

# 外源神经酰胺处理对青椒果实抗冷性的影响

史君彦, 高丽朴, 左进华, 王清, 王倩, 范林林

(北京市农林科学院蔬菜研究中心, 果蔬农产品保鲜与加工北京市重点实验室, 农业部华北地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室, 农业部都市农业(北方)重点实验室, 北京 100097)

**摘要:** 为研究外源物质处理对青椒果实抗冷性的影响, 本试验采用不同浓度的外源神经酰胺(0、200、400  $\mu\text{mol/L}$ )处理青椒果实, 测定贮藏期间青椒果实冷害指数、相对电导率、MDA、叶绿素、Vc、可溶性蛋白含量、POD、CAT 和 APX 等生理指标, 探究外源神经酰胺处理对青椒果实抗冷性的影响。结果表明: 在 4  $^{\circ}\text{C}$  贮藏条件下, 外源神经酰胺处理可有效抑制青椒果实冷害的发生。200 和 400  $\mu\text{mol/L}$  外源神经酰胺处理均有效抑制了青椒果实冷害指数的升高, 延缓了相对电导率增加, 抑制了青椒果实 MDA 含量的积累, 维持了细胞膜的完整性; 同时外源神经酰胺处理延缓了青椒果实叶绿素、Vc 和可溶性蛋白的降解, 增强了 POD、CAT 和 APX 活性, 增强了青椒果实的抗冷性, 其中以 400  $\mu\text{mol/L}$  外源神经酰胺处理的青椒果实抗冷性最好。

**关键词:** 外源神经酰胺; 青椒; 抗冷

文章编号: 1673-9078(2016)2-164-170

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.2.025

## Effect of Exogenous Ceramide Treatment on Chilling Tolerance in Green Bell Pepper Fruits

SHI Jun-yan, GAO Li-pu, ZUO Jin-hua, WANG Qing, WANG Qian, FANG Lin-lin

(Vegetable Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences; Key Lab. of Beijing, Agricultural Products of Fruit and Vegetable Postharvest and Process; Key Lab. of Ministry Agriculture, North China, of Horticulture Corp Biology and Germplasm; Key Lab. of Urban Agriculture (North) Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China)

**Abstract:** To study the effect of treatment with an exogenous substance on the chilling tolerance in green bell pepper fruits, different concentrations of exogenous ceramide solutions (0, 200, and 400  $\mu\text{mol/L}$ ) were used to treat pepper fruits. The chilling index, relative electrical conductivity, contents of malondialdehyde (MDA), chlorophyll, vitamin C (Vc), and soluble proteins, and the activities of peroxidase (POD), catalase (CAT), and ascorbate peroxidase (APX) of pepper fruit, during storage, were determined. The results showed that exogenous ceramide treatment could effectively inhibit chilling injury in pepper fruits stored at 4  $^{\circ}\text{C}$ . Both 200 and 400  $\mu\text{mol/L}$  exogenous ceramide treatments effectively inhibited the increase of chilling index, delayed the increase of relative electrical conductivity, suppressed the accumulation of MDA content, and maintained the integrity of the cell membrane. At the same time, exogenous ceramide treatment delayed the degradations of chlorophyll, Vc, and soluble proteins, and enhanced the activities of POD, CAT, and APX, thereby increasing the chilling tolerance of pepper fruits. Among all the treatments, optimal chilling tolerance of pepper fruits was found in 400  $\mu\text{mol/L}$  of ceramide treatment.

**Key words:** exogenous ceramide; green bell pepper; chilling tolerance

青椒(*Capsicum annuum* L.)与番茄同为全球最有销售市场的茄果类蔬菜, 富含丰富的维生素 C、糖、酸类物质和矿物质等营养成分<sup>[1]</sup>, 深受人们的喜爱。因此低温贮藏青椒, 延长青椒的保鲜期, 为人们在日

收稿日期: 2015-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(青年基金)(31101364); 西北非耕地园艺作物生态高效生产技术与示范(201203095); 国家大宗蔬菜产业体系建设(GARS-25-E-01); 北京市农林科学院青年基金(201404)

作者简介: 史君彦(1988-), 女, 科研助理, 研究方向: 农产品贮藏保鲜  
通讯作者: 王清(1979-), 女, 副研究员, 研究方向: 农产品贮藏保鲜与加工

常生活中提供了方便, 但青椒属冷敏型果菜, 在低温( $<8^{\circ}\text{C}$ )下贮藏或冬季南菜北运的过程中, 因持续低温的影响, 导致青椒果皮表面出现水渍凹陷等症状<sup>[2]</sup>, 即冷害现象, 且受冷害损伤的果实在常温下放置, 极易腐烂变质, 严重影响青椒的贮藏、运输品质。冷害是冷敏型果蔬在低温下贮藏、包装和运输过程中常发生的一种生理病害, 且冷害产生的生理伤害温度为 0  $^{\circ}\text{C}$  以上, 是热带和亚热带果蔬采后贮藏存在的最主要问题之一<sup>[3-4]</sup>, 因此探究抑制冷害发生的保鲜方法尤为重要。

