.4 He-Ne 激光和 UV-B 辐射对小麦根部肌动蛋白含量的影响

SPSS 软件分析结果如图 3 所示。数据分析表明,B 组肌动蛋白含量较 CK 组下降,差异极显著( $P < 0.01$ );BL 组与 B 组相比肌动蛋白含量升高,差异极显著( $P < 0.01$ ),L 组与 CK 组相比差异不显著( $P > 0.05$ )。结果表明,增强 UV-B 辐射使小麦根部肌动蛋白含量显著降低,产生“翘根”现象,He-Ne 激光可以修复增强 UV-B 辐射对小麦造成的伤害,提高根部肌动蛋白含量,缓解小麦根部“翘根”现象。

### 3.5 He-Ne 激光和 UV-B 辐射后小麦根部肌动蛋白电泳图谱

牛血清蛋白(BSA)的相对分子质量为 66.43 kDa,鸡白蛋白(OVA)的相对分子质量为 43 kDa,通过十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶(SDS-PAGE)电泳,在鸡白蛋白的附近发现一条泳带,为小麦根肌动蛋白,单体相对分子质量为 42 kDa。作为细胞骨架及收缩系统的主要成分,肌动蛋白参与顶端生长、根向重力性生长、

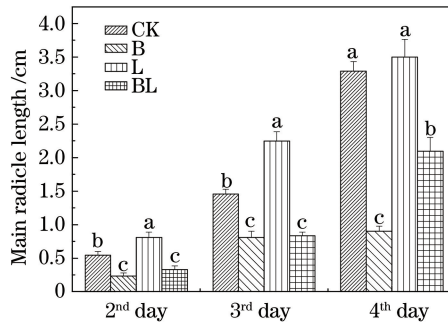


图 2 He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射后小麦主胚根长的影响

Fig. 2 Influence of He-Ne laser on wheat main radicle length under enhanced UV-B radiation

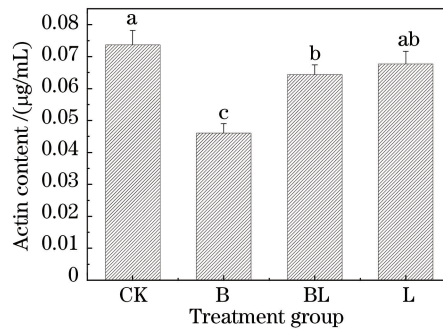


图 3 He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射后小麦根部肌动蛋白含量的影响

Fig. 3 Influence of He-Ne laser on actin content in wheat root under enhanced UV-B irradiation

细胞质流动、细胞器运动、物质运输等一系列生理生化活动<sup>[9]</sup>。“翘根”现象是小麦幼苗经 UV-B 辐射后的一项主要形态特征,违背了根的向重力性生长,所以各组肌动蛋白含量的变化可以作为“翘根”现象产生的原因之一。如表 3、4 所示,无论蛋白带谱光密度(OD)值还是蛋白带谱的蛋白含量,L 组明显大于 B 组,CK 组与 BL 组居中。可以认为 UV-B 辐射导致根部肌动蛋白含量下降,进而导致肌动蛋白参与的众多生理生化过程受到影响,如淀粉体运输,生长素极性运输,从而使根重力性丧失,导致“翘根”现象产生,而 He-Ne 激光缓解了 UV-B 对植物的伤害。

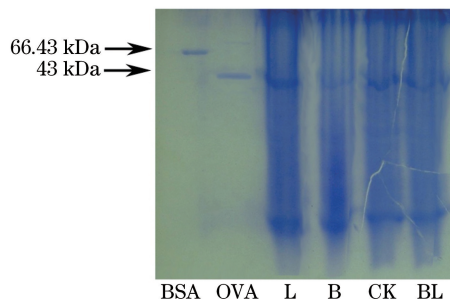


图 4 He-Ne 激光和增强 UV-B 辐射后小麦根部肌动蛋白的 SDS-PAGE 电泳图谱

Fig. 4 SDS-PAGE electrophoresis patterns of wheat root actin content

表 3 各泳道蛋白带谱迁移率

Table 3 Migration rates of cytoskeleton protein among different lanes

Band No.	Migration rate					
	Lane 1 (BSA)	Lane 2 (OVA)	Lane 3 (L)	Lane 4 (B)	Lane 5 (CK)	Lane 6 (BL)
Band 1	0.563			0.560		
Band 2			0.671	0.672	0.662	0.674
Band 3		0.684	0.682		0.681	0.680

表4 各泳道蛋白带谱的蛋白含量比较

Table 4 Comparison on the cytoskeleton protein content among different lanes

Band No.	Protein content / %					
	Lane 1 (BSA)	Lane 2 (OVA)	Lane 3 (L)	Lane 4 (B)	Lane 5 (CK)	Lane 6 (BL)
Band 1	55.355			0.954		
Band 2			34.679	25.311	29.842	27.981
Band 3		59.016	1.054		2.151	4.643

