

# 黄瓜采后外源褪黑素处理提高品质和延缓衰老的研究

辛丹丹, 司金金, 寇莉萍\*

(西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 以采后‘博耐 35’黄瓜为试材, 研究外源褪黑素浸泡处理对其 10 °C 贮藏期间品质的影响及其机理。结果表明: 外源褪黑素处理减缓了黄瓜贮藏过程中叶绿素、维生素 C、可滴定酸、可溶性蛋白含量的下降速度, 使黄瓜保持了更好的品质。进一步研究得出, 外源褪黑素处理降低了黄瓜果实的相对电导率、丙二醛含量、活性氧含量及抗氧化酶 (SOD、CAT、POD、APX) 活性, 降低了对细胞的氧化伤害, 并抑制了呼吸速率和乙烯释放量, 使细胞保持了更完整的结构, 抑制了线粒体和叶绿体的形变。100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的外源褪黑素处理可使黄瓜保持更好的品质, 最大程度降低对细胞的氧化伤害, 延缓了衰老, 达到延长货架期的目的。

**关键词:** 黄瓜; 采后; 褪黑素; 品质; 货架期

**中图分类号:** S 642.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2017) 05-0891-11

## Postharvest Exogenous Melatonin Enhances Quality and Delays the Senescence of Cucumber

XIN Dandan, SI Jinjin, and KOU Liping\*

(College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Cucumber is a kind of vegetable with short storage time (2 - 3 days) at ambient temperature. The objective of this study was to optimize postharvest melatonin handling conditions to reduce the quality loss and extend the shelf life of cucumber. The cucumbers were dipped in 0, 50, 100 or 500  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  melatonin solution immediately after harvest. Changes in quality index, chlorophyll concentration, vitamin C, tissue electrolyte leakage, MDA content, active oxygen content and activity of antioxidant enzymes were monitored periodically during storage at 10 °C for 15 days. Results indicated that exogenous melatonin treatment slowed down the decrease of chlorophyll, vitamin C, and the content of titration-acid and soluble protein of postharvest cucumber during storage. The further study showed exogenous melatonin treatment reduced the fruit relative conductivity, MDA content, active oxygen content and activity of antioxidant enzymes (SOD, CAT, POD, APX), and also inhibited the respiration intensity and the ethylene production, reduced the oxidative damage to cells and maintained a more complete cell structure. 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  melatonin solution dip showed the highest overall quality, lowest tissue

**收稿日期:** 2017-03-06; **修回日期:** 2017-04-27

**基金项目:** 陕西省农业科技攻关项目 (k3310216125)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: kouliping@nwsuaf.edu.cn)

electrolyte leakage, MDA content, and maximum reduction of oxidative damage on the cells.

**Keywords:** cucumber; postharvest; melatonin; quality; shelf-life

黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 在贮藏过程中易失水萎蔫, 且在低温下易发生冷害使表面出现黑斑, 黄化, 变软甚至腐烂 (陈健华 等, 2012)。褪黑素 (N-乙酰基-5-甲氧基色胺, Melatonin, MT) 是色氨酸的吲哚衍生物, 具有很强的抗自由基作用, 能减少活性氧含量, 提高动物体内抗氧化酶和抗氧化剂的含量, 增加与抗氧化酶有关基因的表达 (王伟香 等, 2016)。褪黑素作为一种良好的抗氧化剂可以直接清除植物体内的自由基, 保护植物不受过氧化损伤, 维持细胞膜结构的完整性 (张娜 等, 2012; 左佳琦 等, 2014), 是植物对体内或体外氧化压力的第一道防线 (Tan et al., 2012)。食物中的褪黑素很容易被人体利用, 从营养角度来看, 褪黑素也可以归类为一种维生素, 对人体的健康有益 (Tan et al., 2003), 也可调节机体糖耐量异常、睡眠障碍和代谢紊乱等 (Cipolla-Neto et al., 2014)。已有研究证实, 外源褪黑素处理可提高黄瓜幼苗抵御高温胁迫的能力, 也可促进黄瓜种子对水分胁迫的耐受性, 促进萌发和侧根形成 (Posmyk et al., 2009; Zhang et al., 2013), 并且与果实成熟有关 (Sun et al., 2015)。但目前很少见有褪黑素使用在果蔬采后保鲜方面的研究报道。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料及其处理

试验于 2016 年在西北农林科技大学进行。供试的黄瓜来自陕西省杨凌示范区崔东沟合作社温室, 品种为 ‘博耐 35’。选择成熟度基本一致 (开花后 15 d)、大小均匀、无病虫害、顶花带刺的新鲜黄瓜, 随机分成 4 组, 每组 99 个, 分别浸泡在蒸馏水和 50、100 和 500  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的褪黑素溶液中 30 min。取出后于室温下自然风干, 然后用厚度为 0.01 mm 的聚乙烯保鲜膜每 3 个黄瓜一组包装后并列放置于 10 °C 冰箱中。冰箱可控温度为 -2 ~ 10 °C, 冷藏室体积为 190 L, 分为上、中、下层。每组分 3 等份分别置于各层中, 与冰箱壁相距至少 5 cm。在贮藏 0、3、6、9、12 和 15 d 时分别进行指标检测。每次从各组中分别取 5 个黄瓜, 取果实中间部位重复 3 次测定。

### 1.2 指标测定

感官评价: 请 10 位评价者根据果实的颜色、甜度、苦味、涩味、水分、脆度、韧性、口感、香气和腐烂程度进行评定, 每项 10 分, 品质越好, 得分越高, 取其平均值 (李红丽 等, 2008)。

叶绿素使用丙酮提取, 用比色法测定 (代亨燕 等, 2010)。维生素 C 含量用 2,6-二氯酚钠盐滴定法测定 (解胜利 等, 2012)。可滴定酸含量用氢氧化钠滴定法测定 (曹建康和姜微波, 2007)。可溶性蛋白含量用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定 (曹建康和姜微波, 2007)。相对电导率用 PDS-307 型电导率仪测定 (Dong et al., 2012)。丙二醛含量采用硫代巴比妥酸比色法测定 (韩冰 等, 2010)。超氧阴离子生成速率和过氧化氢含量参照陆晓民等 (2012) 的方法测定; 超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶、抗坏血酸过氧化物酶活性参照《果蔬采后生理生化实验指导》(曹建康和姜微波, 2007) 测定。