研究发现, 水杨酸<sup>[5]</sup>、间歇升温<sup>[6]</sup>、热激<sup>[7]</sup>等处理

在青椒低温贮藏期间,冷害延迟发生,且维持了果实较好的硬度和品质,提高了青椒的抗氧化能力,延缓膜质过氧化进程,抑制氧化终产物MDA的积累,有效维持了青椒果实细胞膜的完整性,从而减轻了冷藏期间青椒冷害的发生。神经酰胺(ceramide)是由长链鞘氨醇通过酰胺键与脂肪酸共价结合而成,可由鞘磷脂酶水解或是从头合成或由鞘氨醇转化而来,作为有机体内重要的活性物质,具有保湿、粘合、屏蔽、调节免疫、抗过敏、抗衰老以及引起细胞凋亡等功能,尤其是作为脂质第二信使,使细胞内氧化应激通路的关键信号分子,参与诸多病理生理过程<sup>[8-10]</sup>。因为神经酰胺在生物体内参与生理代谢,而外源神经酰胺处理对果蔬低温抗冷性的研究未有报道,本实验采用不同浓度外源神经酰胺处理青椒果实,研究外源物质对青椒果实抗冷性的影响,为青椒抗冷性的研究提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

采用由北京天安公司小汤山基地采收,品种为“金英达”的青椒为材料,采收当天运回实验室,挑选大小均一,无病虫害、无机械损伤、新鲜青椒为试材。

### 1.2 试验处理

将挑选的青椒均分为3组,分别用蒸馏水(CK)、200 μmol/L和400 μmol/L的神经酰胺溶液涂抹于青椒表面,自然晾干后用0.04 mm PE袋折口包装,于4℃下贮藏12 d。每个处理重复3次。每2 d取一次样,每次取10个果,样品用液氮冷冻,然后放于-80℃的冰箱中保存,用于生理指标的测定。

### 1.3 主要仪器设备

KOITO-PCLH冷库,日本;CYYL-36型压差预冷通风设备;UV-1800分光光度计,岛津;电导率仪,HANNA:EC215;-80℃冰箱,日本SANYO;D-37520冷冻离心机,德国Sigma有限公司;磁力搅拌器,日本NISSN;pH测量仪,HANNA PH211。

### 1.4 试验方法

冷害指数评定及分级标准参考Wang<sup>[2]</sup>的方法稍作修改,0级,无冷害发生;1级,冷害发生面积占1~25%;2级,冷害发生面积占25~50%;3级,冷害发生面积占51~75%;4级,冷还发生面积占76~100%。

冷害指数 =  $\sum(\text{冷害级数} \times \text{该级果数}) / (\text{最高级数} \times \text{果实总数}) \times 100\%$

相对电导率测定采用Wang等<sup>[11]</sup>的方法稍作修改,用直径为1 cm的打孔器在10个青椒上打孔,取圆片部位20~25个,用蒸馏水冲洗3次,然后放于滤纸上晾干(即圆片上的蒸馏水吸干,圆片表面没有水滴残留即可),在试管中称取2 g左右的圆片,倒入20 mL蒸馏水,室温下放置10 min,混匀测定相对电导率 $L_0$ ,然后100℃下煮沸10 min,冷却后定容至煮沸前体积,混匀测定电导率 $L_1$ 。相对电导率 =  $(L_0/L_1) \times 100\%$

MDA含量的测定采用Jin等<sup>[12]</sup>的方法。样品组织用10 ml 100 g/L三氯乙酸(TCA)溶液匀浆,4℃13000×g下离心30 min,在10 mL试管中一次加入2 mL上清液、2 mL 0.67% TBA混匀,于沸水浴中20 min,冷却,然后测定450 nm、560 nm和600 nm处吸光值。

叶绿素含量测定采用Deng<sup>[13]</sup>的方法稍作修改。青椒组织用4℃的丙酮:乙醇(2:1)溶液匀浆,在通风厨内避光过滤至50 mL棕色容量瓶中,至青椒匀浆组织变白,然后定容至刻度,测定663 nm和645 nm处吸光值。

