

引用格式:

胡燕, 李长滨, 许美娟, 袁晓晴, 邹建. 褪黑素对鲜切山药酶促褐变的作用效果[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(2): 105–112.

HU Y, LI C B, XU M J, YUAN X Q, ZOU J. Effect of melatonin on enzymatic browning of fresh cut yam[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(2): 105–112.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



褪黑素对鲜切山药酶促褐变的作用效果

胡燕, 李长滨, 许美娟, 袁晓晴, 邹建*

(河南牧业经济学院食品与生物工程学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 分别采用 1、2、3 mmol/L 的褪黑素溶液处理鲜切铁棍山药, 以蒸馏水浸泡鲜切山药为对照, 室温(25 °C)下存放 4 d, 测定鲜切山药颜色参数(L^* 、 a^* 、 b^* 、总色差值(ΔE))、多酚氧化酶(PPO)活性、过氧化物酶(POD)活性、苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、 H_2O_2 含量、脂氧合酶(LOX)活性、丙二醛(MDA)含量、DPPH 自由基清除率和 ABTS 自由基清除率等指标, 探究褪黑素对鲜切山药酶促褐变的作用效果。结果表明: 褪黑素处理能抑制鲜切山药中 PPO、POD、PAL 和 LOX 活性, 贮藏 4 d 时, 3 mmol/L 褪黑素处理的样品的 PPO、POD、PAL 和 LOX 活性比空白对照组的分别小 51.6%、65.6%、27.1%、24.6%; 褪黑素处理能降低山药中 H_2O_2 和 MDA 含量, 贮藏 4 d 时, 3 mmol/L 褪黑素处理的样品的 H_2O_2 和 MDA 含量相比空白对照组的分别降低了 84.8% 和 21.0%; 褪黑素处理能提高山药中 CAT 活性, 贮藏 4 d 时, 3 mmol/L 褪黑素处理的样品的 CAT 活性为空白对照组的 1.96 倍; 褪黑素处理能提高山药的 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力, 贮藏 4 d 时, 3 mmol/L 褪黑素处理样品 DPPH 和 ABTS 自由基清除率比空白对照组的分别提高了 20.6%、18.7%; 褪黑素处理也能有效延缓鲜切山药表面褐变, 且其效果具有浓度依赖性, 3 mmol/L 的褪黑素护色效果最好, 贮藏 4 d 时, 3 mmol/L 褪黑素处理的样品的 L^* 值比空白对照组大 32.5%, a^* 、 b^* 、 ΔE 比空白对照组分别小 74.0%、50.7%、67.3%; 相关分析结果显示, 鲜切山药的 ΔE 与 L^* 、 a^* 、 b^* 、PPO 活性、POD 活性、PAL 活性、 H_2O_2 含量和 MDA 含量均呈极显著相关, 与 ABTS 自由基清除率呈显著相关。

关键词: 鲜切山药; 褪黑素; 保鲜剂; 酶促褐变; 抑制作用

中图分类号: TS255.3; S632.1

文献标志码: A

文章编号: 1007–1032(2024)02–0105–08

Effect of melatonin on enzymatic browning of fresh cut yam

HU Yan, LI Changbin, XU Meijuan, YUAN Xiaoqing, ZOU Jian*

(College of Food and Bioengineering, Henan University of Animal Husbandry and Economics, Zhengzhou, Henan 450046, China)

Abstract: In order to investigate the effect of melatonin on enzymatic browning of fresh cut yam, fresh pieces of the cut Chinese yam of were treated by 1, 2, 3 mmol/L melatonin solution respectively and dipped in water as control. They were stored at room temperature(25 °C) for 4 days and the color parameter(L^* , a^* , b^* , total color difference value ΔE), polyphenol oxidase(PPO) activity, peroxidase(POD) activity, phenylalanine ammoniase(PAL) activity, catalase(CAT) activity, H_2O_2 content, lipoxigenase(LOX) activity, malondialdehyde(MDA) content, DPPH free radical scavenging rate and ABTS free radical scavenging rate were selected to be measured. The results showed that melatonin treatment could inhibit the activities of PPO, POD, PAL and LOX in fresh cut yam. After 4 days of storage, the PPO, POD, PAL and LOX activities of samples treated with 3 mmol/L melatonin were 51.6%, 65.6%, 27.1% and 24.6% lower than those of the control group, respectively. Melatonin treatment could also reduce the H_2O_2 and MDA contents in yam. After 4 days of storage, the H_2O_2 and MDA contents in the sample treated with 3 mmol/L melatonin decreased by 84.8% and 21.0%,