呼吸速率用红外 CO<sub>2</sub> 分析仪测定 (Kageyama et al., 2015)。乙烯释放量测定用气相色谱法, 色谱仪: Trace GC Ultra; 检测器: FID (氢火焰离子检测器); 色谱柱: 2M 不锈钢填充柱 (乙烯专用商品柱); 柱温: 70 °C; 进样口温度: 70 °C; 检测器温度: 150 °C; 气流速度: N<sub>2</sub>: 40 kPa, H<sub>2</sub>: 35 mL · min<sup>-1</sup>, Air: 350 mL · min<sup>-1</sup>。细胞超微结构使用透射电镜进行观察, 前处理参照 Hu 等 (2015) 的方法。

## 2 结果与分析

### 2.1 外源褪黑素处理对采后黄瓜感官评价的影响

如图 1 所示, 黄瓜在贮藏过程中感官品质逐渐下降, 对照在 2~3 d 后出现失水, 10 d 后部分果实颜色变黄, 出现干瘪、发霉腐烂等现象。外源褪黑素处理的黄瓜感官评价得分明显高于同期对照, 其中 100、500  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的褪黑素处理达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。在贮藏结束时 50、100 和 500  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理的感官评价分数分别是对照的 1.56 倍、2.37 倍和 2.07 倍, 直观反映了褪黑素处理可延缓黄瓜果实衰老。

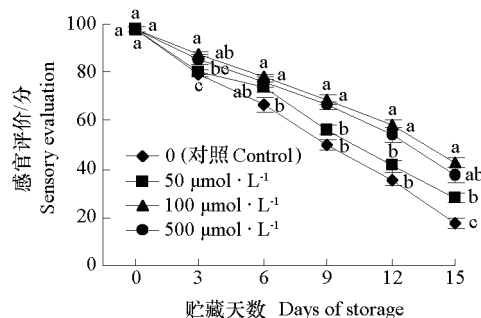


图 1 外源褪黑素处理对采后黄瓜感官评价的影响

Fig. 1 Effect of exogenous melatonin on the sensory evaluation in postharvest cucumber

### 2.2 外源褪黑素处理对采后黄瓜品质参数的影响

黄瓜果实在成熟衰老过程中, 绿色逐渐变淡, 叶绿素含量逐渐下降。如表 1 所示, 12 d 时除外, 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  褪黑素处理叶绿素含量显著高于对照 ( $P < 0.05$ ), 贮藏结束 (15 d) 时是对照的 1.47 倍, 说明外源褪黑素处理可减缓黄瓜中叶绿素含量降解, 使黄瓜保持更好的颜色。

如表 1 所示, 黄瓜中的维生素 C 含量在贮藏刚开始时略微上升, 从 3 d 以后逐渐降低, 整个贮藏过程中 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  褪黑素处理显著高于对照, 贮藏结束时比对照高 77.1%, 说明 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$

表 1 外源褪黑素处理对采后黄瓜品质参数的影响

Table 1 Effect of exogenous melatonin on the quality parameters in postharvest cucumber

贮藏天数 Days of storage	外源褪黑素/ Melatonin ( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	叶绿素/ Chlorophyll ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	维生素 C/ Vitamin C ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	可滴定酸/% Titration acid	可溶性蛋白/ Soluble protein ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )
0	0	1.17 ± 0.02 a	0.13 ± 0.01 a	0.13 ± 0.02 a	0.19 ± 0.04 a
	50	1.17 ± 0.02 a	0.13 ± 0.01 a	0.13 ± 0.02 a	0.19 ± 0.04 a
	100	1.17 ± 0.02 a	0.13 ± 0.01 a	0.13 ± 0.02 a	0.19 ± 0.04 a
	500	1.17 ± 0.02 a	0.13 ± 0.01 a	0.13 ± 0.02 a	0.19 ± 0.04 a
3	0	0.83 ± 0.05 c	0.14 ± 0.01 b	0.10 ± 0.01 a	0.95 ± 0.07 a
	50	0.94 ± 0.06 bc	0.16 ± 0.00 ab	0.10 ± 0.02 a	1.05 ± 0.09 a
	100	1.18 ± 0.07 a	0.18 ± 0.01 a	0.12 ± 0.02 a	1.06 ± 0.08 a
	500	1.09 ± 0.02 ab	0.17 ± 0.02 a	0.11 ± 0.01 a	1.06 ± 0.03 a
6	0	0.57 ± 0.06 b	0.12 ± 0.01 c	0.10 ± 0.01 ab	0.70 ± 0.02 c
	50	0.61 ± 0.02 b	0.13 ± 0.00 bc	0.10 ± 0.00 ab	0.87 ± 0.01 b
	100	0.90 ± 0.06 a	0.16 ± 0.01 a	0.12 ± 0.00 a	0.96 ± 0.01 a
	500	0.76 ± 0.15 ab	0.15 ± 0.01 ab	0.09 ± 0.01 b	0.89 ± 0.02 b
9	0	0.47 ± 0.01 b	0.08 ± 0.02 b	0.07 ± 0.01 b	0.62 ± 0.01 b
	50	0.65 ± 0.11 ab	0.11 ± 0.01 ab	0.07 ± 0.01 b	0.76 ± 0.03 a
	100	0.71 ± 0.00 a	0.15 ± 0.02 a	0.10 ± 0.01 a	0.90 ± 0.06 a
	500	0.53 ± 0.05 ab	0.11 ± 0.02 ab	0.08 ± 0.00 b	0.88 ± 0.02 a
12	0	0.49 ± 0.03 b	0.08 ± 0.01 b	0.08 ± 0.01 a	0.41 ± 0.01 b
	50	0.55 ± 0.07 ab	0.09 ± 0.02 ab	0.06 ± 0.02 a	0.45 ± 0.01 b
	100	0.68 ± 0.09 ab	0.12 ± 0.02 a	0.09 ± 0.01 a	0.79 ± 0.05 a
	500	0.70 ± 0.01 a	0.11 ± 0.01 ab	0.08 ± 0.01 a	0.69 ± 0.02 a
15	0	0.53 ± 0.07 b	0.05 ± 0.01 b	0.07 ± 0.01 a	0.34 ± 0.02 d
	50	0.51 ± 0.03 b	0.08 ± 0.02 ab	0.07 ± 0.02 a	0.45 ± 0.04 c
	100	0.78 ± 0.08 a	0.10 ± 0.01 a	0.09 ± 0.01 a	0.76 ± 0.03 a
	500	0.59 ± 0.04 ab	0.09 ± 0.02 ab	0.08 ± 0.01 a	0.57 ± 0.01 b

外源褪黑素处理可使黄瓜保持较高的维生素 C 含量。

在贮藏过程中可滴定酸含量逐渐降低, 仅在 9 d 时  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  外源褪黑素处理显著高于对照, 其余效果并不显著。

可溶性蛋白含量在贮藏期间不断下降, 从 6 d 之后  $100$ 、 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  褪黑素处理显著高于对照, 说明外源褪黑素处理能抑制黄瓜在贮藏过程中可溶性蛋白的降解。