Vc含量测定采用钼酸铵比色法。样品组织用10 mL 0.05 mol/L草酸-EDTA溶液匀浆,于4℃13000×g下离心30 min,在10 mL试管中一次加入2 mL上清液、3 mL草酸-EDTA、0.5 mL偏磷酸-乙酸、1 mL 5% H<sub>2</sub>SO<sub>2</sub>和2 mL 5%钼酸铵混合,于80℃水浴锅中水浴10 min,取出冷却至室温,用蒸馏水定容至10 mL,然后测定760 nm处的吸光值。

可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法<sup>[14]</sup>测定。

POD(过氧化物酶)活性测定采用愈创木酚法<sup>[14]</sup>,反应体系为0.3% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 1 mL、0.2%愈创木酚 0.9 mL、pH 7.8 PBS 1 mL和酶液 0.1 mL,测定470 nm处吸光值。

CAT(过氧化氢酶)活性测定采用曹建康<sup>[14]</sup>的方法稍作修改,反应体系为0.3% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 1 mL、pH 7.8 PBS 1.9 mL和酶液 0.1 mL,测定240 nm处吸光值。

APX(抗坏血酸过氧化物酶)活性测定采用wang<sup>[2]</sup>等方法,样品组织用8 ml 0.1 mol/L pH 7.5的PBS缓冲液提取,4℃13000×g下离心30 min,上清液为粗酶提取液,反应体系包含反应缓冲液2.6 mL、酶液0.1 mL和2 mmol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0.3 mL,测定290 nm处的吸光值。

### 1.5 数据分析

采用Excel 2003 统计分析软件进行基础数据整理,利用Origin 8.5 分析与作图,利用IBM SPSS

Statistics 19 软件对数据进行差异显著性检验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 外源神经酰胺处理对青椒果实冷害指数的影响

的影响

低温冷害是果蔬贮藏过程中发生的一种生理伤害<sup>[4]</sup>。由图 1 可知,青椒果实在 4℃条件下贮藏,由于低温的积累伤害而发生冷害现象,且冷害指数随着贮藏时间的延长而不断升高。对照组和 200 μmol/L 神经酰胺处理的青椒果实贮藏 2 d 时出现水渍凹陷的冷害症状,400 μmol/L 神经酰胺处理的青椒果实贮藏 4 d 时才出现冷害现象,且各处理在冷害症状出现后冷害指数迅速升高,冷害现象发展迅速,贮藏 6 d 时,对照组青椒果实冷害指数升高到 66.67%,200 μmol/L 神经酰胺处理的青椒果实冷害指数升高到 61.81%,400 μmol/L 神经酰胺处理的青椒果实冷害指数仅升高到 40.97%,有效抑制了青椒果实低温贮藏冷害的发生,与对照组相比,差异显著( $p < 0.05$ ),故 400 μmol/L 神经酰胺处理有效延缓青椒低温贮藏冷害的发生。

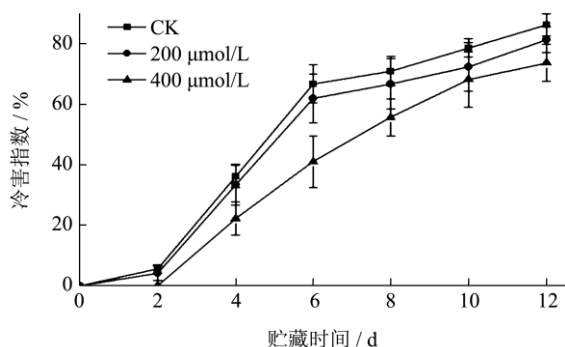


图 1 外源神经酰胺处理对青椒冷害指数的影响

Fig.1 Effect of exogenous ceramide treatment on the chilling index of green bell pepper fruits

### 2.2 外源神经酰胺处理对青椒果实相对电导率的影响

相对电导率是逆境条件下评定细胞损伤的重要指标之一<sup>[15]</sup>。由图 2 可知,青椒在 4℃低温下贮藏,各处理相对电导率不断升高,且对照组相对电导率升高最为迅速,其次为 200 μmol/L 神经酰胺处理的青椒,400 μmol/L 神经酰胺处理的青椒相对电导率升高最为缓慢,贮藏末期,对照组、200 μmol/L 和 400 μmol/L 神经酰胺处理组的青椒相对电导率分别升高了 2.37、2.02、1.92 倍,400 μmol/L 神经酰胺处理有效抑制了

