

物流保鲜

## 采后茉莉酸甲酯处理对蓝莓果实抗病性的影响

姜爱丽<sup>1</sup>, 周福慧<sup>1</sup>, 胡文忠<sup>1</sup>, 姬亚茹<sup>2</sup>, 张静<sup>1</sup>

(1.大连民族大学 生物技术与资源利用教育部重点实验室, 大连 116600;

2.大连理工大学 生命科学与技术学院, 大连 116024)

**摘要:** **目的** 研究简易自发气调包装及不同浓度茉莉酸甲酯(MeJA)处理对采后蓝莓果实抗病性的影响。**方法** 分别用浓度为0.15、0.3 mmol/L的MeJA以及去离子水浸泡蓝莓果实,时间均为10 min,将取出的果实晾干、预冷,装入厚度为0.0294 mm的聚乙烯简易自发气调包装袋中,于1℃下贮藏,以15 d为1周期对蓝莓呼吸代谢及抗病性相关指标进行测定,即袋内CO<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>浓度,以及果实亮度、感官评定、呼吸速率、硬度、腐烂率、pH值、可溶性固形物(SSC)含量、苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性、多酚氧化酶(PPO)活性、过氧化物酶(POD)活性、木质素含量等。**结果** MeJA处理可有效保持包装袋内适宜的CO<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>浓度,并可减缓果实硬度、亮度的下降,抑制果实呼吸速率、pH值及SSC含量的上升,提高果实木质素含量,降低果实腐烂率,显著提高PAL, PPO, POD等抗病性相关酶活性( $P<0.05$ )。**结论** 简易自发气调包装结合MeJA处理可通过抑制呼吸代谢、提高苯丙烷代谢及抗氧化酶活性,从而诱导采后蓝莓果实抗病性的产生,保持采后果实品质。在2种浓度的MeJA处理中,浓度为0.15 mmol/L的处理效果最好。

**关键词:** 气调包装; 茉莉酸甲酯; 蓝莓; 苯丙烷代谢; 抗病性

**中图分类号:** TB485.2; TB489 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)17-0075-09

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.17.013

## Effect of Postharvest Methyl Jasmonate Treatment on Blueberry Fruit Disease Resistance during Storage

JIANG Ai-li<sup>1</sup>, ZHOU Fu-hui<sup>1</sup>, HU Wen-zhong<sup>1</sup>, JI Ya-ru<sup>2</sup>, ZHANG Jing<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Biotechnology and Resource Utilization, Ministry of Education, Dalian Minzu University, Dalian 116600, China; 2.College of Life Science and Biotechnology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effects of treatment by simple spontaneous modified atmosphere packaging (S-MAP) and methyl jasmonate (MeJA) of different concentrations on the postharvest blueberry fruit resistance. Blueberry fruit was immersed in 0.15 and 0.3 mmol/L MeJA and deionized water for 10 min, respectively; then, the fruit was air-dried, precooled, filled into polyethylene S-MAP with a thickness of 0.0294 mm and stored at 1℃. The indexes of respiratory metabolism and resistance of blueberry were determined in a period of 15 d, including the concentration of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> in the S-MAP, fruit brightness, sensory evaluation, respiration rate, firmness, decay rate, pH, soluble solid content (SSC), phenylalanine ammonia-lyase (PAL) activity, polyphenol oxidase (PPO) activity, peroxidase (POD) activity and lignin content. MeJA treatment could effectively maintain the appropriate concentration of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> in the bag, slow down the decline of fruit firmness and brightness, inhibit the rise of respiration rate, pH value and SSC, increase the lignin content, reduce the decay rate, and significantly improve the activities ( $P<0.05$ ) of enzymes related to the resistance, such as PAL, PPO and POD. S-MAP combined with MeJA treatments can induce the generation of the fruit resistance and maintain the quality of postharvest fruits by inhibiting the respiratory metabolism, and increasing the metabolism of phenylpropane and the activity of antioxidant enzyme. During the MeJA treatments of two concentrations, the treatment effect is the best when the concentration is 0.15 mmol/L.

**KEY WORDS:** simple spontaneous modified atmosphere packaging; methyl jasmonate; blueberry; phenylpropane metabolism; disease resistance

收稿日期: 2018-01-31

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFD0400903)

作者简介: 姜爱丽(1971—),女,博士,大连民族大学教授,主要研究方向为采后生物学与技术。

蓝莓又称越橘、蓝浆果,为杜鹃花科越桔属多年生落叶或常绿灌木,极为耐寒,原产于加拿大东部和美国东北部<sup>[1-2]</sup>。蓝莓酸甜可口,皮薄籽小,风味独特,富含花青素、维生素等物质,且具有较强的抗氧化性,倍受消费者青睐<sup>[3-4]</sup>。由于蓝莓果实成熟于高温多雨季节,采后不耐贮藏,极大地限制了采后蓝莓的鲜果销售,造成巨大的经济损失<sup>[5-6]</sup>,因此研究蓝莓保鲜机理具有重大意义。

气调包装是一种可延长新鲜果蔬货架期的重要技术,其原理是根据不同果蔬产品的生理特性,改变包装材料内部气体成分以达到保鲜的目的<sup>[7]</sup>。茉莉酸甲酯(MeJA)是一种天然内生生长物质,广泛存在于不同植物中<sup>[8]</sup>。作为一种重要的生长调节物质,MeJA参与不同的发育过程和非生物胁迫的防御反应,大量实验表明,施加低浓度MeJA,可以调控植物生长、发育等过程,提高果蔬抗性,延长采后果蔬贮藏保鲜效果,并且对人体无毒害、对环境无污染<sup>[9-10]</sup>。MeJA诱导植物产生抗病性的反应机理涉及改变病程相关蛋白、提高抗病相关酶活性、诱导多种次生代谢物质积累等<sup>[11]</sup>。研究发现,采后施加MeJA可提高甜樱桃<sup>[12]</sup>、桃<sup>[13]</sup>的防御酶活性,类似的结果也被发现于番石榴上<sup>[14]</sup>。付亮等<sup>[15]</sup>发现,MeJA处理采后蓝莓可保持蓝莓的生理品质,然而,关于简易自发气调包装及MeJA处理采后蓝莓对其抗性影响机制的研究鲜有报道,因此,文中实验使用简易自发气调包装结合浓度为0.15, 0.3 mmol/L的MeJA溶液处理采后蓝莓,探究其对采后蓝莓抗性的影响机制,以期作为简易自发气调包装及MeJA用于采后蓝莓的保鲜提供理论依据。

