

物理方法在提高植物抗逆性中的应用

张新华* 李富军

山东理工大学轻工与农业工程学院, 山东淄博 255049

Application of Physical Techniques for Plant Stress Resistance

ZHANG Xin-Hua*, LI Fu-Jun

Light Industry and Agricultural Project Institute, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China

提要 介绍了物理因素处理, 主要包括磁场、电场、热激、冷激与低温以及激光处理等提高植物抗逆性的研究进展。

关键词 物理方法; 抗逆性; 植物

植物处于旱、涝、寒、冻、盐、病、高温、强光等各种逆境时, 常受到不同程度的伤害而导致生理过程变化和经济产量下降。随着全球性生态环境的日渐恶化, 各种各样的环境胁迫对植物正常生长带来了不同程度的影响, 所导致的产量和经济损失是巨大的。长期以来, 研究植物抗逆性和各种防御灾害技术一直是植物学家重视的课题。物理方法在这一领域中也正得到日益广泛的应用, 以物理方式提高植物的抗逆性, 简便有效, 不会产生任何副作用, 并可有效减轻农药残留对环境的污染和因食用受污染的食品而给人们健康造成的伤害。现文介绍了近几年来物理因素处理改善植物抗逆性的一些最新研究进展, 并讨论了物理方法在植物抗逆性研究中的意义。

1 磁场处理

生物磁学是研究和应用物质的磁性和磁场与生物特性之间相互联系和相互影响的一门新兴边缘学科。随着生物磁学的发展, 磁致生物效应的研究日益受到重视。在农业生产中应用较早的是磁场直接处理植物的种子, 以提高种子活力和作物的产量^[1, 2]。

用磁场处理改善植物的生长代谢和提高其对逆境抵抗能力的关键是选择适宜的磁场强度和作用时间。目前, 常用于处理植物种子或幼苗的磁场强度为0.2~0.5 T, 处理时间从十几分钟到几十小时不等, 一般是低磁场长时间或高磁场短时间处理^[3, 4]。如黄瓜(*Cucumis sativus*)种子经0.2和0.45 T磁场处理20 min后, 发芽率分别增加29.13%和

43.77%^[5]。Piacentini等^[6]每天用0.1 mT的磁场处理黄瓜种子12 h, 连续处理14 d, 也可明显改善黄瓜幼苗的生长。但不同植物之间差异较大, 甚至同一植物不同的品种或状态都可能对磁场有不同的灵敏阈。如洋葱经0.15~0.50 T的磁场作用20 min后, 其鳞茎的发芽率反而受到明显的抑制(这正有利于洋葱的贮藏保鲜)^[7]。所以, 处理时应视植物而异。

磁场不仅可以用于提高农作物的产量, 适宜强度的磁场还能明显减轻环境胁迫对植物生长的抑制作用。Ruzic和Jerman^[8]发现, 水芹(*Lepidium sativum*)种子经磁场处理后, 其幼苗对高温干旱胁迫的抵抗能力有明显提高。经磁场处理的番茄幼苗在干旱条件下, 叶片细胞膜的相对透性和伤害率也均减小; 同时, 在番茄营养生长期, 抗病性也明显增强^[9]。适宜强度的磁场(0.2~0.3 T)处理还可明显提高小麦幼苗的抗盐碱性^[10]。刘新成和李秋祯^[11]的工作表明, 经过400 mT磁场处理10 min的蚕豆根在不同浓度Cu²⁺下生长的平均长度均大于仅作Cu²⁺处理而无磁场影响的蚕豆, 说明蚕豆种子经过磁场处理后, 其抵抗Cu²⁺毒害作用的能力增强。另外, 磁场还可明显延缓黄瓜黄化苗的衰老进程, 改善其生长状况^[6]。

磁场作为一种物理技术, 用以改善植物生

收稿 2005-01-10 修定 2005-08-29

资助 山东理工大学博士基金(404008)。

*E-mail: zXH@sdut.edu.cn, Tel: 0533-2786820

长, 提高产量与抗逆性, 在农业生产中已得到了广泛应用, 但关于其生理学机制, 目前仍不明确。一般认为, 适当强度的磁场能加速植物体的代谢过程和呼吸速率, 加速细胞内的氧化磷酸化过程, 促进细胞内 ATP 合成^[12], 并且可提高植物体内许多酶的活性, 如过氧化物酶 (peroxidase, POD)、过氧化氢酶 (catalase, CAT) 和超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 等, 从而加快了一些活性氧与自由基的清除, 消除他们在组织内的不良影响, 提高植物的抗逆性^[6, 11]。Garcia 和 Arza^[13]认为, 磁场的作用可能是其会使细胞内 Ca^{2+} 水平或跨细胞膜的离子浓度发生改变, 从而导致细胞渗透压与吸水能力发生改变, 进而影响植物生长。还有研究表明, 磁场还有提高生物体内某些生化有机物质如有机酸、激素、核酸含量的作用, 因而有助于提高植物体抵抗外界不良环境的能力^[4, 9]。