青椒低温贮藏下相对电导率的升高,维持了细胞的完整性,与对照组相比,差异极显著( $p < 0.01$ )。

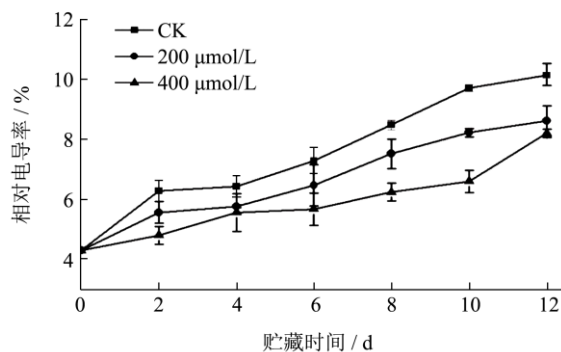


图 2 外源神经酰胺处理对青椒果实相对电导率的影响

Fig.2 Effect of exogenous ceramide treatment on the relative electrical conductivity of green bell pepper fruits

### 2.3 外源神经酰胺处理对青椒果实 MDA 含量的影响

MDA 是细胞膜脂质过氧化的产物,与细胞膜的完整性密切相关<sup>[16]</sup>。由图 3 可知,青椒果实在 4℃低温下贮藏,各处理组 MDA 含量逐渐升高,MDA 不断积累,其中对照组 MDA 含量升高最迅速,其次为 200 μmol/L 神经酰胺处理组,400 μmol/L 神经酰胺处理组的青椒 MDA 含量升高最为缓慢,到贮藏末期,对照组、200 μmol/L 和 400 μmol/L 神经酰胺处理组的青椒 MDA 含量分别升高为初始的 6.07、4.14 和 3.40 倍,与对照组相比,差异极显著( $p < 0.01$ ),400 μmol/L 神经酰胺处理有效抑制了青椒 MDA 含量的升高,延缓了青椒果实 MDA 含量的积累。

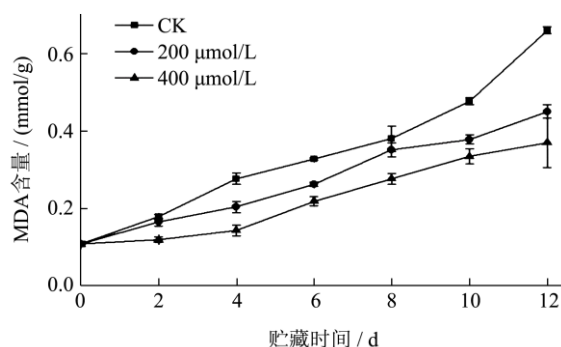


图 3 外源神经酰胺处理对青椒果实 MDA 含量的影响

Fig.3 Effect of exogenous ceramide treatment on the MDA content of green bell pepper fruits

### 2.4 外源神经酰胺处理对青椒果实叶绿素含量的影响



果蔬颜色的变化与叶绿素含量有关<sup>[17]</sup>,低温可诱导叶绿素 a 的荧光反应<sup>[18]</sup>,青椒果实在成熟衰老过程中逐渐褪绿。由图 4 可知,青椒果实在 4 °C 低温下贮藏,各处理组的叶绿素含量逐渐下降,其中对照组叶绿素含量下降最迅速,其次为 200 μmol/L 神经酰胺处理组,400 μmol/L 神经酰胺处理组的青椒叶绿素含量下降最为缓慢,贮藏末期,对照组、200 μmol/L 和 400 μmol/L 神经酰胺处理组的青椒叶绿素含量分别降为初始的 25.54%、35.72%和 42.58%,400 μmol/L 神经酰胺处理有效抑制了青椒果实叶绿素的降解。

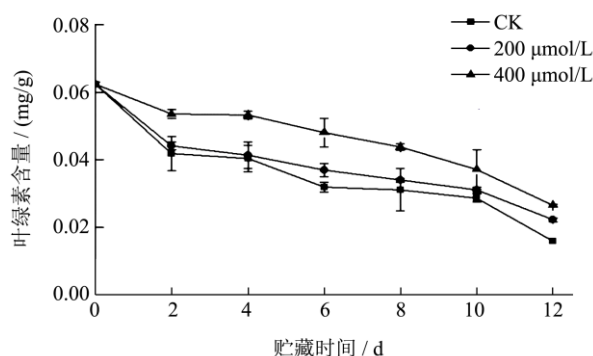


图 4 外源神经酰胺处理对青椒果实叶绿素含量的影响

Fig.4 Effect of exogenous ceramide treatment on the chlorophyll content of green bell pepper fruits

2.5 外源神经酰胺处理对青椒果实 Vc 含量的影响

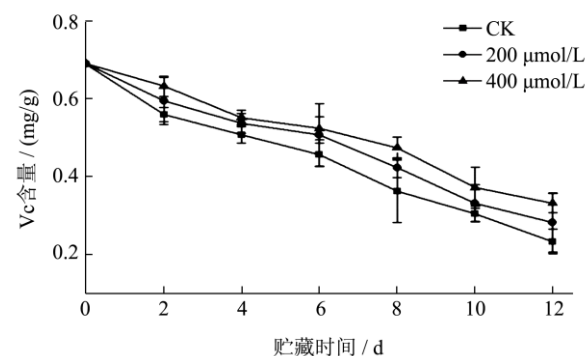


图 5 外源神经酰胺处理对青椒果实 Vc 含量的影响

Fig.5 Effect of exogenous ceramide treatment on the Vc content of green bell pepper fruits

