

外源甜菜碱对黄瓜果实冷藏期间延缓冷害的影响

张海英¹, 王有年², 韩涛¹, 李丽萍³, 许丽¹

(¹北京农学院食品科学系, 北京 102206; ²北京农学院植物科学系, 北京 102206; ³北京工商大学环境与化工学院, 北京 100037)

摘要:【目的】研究甜菜碱处理对黄瓜果实低温贮藏期间冷害发生发展的影响, 探讨甜菜碱对黄瓜果实抗冷性的作用机理, 为甜菜碱应用于果蔬保鲜提供理论依据。【方法】以‘中农8号’黄瓜为试材, 用5、10、15 mmol·L⁻¹的外源甜菜碱处理, 贮于4℃, 观察冷害现象并测定与抗冷性相关的生理指标。【结果】甜菜碱处理可提高黄瓜果实中超氧化物歧化酶(SOD)活性, 加强对超氧阴离子自由基(·O₂⁻)的清除作用, 有效抑制丙二醛(MDA)的产生和积累, 降低细胞膜透性, 增加渗透调节物质脯氨酸(Pro)含量。【结论】甜菜碱能减轻黄瓜果实贮藏期间的冷害, 提高其抗冷性; 处理浓度以10 mmol·L⁻¹为适宜。

关键词: 黄瓜 (*Cucumis sativus* L.); 甜菜碱; 抗冷性; 贮藏

Effect of Exogenous Glycine Betaine on Chilling Injury and Chilling-Resistance Parameters in Cucumber Fruits Stored at Low Temperature

ZHANG Hai-ying¹, WANG You-nian², HAN Tao¹, LI Li-ping³, XU Li¹

(¹Department of Food Sciences, Beijing Agricultural College, Beijing 102206; ²Department of Plant Science, Beijing Agricultural College, Beijing 102206; ³College of Chemical & Environmental Engineering, Beijing Technology & Business University, Beijing 100037)

Abstract: 【Objective】 This paper investigated the effects of glycine betaine (GB) treatment on chilling injury and relative physiological indicators in cucumber during cold storage. The mechanisms were discussed so as to provide a theoretical basis for increasing chilling-resistance of GB in harvested fruits or vegetables. 【Method】 ‘Zhongnong 8’ cucumbers were immersed in the GB solutions of 0, 5 mmol·L⁻¹, 10 mmol·L⁻¹ and 15 mmol·L⁻¹ and stored at (4±1)°C. The rates of index of chilling injury were observed and the relative physiological parameters, including production rate of superoxide anion radical (·O₂⁻), superoxide dismutase activity (SOD), cell membrane permeability, contents of malondialdehyde (MDA) and proline, were measured. 【Result】 The activities of SOD were increased and free proline contents were accumulated in the fruits by GB treatments. The MDA production and accumulation as well as the increase of cell membrane permeability in flesh were restrained by the treatments. 【Conclusion】 This study indicated that GB alleviated chilling injury in cucumber during cold storage and promoted its chill-resistance of tissue. GB at 10 mmol·L⁻¹ is preferable for cucumbers.

Key words: Cucumber; Glycine betaine (GB); Cold resistance; Storage

0 引言

【研究意义】甜菜碱(glycine betaine, GB)是一种季胺型水溶性生物碱^[1], 广泛存在于微生物、植物、

动物体内^[2], 是细胞质中重要的非毒性渗透调节物质。在植物体内, GB合成后, 几乎不被代谢, 属于永久性或半永久性渗透调节剂^[3], GB与甘露糖、多胺、脯氨酸等物质一样, 参与调节细胞的渗透势, 保持细胞

收稿日期: 2007-09-21; 接受日期: 2008-04-18

基金项目: 北京市属高校中青年骨干教师培养计划项目(PMX2007_014207_044539); 北京市都市型果业学科与果树生态安全创新团队, 北京市教育委员会科技创新平台-果蔬生物与物理保鲜技术创新平台项目