### 2.3 外源褪黑素处理对采后黄瓜相对电导率和丙二醛含量的影响

相对电导率是反映细胞膜通透性的重要指标之一。由图 2 可知, 各处理黄瓜的相对电导率均呈上升趋势, 贮藏结束时  $100$  和  $500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的处理黄瓜相对电导率显著低于对照, 分别比对照低 30.2% 和 23.3%, 说明外源褪黑素处理抑制了相对电导率的上升速度, 在贮藏后期效果更明显, 能够更好地保持细胞膜的完整性,  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  褪黑素处理效果最好。

丙二醛含量是反映细胞膜脂质过氧化程度的指标, 含量越高则细胞受损的程度越严重。由图 3 可知, 贮藏结束时  $100$  和  $500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  褪黑素处理分别比对照低 47.9% 和 36.2%, 其中  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  褪黑素处理 12~15 d 显著低于对照 ( $P < 0.05$ ), 说明褪黑素处理在贮藏后期有效抑制丙二醛含量的上升, 减少有害物的积累对细胞的损伤, 延长黄瓜的贮藏时间并保持较好品质。

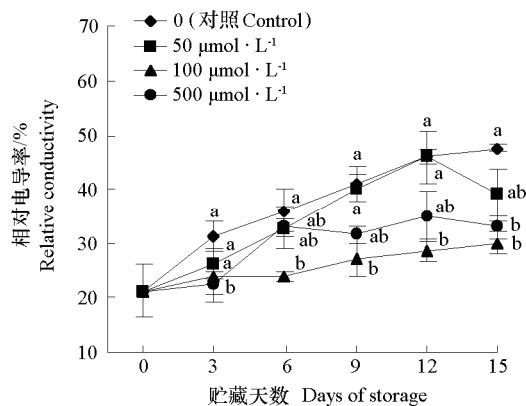


图 2 外源褪黑素处理对采后黄瓜相对电导率的影响

Fig. 2 Effect of exogenous melatonin on the relative electrical conductivity of post harvest cucumber

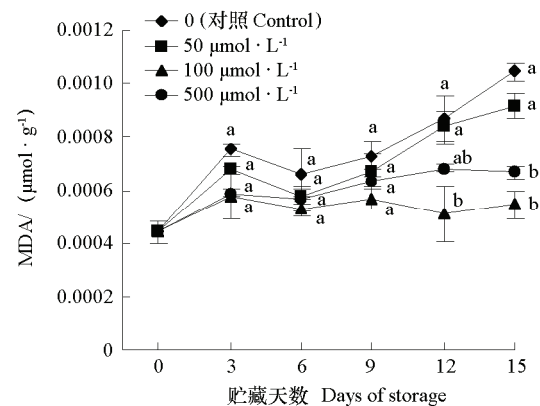


图 3 外源褪黑素处理对采后黄瓜丙二醛含量的影响

Fig. 3 Effect of exogenous melatonin on the MDA content in postharvest cucumber

### 2.4 外源褪黑素处理对采后黄瓜活性氧含量的影响

图 4 显示, 处理 6 d 后外源褪黑素处理明显抑制了超氧阴离子产生速率的上升, 贮藏结束时  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的褪黑素处理比对照低 33.9%。

同样, 褪黑素处理也减少了黄瓜果实内过氧化氢含量 (图 5), 处理 6 d 后  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  褪黑素处理对照组间差异显著, 贮藏结束时比对照低 34.0%。

这说明外源褪黑素处理可通过减少黄瓜果实内活性氧的积累, 减少对细胞膜的伤害, 保持了细胞的完整性, 使黄瓜保持更好的品质。

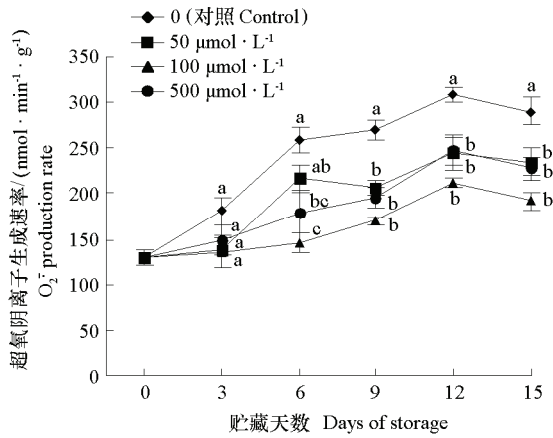


图4 外源褪黑素处理对采后黄瓜超氧阴离子生成速率的影响  
 Fig. 4 Effect of exogenous melatonin on the  $O_2^-$  production rate in postharvest cucumber

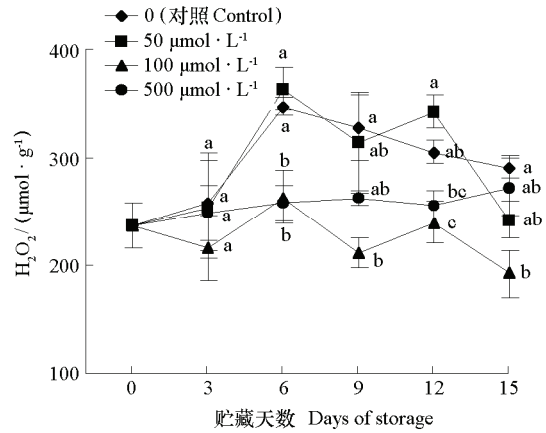


图5 外源褪黑素处理对采后黄瓜过氧化氢含量的影响  
 Fig. 5 Effect of exogenous melatonin on  $H_2O_2$  content in postharvest cucumber

## 2.5 外源褪黑素处理对采后黄瓜抗氧化酶活性的影响

黄瓜果实内的 SOD 活性在贮藏过程中逐渐降低 (图 6), 褪黑素处理能保持较高的 SOD 活性,  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的褪黑素处理显著高于对照 ( $P < 0.05$ ), 贮藏结束时是对照的 5.71 倍。随着贮藏时间的延长 CAT 活性呈先上升后下降的趋势, 在贮藏 3、6 和 15 d 时,  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  褪黑素处理显著高于对照 (图 7), 说明褪黑素可保持较高的 CAT 活性。

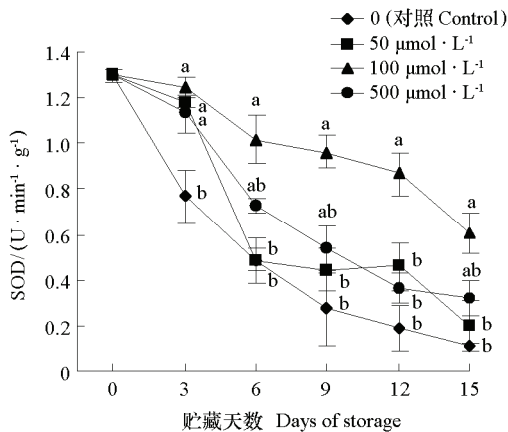


图6 外源褪黑素处理对采后黄瓜 SOD 活性的影响  
 Fig. 6 Effect of exogenous melatonin on the SOD activity in postharvest cucumber