2 电场处理

地球上的生物体在有电磁场的环境中起源进化并长期生存, 几乎所有的生命物质和生命现象都与电磁场密切相关。采用电磁场处理农作物种子, 是电磁生物效应研究最早、在农业中应用最多的一个方面^[14, 15]。

电场处理植物主要有 2 种方法: 一种是低频电流处理, 即将植物种子或幼苗放在绝缘的容器中加水, 容器两边放电极板, 通入低频电流 (200 V, 50 Hz), 处理时间和电流强度等因植物类型而异, 一般电流强度在 0.1~1.0 A, 处理时间 15~30 min^[16]; 另一种是静电处理, 即将植物置于直流静电场中, 以匀强电场处理报道较多, 但正负电场处理对植物的效应影响不同, 应根据植物种类施加不同的电场^[17]。影响处理效果的参数主要是电场强度和處理时间长短, 处理植物种子或幼苗常用的适宜参数为: 电场强度 100~550 $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$, 时间 3 s~2 h 较好^[18, 19]。

电场作为一种无污染的物理处理技术, 在增强植物种子与幼苗的抗逆性中有广阔的应用前景^[20]。有人用不同强度电场作用油菜种子一段时间后, 测定电场对幼苗根系活动、植物缺水程度和抗干旱能力的结果表明, 电场处理油菜种子可促进幼苗生长, 干旱胁迫下, 幼苗体内的 SOD、

POD 和 CAT 的活性均明显提高, 膜脂过氧化产物 (丙二醛) 含量下降^[18]。因此认为, 经电场处理的膜结构与功能在干旱胁迫下受到保护, 从而提高油菜的抗旱性^[18]。韩玉敏与房仲秋^[19]的实验表明, 经电场处理的棉花植株, 抗立枯病、炭疽病和黑斑病的能力增强, 病情指数降低 42.4%, 总产量也明显提高。Prasad 等^[21]指出, 电场也可通过抑制果蔬呼吸跃变和果蔬体内 ATP 的产生延缓果蔬的衰老。

电场处理植物种子或幼苗技术是模拟大自然的电场效应。目前认为, 其提高植物抗逆性的机制是电场可增加植物体内酶含量, 提高酶活性, 并使酶蛋白的构象发生有利于植物生长与代谢的变化, 增强基因表达的活性, 加速蛋白质合成, 从而加快各种生化反应速度, 因而植物的长势和抗逆性增强^[14, 17, 18]。

3 热处理

热处理是国内外广泛研究的一种物理保鲜技术, 其主要优点是无化学残留、安全性高、简便有效^[22, 23]。热处理方法有热蒸汽、热水、干热空气、红外辐射和微波辐射, 但实际常用的是热蒸汽和热水。通常用 30~45℃ 处理数小时至数天或用 43~54℃ 的热空气处理 10~60 min, 以及 46~55℃ 的热水处理 30 s~10 min^[24]。

目前, 热处理技术已大量用来提高果蔬采后贮藏过程中的抗逆性^[24, 25]。桃果实经贮前加温 [(35±1)℃, 24 h], 或中途加温 [(20±1)℃, 24 h], 可明显减轻果实冷藏过程中冷害的发生^[23]。另外, 许多研究还发现番茄^[25, 26]、柿子^[27]等果蔬经适度的热空气或热水处理后, 它们的抗冷性也明显提高。Reyes 等^[28]指出, 香蕉采后用 45℃ 的热水处理 20 min, 冠腐病可减少至原来水平的 15%, 而用 50℃ 的热水处理 20 min 的冠腐病发生率可控制在 3% 以下。热处理还可提高芒果和香蕉果实的抗炭疽病能力^[29]。