## 1 实验

### 1.1 材料与仪器

主要材料:供试蓝莓品种为“布里吉塔”,采自大连蓝风农业科技有限公司,采后立即运回实验室,选取无机械损伤,无病虫害,颜色、大小基本一致的果实作为实验材料;自发气调包装材料选用大号妙洁保鲜袋(尺寸为25 cm×35 cm,厚度为0.0098 mm),购自大连开发区乐购超市;茉莉酸甲酯、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、苯丙氨酸、愈创木酚、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、邻苯二酚,均为分析纯,购自天津科密欧化学试剂有限公司。

主要仪器:PL203型梅特勒-托利多电子精密天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;GC-2010型气相色谱仪,UV-2600型紫外分光光度计,日本岛津公司;T-25型匀浆机,德国IKA公司;KQ5200DB型数控超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;CheckPoint O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>手持式气体分析仪,丹麦PBI公

司;PHS-3C型精密pH计,上海亿欧仪表设备有限公司;PAL-1型数字手持袖珍折射仪,日本Hitachi有限公司。

### 1.2 方法

1) 样品处理方法。分别使用浓度为0.15, 0.3 mmol/L的MeJA及去离子水(CK)浸泡蓝莓10 min。果实取出通风晾干后立即于(1±0.5)℃条件下预冷6 h,随后选用3层大号妙洁保鲜袋(厚度累计为0.0294 mm)进行分装(预实验结果显示,相比于1层和2层大号妙洁保鲜袋,3层大号妙洁保鲜袋保鲜效果最好),每袋装果250 g,每个处理试验蓝莓果用量为4 kg,共16袋,于(1±0.5)℃下贮藏,以15 d为周期进行指标测定。

2) 简易自发气调包装制作方法。在最外层保鲜袋中间部位涂抹玻璃胶,用以测定袋内气体含量。袋内充满空气后,于袋上部3/4处进行扎口,见图1,且3层保鲜薄膜由内向外分别依次扎口。

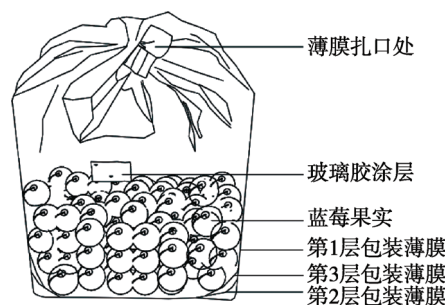


图1 简易自发气调包装袋结构  
Fig.1 Structure of simple spontaneous modified atmosphere packaging bag

3) 包装袋内气体成分。采用CheckPoint O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>手持式气体分析仪对包装内O<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>的含量进行测定。

4) 果实亮度。用CR410型色差计对整果果实表面进行亮度的测定。

5) 感官评定方法。每个处理随机取出100个果实,由品评组成员进行感官评分。评分标准参照文献[16]的方法。

6) 呼吸速率。参照司琦等<sup>[17]</sup>的方法,将500 g果实放入干燥的密闭保鲜盒中静置1 h,使用带有TCD检测器的GC-2010型气相色谱仪测定蓝莓在密闭保鲜盒内通过呼吸代谢释放的CO<sub>2</sub>含量,从而推算蓝莓的呼吸速率。

7) 果实硬度。使用TA.XT质构仪测定果实硬度,选择直径为5 mm的P5探头,将蓝莓果实穿透7 mm,第1个峰的峰值即硬度值。

8) 果实腐烂率。根据果实表面是否发生汁液外漏、严重软化或腐烂现象判断果实是否腐烂,腐烂率测定的公式为:

果实腐烂率 = (烂果数/总果数) × 100%

9) 果实 pH 值。参照 GB 10468—89, 果肉与水的质量比为 1:2, 使用 PHS-3C 型精密 pH 计进行测定。

10) 果实可溶性固性物含量。将蓝莓果充分研磨后, 利用数字手持袖珍折射仪测定 SSC 含量, 重复 5 次, 取平均值。

11) 酶活性。参照姜爱丽等的方法<sup>[18]</sup>测定多酚氧化酶 (PPO)、过氧化物酶 (POD) 活性, 参照曹建康等的方法<sup>[19]</sup>测定苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 活性, 分别以 1 min 内每克果实在 398, 460, 290 nm 处吸光度增加 1 为 1 个酶活力单位, 结果以 U 表示, 重复 3 次。

12) 木质素含量。参照 Gong 等的方法<sup>[20]</sup>, 并稍作修改。

### 1.3 数据分析

所有试验重复 3 次, 实验结果用 (平均值 ± 标准偏差) 表示。采用 Excel 2003 软件进行数据分析, 采用 SPSS 22.0 软件进行差异显著性分析 ( $P < 0.05$ ), 采用皮尔森积差相关法分析参数间的相关性, 采用 OriginPro 8 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 CO<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 含量

经不同处理后, 简易自发气调包装袋内气体成分变化见图 2 (图 2—13 中不同字母表示实验组的结果之间差异显著 ( $P < 0.05$ ))。贮藏期间 CO<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 含量分别呈上升和下降的趋势。与 0 d 时相比, 贮藏 15 d 时各处理组的 CO<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 含量变化迅速, 随后趋于平缓。与对照组相比, MeJA 处理可有效降低简易自发气调包装袋内的 CO<sub>2</sub> 含量, 以 0.15 mmol/L MeJA 处理效果最好 ( $P < 0.05$ ), 并且, MeJA 处理可保持相对较高的 O<sub>2</sub> 含量, 0.15 mmol/L MeJA 处理效果好于 0.3 mmol/L MeJA 处理。