作者简介: 张海英(1976-), 女, 蒙古族, 山东泗水人, 讲师, 硕士, 研究方向为果蔬采后生理及加工技术。Tel: 13691333252; Fax: 010-80799170; E-mail: zhanghaiying8079@sina.com。通讯作者韩涛(1963-), 北京人, 教授, 研究方向为果蔬采后生理及加工技术。Tel: 13681239144, 010-80794186; Fax: 010-80799170; E-mail: taolhan@yahoo.com.cn

膨压^[4]。当植物受到逆境胁迫时, GB 会在植物体内迅速积累, 调节细胞内的渗透压, 并维持水分平衡, 稳定生物大分子结构和功能, 对植物维持细胞的正常膨压及生理功能具有重要的生理意义^[5]。【前人研究进展】目前对植物体内 GB 的生物合成及其渗透调节过程的研究已取得了一定的进展, 证明了植物体内 GB 的积累可提高植物抗逆性, 如抗旱性^[6,7]、抗盐碱性^[6,8]和抗寒性^[9-12]。冷藏是果品和蔬菜最行之有效的贮藏方法之一。但有些果蔬, 特别是一些亚热带和热带(也包括某些温带)地区生长的冷敏感产品, 由于系统发育处于高温多湿的环境中, 形成了对低温的敏感性(称冷敏感果蔬), 即使在冰点温度以上贮藏也会引起代谢障碍或失调而造成细胞伤害(冷害)。【本研究切入点】GB 可提高植物抗逆性, 但对冷敏感果蔬的抗冷性研究较少。【拟解决的关键问题】本文以‘中农 8 号’黄瓜为试材, 研究外源 GB 处理后黄瓜在低温下冷害发生及相关生理指标的变化, 探讨外源 GB 应用于冷敏感果蔬, 是否具有提高组织抗冷性的效应。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验材料黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 为‘中农 8 号’, 购自北京昌平北郊市场。选择瓜条饱满、顺直、长短一致、粗细均匀、无机械伤的黄瓜, 采购时带 1 cm 的果柄, 立即运至实验室进行处理。

1.2 试验处理

在前期预试验的基础上, 将黄瓜分别用 5、10 和 15 mmol·L⁻¹ 的 GB 水溶液浸泡 15 min, 以水浸为对照, 室温下自然晾干, 分别放入塑料袋中, 挽口后, 置于 4℃ 贮藏。每批处理 3 次重复。

1.3 指标测定

贮藏期间, 调查黄瓜的冷害发生率和冷害指数, 并随机取样, 进行生理指标的测定。超氧化物歧化酶 (SOD) 活性的测定采用氮蓝四唑法^[13], 超氧阴离子 ($\cdot\text{O}_2^-$) 产生速率的测定采用郭远华和邹国林的方法^[14], 脯氨酸 (Pro) 含量的测定采用茚三铜比色法^[15], 丙二醛 (MDA) 含量的测定采用硫代巴比妥酸比色法^[16], 细胞膜电解质渗透率的测定采用电导率法^[17]。黄瓜冷害发生率和冷害指数统计参照逯明辉等方法^[18], 依冷害面积占黄瓜表面积之比将黄瓜的冷害分为: I 级, 0~25%; II 级, 25%~50%; III 级, 50%~75%; IV 级, 75%~100%。

冷害发生率 = (发生该级别冷害果数/总果数) × 100%
冷害指数 = \sum (冷害级别 × 该级别果数) / (4 × 检查果数)

数据处理均使用 SPSS 软件系统进行分析。图中标识为平均值 ± SE。

2 结果与分析

2.1 外源甜菜碱 (GB) 对黄瓜果实在贮藏期间冷害发生的影响

未经 GB 处理的对照最先在冷藏的第 5 天开始出现冷害症状(表), 而用 GB 处理的黄瓜, 冷害出现的时间均有所延迟, 5 mmol·L⁻¹ 处理在第 7 天开始发生冷害, 10 mmol·L⁻¹ 和 15 mmol·L⁻¹ 处理在第 9 天开始发生冷害, 分别比对照晚 2~4 d。随着冷藏期的延长, 黄瓜冷害发生率增加, GB 处理的果实, 冷害发生率明显低于对照, 其中以 10 mmol·L⁻¹ 处理最低; 标志冷害程度的冷害指数也是以 10 mmol·L⁻¹ 处理最低。这表明外源 GB 处理可有效推迟黄瓜冷害的发生, 并