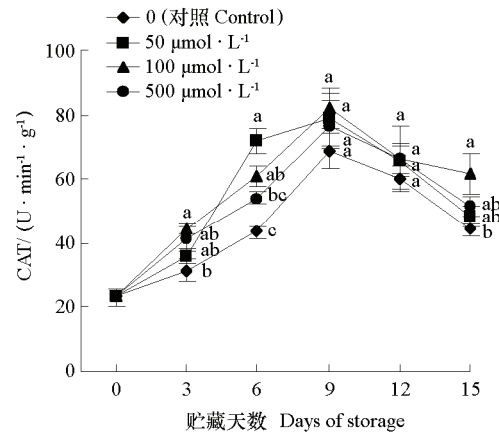


图7 外源褪黑素处理对采后黄瓜 CAT 活性的影响  
 Fig. 7 Effect of exogenous melatonin on the CAT activity in postharvest cucumber

如图 8 所示, 在贮藏过程中 POD 酶活性不断升高,  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  褪黑素处理显著高于对照, 贮藏结束时是对照的 2.91 倍,  $500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理 9 d 后显著高于对照,  $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理效果不明显。

如图 9 所示, APX 活性在贮藏过程中不断降低, 在整个贮藏期褪黑素处理作用不明显, 整体与对照组间无显著差异, 说明外源褪黑素处理并不是通过提高 APX 活性而减少对细胞的氧化伤害。

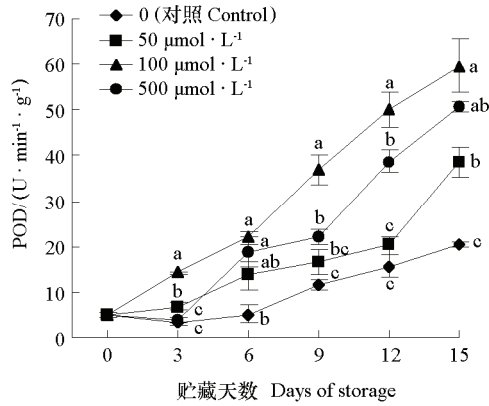


图 8 外源褪黑素处理对采后黄瓜 POD 活性的影响  
 Fig. 8 Effect of exogenous melatonin on the POD activity in postharvest cucumber

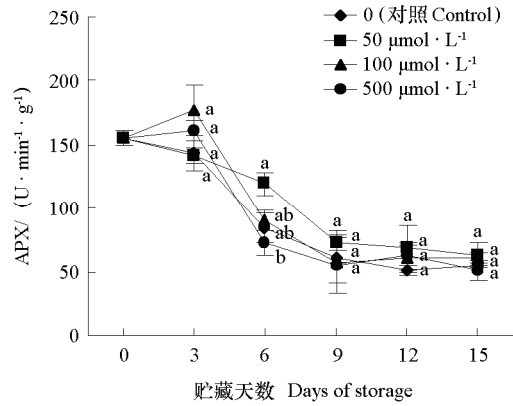


图 9 外源褪黑素处理对采后黄瓜 APX 活性的影响  
 Fig. 9 Effect of exogenous melatonin on the APX activity in postharvest cucumber

2.6 外源褪黑素处理对采后黄瓜呼吸速率和乙烯释放量的影响

在贮藏过程中黄瓜呼吸速率大体上逐渐上升（图 10），在贮藏结束时，可能由于腐烂呼吸速率有小幅下降。在贮藏结束时 50、100 和 500 μmol·L<sup>-1</sup> 的处理分别比对照低 15.6%、38.2%和 26.0%，100 μmol·L<sup>-1</sup> 外源褪黑素处理更好地抑制了黄瓜呼吸速率的增加，减少了呼吸作用对果实内部品质的消耗。

如图 11 所示，采后黄瓜乙烯释放量呈下降趋势，外源褪黑素处理可抑制乙烯释放量，100 μmol·L<sup>-1</sup> 的褪黑素处理显著低于对照，特别是采后 6 d，对照出现乙烯释放量高峰，而 100 μmol·L<sup>-1</sup> 的褪黑素处理比对照低 59.1%，贮藏结束时，50、100 和 500 μmol·L<sup>-1</sup> 的褪黑素处理分别比对照低 53.9%、50.6%和 61.6%，效果明显。

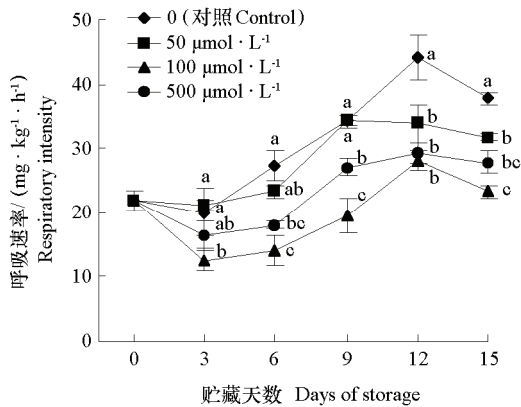


图 10 外源褪黑素处理对采后黄瓜呼吸强度的影响  
 Fig. 10 Effect of exogenous melatonin on the respiratory intensity of postharvest cucumber

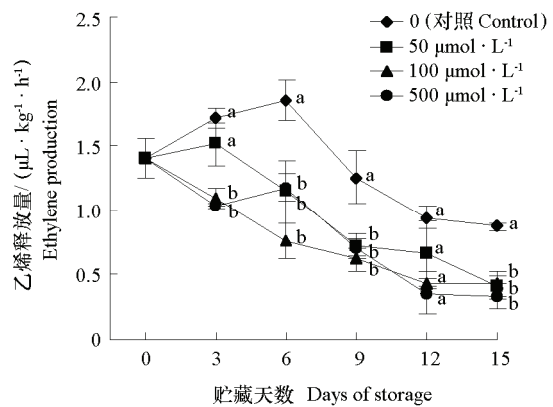


图 11 外源褪黑素处理对采后黄瓜乙烯生成量的影响  
 Fig. 11 Effect of exogenous melatonin treatment on the amount of ethylene production in post harvest cucumber