### 3.6 He-Ne 激光对 UV-B 辐射后小麦黄酮类化合物含量的影响

由图 5 可知,第 2 天和第 3 天处理小麦根尖组织,B 组黄酮类化合物的含量大于 CK 组和 BL 组,差异极显著( $P < 0.01$ ),推测这与黄酮类化合物本身具有的抗逆性相符,UV-B 辐射强度越大,黄酮类化合物的含量越高<sup>[20]</sup>。这一结果表明,在一定的 UV-B 辐射强度范围内,小麦体内黄酮类化合物含量与 UV-B 辐射强度呈正相关关系,即随着 UV-B 辐射强度的增加,植物体内次级代谢物质黄酮类化合物的含量升高。

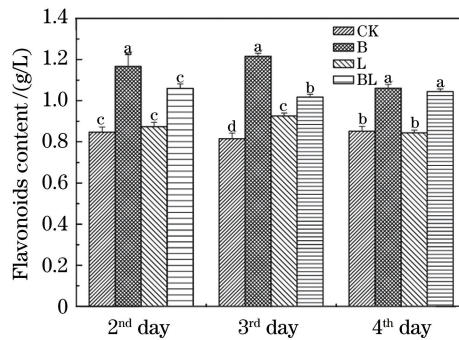


图5 He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射后小麦根部黄酮类化合物含量的影响

Fig. 5 Influence of He-Ne laser on the flavonoids content in wheat roots under enhanced UV-B irradiation

### 3.7 薄层层析图谱

黄酮类化合物的薄层层析图谱如图 6 所示,表 5 表示图 6 中各处理组条带的迁移率  $R_{f,n}$  ( $n=1,2,3$ )。从图 6 及表 5 可知,不同组黄酮类化合物的层析条带存在差别,扩散速度也明显不一致,CK 组和 L 组有 2 个条带  $R_{f,1}$  和  $R_{f,2}$ ,而 B 组和 BL 组只有 1 个条带  $R_{f,1}$ 。经 UV-B 辐射处理的 B 组扩散播慢,经 He-Ne 激光处理的 BL 组较 B 组扩散更快,较 CK 组扩散更慢,说明经过 UV-B 辐射后小麦根尖黄酮类化合物的种类与含量发生变化,He-Ne 激光可以缓解 UV-B 对植物造成的伤害。

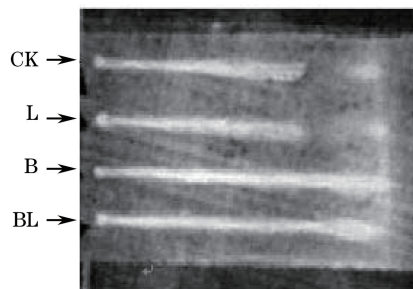


图6 黄酮类化合物薄层层析图谱

Fig. 6 Thin layer chromatographic patterns of flavonoids

表5 不同处理组的迁移率

Table 5 Mobility of different processing groups

Group	$R_{f,1}$	$R_{f,2}$	$R_{f,3}$
CK	0.41	0.64	-
B	0.32	-	-
L	0.39	0.58	-
BL	0.36	-	-

Note: "-" means no sample

## 4 讨 论

前期研究发现 UV-B 辐射下小麦幼苗的“翘根”现象与生长素之间的关系密切<sup>[15]</sup>,生长素在根尖的极性分布导致小麦“翘根”现象的发生<sup>[21]</sup>,而生长素输出载体的极性分布决定了生长素的极性分布。作为一种生长素极性运输的自然抑制剂,黄酮类化合物<sup>[8]</sup>在不同程度上抑制了生长素的极性运输,与小麦幼苗“翘根”现象有关。

生长素输出载体由调节亚基和催化亚基组成,生长素极性运输抑制剂(如 1-萘氨甲酰苯甲酸、2,3,5-三碘苯甲酸等)与生长素输出载体的调节亚基结合,以此抑制生长素的极性运输。黄酮类化合物通过对调节亚基(NPA 结合蛋白)的作用,抑制输出载体的活性,从而抑制生长素的极性运输<sup>[8]</sup>。

肌动蛋白是真核生物细胞中维持细胞形态和正常生长的基础<sup>[22]</sup>,UV-B 辐射影响了小麦根部肌动蛋白的含量,造成小麦根部辐射面和非辐射面细胞形态的变化,从而导致“翘根”现象的发生。增强 UV-B 辐射后,小麦根尖组织细胞中的黄酮类化合物产生了差异,细胞的生长与生长素有关且生长的快慢由生长素的分布不均来调控。增强 UV-B 辐射后可能使生长素在小麦根尖纵向分布且含量不均,纵向两侧生长素的浓度有差异,进而使根尖细胞产生不均等分裂而发生“翘根”现象。增强 UV-B 辐射后,小麦根尖组织细胞中生长素在纵向的不均分布还需进一步探讨。