表 外源甜菜碱 (GB) 处理后黄瓜在贮藏期间冷害的发生情况

Table The rate and index of chilling injury in cucumber fruits during storage at 4℃

甜菜碱浓度 GB concentration (mmol·L ⁻¹)	冷害统计指标 Indicators of chilling injury	贮藏天数 Storage days (d)						
		0	3	5	7	9	12	14
0	发生率 Rate	0.00	0.00	5.26a	15.79a	23.68a	34.21a	44.74a
	发生指数 Index	0.00	0.00	0.02	0.08	0.11	0.18	0.25
5	发生率 Rate	0.00	0.00	0.00	5.26b	13.00ab	18.40b	23.68ab
	发生指数 Index	0.00	0.00	0.00	0.02	0.06	0.09	0.12
10	发生率 Rate	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00b	10.00b	17.50b
	发生指数 Index	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.09
15	发生率 Rate	0.00	0.00	0.00	0.00	6.67b	16.00ab	24.40ab
	发生指数 Index	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.07	0.13

同列相同字母表示差异不显著, 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) (最小显著差异法)

Letters in same columns indicate the significant difference at 0.05 level (LSD)

能减轻冷害程度。

2.2 外源甜菜碱 (GB) 对冷藏黄瓜果实超氧阴离子 ($\cdot\text{O}_2^-$) 产生速率和超氧化物歧化酶 (SOD) 活性的影响

冷藏期间黄瓜 $\cdot\text{O}_2^-$ 产生速率一直呈现下降趋势(图 1)；不同浓度 GB 处理黄瓜的 $\cdot\text{O}_2^-$ 产生速率在冷藏前 5 d 和对照的差异较小，随后 GB 处理的黄瓜 $\cdot\text{O}_2^-$ 产生速率明显低于对照，以 10 mmol·L⁻¹ GB 处理最为显著 ($P<0.05$)。这表明适宜浓度 GB 处理后能有效减少低温胁迫条件下黄瓜的 $\cdot\text{O}_2^-$ 产生速率。

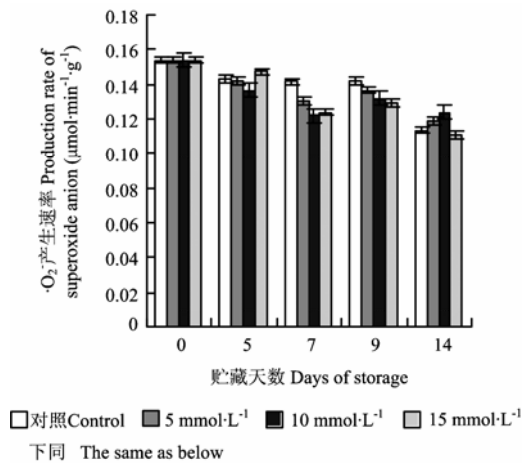


图 1 甜菜碱处理后黄瓜果实在 4°C 下 $\cdot\text{O}_2^-$ 产生速率的变化
Fig. 1 Changes of production rate of superoxide anion in cucumber fruits at 4°C

冷藏期间不论对照或 GB 处理黄瓜的 SOD 活性呈现先升高后下降的变化趋势(图 2)，第 5 d 达到最大活性；但 GB 处理黄瓜的 SOD 活性一直明显高于对

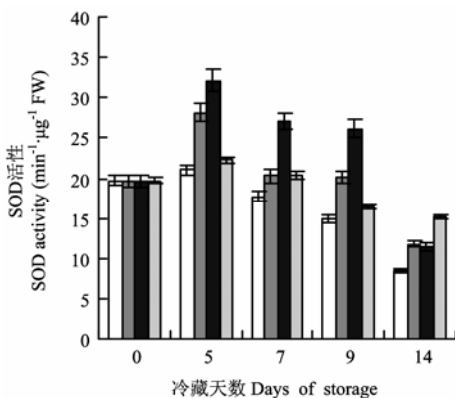


图 2 甜菜碱处理后黄瓜果实在 4°C 下 SOD 活性的变化
Fig. 2 Changes of SOD activity in cucumber fruits at 4°C