## 2.7 外源褪黑素处理对采后黄瓜细胞超微结构的影响

新鲜的黄瓜(贮藏 0d)细胞膜和细胞壁结构完整,在细胞质中可观察到许多结构完整的线粒体和叶绿体(图 12, A~C)。贮藏 15 d 的对照黄瓜细胞内的线粒体和叶绿体出现自我分解现象(图 12, D~F),其中线粒体肿大变形明显。外源褪黑素处理贮藏 15 d 后的黄瓜细胞线粒体和叶绿体也出现了自我分解现象(图 12, G~I),但分解程度低于对照,线粒体并未出现明显的肿大变形,说明使用外源褪黑素处理可有效地保持线粒体和叶绿体的完整性,进一步验证了褪黑素作为一种抗氧化剂减少了果实内部对细胞的氧化伤害,延缓了黄瓜的衰老从而使黄瓜保持了更好的品质。

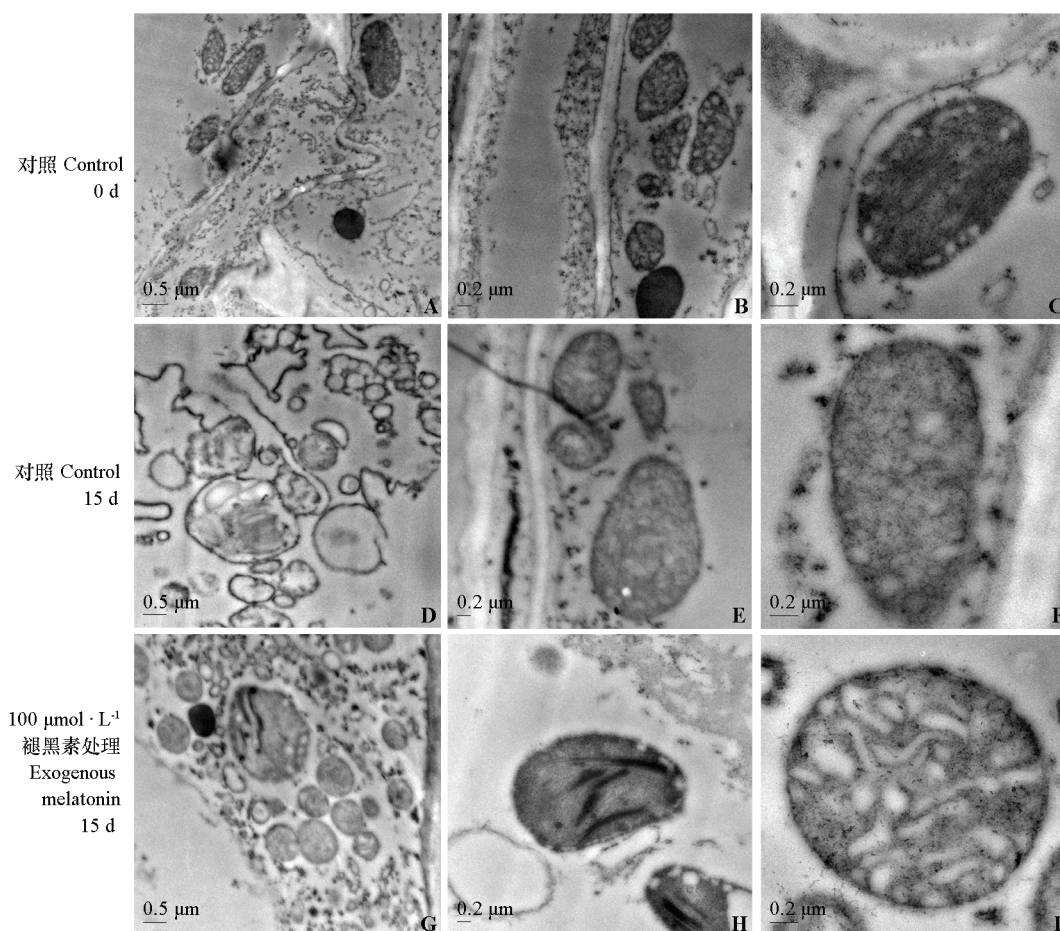


图 12 外源褪黑素处理采后黄瓜对细胞超微结构的影响

Fig. 12 Effect of exogenous melatonin on the ultrastructure of postharvest cucumber cells

## 3 讨论

植物体内的褪黑素最早是作为植物中天然的抗氧化剂被研究的,能有效抑制高温(徐向东等, 2010a)、低温(Lei et al., 2004)、干旱(Wang et al., 2013)、UV-B(Afreen et al., 2006)、重金属污染(Posmyk et al., 2008)等逆境条件对植物细胞的伤害,保护膜完整性,并防止叶绿素的降解(Arno & Hernández-Ruiz, 2009; García et al., 2014)。Zhang等(2013)用褪黑素处理在水分胁迫条件下的黄瓜种子,结果表明褪黑素处理不会改善水分胁迫条件下种子的吸水能力,但可以提高

种子的发芽率,促进幼苗根的生长,抑制叶绿素的降解,提高气孔导度和净光合速率,降低脂质过氧化程度和活性氧的生成量,同时提高水分胁迫条件下抗氧化酶的活性。与 IAA 类似,褪黑素可促进植物离体细胞膨大,还可以调节植物光周期 (Kolář et al., 1997)。

本试验结果表明,外源褪黑素处理可有效保持采后黄瓜在贮藏过程中的感官品质,减缓叶绿素、维生素 C、可滴定酸、可溶性蛋白含量的降解速度,说明外源褪黑素处理较好的保持了黄瓜的营养价值。叶绿素降解的生化过程尚不清楚。有报道认为,叶绿素降解可能依赖于叶绿素酶,其活性的高低影响叶绿素含量变化,进而引起果实感官变化(崔霞等,2013;章银良等,2013)。果实内的维生素 C 和可滴定酸会由于机体内的呼吸作用等代谢过程而消耗,含量不断降低(Champa et al., 2015; Meighani et al., 2015; 任邦来和妥丽琼,2015)。李红丽等(2008)研究证实果实内的维生素 C 和酸含量等与果实的风味物质有一定的正相关关系。黄瓜体内保持较高的可溶性蛋白含量有利于细胞代谢,减少脱水对细胞膜造成的损伤。黄瓜的贮藏过程就是一个衰老过程,在衰老的过程中膜系统受到的氧自由基攻击增多其透性越来越大,离子大量外渗,使果实的相对电导率不断增加(丹阳等,2005; Wang et al., 2015; Zhang et al., 2015)。本研究中外源褪黑素处理显著抑制了相对电导率的上升,说明褪黑素能维护黄瓜细胞膜的完整性,抑制衰老进程。黄瓜果实相对电导率与膜脂过氧化产物——丙二醛(MDA)有密切关系(熊运海,2008),在贮藏过程中,相对电导率和丙二醛含量变化趋势相似,都随贮藏时间延长而不断增加,丙二醛含量的快速升高标志着果实衰老加剧,而外源褪黑素处理显著抑制了丙二醛含量的增加,延缓果实衰老进程。