### 2.2 亮度与感官评定分值

颜色是消费者对蓝莓果实好坏评定的重要因素。贮藏期间各处理组蓝莓果实亮度均呈下降趋势, 见图 3, 但 MeJA 处理的果实亮度均高于同期的对照组 ( $P < 0.05$ )。贮藏前 15 d, 亮度值下降较快, 这可能是由于浸泡处理使果实表面的蜡质受到一定程度的破坏<sup>[16]</sup>。与对照组相比, MeJA 处理可有效延缓果实亮度的下降, 0.15 mmol/L 处理组的效果更佳。

感官评定是反映新鲜蓝莓品质的重要指标。随着贮藏时间的延长, 各处理组蓝莓果实的感官评定分值呈下降趋势, 见图 4。贮藏 15 d 后, 对照组下降速率急剧增加。相较于对照组, MeJA 处理的感官评定分值下降趋势缓慢, 并在整个贮藏过程中均显著高于同

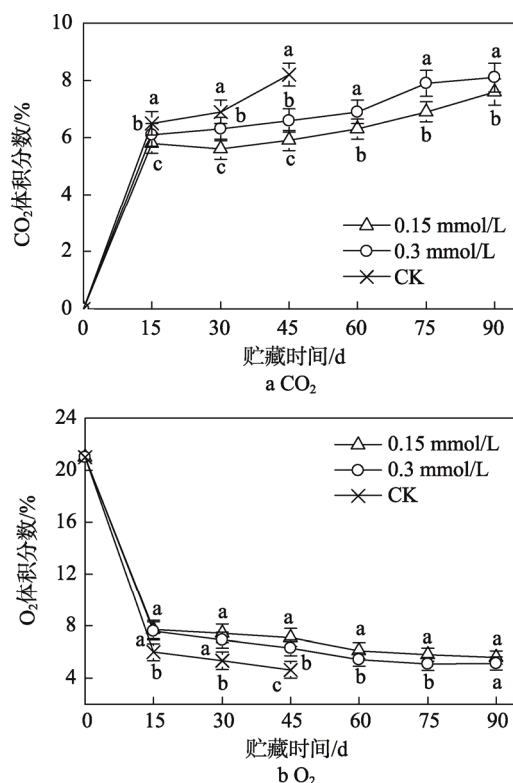


图 2 MeJA 处理后简易自发气调包装内 CO<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 含量的变化

Fig.2 CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> contents change in simple spontaneous modified atmosphere package treated with MeJA

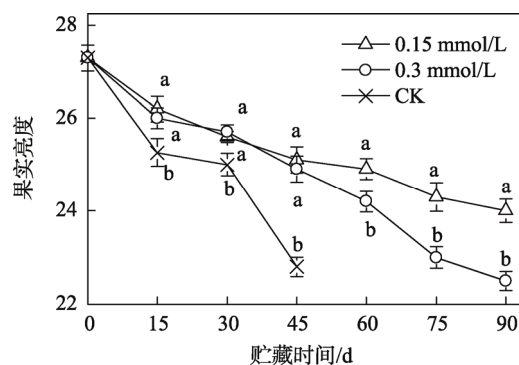


图 3 MeJA 处理后蓝莓果实亮度的变化

Fig.3 Brightness change of blueberry fruit treated with MeJA

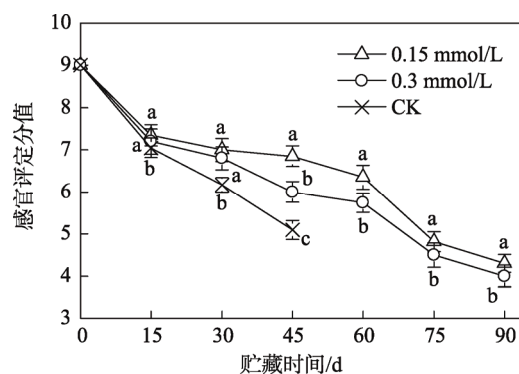


图 4 MeJA 处理后蓝莓果感官评定分值的变化  
Fig.4 Sensory evaluation change of blueberry fruit treated with MeJA

期的对照组 ( $P<0.05$ ), 且 2 个不同浓度 MeJA 处理的蓝莓果实感官评定分值变化趋势相似, MeJA 浓度为 0.15 mmol/L 处理组的效果更好。

### 2.3 果实呼吸速率、硬度、腐烂率、pH 值、SSC 含量

呼吸速率是反映植物代谢的重要指标。贮藏 15 d 后, 对照组呼吸速率急剧增加, 而 MeJA 处理组上升趋势较缓慢, 且浓度为 0.15 mmol/L 的 MeJA 处理组呼吸速率在 75 d 时达到最大值, 见图 5。MeJA 处理的呼吸速率在贮藏 15 d 后显著低于对照组 ( $P<0.05$ )。这表明 MeJA 处理可以延缓蓝莓呼吸跃变的时间, 延迟果实的衰老进程。2 组 MeJA 处理中, 浓度为 0.15 mmol/L 的 MeJA 处理组效果更好。

果实软化是淀粉水解为糖及果胶的过程, 组织软化也是缩短果实货架期的主要因素<sup>[21]</sup>。整个贮藏期间, 各处理组果实硬度均呈先上升后下降的趋势, 见图 6。贮藏 30 d 后, 对照组果实硬度迅速下降, 而 MeJA 处理组果实硬度仍快速增大, 2 个处理组的硬度分别在第 45 和第 60 天出现高峰。MeJA 处理组果实硬度均显著高于同期的对照组 ( $P<0.05$ ), 2 组 MeJA 处理中, 以浓度为 0.15 mmol/L 的 MeJA 处