照 ($P<0.01$)，以 10 mmol·L⁻¹ GB 处理的 SOD 活性最高。这表明适宜浓度 GB 处理可增加冷敏感果蔬的 SOD 活性和增强其清除自由基的能力。

2.3 外源甜菜 (GB) 对冷藏黄瓜果实丙二醛 (MDA) 含量和细胞膜渗透性的影响

冷藏期间黄瓜丙二醛含量总体呈增加的趋势(图 3)，GB 处理与对照有相同的变化趋势，明显低于对照 ($P<0.05$)；以 10 mmol·L⁻¹ GB 处理的最低，与 15 mmol·L⁻¹ 处理之间不明显。表明适宜浓度 GB 处理能有效减少 MDA 的积累。

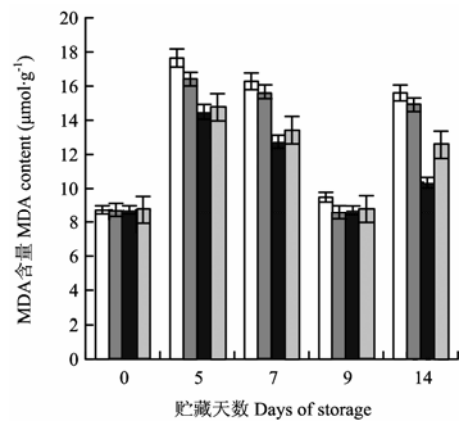


图 3 甜菜碱处理后黄瓜在 4°C 下 MDA 含量的变化
Fig. 3 Changes of MDA content in cucumber fruits at 4°C

细胞膜渗透性的增加是低温对生物膜伤害的标志之一^[19]。冷藏期间黄瓜的电解质渗出率一直呈增加的趋势(图 4)；不同浓度 GB 处理黄瓜的细胞电解质渗

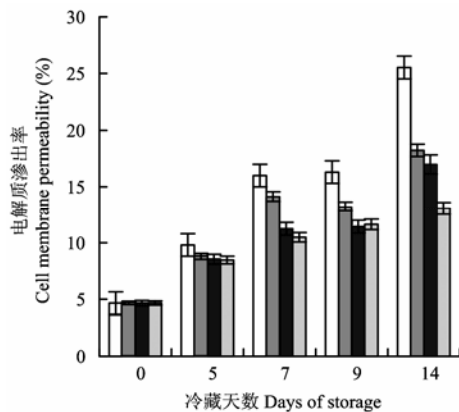


图 4 甜菜碱处理后黄瓜在 4°C 下电解质渗出率的变化
Fig. 4 Changes of cell membrane permeability in cucumber fruits at 4°C

出率呈现出明显低于对照的趋势 ($P < 0.05$), 处理浓度愈高, 细胞电解质渗出率愈低; $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 $15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 两处理间差异不显著。

2.4 外源甜菜碱 (GB) 处理对冷藏黄瓜果实脯氨酸 (Pro) 含量的影响

黄瓜脯氨酸含量在冷藏期间总体趋势也是增加的 (图 5), 不同浓度 GB 处理黄瓜的脯氨酸含量的变化趋势与对照一致, 总体上都高于对照 ($P < 0.05$), 以 $15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理最高。