收稿日期: 2023–03–02

修回日期: 2024–04–18

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(212102110342); 河南牧业经济学院博士科研启动基金(2020HNHUAHEDF003)

作者简介: 胡燕(1982—), 女, 湖北黄冈人, 博士, 讲师, 主要从事食品加工与保鲜研究, 81684@hnuah.edu.cn; *通信作者, 邹建, 博士, 教授, 主要从事食品加工与保鲜研究, 2293464633@qq.com

respectively, compared to the control group. Melatonin treatment could enhance CAT activity in yam. After 4 days of storage, the CAT activity of the sample treated with 3 mmol/L melatonin was 1.96 times higher than that of the control group. Melatonin treatment could enhance the DPPH and ABTS free radical scavenging ability. After 4 days of storage, the DPPH and ABTS free radical scavenging rates of samples treated with 3 mmol/L melatonin were increased by 20.6% and 18.7%, respectively, compared to the control group. Melatonin treatment could also effectively delay the browning on the surface of fresh cut yam, and its effect was concentration dependent. 3 mmol/L of melatonin had the best color protection effect. When stored for 4 days, the L^* value of the sample treated with 3 mmol/L of melatonin was 32.5% higher than that of the control group, a^* , b^* , ΔE was 74.0%, 50.7%, and 67.3% smaller than the control group, respectively. The relevant analysis results showed that there was a highly significant correlation between ΔE and L^* , a^* , b^* , PPO activity, POD activity, PAL activity, H_2O_2 content and MDA content, as well as a significant correlation with ABTS free radical scavenging ability.

Keywords: fresh cut yam; melatonin; preserving agent; enzymatic browning; inhibition

作为药食同源的重要经济作物, 山药在中国被广泛种植和消费。山药营养价值高, 不仅含有多种人体必需的氨基酸和矿物质元素, 还含有皂苷、黏液质尿囊素等多种生物活性物质^[1]。研究^[2]证实, 山药具有抗氧化、降血糖、调节肠胃功能、增强免疫力等多种药用活性。近些年来, 鲜切蔬菜由于食用方便, 越来越受到消费者的欢迎。而由于山药汁液中含有会导致人皮肤发痒的物质, 去皮不便, 特别适合加工成鲜切山药进行销售。但是经过清洗、去皮、切分等加工处理后, 鲜切山药很容易发生酶促褐变, 从而导致产品货架期缩短, 商业价值降低; 因此, 抑制酶促褐变、保持产品质量一直是鲜切山药保鲜研究中的热点。

已有较多有关酶促褐变抑制方法的探究, 如亚硫酸盐、有机酸、还原剂等, 都可以用于控制果蔬酶促褐变。但有些方法存在安全隐患, 不被消费者所接受, 还有些方法护色效果不太理想^[3]。褪黑素(N-乙酰-5-甲氧基色胺, MT)是一种色氨酸衍生的天然产物, 几乎存在于所有生物体内。目前, 已在苹果、葡萄、马铃薯、胡萝卜等几十种常见的蔬菜水果中检测出 MT^[4], 证实其对人体安全无毒。研究^[5]表明, MT 可以缓解因生物和非生物因素造成的损伤应力。MT 具有抗氧化活性, 可作为自由基的清道夫或者激活抗氧化剂的信号分子, 直接或间接参与植物发育的不同过程^[6]。研究证实, 采后 MT 处理可延缓芒果贮藏期的软化^[7], 减轻灯笼椒贮藏期的冷害效应^[8], 抑制梨贮藏期的褐变反应^[9], 延缓脐橙采后衰老^[10]。基于以上研究, 作为一种天然抗氧化剂和抗褐变剂, MT 对鲜切山药的酶促褐变可能有抑制效果。本研究中, 以一定浓度的褪黑素处理鲜切山药, 评估其对鲜切山药酶促褐变的作用

效果, 并探讨其作用机理, 以期为褪黑素在果蔬保鲜方面的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜铁棍山药购于河南省郑州市郑东新区姚桥农贸市场; 褪黑素(99%), 食品级, 购于陕西佰诺安生物科技有限公司; 其他化学试剂均为分析纯, 购于国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

色差仪, 深圳市三恩时科技有限公司产品, NR60CP; 紫外-可见分光光度计, 青岛聚创环保集团有限公司产品, JC-UT200; 台式离心机, 上海卢湘仪离心机仪器有限公司产品, TG16A。