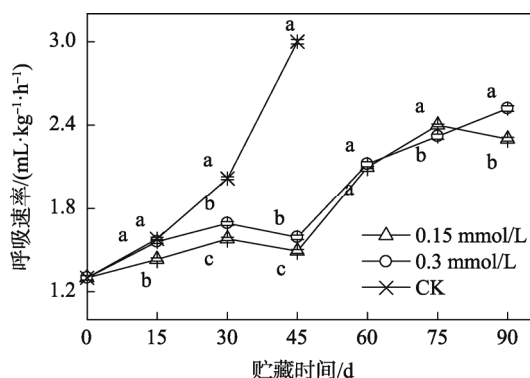


图 5 MeJA 处理后蓝莓果实呼吸速率的变化  
Fig.5 Respiration rate change of blueberry fruit treated with MeJA

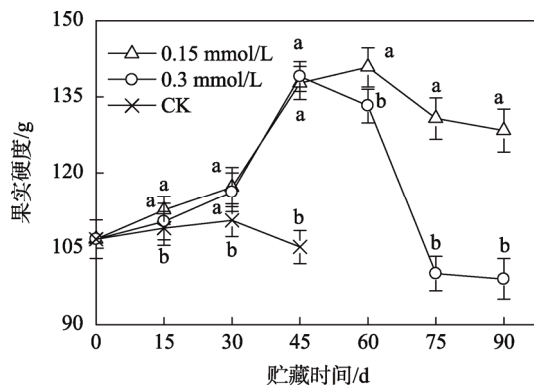


图 6 MeJA 处理后蓝莓果硬度的变化  
Fig.6 Hardness change of blueberry fruit treated with MeJA

理更有利于果实硬度的提高和保持, 并于 60 d 时显著高于同期浓度为 0.3 mmol/L 的 MeJA 处理 ( $P<0.05$ )。

随着贮藏时间的延长, 果实腐烂率呈上升趋势, 见图 7, 贮藏到 45 d 时, 对照组果实腐烂率增加至 8.8%, 而 2 组 MeJA 处理的腐烂率均低于 2%。整个贮藏过程中, MeJA 处理的腐烂率均显著低于对照组 ( $P<0.05$ ), 浓度为 0.15 mmol/L 的 MeJA 处理更有利于控制果实腐烂的发生。

果实 pH 值是反映果实品质的重要指标。对照组蓝莓果实的 pH 值随贮藏时间的延长迅速上升, MeJA 处理组的 pH 值在贮藏 0~15 d 时呈下降趋势, 随后迅速增长, 见图 8。整个贮藏期间, 对照组 pH 值显著大于浓度为 0.3 mmol/L 的 MeJA 处理组, 浓度为 0.15 mmol/L 的 MeJA 处理组的 pH 值最低, 表明浓度为 0.15 mmol/L 的 MeJA 处理对蓝莓果实衰老进程的延迟效果好于其他组。

作为评价蓝莓果实品质的指标之一, 对照组 SSC 含量在整个贮藏期间呈显著上升趋势, 而 MeJA 处理组的 SSC 含量于贮藏 0~60 d 内先上升, 随后缓慢下降, 见图 9。浓度为 0.3 mmol/L 的 MeJA 处理组贮藏 45 d 后 SSC 含量显著高于浓度为 0.15 mmol/L 的 MeJA 处理组 ( $P<0.05$ )。

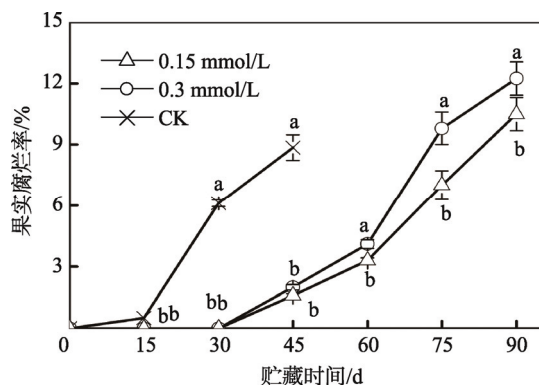


图 7 MeJA 处理后蓝莓果实腐烂率的变化  
Fig.7 Decay rate change of blueberry fruits treated with MeJA

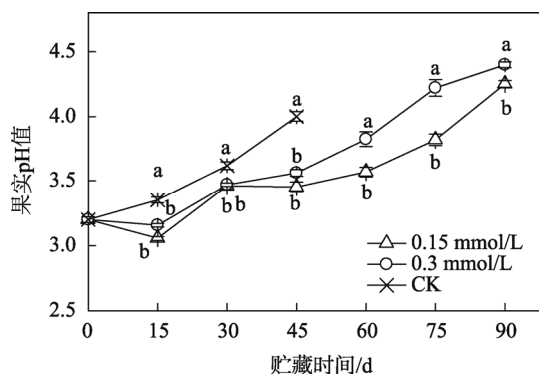


图 8 MeJA 处理后蓝莓果实 pH 值的变化  
Fig.8 pH change of blueberry fruits treated with MeJA

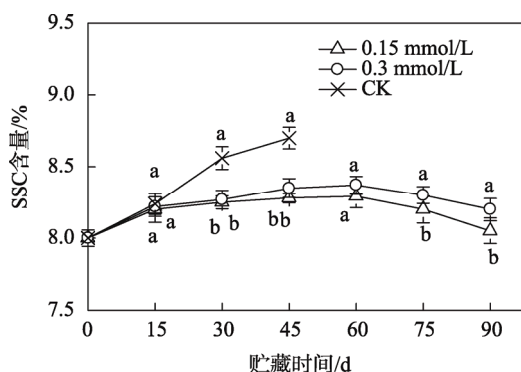


图 9 MeJA 处理后蓝莓果 SSC 含量的变化  
Fig.9 SSC change of blueberry fruits treated with MeJA

## 2.4 PAL 活性、PPO 活性、POD 活性、木质素含量变化

PAL 是苯丙烷代谢的第一关键酶,也是植物合成多酚类化合物、木质素等抗病物质途径中的第一步限速酶,与植物抗病性密切相关<sup>[22-23]</sup>。贮藏期间,除对照组的 PAL 活性在 15~30 d 后略有下降外,各处理组的 PAL 活性均呈逐渐上升的趋势,见图 10。相较于对照组,MeJA 处理可有效提高果实 PAL 活性,贮藏 75 d 前浓度为 0.15 mmol/L 的 MeJA 处理效果最好,贮藏 75~90 d 时,2 种浓度处理对 PAL 的影响差异不显著 ( $P>0.05$ )。