果蔬在采后成熟衰老过程中营养物质不断被代谢降解。由图 5 可知,青椒果实在 4 °C 低温下贮藏,各处理组 Vc 含量逐渐下降,营养物质不断降解,其中对照组 Vc 含量下降最迅速,其次为 200 μmol/L 神经酰胺处理组,400 μmol/L 神经酰胺处理组的青椒 Vc 含量下降最为缓慢,到贮藏末期,对照组、200 μmol/L 和 400 μmol/L 神经酰胺处理组的青椒 Vc 含量分别降

为初始的 33.91%、40.91%和 48.13%,400 μmol/L 神经酰胺处理有效抑制了青椒 Vc 含量的降低,延缓了青椒果实 Vc 的降解。

2.6 外源神经酰胺处理对青椒果实可溶性蛋白含量的影响

在冷胁迫下,冷敏感果蔬组织细胞中蛋白质降解速率大大超过了合成速率。由图 6 可知,青椒果实在 4 °C 低温下贮藏,各处理组的可溶性蛋白含量逐渐下降,营养物质被降解,其中对照组可溶性蛋白含量下降最迅速,其次为 200 μmol/L 神经酰胺处理组,400 μmol/L 神经酰胺处理组的青椒可溶性蛋白含量下降最为缓慢,到贮藏末期,对照组、200 μmol/L 和 400 μmol/L 神经酰胺处理组的青椒可溶性蛋白含量分别降为初始的 48.99%、60.77%和 69.60%,与对照组相比,差异显著( $p < 0.05$ ),400 μmol/L 神经酰胺处理有效抑制了青椒可溶性蛋白含量的降低,延缓了青椒果实可溶性蛋白的降解。

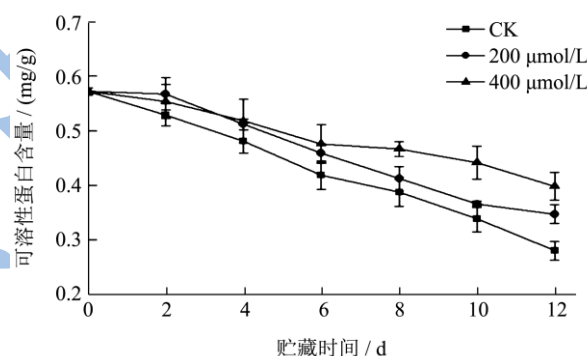


图 6 外源神经酰胺处理对青椒果实可溶性蛋白含量的影响

Fig.6 Effect of exogenous ceramide treatment on the soluble protein content of green bell pepper fruits

2.7 外源神经酰胺处理对青椒果实 POD 活性的影响

POD 作为活性较高的适应性酶,能够反应植物生长发育的特点、体内代谢状况以及对环境的适应性,POD 有清除 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的作用<sup>[16]</sup>。冷害对植物造成的伤害很大程度上来源于低温胁迫所引发的氧化胁迫,尤其是 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 的氧化胁迫作用<sup>[19]</sup>。由图 7 可知,青椒果实在 4 °C 低温下贮藏,POD 酶活性呈先升高后下降的趋势,400 μmol/L 神经酰胺处理的青椒果实 POD 酶活性高于其他处理组。贮藏 6d 时,对照组、200 μmol/L 和 400 μmol/L 处理组青椒果实 POD 酶活性最强,分别为 0.78、0.83 和 0.89 U/(g min),400 μmol/L 处理组

与对照组差异显著( $p < 0.05$ ), 与 200  $\mu\text{mol/L}$  处理组差异不显著, 其后青椒果实 POD 酶活性逐渐下降, 400  $\mu\text{mol/L}$  处理组与对照组处理差异显著( $p < 0.05$ ), 400  $\mu\text{mol/L}$  神经酰胺处理显著延缓了 POD 活性的下降。

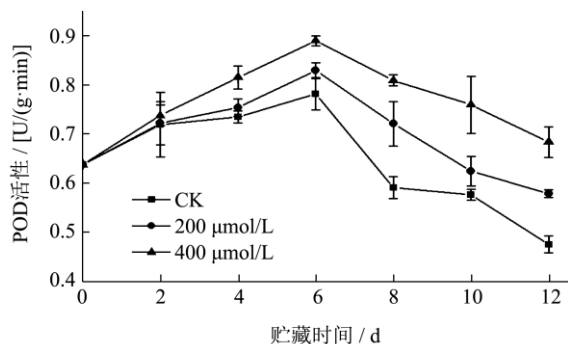


图7 外源神经酰胺处理对青椒果实 POD 活性的影响

Fig.7 Effect of exogenous ceramide treatment on the POD activity of green bell pepper fruits