玉米和番茄的种子或幼苗经热处理后, 抗逆性明显增加^[30, 31]。热处理过的小麦^[32]、黄瓜^[33, 34]、绿豆^[35]幼苗的耐冷性也能明显提高。Mangrich 和 Saltveit^[36]的研究也表明, 热击可降低水稻、棉花等幼苗对冷害的敏感性。播种前对马铃薯种薯进行热处理 (38℃, 24 d) 可有效防治马铃薯卷叶病毒

的发生, 提高薯苗的抗病能力^[37]。Gong 等^[38]发现, 热击可以诱导玉米幼苗对热、冷、干旱以及盐等胁迫交叉的适应能力。

热处理可减轻植物果实贮藏过程中冷害的发生, 可能是因为热处理保护了与果实呼吸、乙烯形成有关酶的活性, 维持果实的呼吸速率和相对较高水平的乙烯释放量, 以至果实组织可通过活跃的代谢作用将低温胁迫时积累的有毒中间产物排除掉, 保护膜完整性和蛋白质、酶、DNA 等生物分子的活性, 维持细胞的正常代谢^[23]。Gonzalez 等^[39]指出, 热水处理可增强辣椒的抗冷性, 同时提高辣椒的内源多胺含量。多胺在生理酸性条件下带正电荷, 通过氢键和离子键与细胞膜上带负电荷的磷脂结合后, 可降低膜脂相变温度和阻止膜脂过氧化作用, 从而减轻低温对细胞膜的冲击。还有研究认为, 热处理可能诱导植物细胞内某些抗氧化酶的活性^[40], 减轻冷害导致离子渗漏的发生^[26, 30], 诱导热激蛋白合成, 导致植物体内有利于增强抗性的其它生理生化代谢发生^[41, 42]。

4 冷锻炼

植物对逆境具有一定的适应能力, 即植物受到某一种非致死逆境胁迫时, 会产生抵抗这种逆境胁迫的能力^[43]。

刘鹏等^[44]以喜温植物甜椒抗冷品种“1141”和不抗冷品种“0004”为试验材料, 研究冷锻炼对两品种叶片膜脂过氧化作用和活性氧清除系统影响的结果表明, 经过冷锻炼的甜椒幼苗叶片细胞膜的稳定性和膜保护系统功能明显提高。与未经锻炼的幼苗相比, 锻炼的苗在低温胁迫过程中表现出更高的 SOD 活性和抗坏血酸含量, 以及较低的膜脂过氧化水平。也就是说, 冷锻炼可提高两品种甜椒抵御低温伤害的能力。吴能表等^[45]发现, 经低温诱导后的甘蓝抗寒性明显增强, 并与其体内 ABA 水平增加有关系。ABA 作为一种应急激素, 通过保护膜结构, 维护膜功能和启动抗寒基因而提高甘蓝抗低温的能力。不同品种和同一品种不同苗龄的香蕉幼苗经过低温锻炼后, 幼苗体内 6-磷酸葡萄糖脱氢酶和腺苷三磷酸酶的活性以及 RNA 与可溶性蛋白质含量均明显提高, 而幼苗细胞膜的伤害率显著降低, 这均证明低温锻炼

可提高幼苗的抗冷性^[46]。

冷击处理不但可提高植物幼苗的抗寒性, 还可推迟果蔬的成熟衰老, 延长贮藏寿命, 提高果蔬在贮藏过程中的抗逆性。如黄桃采后先用 0℃ 的冰水浸泡 30 min, 再置于 (0±1)℃ 下贮藏, 其果实的呼吸速率即受抑, 半聚乳糖醛酸酶活性、丙二醛含量和电解质渗出率下降, 冷害发生减少^[47]。张昭其等^[48]报道, 香蕉经 -2~0℃ 冷空气处理 2.5 h 后, 原在高温下贮藏的香蕉膜脂过氧化即减轻, 脯氨酸积累提高, 蛋白质降解受抑, 显示冷处理可诱导香蕉的耐热性。这是植物对逆境有交叉适应能力的一种反应, 即植物受到某一种非致死逆境胁迫时, 不仅有抵抗这种逆境胁迫的能力, 而且对另一种逆境胁迫的抗逆能力也增强。

5 激光

激光作为一种新技术已经在工业、国防、医学等领域获得愈来愈多的应用。近年来, 激光在农业和生物科学中的应用发展也很快。目前已有不少研究发现, 用激光处理植物可增强其对逆境的抵抗能力^[49, 50]。