1.3 样品处理

挑选粗细均匀、无机械损伤和虫害少的新鲜山药, 洗净表面的泥土, 用不锈钢小刀去皮, 切分成约 1 cm 厚的均匀薄片, 然后将其平均分成 4 组: 空白对照组(将山药片在蒸馏水中浸泡 5 min); 3 组试验组(将山药片分别在 1、2、3 mmol/L 的 MT 溶液中浸泡 5 min)。浸泡结束, 将各组样品捞出晾干, 然后分装于聚丙烯薄膜袋中, 置于室温(25 °C)条件下存放 4 d, 每天取样进行相关指标的测定。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 颜色测定

参照文献[11]的方法, 采用色度仪测定鲜切山药样品的色度值。颜色的变化由 L^* 、 a^* 、 b^* 值进行判定, 并计算总色差值(ΔE)。

1.4.2 酶活性测定

参照 BAI 等^[11]的方法,测定多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)、苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性;参照 QIAO 等^[12]的方法,测定过氧化氢酶(CAT)活性;参照 LI 等^[13]的方法,测定脂氧合酶(LOX)活性。

1.4.3 过氧化氢(H₂O₂)含量测定

参照 ZHANG 等^[14]的方法,测定过氧化氢(H₂O₂)含量。

1.4.4 丙二醛(MDA)含量测定

参照 QIAO 等^[12]的方法,测定丙二醛(MDA)含量。

1.4.5 抗氧化性能测定

参照 TSAI 等^[15]的方法,测定 DPPH 自由基清除能力;参照 SOONG 等^[16]的方法,测定 ABTS 自由基清除能力。

1.5 数据处理

每个指标独立重复测定 3 次,最终结果以平均数±标准差(SD)表示。运用 SPSS 20.0 进行数据差异分析和主成分分析;采用 Pearson 相关系数评价相关性。采用 Origin 8.5 绘图。

2 结果与分析

2.1 贮藏期间鲜切山药的外观变化

鲜切山药在贮藏过程中外观的变化如图 1 所示。从图 1 可以看出,空白对照组的山药样品室温贮藏 1 d 后就显示出轻微的褐变,贮藏 3 d 后褐变严重,失去了食用价值;而经 3 mmol/L MT 处理的鲜切山药片室温贮藏 3 d 后只出现轻微褐变。表明 MT 能有效抑制鲜切山药贮藏过程中的褐变反应。