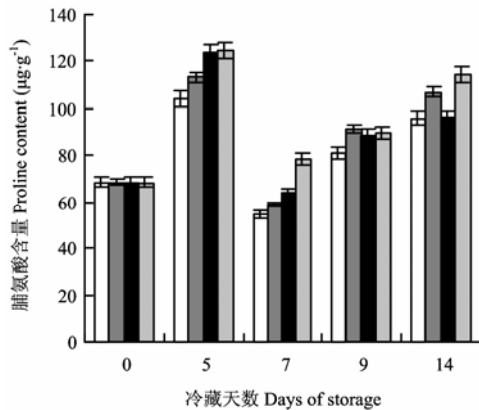


图 5 甜菜碱处理后黄瓜在 4°C 下脯氨酸含量的变化

Fig. 5 Changes of proline content in cucumber fruits at 4°C

3 讨论

在正常情况下, 细胞内活性氧或自由基的产生与清除处于动态平衡, 不会引起伤害; 但在果蔬衰老劣变过程中, 或在逆境胁迫下, 这种平衡遭到破坏, 导致蛋白质、核酸、酶结构的破坏; 过氧化反应产生新的自由基, 进一步促进膜脂质的过氧化, 膜的完整性受到破坏, 表现为膜透性的增大和离子泄漏, 最终导致组织伤害或死亡^[19]。果蔬组织遭受低温胁迫时, 伴随着膜相的改变, 膜结合酶的活性也发生变化, 进一步引起膜结合酶和游离酶反应速度失去平衡, 从而使物质代谢失调和有毒物质在组织内积累, 使组织受害或死亡^[20]。因此, 冷害胁迫下相关酶活性的变化及渗透调节物质的积累与冷害的因果关系值得深入研究。

低温对植物体内不同酶系统的影响是不同的^[21]。SOD 是存在于植物细胞中最重要的清除自由基的酶类之一, 具抗氧化作用, 能促进 $\cdot\text{O}_2^-$ 生成 H_2O_2 和水的歧化反应, 解除对植物的毒害。SOD 是一种典型的诱导酶, 外部环境条件的改变能影响 SOD 的活性水平^[20]。

几乎所有的胁迫都能诱导 SOD 活性的增加, 有效的清除自由基^[22]。膜脂过氧化产物 MDA 含量的高低可在一定程度上反映植物抗逆性的强弱^[21], 丙二醛 (MDA) 是细胞膜中不饱和脂肪酸过氧化作用的产物, 其水平在一定程度上反映植物抗冷性的强弱。在植物遭受逆境胁迫时, 自由基积累, 导致膜脂过氧化水平增高, 丙二醛含量增加, 膜脂成分改变, 不饱和指数下降, 膜的相对透性增加, 膜结构和功能改变, 从而引发一系列生理代谢变化^[22]。本研究中, GB 处理黄瓜能增加组织 SOD 活性, 抑制 MDA 的产生和积累。

低温胁迫下, 植物细胞膜受到伤害, 透性增加, 离子渗出率上升。这种变化的发生明显早于外部形态结构的变化, 膜透性可作为预测冷害的指标^[23]。不同浓度的 GB 处理后, 使细胞膜内的电解质在完整的细胞内部形成区域化分布, 进而在黄瓜中积累, 从而达到渗透调节保护细胞膜的目的; 同时由于 GB 还有稳定逆境下生物大分子的作用^[2], 使细胞膜的透性降低。这与李芸瑛等^[24]研究的结果一致。

脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质, 在细胞内的积累对于降低细胞内溶质的渗透势、均衡原生质体内外的渗透强度、维持细胞内酶正常的结构和构象、减少细胞内可溶性蛋白的沉淀等有重要的作用^[25]。低温胁迫下, 冷敏感的果蔬组织细胞中蛋白质降解速率大大超过合成速率, 造成蛋白质匮乏和有毒物质的积累; 随着蛋白质含量的下降, 游离氨基酸与游离氨也随之大量积累, 尤其是脯氨酸含量增加显著。脯氨酸是渗透调节过程中重要的调节物质, 是植物对低温胁迫所做出的适应性反应, 其升高可加强质膜稳定性, 提高细胞耐脱水能力^[26,27]。本研究发现用不同浓度的 GB 处理黄瓜可明显增加低温贮藏后期游离脯氨酸含量, 浓度高时 ($10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 的效果更为明显。

4 结论

GB 通过增加保护性酶 SOD 活性及渗透调节物质 Pro 含量, 有效抑制了膜脂过氧化产物 MDA 的产生和积累, 保持了细胞膜透性, 从而增强了黄瓜的抗冷性。在 3 个浓度 GB 处理中, 以 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理对黄瓜的保护性最好。

References

- [1] 李新梅, 孙丙耀, 谈建中. 甜菜碱与植物抗逆性关系的研究进展. 农业科学研究, 2006, 27(3): 66-70.