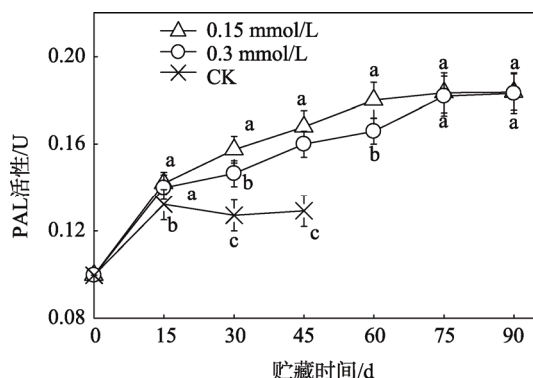


图 10 MeJA 处理后蓝莓果实 PAL 活性的变化  
Fig.10 PAL activity change of blueberry fruit treated with MeJA

PPO 是植物中广泛存在的酶类,在木质素及其他酚类氧化物合成过程中起重要作用<sup>[24]</sup>。整个贮藏期间,浓度为 0.3 mmol/L 的 MeJA 处理在贮藏 60 d 后的 PPO 活性呈先上升后下降趋势,而对照组和浓度为 0.15 mmol/L 的 MeJA 处理组的 PPO 活性均呈逐步上升趋势,见图 11。60 d 时,2 种浓度的 MeJA 处理组 PPO 活性差异不显著 ( $P<0.05$ ),其中浓度为 0.15 mmol/L 的 MeJA 处理组更有利于 PPO 活性提升。

POD 可清除植物体内过氧化物自由基,提高植物抗性<sup>[25]</sup>。尽管对照组的 POD 活性在其 45 d 的贮藏期内始终呈上升趋势,但仍低于同期的 MeJA 处理组,

并于 30 和 45 d 时差异达显著性水平 ( $P<0.05$ ),而 MeJA 处理组的 POD 活性呈先上升后下降趋势,并均于 60 d 时达到峰值,见图 12。MeJA 处理可有效提升并保持 POD 活性,除贮藏第 45 天时浓度为 0.3 mmol/L 的 MeJA 处理组的 POD 活性显著高于同期对照组和浓度为 0.15 mmol/L 的 MeJA 处理组 ( $P<0.05$ ),其他贮藏时间以浓度为 0.15 mmol/L 的 MeJA 处理更有利于 POD 活性的提高和保持。

木质素是苯丙烷代谢的终产物,作为重要的物理屏障之一,能有效抑制病原微生物的侵染,并且只有少数木腐性真菌具有降解木质素的特殊功能,其含量的多少与抗病性密切相关<sup>[26]</sup>。整个贮藏期间,各处理组的木质素含量大致呈先上升后下降趋势,对照组在贮藏 15~45 d 期间呈显著上升趋势 ( $P<0.05$ ),与对照组相比,2 种不同浓度的 MeJA 处理对木质素含量均有不同程度的提升作用,以浓度为 0.15 mmol/L 的 MeJA 处理效果最好,见图 13,其中  $A_{280}$  为波长 280 nm 下的吸光值。

## 2.5 Pearson 相关性矩阵

Pearson 相关性矩阵见表 1,由表 1 可知,CO<sub>2</sub> 含量与果实亮度、感官评定分值呈高度负相关,与

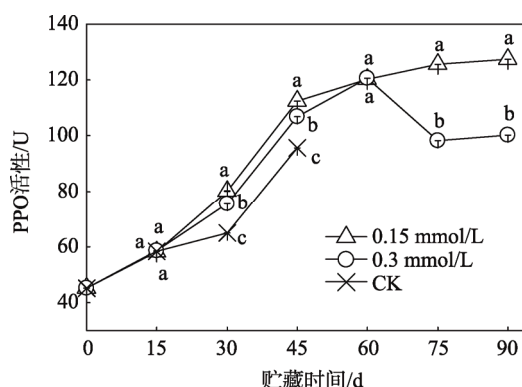


图 11 MeJA 处理后蓝莓果实 PPO 活性的变化  
Fig.11 PPO activity change of blueberry fruit treated with MeJA

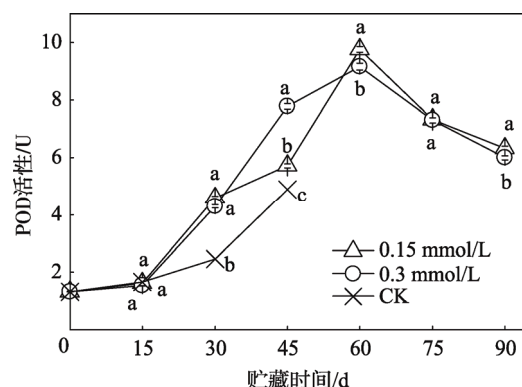


图 12 MeJA 处理后蓝莓果实 POD 活性的变化  
Fig.12 POD activity change of blueberry fruit treated with MeJA

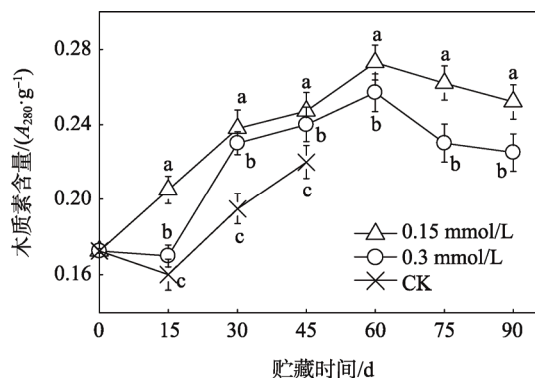


图 13 MeJA 处理后蓝莓果实木质素含量的变化  
Fig.13 Lignin content change of blueberry fruit treated with MeJA