2.8 外源神经酰胺处理对青椒果实 CAT 活性的影响

CAT 是一类活性中心含血红素的酶类, 主要存在于过氧化物酶体、乙醛酸循环体和线粒体中, 只能专一性的清除  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 将  $\text{H}_2\text{O}_2$  降解为  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{O}_2$  [20]。由图 8 可知, 青椒果实在 4  $^{\circ}\text{C}$  低温下贮藏, CAT 酶活性呈先升高后下降的趋势, 贮藏 4 d 时 CAT 酶活性最高, 且 400  $\mu\text{mol/L}$  神经酰胺处理的青椒果实 CAT 酶活性显著( $p < 0.05$ )高于其他处理组, 贮藏 10 d 时, 400  $\mu\text{mol/L}$  处理组与其他处理组差异显著( $p < 0.05$ ), 贮藏末期, 对照组、200  $\mu\text{mol/L}$  和 400  $\mu\text{mol/L}$  处理组青椒果实 CAT 活性分别为 0.0082、0.0110 和 0.0128 U/(g min), 各处理组间差异不显著。

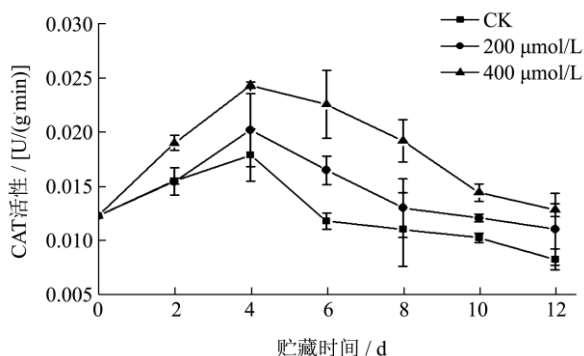


图8 外源神经酰胺处理对青椒果实 CAT 活性的影响

Fig.8 Effect of exogenous ceramide treatment on the CAT activity of green bell pepper fruits

2.9 外源神经酰胺处理对青椒果实 APX 活性的影响

APX 被认为在植物、藻类、微生物等中在清除活性氧和保护细胞中起重要的作用[21]。APX 是以抗坏血酸为电子供体的专一性强的过氧化物酶, 催化抗坏血酸与  $\text{H}_2\text{O}_2$  发生氧化-还原反应, 使抗坏血酸氧化形成单脱氢抗坏血酸, 同时  $\text{H}_2\text{O}_2$  被分解消除, 提高细胞抗氧化系统的还原势, 对外界的氧化胁迫、不良环境、病虫害感染等做出反应。由图 9 可知, 青椒果实在 4  $^{\circ}\text{C}$  低温下贮藏, APX 活性亦呈先升高后下降的趋势, 这是由于青椒果实对冷应激反应, APX 活性在冷害发生时增强, 贮藏 4 d 时, 对照组、200 和 400  $\mu\text{mol/L}$  处理组青椒果实 APX 活性两两差异极显著( $p < 0.01$ ), 到贮藏至 6 d 时, APX 活性达最强, 400  $\mu\text{mol/L}$  神经酰胺处理的青椒果实 APX 活性显著( $p < 0.05$ )高于其他处理组, 贮藏 10 d 时, 对照组、200 和 400  $\mu\text{mol/L}$  处理组青椒果实 APX 活性两两差异极显著( $p < 0.01$ ), 至贮藏末期, 对照组、200  $\mu\text{mol/L}$  和 400  $\mu\text{mol/L}$  处理组青椒果实 APX 活性分别为 0.0166、0.0193 和 0.0245, 400  $\mu\text{mol/L}$  与对照组差异显著( $p < 0.05$ ), 与 200  $\mu\text{mol/L}$  处理组无显著差异。

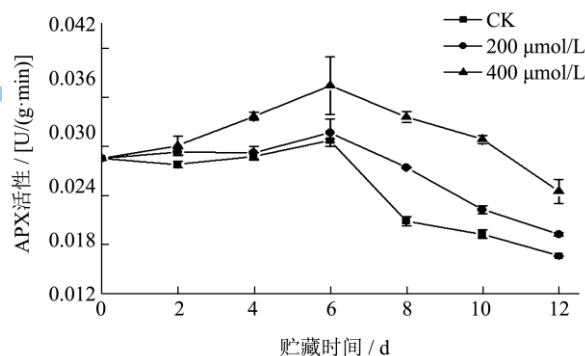


图9 外源神经酰胺处理对青椒果实 APX 活性的影响

Fig.9 Effect of exogenous ceramide treatment on the APX activity of green bell pepper fruits