- Li X M, Sun B Y, Tan J Z. Research progress on application of glycine betaine in plant stress resistance. *Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 27(3): 66-70. (in Chinese)
- [2] 罗小敏, 张迎迎, 崔 妍. 甜菜碱在植物抗渗透胁迫中的功能及其作用机制. *河北林果研究*, 2003, 18(4): 384-388.
- Luo X M, Zhang Y Y, Cui Y. The function and the mechanism of glycine betaine in osmotic stress tolerance in plant. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 2003, 18(4): 384-388. (in Chinese)
- [3] Raza S H, Athar H R, Ashraf M, Hameed A. Glycinebetaine-induced modulation of antioxidant enzymes activities and ion accumulation in two wheat cultivars differing in salt tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 60: 368-376.
- [4] Chen Z H, Cuin T A, Zhou M X, Twomey A, Naidu B P, Shabala S. Compatible solute accumulation and stress-mitigating effects in barley genotypes contrasting in their salt tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(15/16): 4245-4255.
- [5] Konstantinova T, Parvanova D, Atanassov A, Djilianov D. Freezing tolerant tobacco, transformed to accumulate osmoprotectants. *Plant Science*, 2002, 163: 157-164.
- [6] 张立新, 李生秀. 甜菜碱与植物抗旱/盐性研究进展. *西北植物学报*, 2004, 24(9): 1765-1771.
- Zhang L X, Li S X. Research progress on relationships betaine and drought/salt resistance of plants. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2004, 24(9): 1765-1771. (in Chinese)
- [7] 杨淑英, 张建新, 吕家珑, 史荣力. 外源甜菜碱对冬小麦抗旱性生理指标的影响研究. *西北植物学报*, 2000, 20(6): 1041-1045.
- Yang S Y, Zhang J X, Lü J L, Shi R L. Studies on effect of exogenous betaine on physiological index of drought resistance for winter wheat. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2000, 20(6): 1041-1045. (in Chinese)
- [8] Sakamutu A, Mlbata N. Genetic engineering of glycine betaine synthesis in plant: current status and implications for enhancement of stress tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(342): 81-88.
- [9] 郭启芳, 马千全, 孙 灿, 吕守忠, 张青蒙, 王 玮. 外源甜菜碱提高小麦幼苗抗盐性的研究. *西北植物学报*, 2004, 24(9): 1680-1686.
- Guo Q F, Ma Q Q, Sun C, Lü S Z, Zhang Q M, Wang W. Effects of exogenous glycine betaine on the salt-tolerance of wheat. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2004, 24 (9): 1680-1686. (in Chinese)
- [10] Shirasawa K, Takabe Tomoko, Takabe Tetsuko, Kishitani S. Accumulation of glycine betaine in rice plants that overexpress choline monooxygenase from spinach and evaluation of their tolerance to abiotic stress. *Annals of Botany*, 2006, 98: 565-571.
- [11] 苏文潘, 李茂富, 黄华孙. 甜菜碱对低温胁迫下香蕉幼苗细胞膜保护酶活性的影响. *广西农业科学*, 2005, 36(1): 21-25.
- Su W P, Li M F, Huang H S. Effect of betaine on activities of membrane protective enzymes in banana seedlings under low temperature stress. *Guangxi Agricultural Science*, 2005, 36(1): 21-25. (in Chinese)
- [12] Park E J, Jeknic Z, Chen T H H. Exogenous application of glycinebetaine increases chilling tolerance in tomato plants. *Plant Cell Physiology*, 2006, 47(6): 706-714.
- [13] 黎瑞珍, 杨庆建, 陈贻锐. 超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定及其应用研究. *琼州大学学报*, 2004, 11(5): 34-36.
- Li R Z, Yang Q J, Chen Y R. Study of determination of superoxide dismutase (SOD) activation and application. *Journal of Qiongzhou University*, 2004, 11(5): 34-36. (in Chinese)
- [14] 郭远华, 邹国林. 儿茶素对超氧阴离子自由基的清除及其自氧化作用研究. *氨基酸和生物资源*, 2001, 23(2): 10-12.
- Guo Y H, Zou G L. Studies on the scavenging effect of catechin on superoxide anion free radical and its self-oxidation. *Amino Acids and Biotic Resources*, 2001, 23(2): 10-12. (in Chinese)
- [15] 职明星, 李秀菊. 脯氨酸测定方法的改进. *植物生理学通讯*, 2005, 41(3): 355-357.
- Zhi M X, Li X J. Improvement on the method for measuring proline content. *Plant Physiology Communications*, 2005, 41(3): 355-357. (in Chinese)
- [16] 赵世杰, 许长成, 邹 琦, 孟庆伟. 植物组织中丙二醛测定方法的改进. *植物生理学通讯*, 1994, 30(3): 207-210.
- Zhao S J, Xu C C, Zou Q, Meng Q W. Improvement on the method for MDA content. *Plant Physiology Communications*, 1994, 30(3): 207-210. (in Chinese)
- [17] 刘建辉, 崔鸿文. 电导法鉴定黄瓜抗寒性的研究. *西北农业大学学报*, 1995, 23(4): 74-77.
- Liu J H, Cui H W. Electrical conductivity method for chilling-resistance evaluation in cucumber. *Acta Universitatis Agriculturae Boreali-occidentalis*, 1995, 23(4): 74-77. (in Chinese)
- [18] 逮明辉, 娄群峰, 陈劲枫. 黄瓜的冷害及耐冷性. *植物学通报*, 2004, 21(5): 578-586.
- Lu M H, Lou Q F, Chen J F. A review on chilling injury and cold tolerance in *Cucumis sativus* L. *Chinese Bulletin of Botany*, 2004, 21(5): 578-586. (in Chinese)
- [19] 王 娟, 李德全. 逆境条件下植物体内渗透调节物质的积累与活性氧代谢. *植物学通报*, 2001, 18(4): 459-465.