PAL 活性、呼吸速率呈高度正相关 ( $P<0.01$ ) ;  $O_2$  浓度与果实感官评定分值、果实亮度呈高度正相关,

与 PAL 活性呈高度负相关 ( $P<0.01$ ) ; 呼吸速率与果实腐烂率呈高度正相关 ( $P<0.01$ ) ; 果实腐烂率与 pH 值呈高度正相关 ( $P<0.01$ ) ; PAL、PPO、POD、木质素这几项指标间呈高度正相关 ( $P<0.01$ ) 。这些结果表明, MeJA 处理通过提高蓝莓体内抗性相关酶的活性来提升果实抗性, 降低果实腐烂率、呼吸速率, 并保持较好的果实品质。

### 3 讨论

蓝莓采后各种生理代谢反应加快, 尤其当呼吸高峰出现后果实迅速衰老腐烂, 限制其采后贮藏期<sup>[27]</sup>。抗病性诱导技术通过采用生物的或非生物的诱导因子处理果蔬产品来提高其抗病性, 达到控制果蔬采后病害的目的, 具有安全高效等特性<sup>[28]</sup>。MeJA 在调节

表 1 各指标皮尔森相关性矩阵  
Tab.1 Pearson correlation matrix of each indicator

| 指标                 | CO <sub>2</sub> 含量 | O <sub>2</sub> 含量 | 果实 亮度    | 感官评 定分值  | 呼吸 速率   | 果实 硬度   | 果实腐 烂率  | pH 值    | SSC 含量 | PAL 活性  | PPO 活性  | POD 活性  | 木质素 含量 |
|--------------------|--------------------|-------------------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|
| CO <sub>2</sub> 含量 | 1                  |                   |          |          |         |         |         |         |        |         |         |         |        |
| O <sub>2</sub> 含量  | -0.983**           | 1                 |          |          |         |         |         |         |        |         |         |         |        |
| 果实 亮度              | -0.860**           | 0.777**           | 1        |          |         |         |         |         |        |         |         |         |        |
| 感官评 定分值            | -0.886**           | 0.822**           | 0.954**  | 1        |         |         |         |         |        |         |         |         |        |
| 呼吸 速率              | 0.717**            | -0.612**          | -0.906** | -0.867** | 1       |         |         |         |        |         |         |         |        |
| 果实 硬度              | 0.222              | -0.34             | -0.049   | -0.161   | -0.017  | 1       |         |         |        |         |         |         |        |
| 果实腐 烂率             | 0.617**            | -0.494*           | -0.877** | -0.881** | 0.889** | -0.11   | 1       |         |        |         |         |         |        |
| pH 值               | 0.662**            | -0.559*           | -0.913** | -0.911** | 0.864** | -0.006  | 0.953** | 1       |        |         |         |         |        |
| SSC 含量             | 0.664**            | -0.639**          | -0.582*  | -0.466   | 0.578*  | 0.085   | 0.319   | 0.314   | 1      |         |         |         |        |
| PAL 活性             | 0.775**            | -0.804**          | -0.731** | -0.829** | 0.552*  | 0.491*  | 0.581*  | 0.680** | 0.197  | 1       |         |         |        |
| PPO 活性             | 0.677**            | -0.688**          | -0.730** | -0.792** | 0.652** | 0.673** | 0.615** | 0.743** | 0.252  | 0.865** | 0.946** |         |        |
| POD 活性             | 0.611**            | -0.617**          | -0.724** | -0.765** | 0.628** | 0.586*  | 0.615** | 0.743** | 0.252  | 0.865** | 0.946** | 1       |        |
| 木质素 含量             | 0.576*             | -0.626**          | -0.576*  | -0.653** | 0.520*  | 0.706** | 0.438   | 0.561*  | 0.285  | 0.837** | 0.925** | 0.905** | 1      |

注: \*和\*\*分别表示数值间相关性达到  $P<0.05$  水平和  $P<0.01$  水平。

植物的生长发育和逆境胁迫过程中起着十分重要的作用<sup>[29]</sup>。相关研究表明, 采后 MeJA 处理可提高果实抗病性, 如 1  $\mu\text{mol/L}$  的茉莉酸甲酯处理联合低温预贮可以有效提高桃的抗冷性<sup>[30]</sup>, 5 mmol/L 的 MeJA 处理在低温贮藏时可有效保持茄子品质<sup>[31]</sup>, 其机理被广泛认为是 MeJA 激活了果实的防御系统<sup>[32-33]</sup>。一些植物抗病酶如 PAL, POD, PPO 等活性的提高, 是重要的防御反应之一, 这些防御酶可通过诱导组织中酚类物质、木质素等次生代谢产物合成, 间接提高植物抗病性<sup>[34]</sup>, MeJA 处理可以提高这些酶的活性; 植物的木质化是另一重要的防御反应, MeJA 处理可以促进采后果实中植保素、木质素的合成, 加强细胞壁木质化程度, 形成天然保护屏障来抵御病原菌的侵入<sup>[35]</sup>。文中研究结果表明, 简易自发气调包装结合 MeJA 处理采后蓝莓通过抑制果实呼吸, 降低果实代谢速率, 提高木质素含量, 提升果实苯丙烷代谢相关酶以及抗氧化酶活性, 从而达到提高果实抗性, 保持果实品质, 延长果实贮藏期的效果。实验发现, 浓度为 0.15 mmol/L 的 MeJA 处理效果最好。

#### 4 结语

采用的自发气调包装可在短期内形成相对稳定的袋内气体环境, 说明总厚度为 0.0294 mm 的 3 层妙洁包装袋适于适量蓝莓鲜果的贮藏保鲜。鉴于该试验的包装材料简单易得, 包装方法操作简单, 并可避免单层薄膜包装若封口不严便导致自发气调无法实现等问题, 因此可推荐用于日常蓝莓鲜果贮藏和大规模生产, 并可为试验研究及中试开发提供一种包装方法。为了测定包装袋内  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  含量, 包装试验中还采用了在薄膜表面涂玻璃胶的方法, 保证从包装袋内可重复取气体样品而不影响包装袋的气密性。

与未作处理的采后蓝莓果实相比, 2 种浓度 MeJA 处理的采后蓝莓均表现出较好的品质, 并且在整个贮藏期间可诱导果实苯丙烷代谢相关酶活性的提高和木质素的积累, 进而提高果实抗性, 具体表现在延缓果实硬度和亮度的下降, 抑制果实呼吸速率、pH 值、SSC 含量、果实抗氧化酶活性的上升, 延迟果实开始腐烂的时间等。2 种浓度的 MeJA 处理相比较而言, 浓度为 0.15 mmol/L 的 MeJA 处理对维持采后蓝莓品质的效果更好。综上所述, 简易自发气调包装结合 MeJA 处理可诱导和调动果实自身抗性防御系统, 通过调节呼吸代谢、苯丙烷代谢、抗氧化能力从而延长果实贮藏期。

#### 参考文献:

[1] 潘利华, 王建飞, 叶兴乾, 等. 蓝莓花青素的提取工艺及其免疫调节活性[J]. 食品科学, 2014, 35(2):

81—86.