### 3 结论

3.1 低温贮藏是果蔬贮藏过程中延长货架期、抑制呼吸代谢和微生物生长的主要贮藏方式, 然而冷敏型果蔬在低于 10~12  $^{\circ}\text{C}$  的温度下贮藏会有冷害的发生[16]。冷害是一种严重的生理伤害, 表现为果蔬表面的水渍凹陷或是针状凹陷[22], 冷害不仅降低果蔬的外观品质, 加速营养物质的降解, 而且极易引起果蔬腐烂变质, 使果蔬失去商品性[23]。

3.2 冷害直接影响细胞膜的完整性<sup>[24]</sup>。冷害促使细胞膜由液态-结晶状态转变为固体-凝胶结构,导致细胞膜的半透性损伤,相对电导率是一个评定膜渗透性的有效指标,因此作为细胞膜完整性的评定指标被应用<sup>[25]</sup>。膜质过氧化导致细胞膜完整性损伤,膜质过氧化程度可由产物 MDA 含量评定<sup>[26]</sup>。MDA 是膜质过氧化的终产物,是氧化应激反应的标志,该产物的增加表示细胞膜的完整性受损<sup>[25]</sup>,最终导致细胞膜选择通过性功能损伤或失去选择通过性功能<sup>[26]</sup>。

3.3 氧化胁迫发生时,细胞内活性氧积累,损害细胞组织,氧化细胞内活性物质<sup>[19]</sup>。果蔬组织中含有一个高效的抗氧化系统,以免除损伤,抗氧化系统内的酶类主要有 POD、CAT、APX 和 SOD(超氧化物歧化酶)等。前人研究表明抗氧化酶活性变化与植物冷害发生过程密切相关<sup>[2,16]</sup>,低温冷激引起植物细胞组织中活性氧自由基的产生,植物细胞中的抗氧化酶活性随之增强,消除活性氧自由基对细胞组织的损害。

3.4 本实验采用神经酰胺处理青椒果实,结果表明:神经酰胺处理能够有效抑制青椒果实冷害的发生,抑制 MDA 含量的积累,维持细胞的完整性,同时抑制叶绿素、Vc 和可溶性蛋白等营养成分的分解代谢,增强了抗氧化酶 POD、CAT 和 APX 活性,神经酰胺处理显著增强了青椒的抗冷性,且 400  $\mu\text{mol/L}$  神经酰胺处理的青椒果实抗冷性效果最佳。

## 参考文献

- [1] Rodoni L, Vicente A, Azevedo S, et al. Quality retention of fresh-cut pepper as affected by atmosphere gas composition and ripening stage [J]. Food Science and Technology, 2015, 60: 109-114.
- [2] Wang Q, Ding T, Gao L P, et al. Effect of brassinolide on chilling injury of green bell pepper in storage [J]. Scientia Horticulturae, 2012, 144: 195-200.
- [3] Chaudhary P R, Jayaprakasha G K, Porat R, et al. Low temperature condition reduces chilling injury while maintaining quality and certain bioactive compounds of 'Star Ruby' grapefruit [J]. Food Chemistry, 2014, 153: 243-249
- [4] 生吉萍,代晓霞,刘灿,等.  $\text{H}_2\text{O}_2$  在采后果蔬冷害中的作用机理[J].北京农学院学报,2007, 22 (3): 77-80  
SHENG Ji-ping, DAI Xiao-xia, LIU Can, et al. Mechanism of the effect of  $\text{H}_2\text{O}_2$  on chilling injury of postharvest fruit and vegetable [J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2007, 22 (3): 77-80
- [5] 丁天,史君彦,王清,等.水杨酸对青椒抗冷性的影响[J].北方园艺,2014, 9: 154-158  
DING Tian, SHI Jun-yan, WANG Qing, et al. Effect of salicylic acid on chilling tolerance of green pepper [J]. Northern Horticulture, 2014, (9): 154-158.
- [6] 刘玲,魏亚南,纪淑娟,等.间歇升温对低温储藏青椒果实硬度及相关指标的影响[J].食品与发酵工业,2014,40(4): 195-199  
LIU Ling, WEI Ya-nan, JI Shu-juan, et al. Effects of intermittent temperature rising on the firmness and other indexes of green pepper [J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(4): 195-199.
- [7] 王慧,张艳梅,王大鹏,等.热激处理对青椒耐冷性及抗氧化体系的影响[J].食品科学,2013, 34(2): 312-316  
WANG Hui, ZHANG Yan-mei, WANG Da-peng, et al. Effect of heat shock treatment on chilling tolerance and antioxidant enzyme systems in hot green pepper [J]. Food Science, 2013, 34(2): 312-316
- [8] 姜婷婷,李英娴,方步武,等.测定生物样本中神经酰胺含量的 HPLC-FLD 法[J].药物分析杂志,2012,32(10): 1807-1812.  
LOU Ting-ting, LI Xian-ying, FANG bu-wu, et al. HPLC-FLD determination of ceramide in biological samples [J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2012, 32(10): 1807-1812
- [9] Saddoughi S A, Ogretmen B. Chapter Two-Diverse function of ceramide in cancer cell death and proliferation [J]. Advances in Cancer Research, 2013, 117: 37-58
- [10] Yuyanma K, Mitsutake S, Igarashi Y. Pathological roles of ceramide and its metabolic syndrome and Alzheimer's disease [J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2014, 1841: 793-798
- [11] Wang Y S, Luo Z S, Huang X D, et al. Effect of exogenous  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) treatment on chilling injury and antioxidant capacity in banana peel [J]. Scientia Horticulturae, 2014, 168: 132-137
- [12] Jin P, Zhu H, Wang L, et al. Oxalic acid alleviates chilling injury in peach fruit by regulating energy metabolism and fatty acid content [J]. Food Chemistry, 2014, 161: 87-93
- [13] Deng Y S, Kong F Y, Zhou B, et al. Heterology expression of the tomato LeLhcb2 gene confers elevated tolerance to chilling stress in transgenic tobacco [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2014, 80: 318-327
- [14] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导.2 版 [M]. 北京:中国轻工业出版社:2011  
CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo, ZHAO Yu-mei. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press,