激光分为脉冲式激光和连续式激光 2 种^[51]。前者, 如掺钕钇铝石榴石 (neodymium:yttrium aluminum garnet, Nd:YAG) 和氙氯 (XeCl) 激光, 主要用于医学治疗^[52]; 而在农业科学中应用比较广泛的是后者, 如常见的 He-Ne 激光和 CO₂ 激光^[53, 54]。一般, 研究激光辐照植物效应的方法有 3 种: (1) 播前辐照种子; (2) 辐照生长时的植株; (3) 辐照灌溉水。由于辐照植物种子或幼苗比较简便, 所以, 应用较广的为前两种方法^[55]。

适宜剂量 He-Ne 激光和 CO₂ 激光可促进植物的生长和代谢, 促进植物种子萌发, 提高植物幼苗抵抗逆境的能力。经 He-Ne 激光辐照的葡萄休眠芽和其长成的植株, 不仅有提早结果和促进生长发育的作用, 而且更为明显的是有延迟发病与增强葡萄抗病的效应。如激光处理后, 葡萄黑痘病发病期延迟 7~8 d, 发病率减少 9.83%; 葡萄叶斑病发病期延迟 5~10 d, 发病率减少 15.1%, 葡萄黑痘病发病率减少 16.28% 等^[54]。蚕豆和小麦幼苗经过适宜强度的激光辐射后, 即强 UV-B 射线辐射对这些植物的损伤作用明显减轻^[50, 56]。Nd:YAG (1 060 nm) 激光辐照花生种子后, 其 F₁ 代植株性

状和对环境的适应能力均明显改善等^[55]。

激光对生物体与非生物体的作用显著不同,其作用机制较复杂。激光提高植物的生活力与抗逆性可能是通过热效应、光化学效应、光电效应及电磁效应等多种效应的协调作用,改变植物体内基因表达之果,因而植物体内CAT、SOD以及抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)等活性提高,它们对由于逆境导致的一些自由基、活性氧等有害物质的清除能力提高^[49, 55]。Chen等^[49]发现,植物种子经He-Ne激光辐射后,种子体内的能量水平提高,幼苗的焓变增加,叶绿素浓度增高,净光合速率、水分利用效率等明显增强,从而提高了植物对外界不良因素的抵抗能力。

6 结语

提高植物抗逆性的物理方法除了上述几种以外,还有近红外线法、微波辐射、减压以及⁶⁰Co、 γ 射线辐射等等,这里不再一一介绍。总之,采用一些物理措施来提高植物的抗逆性,具有无污染、操作简单、迅速有效等优点,在农业生产中的应用必将越来越广泛。但值得注意的是,影响植物抗逆性的因素很多,包括植物种类、发育的阶段及特点、生长的环境等等,所以在应用中必然涉及到物理处理参数的选择问题,如物理方式的选择,处理的强度、剂量、时间以及其它各种具体物理参数的选择等。同时,这些物理因素处理影响植物抗逆性的作用机制也应深入研究。