在贮藏过程中,黄瓜果实内的活性氧含量不断升高,主要包括超氧阴离子生成速率和过氧化氢含量,这可以引发脂质过氧化,导致细胞膜的退化,加速果实衰老(Qian et al., 2013)。褪黑素降低了黄瓜幼苗在高温胁迫下的  $O_2^-$  产生速率和  $H_2O_2$  含量,有效清除植物体内活性氧(徐向东等,2010a)。果实内部抗氧化酶活性是细胞抵抗活性氧胁迫最直接有效的方式,可清除植物组织内部的活性氧,因此它们的活性变化能够直接地反应细胞对氧化胁迫应答的水平指标。SOD 在氧化应激条件下具有关键作用,它是防御氧化应激的第一步(Scandalios, 1993)。已有试验证明外源褪黑素处理可提高酿酒酵母内的 SOD 和 CAT 活性(王成等,2015),提高高温胁迫下黄瓜幼苗的抗氧化酶活性(徐向东等,2010b)。本试验结果表明外源褪黑素处理可明显提高黄瓜果实 SOD、CAT 和 POD 活性,保护细胞免受氧化损伤进而维持细胞完整性,使果实在贮藏过程中保持更好的品质并延缓衰老。这可能是褪黑素在黄瓜体内通过增加抗氧化酶等相关基因的表达以及减少生物大分子的降解来提高抗氧化酶活性(Wang et al., 2014),继而增加了对 ROS 的清除能力。APX 是植物中非常普遍的一种酶,它与  $H_2O_2$  的亲合力比 SOD 和 CAT 都要高(Khan et al., 2015),但褪黑素对黄瓜体内 APX 活性无显著影响。呼吸作用是果蔬采后最重要的生命活动,呼吸消耗是造成营养物质损失的主要原因。本试验测得外源褪黑素处理抑制了黄瓜贮藏过程中的呼吸速率,减少了叶绿素、维生素 C、可滴定酸等有机干物质的消耗,是减缓果实衰老的主要原因。乙烯是促进果实成熟衰老的重要激素,对于果实后熟和衰老机理,尤其是乙烯在跃变型果实成熟过程中的作用,已有较多研究(李秀菊和刘用生,2000)。黄瓜对其比较敏感,抑制果实内源乙烯的生成,对减缓瓜条衰老意义明显(王明钦,2010)。本试验中采用外源褪黑素处理有效地减少了黄瓜的乙烯释放量,抑制乙烯促进黄瓜衰老的程度,进而保持黄瓜较好的品质。

在透射电镜下观察发现,外源褪黑素处理使黄瓜保持了更完整的细胞结构,抑制了线粒体和叶绿体的形变,进一步证实了使用褪黑素处理可避免活性氧物质对细胞的氧化伤害,与前人的试验结果(Szafrańska et al., 2013)一致。使用不同浓度的外源褪黑素处理都延缓了果实的衰老,其中 100



$\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的外源褪黑素处理作用效果最好。目前, 褪黑素的功能研究主要证实了褪黑素在植物中可作为自由基清除剂, 还可以促进植物根系 (Arnao & Hernández-Ruiz, 2007; Sarropoulou et al., 2012) 和叶片 (Okazaki et al., 2010; Wang et al., 2013) 的生长。本试验为褪黑素在果蔬采后保鲜应用方面提供了依据。

## References

- Afreen F, Zobayed S M, Kozai T. 2006. Melatonin in *Glycyrrhiza uralensis*: response of plant roots to spectral quality of light and UV-B radiation. *Journal of Pineal Research*, 41 (2): 108 - 115.
- Arnao M B, Hernández-Ruiz J. 2007. Melatonin promotes adventitious- and lateral root regeneration in etiolated hypocotyls of *Lupinus albus* L. *Journal of Pineal Research*, 42 (2): 147.
- Arnao M B, Hernández-Ruiz J. 2009. Chemical stress by different agents affects the melatonin content of barley roots. *Journal of Pineal Research*, 46 (3): 295 - 299.
- Cao Jiankang, Jiang Weibo. 2007. *Physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables*. Beijing: China Light Industry Press. (in Chinese)
- 曹建康, 姜微波. 2007. *果蔬采后生理生化实验指导*. 北京: 中国轻工业出版社.
- Champa W A H, Gill M I S, Mahajan B V C, Bedi S. 2015. Exogenous treatment of spermine to maintain quality and extend postharvest life of table grapes (*Vitis vinifera* L.) cv. flame Seedless under low temperature storage. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 60 (1): 412 - 419.
- Chen Jian-hua, Zhang Min, Che Zhen-hua, Lu Jia-hua, Xie Jing, Shao Si-si, Zhang Bai-mei, Li Yi-fan. 2012. The influence on chilling injury of the cucumber fruit under different storage temperatures and storage time. *Science and Technology of Food Industry*, 33 (9): 394 - 397. (in Chinese)
- 陈建华, 张敏, 车贞花, 卢佳华, 谢晶, 邵思思, 张白玫, 李一凡. 2012. 不同贮藏温度及时间对黄瓜果实冷害发生的影响. *食品工业科技*, 33 (9): 394 - 397.
- Cipolla-Neto J, Amaral F G, Afeche S C, Tan D X, Reiter R J. 2014. Melatonin, energy metabolism, and obesity: a review. *Journal of Pineal Research*, 56 (4): 371.
- Cui Xia, Jia Xiao-li, Qiao Li-xiang, Zhao Xing-jie. 2013. Research on extracts of paeonol trim to the refreshment of the dutch cucumber. *Cereal and Food Industry*, 20 (4): 75 - 77. (in Chinese)
- 崔霞, 贾小丽, 乔利香, 赵兴杰. 2013. 丹皮提取物对荷兰黄瓜保鲜的研究. *粮食与食品工业*, 20 (4): 75 - 77.
- Dai Heng-yan, Liu Chun-mei, Tan Shu-ming. 2010. Microencapsulation optimization of essential oils from four varieties of plants and their fresh-keeping effect on cucumbers. *Food Science*, 31 (14): 299 - 304. (in Chinese)
- 代亨燕, 刘春梅, 谭书明. 2010. 四种蔬菜固体保鲜剂对黄瓜的保鲜效果研究. *食品科学*, 31 (14): 299 - 304.
- Dan Yang, Li Li-te, Zhang Gang. 2005. Effect of short time high voltage electrostatic field (HVEF) treatment on the post harvest physiology of cucumber. *Food Science*, 26 (10): 240 - 242. (in Chinese)
- 丹阳, 李里特, 张刚. 2005. 短时高压静电场处理对黄瓜采后生理的影响. *食品科学*, 26 (10): 240 - 242.
- Dong J, Yu Q, Lu L, Xu M. 2012. Effect of yeast saccharide treatment on nitric oxide accumulation and chilling injury in cucumber fruit during cold storage. *Postharvest Biology & Technology*, 68 (2): 1 - 7.
- García J J, López-Pingarrón L, Almeida-Souza P, Tres A, Escudero P, García-Gil F A. 2014. Protective effects of melatonin in reducing oxidative stress and in preserving the fluidity of biological membranes: a review. *Journal of Pineal Research*, 56 (3): 225 - 237.
- Han Bing, Sun Jin, Guo Shi-rong, Jin Chun-yan. 2010. Effects of calcium on antioxidant enzymes activities of cucumber seedlings under salt stress. *Acta Horticulturae Sinica*, 37 (12): 1937 - 1943. (in Chinese)
- 韩冰, 孙锦, 郭世荣, 金春燕. 2010. 钙对盐胁迫下黄瓜幼苗抗氧化系统的影响. *园艺学报*, 37 (12): 1937 - 1943.
- Hu Y H, Chen C M, Xu L, Cui Y, Yu X Y, Gao H J. 2015. Postharvest application of 4-methoxy cinnamic acid for extending the shelf life of mushroom (*Agaricus bisporus*). *Postharvest Biology & Technology*, 104: 33 - 41.