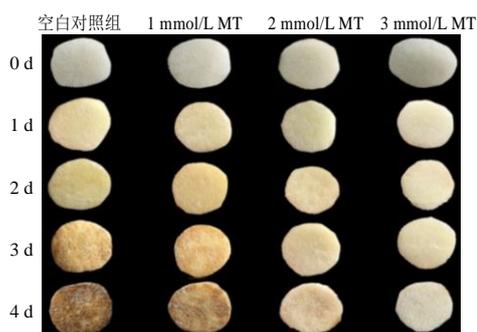


图 1 贮藏期间鲜切山药的外观

Fig.1 The appearance of fresh-cut yam during storage

2.2 褪黑素处理对鲜切山药贮藏期间颜色变化的影响

从表 1 可以看出,所有样品的 L^* 值都随着贮藏

表 1 贮藏期间鲜切山药的色度值

Table 1 The color parameters of fresh cut yam during storage

贮藏时间/d	MT 用量/(mmol L ⁻¹)	L^*	a^*	b^*	ΔE
0	0	69.33±0.85	-0.53±0.55	6.33±0.25	(0.00±0.00)b
	1	70.81±0.71	-1.12±0.08	5.58±0.48	(1.07±0.13)a
	2	70.21±0.77	-1.32±0.05	5.92±0.45	(0.93±0.08)a
	3	69.95±0.78	-0.87±0.07	6.25±0.47	(0.89±0.16)a
1	0	69.53±0.74	0.51±0.04	(14.22±0.74)a	(6.81±0.82)a
	1	69.14±0.82	0.45±0.02	(12.58±1.02)a	(5.93±0.39)a
	2	69.54±0.71	0.52±0.08	(9.25±0.68)b	(4.11±0.25)b
	3	70.55±0.34	0.28±0.04	(7.88±0.64)b	(3.52±0.41)b
2	0	66.11±0.82	1.12±0.12	(18.35±0.92)a	(11.28±0.45)a
	1	67.52±0.66	0.98±0.06	(13.15±0.56)b	(7.68±0.41)b
	2	66.81±0.57	0.75±0.07	(11.85±1.17)b	(6.21±0.25)c
	3	68.16±0.78	0.57±0.08	(9.63±0.68)c	(3.88±0.37)d
3	0	(58.45±0.63)c	(5.63±0.63)a	(20.27±1.13)a	(18.04±0.58)a
	1	(60.20±0.82)b	(4.85±0.42)a	(17.28±1.02)b	(14.91±0.68)b
	2	(61.31±0.67)b	(4.53±0.47)a	(14.38±0.87)c	(12.13±0.49)c
	3	(63.22±0.68)a	(1.25±0.38)b	(9.95±0.83)d	(7.68±0.34)d
4	0	(46.30±0.73)d	(10.85±0.85)a	(22.95±0.93)a	(28.57±1.25)a
	1	(55.71±0.65)c	(7.11±0.65)b	(20.35±0.65)b	(21.97±0.39)b
	2	(58.92±0.65)b	(5.33±0.75)c	(18.45±0.42)c	(17.21±0.56)c
	3	(61.35±0.45)a	(2.82±0.55)d	(11.32±1.01)d	(9.15±0.78)d

同列不同字母示同一贮藏时间组间差异有统计学意义($P<0.05$)。

时间的延长呈减小趋势,表明鲜切山药表面颜色都呈现逐渐变暗的趋势;贮藏4 d时,4组样品 L^* 值的差异有统计学意义,3 mmol/L MT处理组样品 L^* 值最大,比空白对照组的大32.5%,说明褪黑素处理可以减缓鲜切山药表面颜色变暗。随着贮藏时间的延长,所有样品的 a^* 值均呈增大趋势,且各组样品 a^* 值的差异越来越大,贮藏4 d时,4组样品 a^* 值的差异有统计学意义,1、2、3 mmol/L MT处理组样品的 a^* 值比空白对照组的分别小34.5%、50.9%、74.0%,说明褪黑素处理可以显著降低鲜切山药的红变速率。各组样品的 b^* 值均随着贮藏时间的延长逐渐增大,贮藏3 d后,4组样品 b^* 值的差异有统计学意义,3 mmol/L MT处理组的最小;贮藏4 d时,3 mmol/L MT处理组样品 b^* 值比空白对照组的小50.7%,说明褪黑素处理可以显著抑制鲜切山药表面颜色的黄变。所有样品的 ΔE 值都随着贮藏时间的延长逐渐增大;贮藏2 d后,4组样品 ΔE 值的差异有统计学意义;贮藏4 d时,1、2、3 mmol/L MT处理组样品的 ΔE 值比空白对照组的分

别小31.7%、44.4%、67.3%,说明褪黑素处理可以有效控制鲜切山药的酶促褐变,且在1~3 mmol/L范围内其效果具有浓度依赖性,3 mmol/L褪黑素处理效果最好。

2.3 褪黑素处理对贮藏期间鲜切山药中与褐变相关酶活性的影响

从表2可以看出,在贮藏前期,各组样品PPO活性差别不大;3 d后,各MT处理组样品PPO活性显著低于空白对照组的;贮藏4 d时,1、2、3 mmol/L MT处理组样品的PPO活性比空白对照组的分别小21.4%、41.4%和51.6%,说明褪黑素处理可以抑制鲜切山药PPO活性的增大。各组样品POD活性随着贮藏时间的延长均先增大,到贮藏3 d时最大,随后又有所减小;2 d后,各MT处理组样品POD活性均显著低于空白对照组的;贮藏4 d时,1、2、3 mmol/L MT处理组样品的POD活性比空白对照组的分别小14.2%、33.0%、65.6%,说明褪黑素处理可以抑制鲜切山药POD活性的增大。贮

表2 贮藏期间鲜切山药中与褐变相关酶的活性及活性氧代谢和膜脂代谢相关指标的含量

Table 2 The activities of enzymes related to browning, the contents of indicators related to reactive oxygen species metabolism and membrane lipid metabolism in fresh cut yam during storage