- 2011
- [15] Zhu J J, Li Y R, Liao J X. Involvement of anthocyanins in the resistance to chilling-induced oxidative stress in *Saccharum officinarum* L. leaves [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2013, 73: 427-433
- [16] Aghdam M S, Bodbodak S. Physiological and biochemical mechanisms regulating chilling tolerance in fruits and vegetables under postharvest salicylates and jasmonates treatments [J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 156: 73-85
- [17] Schouten R E, Tijskens L M M, Van Kooten O. Predicting keeping quality of batches of cucumber fruit based on a physiological mechanism [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2002, 26: 209-220.
- [18] Wright H, DeLong J, Harrison P A, et al. The effect of temperature and other factors on chlorophyll a fluorescence and the lower oxygen limit in apples (*Malus domestica*) [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2010, 55, 21-28
- [19] 赵丹莹,申琳,于萌萌,等.采后番茄果实抗氧化酶活与抗冷性的关系[J].*食品科学*,2009, 39(14): 309-313  
ZHAO Dan-ying, SHEN Lin, YU Meng-meng, et al. Relationship between activities of antioxidant enzymes and cold tolerance of postharvest tomato fruits [J]. *Food Science*, 2009, 39(14): 309-313
- [20] 张微微,黄晓林,赵霞,等.棉花酶促抗氧化系统对逆境胁迫生理响应的研究进展[J].*中国农学通报*,2009,25(19): 108-112  
ZHANG Wei-wei, HUANG Xiao-lin, ZHAO Xia, et al. Research progress on enzymatic antioxidant system response to stress in cotton [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(19): 108-112
- [21] Gill S S, Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48: 909-930
- [22] Yang H Q, Wu F H, Cheng J. Reduced chilling injury in cucumber by nitric oxide and the antioxidant response [J]. *Food Chemistry*, 2001, 27: 1237-1242
- [23] Aghdam M S, Sevillano L, Flores F B, et al. Heat shock proteins as biochemical markers for postharvest chilling stress in fruits and vegetables [J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 160: 54-64
- [24] Rui H, Cao S, Shang H, et al. Effects of heat treatment on internal browning and membrane fatty acid in loquat fruit in response to chilling stress [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90: 1557-1561
- [25] Marangoni A G, Palma T, Stanley D W. Membrane effects in postharvest physiology [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 1996, 7: 193-217
- [26] Wise R R, Naylor A W. Chilling-enhanced photophylls, chilling-enhanced Photooxidation- the peroxidative destruction of lipids during chilling injury to photosynthesis and ultrastructure [J]. *Plant Physiology*, 1987, 83: 272-277
- [27] Hodges D M, DeLong J M, Forney C F, et al. Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds [J]. *Planta*, 1999, 207: 604-611
- [28] Sevillano L, Sanchez-Ballesta M T, Romojaro F, et al. Physiological hormonal and molecular mechanisms regulating chilling injury in horticultural species. Postharvest technologies applied to reduce its impact. [J]. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 2009, 59: 555-573