增强 UV-B 辐射引起小麦“翘根”现象,采用 He-Ne 激光对其进行了修复,测定了根部肌动蛋白的含量,并用薄层层析图谱分析了黄酮类化合物的差异。UV-B 辐射对许多基因造成了损伤,或者激活了许多基因从而导致多种黄酮类化合物的消失或被诱导出现。B 组中产生的差异黄酮类化合物可能与 UV-B 辐射有关,而肌动蛋白含量的变化导致微丝发生变化,根背地生长,导致了小麦幼苗“翘根”现象产生。

激光主要通过光效应和电磁效应对生物体产生作用<sup>[15,23]</sup>。He-Ne 激光通过磁场作用影响蛋白质结构的修复,调节了黄酮类化合物的合成及分布,为植物损伤修复机制的研究提供了参考。

## 5 结 论

增强 UV-B 辐射使小麦根部发生“翘根”现象,主胚根长缩短,采用 He-Ne 激光辐射后,主胚根长显著增长,小麦根部肌动蛋白含量升高,缓解了增强 UV-B 辐射导致的根尖肌动蛋白含量分布不均现象;降低了生长素抑制剂黄酮类化合物在根部的含量,减轻了“翘根”现象对小麦幼苗生长的影响,为 He-Ne 激光修复 UV-B 对植物造成的伤害提供了更为深入的理论指导。

## 参 考 文 献

- Zhang Meiping, Liang Zhiying, Han Rong, *et al.* Effects of He-Ne laser and enhanced UV-B radiation on the photosynthesis on rice flags[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0804001.  
张美萍, 梁志英, 韩 榕, 等. He-Ne 激光和增强 UV-B 辐射对水稻幼苗光合作用的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0804001.
- Sun Yongxing, Chen Huize, Li Suhua, *et al.* Effect of He-Ne laser and UV-B radiation enhancement on apoptosis in the roots of wheat seedling[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0704001.  
孙永星, 陈慧泽, 李素花, 等. He-Ne 激光和增强 UV-B 辐射对小麦幼苗根细胞凋亡的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0704001.
- Zhang Juan, Han Rong. Study on the nuclease of wheat seedling under He-Ne laser and ultraviolet-b radiation[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(10): 2619-2624.  
张 娟, 韩 榕. He-Ne 激光和增强 UV-B 辐射小麦幼苗核酸酶的影响[J]. 中国激光, 2009, 36(10): 2619-2624.
- Han Rong, Wang Xunling, Yue Ming, *et al.* The influence of He-Ne laser irradiation on the damaged and repair of wheat seedling by enhanced UV-B radiation[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(10): 1182-1187.  
韩 榕, 王勋陵, 岳 明, 等. He-Ne 激光对小麦幼苗增强 UV-B 辐射损伤修复的影响[J]. 光子学报, 2001, 30(10): 1182-1187.
- Chang Ali, Han Rong. Effects of He-Ne laser and UV-B irradiation enhancement on wheat seedling chlorophyll II fluorescence characteristic[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2012, 21(5): 399-405.