PAN Li-hua, WANG Jian-fei, YE Xing-qian, et al. Optimization of Extraction Process and Evaluation of Immunomodulatory Activity of Anthocyanins from Blueberry[J]. Food Science, 2014, 35(2): 81—86.

[2] 陈杭君, 王翠红, 郜海燕, 等. 不同包装方法对蓝莓采后贮藏品质和抗氧化活性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(6): 1230—1236.

CHEN Hang-jun, WANG Cui-hong, GAO Hai-yan, et al. Effect of Packaging on the Postharvest Quality and the Antioxidant Activity of Blueberry[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(6): 1230—1236.

[3] 许晴晴, 陈杭君, 郜海燕, 等. 真空冷冻和热风干燥对蓝莓品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(5): 64—68.

XU Qing-qing, CHEN Hang-jun, GAO Hai-yan, et al. Effects of Vacuum Freeze-drying and Hot-air Drying on the Quality of Blueberry Fruits[J]. Food Science, 2014, 35(5): 64—68.

[4] 李金星, 胡志和. 蓝莓花青素的研究进展[J]. 核农学报, 2013, 27(6): 817—822.

LI Jin-xing, HU Zhi-he. Advances in Research on Anthocyanins of Blueberry[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(6): 817—822.

[5] 黄晓杰. 采后处理对蓝莓果实衰老的作用及机理研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.

HUANG Xiao-jie. Effect and Mechanism of Postharvest Treatments on Senescence of Blueberry Fruits[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.

[6] 姜爱丽, 孟宪军, 胡文忠, 等. 高  $\text{CO}_2$  冲击处理对采后蓝莓生理代谢及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 362—368.

JIANG Ai-li, MENG Xian-jun, HU Wen-zhong, et al. Effects of High  $\text{CO}_2$  Shock Treatment on Physiological Metabolism and Quality of Postharvest Blueberry Fruits[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 362—368.

[7] RADZIEJEWSKA-KUBZDELA E. The Effect of Pre-treatment and Modified Atmosphere Packaging on Bioactive Compound Content in Coleslaw Mix[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 505—511.

[8] 王璇. 茉莉酸甲酯等三种处理对黄冠梨果皮褐变的抑制作用及其机制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.

WANG Xuan. Effect of MeJA etc. on Peel Browning Inhibition of Postharvest Huangguan Pear and the Mechanism[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2016.

[9] CHEONG J J, CHOI Y D. Methyl Jasmonate as a Vital Substance in Plants[J]. Trends in Genetics, 2003, 19(7): 409.

[10] 胡文忠, 姜爱丽, 蔡慧, 等. 茉莉酸甲酯处理对软枣猕猴桃生理生化变化的影响[J]. 食品工业科技, 2013(4): 331—334.