- Kageyama M, Hiraoka M, Kagawa Y. 2015. Postharvest treatment of nanochitosan-based coating loaded with zataria multiflora essential oil improves antioxidant activity and extends shelf-life of cucumber. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33: 580 - 588.
- Khan Z U, Bu J, Khan N M, Khan R U, Jiang Z, Mou W. 2015. Integrated treatment of CaCl<sub>2</sub>, citric acid and sorbitol reduces loss of quality of button mushroom (*Agaricus bisporus*) during postharvest storage. *Journal of Food Processing & Preservation*, 39 (6): 2008 - 2016.
- Kolář J, Macháčková I, Eder J, Prinsen E, Dongen W V, Onckelen H V. 1997. Melatonin: Occurrence and daily rhythm in chenopodium rubrum. *Phytochemistry*, 44 (8): 1407 - 1413.
- Lei X Y, Zhu R Y, Zhang G Y, Dai Y R. 2004. Attenuation of cold-induced apoptosis by exogenous melatonin in carrot suspension cells: the possible involvement of polyamines. *Journal of Pineal Research*, 36 (2): 126 - 131.
- Li Hong-li, Yu Xian-chang, Gao Jun-jie, Wang Hua-sen. 2008. Correlation between sensory evaluation and nutritional quality of grafted and self rooted cucumber fruits. *China Vegetable*, 1 (3): 23 - 26. (in Chinese)
- 李红丽, 于贤昌, 高俊杰, 王华森. 2008. 嫁接和自根黄瓜果实感官评价与营养品质的相关性. *中国蔬菜*, 1 (3): 23 - 26.
- Li Xiu-ju, Liu Yong-sheng. 2000. Effect of exogenous ABA on the ethylene production and respiration rate of different kinds of apple fruit. *Plant Physiol*, 36 (2): 116 - 118. (in Chinese)
- 李秀菊, 刘用生. 2000. 外源 ABA 对不同成熟型品种苹果采后乙烯生成和呼吸速率的影响 (简报). *植物生理学报*, 36 (2): 116 - 118.
- Lu Xiao-min, Sun Jin, Guo Shi-rong, He Li-zhong. 2012. Effects of brassinolide on the mitochondria antioxidant system and cellular ultrastructure of cucumber seedling roots under hypoxic stress. *Acta Horticulturae Sinica*, 39 (5): 888 - 896. (in Chinese)
- 陆晓民, 孙锦, 郭世荣, 何立中. 2012. 油菜素内酯对低氧胁迫黄瓜幼苗根系线粒体抗氧化系统及其细胞超微结构的影响. *园艺学报*, 39 (5): 888 - 896.
- Meighani H, Ghasemnezhad M, Bakhshi D. 2015. Effect of different coatings on post-harvest quality and bioactive compounds of pomegranate (*Punica granatum L.*) fruits. *Journal of food science and technology*, 52 (7): 1 - 8.
- Okazaki M, Higuchi K, Aouini A, Ezura H. 2010. Lowering intercellular melatonin levels by transgenic analysis of indoleamine 2, 3-dioxygenase from rice in tomato plants. *Journal of Pineal Research*, 49 (3): 239 - 247.
- Posmyk M M, Bałabusta M, Wieczorek M, Sliwinska E, Janas K M. 2009. Melatonin applied to cucumber (*Cucumis sativus L.*) seeds improves germination during chilling stress. *Journal of Pineal Research*, 46 (2): 214 - 223.
- Posmyk M M, Kuran H, Marciniak K, Janas K M. 2008. Presowing seed treatment with melatonin protects red cabbage seedlings against toxic copper ion concentrations. *Journal of Pineal Research*, 45 (1): 24.
- Qian C, He Z, Zhao Y, Mi H, Chen X, Mao L. 2013. Maturity-dependent chilling tolerance regulated by the antioxidative capacity in postharvest cucumber (*Cucumis sativus L.*) fruits. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 93 (3): 626 - 633.
- Ren Bang-lai, Tuo Li-qiong. 2015. Effects of different concentrations of sodium alginate on preservation of cucumber. *Food and Nutrition in China*, 21 (8): 39 - 41. (in Chinese)
- 任邦来, 妥丽琼. 2015. 不同浓度海藻酸钠处理对黄瓜保鲜效果的影响. *中国食物与营养*, 21 (8): 39 - 41.
- Sarropoulou V N, Therios I N, Dimassi-Theriou K N. 2012. Melatonin promotes adventitious root regeneration in in vitro shoot tip explants of the commercial sweet cherry rootstocks CAB-6P (*Prunus cerasus L.*), Gisela 6 (*P. cerasus* × *P. canescens*), and MxM 60 (*P. avium* × *P. mahale*). *Journal of Pineal Research*, 52 (1): 38 - 46.
- Scandalios J.G. 1993. Oxygen stress and superoxide dismutases. *Plant Physiol*, 101, 7 - 12.
- Sun Q, Zhang N, Wang J, Zhang H, Li D, Shi J. 2015. Melatonin promotes ripening and improves quality of tomato fruit during postharvest life. *Journal of Experimental Botany*, 66 (3): 657 - 668.
- Szafrańska K, Glińska S, Janas K M. 2013. Ameliorative effect of melatonin on meristematic cells of chilled and re-warmed vigna radiata roots. *Biologia Plantarum*, 57 (1): 91 - 96.
- Tan D X, Hardeland R, Manchester L C, Korkmaz A, Ma S, Rosalescorral S. 2012. Functional roles of melatonin in plants, and perspectives in nutritional and agricultural science. *Journal of Experimental Botany*, 63 (2): 577 - 597.
- Tan D X, Manchester L C, Hardeland R, Lopez-Burillo S, Mayo J C, Sainz R M. 2003. Melatonin: a hormone, a tissue factor, an autocoid, a paracoid, and an antioxidant vitamin. *Journal of Pineal Research*, 34 (1): 75 - 78.