参考文献

- Esitken A. Effects of magnetic fields on yield and growth in strawberry 'Camarosa'. *J Hort Sci Biotech*, 2003, 78(2): 145~147
- Martinez E, Carbonell MV, Amaya JM. A static magnetic field of 125 mT stimulates the initial growth stages of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Electro Magnetobiol*, 2000, 19(3): 271~277
- Phirke PS, Patil MN, Umbarkar SP et al. The application of magnetic treatment to seeds: methods and responses. *Seed Sci Technol*, 1996, 24(2): 365~373
- Souza TE, Porras LE, Casate FR. Effect of magnetic treatment of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) seeds on germination and seedling growth. *Hortic Abs*, 1999, 70(8): 6892
- Yao YN, Li Y, Yang YQ et al. Effect of seed pretreatment by magnetic field on the sensitivity of cucumber (*Cucumis sativus*) seedlings to ultraviolet-B radiation. *Environ Exp Bot*, 2005, 54(3): 286~294
- Piacentini MP, Fraternali D, Piatti E et al. Senescence delay and change of antioxidant enzyme levels in *Cucumis sativus* L. etiolated seedlings by ELF magnetic fields. *Plant Sci*, 2001, 161(1): 45~53
- 肖艳辉, 任国艳, 何金明等. 磁场对洋葱鳞茎发芽影响的研究. *江苏农业科学*, 2004, (1): 60~62
- Ruzic R, Jerman I. Weak magnetic field decreases heat stress in cress seedlings. *Electromagnet Biol Med*, 2002, 21(1): 43~53
- 朱建楚, 刘思春, 陈建文等. 磁环境条件下番茄抗逆性的初探. *干旱地区农业研究*, 2001, 19(4): 58~64
- Xi G, Fu ZD, Ling J. Change of peroxidase activity in wheat seedlings induced by magnetic field and its response under dehydration condition. *Acta Bot Sin*, 1994, 36(suppl): 113~118
- 刘新成, 李秋祯. 磁场和Cu²⁺对蚕豆幼根生长、细胞分裂和过氧化物酶同工酶谱的影响. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 2000, 23(9): 27~29
- Ruzic R, Vodnik D, Jerman I. Influence of aluminum in biologic effects of elf magnetic field stimulation. *Electro Magneto Biol*, 2000, 19(1): 57~68
- Garcia RF, Arza PL. Influence of a stationary magnetic field on water relations in lettuce seeds. Part I: theoretical considerations. *Bioelectromagnetics*, 2001, 22(8): 589~595
- Zhang H, Hashinaga F. Effect of high electric fields on the germination and early growth of some vegetable seeds. *J Jpn Soc Hortic Sci*, 1997, 66(2): 347~352
- Matsuo M, Sakata T. Effects of electric fields on germination and early growth of moist seed. *Environ Control Biol*, 1994, 32(2): 107~111
- Valberg PA, Kavet R, Rafferty CN. Can low-level 50/60 Hz electric and magnetic fields cause biological effects? *Radiat Res*, 1997, 148(1): 2~21
- Parani M, Rao CS, Mathan N et al. Biological effects of power frequency electric fields. *J Electrostat*, 1997, 39(3): 157~174
- 侯建华, 杨体强, 那日等. 电场处理油菜种子在干旱胁迫下萌发及酶活性的变化. *中国油料作物学报*, 2003, 25(1): 40~44
- 韩玉敏, 房仲秋. 农作物种子电场处理的试验研究. *天津农林科技*, 1999, (2): 8~10
- Nechitailo G, Gordeev A. The use of an electric field in increasing the resistance of plants to the action of unfavorable space flight factors. *Adv Space Res*, 2004, 34(7): 1562~1565
- Prasad KG, Hashinaga F, Shintani R. Effect of high electric fields on some fruits and vegetables. *J Jpn Soc Cold Preserved Food*, 1996, 22(1): 17~22
- Whitaker BD. A reassessment of heat treatment as a means of reducing chilling injury in tomato fruit. *Postharvest Biol Technol*, 1994, 4(1): 75~83