- 常阿丽, 韩 榕. He-Ne 激光和增强 UV-B 辐射对小麦幼苗叶绿素荧光特性的影响[J]. 激光生物学报, 2012, 21(5): 399-405.
- 6 Guo Junyu, Han Rong. Effects of He-Ne laser on thylakoid membrane characteristic of wheat seedling exposed to enhanced UV-B radiation[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(3): 758-764.  
郭君瑜, 韩 榕. He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射小麦类囊体膜特性的影响[J]. 中国激光, 2009, 36(3): 758-764.
- 7 Han Rong, Wang Xunling, Yue Ming. Influence of He-Ne laser irradiation on the damage and repair of wheat seedling by enhanced UV-B radiation[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(9): 859-863.  
韩 榕, 王勋陵, 岳 明. He-Ne 激光对小麦 DNA UV-B 损伤修复的影响[J]. 中国激光, 2002, 29(9): 859-863.
- 8 Ni Weimin, Chen Xiaoya, Xu Zhihong, *et al.* Advances in study of polar auxin transport[J]. Acta Botanica Sinica, 2000, 42(3): 221-228.  
倪为民, 陈晓亚, 许智宏, 等. 生长素极性运输研究进展[J]. 植物学报, 2000, 42(3): 221-228.
- 9 Chen Huize. Effects on the F-actin in mitotic cycle of wheat seedlings under enhanced UV-B radiation[D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2012.  
陈慧泽. 增强 UV-B 辐射对小麦幼苗细胞周期中肌动蛋白的影响[D]. 临汾: 山西师范大学, 2012.
- 10 韩 榕. He-Ne 激光对小麦增强 UV-B 辐射损伤的修复效应及机理[D]. 西安: 西北大学, 2002.
- 11 陈 颖, 王 刚, 赵俊霞. 高等植物体内的肌动蛋白[J]. 生物学通报, 2003, 38(1): 13-15.
- 12 Chen Yiping, Sun Benhua. Influence of laser on DTA thermal parameters of folium isatidis exposed to UV-B radiation[J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 395-397.  
陈仪平, 孙本华. He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射大青叶 DTA 热解参数的影响[J]. 激光技术, 2006, 30(4): 395-397.
- 13 Zhang Meiping, Wang Xiaohua, Shan Yongjie, *et al.* Effects of He-Ne laser and enhanced ultraviolet-B radiation on the isozymes gene expression of wheat seedlings[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0504002.  
张美萍, 王小花, 陕永杰, 等. He-Ne 激光和增强 UV-B 辐射对小麦幼苗同工酶基因表达的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0504002.
- 14 Gao Limei, Li Yongfeng, Han Rong. Effects of He-Ne laser on photosynthesis of wheat seedlings exposed to enhanced UV-B radiation[J]. Guihaia, 2011, 31(1): 117-123.  
高丽美, 李永锋, 韩 榕. He-Ne 激光对增强 UV-B 辐射后小麦幼苗光合作用的影响[J]. 广西植物, 2011, 31(1): 117-123.
- 15 Han Rong, Zhang Meiping, Wang Xiaoxia, *et al.* Mechanism of repairation of He-Ne laser irradiation on "root-bending" in wheat seedling induced by enhanced ultraviolet-B[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 27(3): 0565-0570.  
韩 榕, 张美萍, 王晓霞, 等. 增强 UV-B 及 He-Ne 激光对小麦幼苗“翘根”现象的诱导与修复机制[J]. 西北植物学报, 2007, 27(3): 0565-0570.
- 16 Zhang Hong, Liu Xiong, Yan Longfei. Comparative study of pollen actin content in ginkgo and maize[J]. Acta Botanica Sinica, 1997, 39(11): 998-1002.  
张 红, 刘 熊, 阎隆飞. 银杏与玉米花粉肌动蛋白含量的比较研究[J]. 植物学报, 1997, 39(11): 998-1002.
- 17 Wang Xiaohua, Liu Haifeng, Han Rong. Effect of He-Ne laser and enhanced ultraviolet-B radiation on protein metabolism of wheat seedlings[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2008, 28(1): 103-108.  
王小花, 刘海峰, 韩 榕. He-Ne 激光和增强 UV-B 辐射对小麦幼苗蛋白质代谢的影响[J]. 西北植物学报, 2008, 28(1): 103-108.
- 18 Zhao Chunyan, Pu Xiaoying, Zeng Yawen, *et al.* Determination of the content of general flavones in barley malts[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2010, 11(4): 498-502.  
赵春艳, 普晓英, 曾亚文, 等. 大麦麦芽总黄酮类化合物含量的测定分析[J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11(4): 498-502.
- 19 赵永芳. 生物化学技术原理及应用[M]. 北京: 科学技术出版社, 2002.
- 20 Zhou Fenglian, Shou Senyan, Ye Wanzhi, *et al.* Advances in the research on flavonoid biosynthesis and plant stress response[J]. Chinese Journal of Cell Biology, 2004, 26(1): 39-44.  
邹风莲, 寿森炎, 叶纨芝, 等. 类黄酮化合物在植物胁迫反应中作用的研究进展[J]. 细胞生物学杂志, 2004, 26(1): 39-44.

- 21 Lü Jian, Yu Jingquan. Mechanism of auxin action[J]. Plant Physiology Communications, 2004, 40(5): 624-628.  
吕 剑, 喻景权. 植物生长素的作用机制[J]. 植物生理学通讯, 2004, 40(5): 624-628.
- 22 Liu Xi, Zhang Shaobin, Wang Che. Research progress of plant actin function[J]. Biotechnology Bulletin, 2010, 3: 13-16.  
刘 曦, 张少斌, 汪 澈. 植物肌动蛋白功能的研究进展[J]. 生物技术通报, 2010, 3: 13-16.
- 23 Zhang Meiping, Han Rong, Shan Yongjie. Effects of 6-BA and He-Ne laser on the seedling of wheat antioxidant enzymes under cadmium stress[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 081702.  
张美萍, 韩 榕, 陕永杰. He-Ne 激光和 6-苄基氨基嘌呤对镉污染下小麦幼苗的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 081702.