- Wang J, Li D Q. The accumulation of plant osmoticum and activated oxygen metabolism under stress. *Chinese Bulletin of Botany*, 2001, 18(4): 459-465. (in Chinese)
- [20] Liang G J. Betaine can improve tolerance to low temperature in plant. *Journal of Zhaoqing University*, 2003, 24(2): 36-40.
- [21] Ruiz J M, Sánchez E, García P C, López-Lefebre L R, Rivero R M, Romero L. Proline metabolism and NAD kinase activity in greenbean plants subjected to cold-shock. *Phytochemistry*, 2002, 59: 473-478.
- [22] 尹永强, 胡建斌, 邓明军. 植物叶片抗氧化系统及其对逆境胁迫的响应研究进展. *中国农学通报*, 2007, 23(1): 105-110.
- Yin Y Q, Hu J B, Deng M J. Latest development of antioxidant system and responses to stress in plant leaves. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(1): 105-110. (in Chinese)
- [23] Manganaris G A, Vasilakakis M, Diamantidis G, Mignani I. Cell wall cation composition and distribution in chilling-injured nectarine fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 37: 72-80.
- [24] 李芸瑛, 梁广坚, 李永华, 叶庆生. 外源甜菜碱对黄瓜幼苗抗冷性的影响. *植物生理学通讯*, 2004, 40(6): 673-676.
- Li Y Y, Liang G J, Li Y H, Ye Q S. Effects of exogenous betaine on cold resistance of cucumber seedlings. *Plant Physiology Communications*, 2004, 40(6): 673-676. (in Chinese)
- [25] 丁 灿, 杨清辉, 李富生, 林位夫. 低温胁迫等对割手密和斑茅叶片游离脯氨酸含量的影响. *热带作物学报*, 2005, 26(4): 52-56.
- Ding C, Yang Q H, Li F S, Lin W F. Effects of cold stress on the content of free-proline in leaves of *Saccharum spontaneum* L. and *Sclerostachya*. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2005, 26(4): 52-56. (in Chinese)
- [26] Ashraf M, Foolad M R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59: 206-216.
- [27] 韩 晋, 田世平. 外源茉莉酸甲酯对黄瓜采后冷害及生理生化的影响. *园艺学报*, 2006, 33(2): 289-293.
- Han J, Tian S P. Effects of exogenous methyl jasmonate on chilling injury and physiology and biochemistry in postharvest cucumber. *Acta Horticulturae Sinica*, 2006, 33(2): 289-293. (in Chinese)

(责任编辑 曲来娥)