- 23 茅林春, 王阳光, 张上隆. 热处理减缓桃果实的采后冷害. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2000, 26(2): 137~140
- 24 Woolf AB, Ferguson IB. Postharvest responses to high fruit temperatures in the field. *Postharvest Biol Technol*, 2000, 21(1): 7~20
- 25 Sabehat A, Weiss D, Lurie S. The correlation between heat shock protein accumulation and persistence and chilling tolerance in tomato fruit. *Plant Physiol*, 1996, 110(2): 531~537
- 26 Saltveit ME. Influence of heat shocks on the kinetics of chilling-induced ion leakage from tomato pericarp discs. *Postharvest Biol Technol*, 2005, 36(1): 87~92
- 27 罗自生, 席芳, 楼健. 热处理减轻柿果冷害与内源多胺的关系. *中国农业科学*, 2003, 36(4): 429~432
- 28 Reyes MEQ, Nishijima W, Paull RE. Control of crown rot in 'Santa Catarina Prata' and 'Willama' banana with hot water treatment. *Postharvest Biol Technol*, 1998, 14(1): 71~75
- 29 胡美姣, 刘秀娟, 黄圣明. 热处理后芒果、香蕉果皮PAL活性变化与炭疽病发生的关系. *热带作物学报*, 2000, 21(4): 63~67
- 30 Rab A, Saltveit ME. Sensitivity of seedling radicles to chilling and heat-shock induced chilling tolerance. *J Am Soc Hortic Sci*, 1996, 121(4): 711~715
- 31 Hanley ME, Lamont BB. Heat pre-treatment and the germination of soil and canopy stored seeds of south-western Australian species. *Acta Oecol*, 2000, 21(6): 315~321
- 32 Alyabyev AJ, Loseva NL, Jakushenkova TP et al. Comparative effects of blue light and red light on the rates of oxygen metabolism and heat production in wheat seedlings stressed by heat shock. *Thermochim Acta*, 2002, 394(1): 227~231
- 33 Saltveit ME. Chilling injury is reduced in cucumber and rice seedlings and in tomato pericarp discs by heat-shocks applied after chilling. *Postharvest Biol Technol*, 2001, 21(2): 169~177
- 34 Mangrich ME, Saltveit ME. Effect of chilling, heat shock, and vigor on the growth of cucumber (*Cucumis sativus*) radicles. *Physiol Plant*, 2000, 109(2): 137~142
- 35 Collins GG, Nie XL, Saltveit ME. Heat shock increases chilling tolerance of mung bean hypocotyl tissue. *Physiol Plant*, 1993, 89(1): 117~124
- 36 Mangrich ME, Saltveit ME. Heat-shocks reduce the chilling sensitivity of cotton, kenaf, okra, and rice seedling radicles. *J Am Soc Hortic Sci*, 2000, 125(3): 377~382
- 37 刘华, 冯高. 热处理防治马铃薯卷叶病毒的研究. *中国马铃薯*, 2002, 16(6): 340~341
- 38 Gong M, Chen B, Li ZG et al. Heat-shock induced cross adaptation to heat, chilling, drought and salt stress in maize seedlings and involvement of H₂O₂. *J Plant Physiol*, 2001, 158(9): 1125~1130
- 39 Gonzalez A, Gayosso L, Cruz R. Polyamines induced by hot water treatments reduce chilling injury and decay in pepper fruit. *Postharvest Biol Technol*, 2000, 18(1): 19~26
- 40 Chaitanya KV, Sundar D, Masilamani S et al. Variation in heat stress-induced antioxidant enzyme activities among three mulberry cultivars. *Plant Growth Regul*, 2002, 36(2): 175~180
- 41 Sun WN, Montagu MV, Verbruggen N. Small heat shock proteins and stress tolerance in plants. *Biochim Biophys Acta*, 2002, 1577(1): 1~9
- 42 Gulen H, Eris A. Some physiological changes in strawberry (*Fragaria x ananassa* cv. Camarosa) plants under heat stress. *J Hortic Sci Biotech*, 2003, 78(6): 894~898
- 43 王宝山. 植物生理学. 北京: 科学出版社, 2004. 274~294
- 44 刘鹏, 李勃, 刘庆忠等. 冷锻炼诱导甜椒抗冷力的生化机理研究. *山东农业科学*, 2003, (3): 11~14
- 45 吴能表, 王小佳, 朱利泉等. 短时低温处理对甘蓝逆境指标和PK活性的影响. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2003, 28(4): 609~613
- 46 林善枝, 陈晓敏, 蔡世英等. 低温锻炼对香蕉幼苗能量代谢和抗冷性效应的研究. *热带作物学报*, 2001, 22(2): 17~22
- 47 陈留勇, 孟宪军, 宋义忠等. 冷激处理对黄桃保鲜效果的影响. *食品工业科技*, 2003, 24(11): 67~69
- 48 张昭其, 段学武, 庞学群等. 冷激对采后香蕉几个与耐热性有关的生理指标的影响. *植物生理学通讯*, 2002, 38(4): 333~335
- 49 Chen YP, Yue M, Wang XL. Influence of He-Ne laser irradiation on seeds thermodynamic parameters and seedlings growth of *Isatis indogotica*. *Plant Sci*, 2005, 168(3): 601~606
- 50 Qi Z, Yue M, Wang XL. Laser pretreatment protects cells of broad bean from UV-B radiation damage. *J Photochem Photobiol Biol*, 2000, 59(1): 33~37
- 51 Markolf HN. Laser tissues interactions fundamentals and applications. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1996. 8~15
- 52 Terry AC, Stark WJ, Maumence HE et al. Neodymium-YAG lasers for posterior capsulotomy. *Am J Ophthalmol*, 1983, 96(6): 716~720
- 53 Klebanov GI, Kapitanov AB, Tessikin YA. The antioxidant properties of lycopene. *Membr Cell Biol*, 1998, 12(2): 287~300
- 54 彭绍民. He-Ne 激光辐照葡萄抗病性研究. *激光生物学报*, 2002, 11(1): 54
- 55 欧琳, 陈荣, 林彤等. Nd:YAG激光辐照花生种子的生物学效应. *光电子·激光*, 2001, 12(7): 751~753
- 56 Qi ZH, Yue M, Han R et al. The damage repair role of He-Ne laser on plants exposed to different intensities of UV-B irradiation. *Photochem Photobiol*, 2002, 75(6): 680~686