- Wang Cheng, Zhan Ji-cheng, Liu Xing-yan, Zhao Fang, Sun Xiang-yu, Huang Wei-dong. 2015. Effect of exogenous melatonin on ethanol fermentation and antioxidant activity of *Saccharomyces cerevisiae*. *Modern Food Science & Technology*, 15 (4): 102 - 108. (in Chinese)
- 王成, 战吉成, 刘兴艳, 赵芳, 孙翔宇, 黄卫东. 2015. 外源褪黑素对酿酒酵母发酵及抗氧化体系的影响. *现代食品科技*, 15 (4): 102 - 108.
- Wang L, Zhao Y, Reiter R J, He C, Liu G, Lei Q. 2014. Changes in melatonin levels in transgenic 'micro-tom' tomato overexpressing ovine AANAT and ovine HIOMT genes. *Journal of Pineal Research*, 56 (2): 134 - 142.
- Wang Ming-qin. 2010. Effect of Small Film Package on cucumber shelf-life and its mechanism[M. D. Dissertation]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University. (in Chinese)
- 王明钦. 2010. 聚乙烯薄膜小包装对黄瓜保鲜效果及其机制[硕士论文]. 杨凌: 西北农林科技大学.
- Wang P, Sun X, Li C, Wei Z, Liang D, Ma F. 2013. Long-term exogenous application of melatonin delays drought-induced leaf senescence in apple. *Journal of Pineal Research*, 54 (3): 292 - 302.
- Wang Wei-xiang, Zhang Rui-min, Sun Yan, Liu Jian-long. 2016. Effect of exogenous melatonin on the antioxidant system of cucumber seedlings under nitrate stress. *Acta Horticulturae Sinica*, 43 (4): 695 - 703. (in Chinese)
- 王伟香, 张锐敏, 孙艳, 刘建龙. 2016. 外源褪黑素对硝酸盐胁迫条件下黄瓜幼苗抗氧化系统的影响. *园艺学报*, 43 (4): 695 - 703.
- Wang Y, Luo Z, Khan Z U, Mao L, Ying T. 2015. Effect of nitric oxide on energy metabolism in postharvest banana fruit in response to chilling stress. *Postharvest Biology & Technology*, 108: 21 - 27.
- Xie Sheng-li, Liu Juan-juan, Gou Jian-xia. 2012. Determination of ascorbic acid in vegetables and fruits. *Hubei Agricultural Sciences*, 51 (1): 169. (in Chinese)
- 解胜利, 刘娟娟, 苟建霞. 2012. 果蔬中抗坏血酸含量的测定. *湖北农业科学*, 51 (1): 169.
- Xiong Yun-hai. 2008. Effects of Chinese herbal medicine on cell membrane permeability of cucumber during storage. *Journal of Changjiang Vegetables*, (20): 70 - 72. (in Chinese)
- 熊云海. 2008. 中草药处理对贮藏期黄瓜细胞膜透性变化的影响. *长江蔬菜*, (20): 70 - 72.
- Xu Xiang-dong, Sun Yan, Sun Bo, Zhang Jian, Guo Xiao-qin. 2010a. Effects of exogenous melatonin on active oxygen metabolism of cucumber seedlings under high temperature stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21 (5): 1295 - 1300. (in Chinese)
- 徐向东, 孙艳, 孙波, 张坚, 郭晓芹. 2010a. 高温胁迫下外源褪黑素对黄瓜幼苗活性氧代谢的影响. *应用生态学报*, 21 (5): 1295 - 1300.
- Xu Xiang-dong, Sun Yan, Guo Xiao-qin, Sun Bo, Zhang Jian. 2010b. Effects of exogenous melatonin on ascorbate metabolism system in cucumber seedlings under high temperature stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21 (10): 2580 - 2586. (in Chinese)
- 徐向东, 孙艳, 郭晓芹, 孙波, 张坚. 2010b. 高温胁迫下外源褪黑素对黄瓜幼苗抗坏血酸系统的影响. *应用生态学报*, 21 (10): 2580 - 2586.
- Zhang N, Zhao B, Zhang H J, Weeda S, Yang C, Yang Z C. 2013. Melatonin promotes water-stress tolerance, lateral root formation, and seed germination in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Journal of Pineal Research*, 54 (1): 15 - 23.
- Zhang Na, Zhang Hai-jun, Yang Rong-chao, Huang Yun-yu, Guo Yang-dong. 2012. The advances on functions study of melatonin in plants. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 28 (9): 16 - 20. (in Chinese)
- 张娜, 张海军, 杨荣超, 黄崧宇, 郭仰东. 2012. 褪黑素在植物中的功能研究进展. *中国农学通报*, 28 (9): 16 - 20.
- Zhang Y, Zhang M, Yang H. 2015. Postharvest chitosan-g-salicylic acid application alleviates chilling injury and preserves cucumber fruit quality during cold storage. *Food Chemistry*, 174: 558 - 563.
- Zhang Yin-liang, Zhou Wen-quan, Zhang Lu-yan. 2013. Study on the preservation of cherry tomatoes and cucumber by edible film of bovine serum albumin. *Journal of Zhengzhou University of Light Industry*, 28 (3): 1 - 4. (in Chinese)
- 章银良, 周文权, 张陆燕. 2013. 牛血清蛋白涂膜保鲜圣女果和小黄瓜的研究. *郑州轻工业学院学报(自然科学版)*, 28 (3): 1 - 4.
- Zuo Jiaqi, Xie Jiaheng, Xue Yuxuan, Feng Huan, Xu Jia-ni, Huang Xuan. 2014. Progress research of melatonin in plant: A multifunctional response to various stress. *Genomics and Applied Biology*, 14 (3): 709 - 715. (in Chinese)
- 左佳琦, 谢佳恒, 薛宇轩, 冯欢, 徐佳妮, 黄萱. 2014. 褪黑素对缓解植物逆境胁迫作用的研究进展. *基因组学与应用生物学*, 14 (3): 709 - 715.