HU Wen-zhong, JIANG Ai-li, CAI Hui, et al. Effect of

- MeJA Treatments on Physiological and Biochemical Changes for *Actinidia Arguta*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013(4): 331—334.
- [11] 马杰, 胡文忠, 毕阳, 等. 茉莉酸甲酯处理对鲜切莴苣和甘蓝苯丙烷代谢的影响[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(7): 327—329.
- MA Jie, HU Wen-zhong, BI Yang, et al. Effect of MeJA Treatments on Benzene Propane Metabolism in Tissues of Fresh-cut Lettuce and Cabbage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(7): 327—329.
- [12] YAO H, TIAN S. Effects of Pre- and Post-harvest Application of Salicylic Acid or Methyl Jasmonate on Inducing Disease Resistance of Sweet Cherry Fruit in Storage[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2005, 35(3): 253—262.
- [13] YAO H J, TIAN S P. Effects of a Biocontrol Agent and Methyl Jasmonate on Postharvest Diseases of Peach Fruit and the Possible Mechanisms Involved[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2005, 98(4): 941—950.
- [14] GONZÁLEZ-AGUILAR G A, TIZNADO-HERNÁNDEZ M E, ZAVALA-GATICA R, et al. Methyl Jasmonate Treatments Reduce Chilling Injury and Activate the Defense Response of Guava Fruits[J]. *Biochemical & Biophysical Research Communications*, 2004, 313(3): 694—701.
- [15] 付亮, 刘诗扬, 徐方旭. 茉莉酸甲酯对蓝莓果实生理生化变化的影响[J]. *沈阳师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 35(4): 485—487.
- FU Liang, LIU Shi-yang, XU Fang-xu. Effect of Treatment with MeJA on Physiology and Biochemistry in Blueberry Fruit[J]. *Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 35(4): 485—487.
- [16] 姜爱丽, 胡文忠, 孟宪军, 等. 外源水杨酸处理对采后蓝莓果实苯丙烷代谢的影响[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(6): 334—337.
- JIANG Ai-li, HU Wen-zhong, MENG Xian-jun, et al. Effects of Exogenous Salicylic Acid Treatment on Phenylpropanoid Metabolic System of Postharvest Blueberry Fruits[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(6): 334—337.
- [17] 司琦, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 动态气调贮藏对蓝莓采后生理代谢品质的影响[J]. *包装工程*, 2017, 38(17): 13—18.
- SI Qi, HU Wen-zhong, JIANG Ai-li, et al. Effects of Dynamic Modified Atmosphere Storage on Quality of Physiological Metabolism of the Postharvest Blueberry[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(17): 13—18.
- [18] 姜爱丽, 胡文忠, 李慧, 等. 纳他霉素处理对采后甜樱桃生理代谢及品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 351—356.
- JANG Ai-li, HU Wen-zhong, LI Hui, et al. Effect of Natamycin Treatment on Physiological Metabolism and Quality of Postharvest Sweet Cherry[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(12): 351—356.
- [19] 曹建康, 姜微波. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo. *Experiment Guidance of Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [20] GONG K, CHEN L, LI X, et al. Lignin Accumulation and Biosynthetic Enzyme Activities in Relation to Postharvest Firmness of Fresh Waxy Corn[J]. *Journal of Food Processing & Preservation*, 2017(1): 133.
- [21] 萨仁高娃, 胡文忠, 修志龙, 等. 活性壳寡糖涂膜处理对鲜切苹果品质的影响[J]. *包装工程*, 2017, 38(17): 25—30.
- SA Ren-gao-wa, HU Wen-zhong, XIU Zhi-long, et al. Effect of Active Chitosan Oligosaccharide Coating Treatment on Quality of Fresh-cut Apples[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(17): 25—30.
- [22] 许晴晴, 邵海燕, 陈杭君. 茉莉酸甲酯对蓝莓贮藏品质及抗病相关酶活性的影响[J]. *核农学报*, 2014, 28(7): 1226—1231.
- XU Qing-qing, GAO Hai-yan, CHEN Hang-jun. Effect of MeJA on Storage Quality and Disease-resistant Enzymes of Blueberries[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(7): 1226—1231.
- [23] GARCÍA P C. Resistance to Cold and Heat Stress: Accumulation of Phenolic Compounds in Tomato and Watermelon Plants[J]. *Plant Science an International Journal of Experimental Plant Biology*, 2001, 160(2): 315.
- [24] 郑亚男, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 茉莉酸甲酯对鲜切甘薯伤害防御反应的研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 32(2): 368—372.
- ZHENG Ya-nan, HU Wen-zhong, JIANG Ai-li, et al. Research of Methyl Jasmonate on the Wounding Defense Response for Fresh-cut Sweet Potatoes[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012(2): 368—372.
- [25] YAN J, SONG Y, LI J, et al. Forced-air Precooling Treatment Enhanced Antioxidant Capacities of Apricots[J]. *Journal of Food Processing & Preservation*, 2017(3): 13320.
- [26] WU Y, LIN H, LIN Y, et al. Effects of Biocontrol Bacteria *Bacillus Amyloliquefaciens*, LY-1 Culture Broth on Quality Attributes and Storability of Harvested Litchi Fruit[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2017, 132: 81—87.
- [27] 杨海燕, 吴文龙, 李维林, 等. 茉莉酸甲酯调控下采后蓝莓果实的生理响应研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015(11): 4483—4488.
- YANG Hai-yan, WU Wen-long, LI Wei-lin, et al. Effect of Methyl Jasmonate Treatments on Physiological Changes of Blueberry Fruit[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2015(11): 4483—4488.

- [28] 弓德强, 黄训才, 黄光平, 等. 茉莉酸甲酯处理对采后芒果果实抗病性的影响[J]. 热带作物学报, 2016, 37(12): 2294—2299.  
GONG De-qiang, HUANG Xun-cai, HUANG Guang-ping, et al. Effect of Methyl Jasmonate Treatment on Disease Resistance in Harvested Mango Fruit[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(12): 2294—2299.
- [29] 闫媛媛, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 茉莉酸甲酯的信号分子作用及其在鲜切果蔬中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(2): 384—387.  
YAN Yuan-yuan, HU Wen-zhong, JIANG Ai-li, et al. Research Progress on the Role of Methyl Jasmonate as Signal Molecules and Application in Fresh-cut Fruits and Vegetables[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(2): 384—387.
- [30] JIN P, WANG K, SHANG H, et al. Low-temperature Conditioning Combined with Methyl Jasmonate Treatment Reduces Chilling Injury of Peach Fruit[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2010, 89(10): 1690—1696.
- [31] FAN L, SHI J, ZUO J, et al. Methyl Jasmonate Delays Postharvest Ripening and Senescence in the Non-climacteric Eggplant (*Solanum Melongena*, L.) Fruit[J]. Postharvest Biology & Technology, 2016, 120: 76—83.
- [32] ZHU S, MA B. Benzothiadiazole-or Methyl Jasmonate-induced Resistance to *Colletotrichum Musae* in Harvested Banana Fruit is Related to Elevated Defense Enzyme Activities[J]. Journal of Pomology & Horticultural Science, 2015, 82(4): 500—506.
- [33] WANG K, JIN P, HAN L, et al. Methyl Jasmonate Induces Resistance against *Penicillium Citrinum*, in Chinese Bayberry by Priming of Defense Responses[J]. Postharvest Biology & Technology, 2014, 98(1): 90—97.
- [34] 黄晓杰, 李婧, 柴媛, 等. MeJA 处理对蓝莓果实采后灰霉病的影响及机理[J]. 食品科学, 2016, 37(22): 307—312.  
HUANG Xiao-jie, LI Jing, CHAI Yuan, et al. Effect and Mechanism of Methyl Jasmonate on Incidence of Grey Mould Decay in Postharvest Blueberry[J]. Food Science, 2016, 37(22): 307—312.
- [35] 秦国政, 田世平, 刘海波, 等. 拮抗菌与病原菌处理对采后桃果实多酚氧化酶、过氧化物酶及苯丙氨酸解氨酶的诱导[J]. 中国农业科学, 2003, 36(1): 89—93.  
QIN Guo-zheng, TIAN Shi-ping, LIU Hai-bo, et al. Polyphenol Oxidase, Peroxidase and Phenylalanine Ammonium Lyase in Postharvest Peach Fruits Induced by Inoculation with *Pichia Membranefaciens* or *Rhizopus Stolonifer*[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(1): 89—93.