贮藏时间/d	MT用量/(mmol L ⁻¹)	PPO活性/(U g ⁻¹ min ⁻¹)	POD活性/(U g ⁻¹ min ⁻¹)	PAL活性/(U g ⁻¹ min ⁻¹)	CAT活性/(U kg ⁻¹)	H ₂ O ₂ 含量/(mol kg ⁻¹)	LOX活性/(U kg ⁻¹)	MDA含量/(mol kg ⁻¹)
0	0	102.31±8.15	2.33±0.12	15.55±0.65	1 098.3±59.1	0.06±0.01	10 021±231	5.85±0.35
	1	98.30±4.15	1.53±0.08	18.51±0.88	1 235.5±54.1	0.08±0.00	10 008±265	6.03±0.18
	2	105.35±8.15	1.20±0.06	17.31±0.85	1 321.1±58.1	0.09±0.00	9 988±310	6.05±0.25
	3	99.35±8.15	1.91±0.09	16.24±0.82	1 282.1±78.1	0.08±0.01	10 200±265	6.11±0.27
1	0	121.22±9.84	11.80±0.15	(27.21±1.09)c	(1 091.6±89.8)b	(0.25±0.01)a	(14 850±355)a	(12.58±0.64)a
	1	128.43±9.32	13.12±0.32	(29.84±0.32)b	(1 228.4±59.3)b	(0.17±0.01)b	(13 255±335)b	(12.21±0.42)a
	2	133.51±8.92	12.22±0.75	(32.26±0.75)a	(1 154.3±68.9)b	(0.05±0.01)c	(11 920±290)c	(12.05±0.68)a
	3	148.50±9.24	10.51±0.39	(24.81±0.87)d	(1 537.3±79.2)a	(0.06±0.00)c	(11 050±368)d	(10.08±0.44)b
2	0	(198.51±10.12)a	(45.53±2.92)a	(29.51±0.89)b	(1 015.2±80.1)b	(0.34±0.01)a	(13 775±280)a	(13.05±0.27)a
	1	(175.25±9.91)b	(35.32±3.71)b	(33.33±0.71)a	(1 092.0±79.9)b	(0.31±0.02)a	(11 500±363)b	(12.04±0.56)b
	2	(208.52±6.57)a	(19.21±2.57)c	(35.25±1.25)a	(1 685.5±86.5)a	(0.18±0.02)b	(10 850±278)b	(10.93±0.37)c
	3	(213.25±10.98)a	(15.11±2.98)c	(26.57±0.94)c	(1 752.3±60.9)a	(0.13±0.01)c	(11 090±208)b	(9.85±0.38)d
3	0	(242.31±11.23)a	(112.10±5.11)a	(35.82±1.18)a	(982.5±51.2)b	(0.39±0.03)a	(12 855±325)a	(12.85±0.33)a
	1	(215.11±10.42)b	(91.62±5.42)b	(36.64±1.12)a	(1 124.1±60.4)b	(0.29±0.01)b	(11 035±285)b	(11.93±0.22)b
	2	(196.72±9.87)b	(63.56±7.87)c	(36.54±0.87)a	(1 213.3±79.8)b	(0.21±0.03)c	(11 550±301)b	(11.03±0.47)c
	3	(173.23±7.68)c	(52.43±6.68)c	(29.21±1.08)b	(1 885.3±57.6)a	(0.08±0.03)d	(8 550±321)c	(10.57±0.28)c
4	0	(285.51±8.53)a	(103.50±5.31)a	(37.76±1.28)a	(1 884.4±58.8)d	(0.46±0.02)a	(11 910±276)a	(12.69±0.25)a
	1	(224.52±9.65)b	(88.81±3.65)b	(39.15±1.35)a	(2 138.8±69.6)c	(0.37±0.03)b	(10 850±147)b	(11.59±0.39)b
	2	(167.23±11.69)c	(69.33±5.69)c	(34.30±1.04)b	(3 138.5±91.6)b	(0.23±0.02)c	(10 520±422)b	(10.82±0.24)c
	3	(138.31±9.42)d	(35.61±3.42)d	(27.52±0.55)c	(3 688.5±89.4)a	(0.07±0.03)d	(8 980±118)c	(10.02±0.45)d

同列不同字母示同一贮藏时间组间差异有统计学意义($P<0.05$)。

藏 0~3 d, 鲜切山药 PAL 活性随着贮藏时间的延长而增大, 到 4 d 时, 空白对照组和 1 mmol/L MT 处理组的继续增大, 但 2、3 mmol/L MT 处理组的则有所减小, 比空白对照组的分别小 9.2%、27.1%; 贮藏 0~3 d, 1、2 mmol/L MT 处理组样品 PAL 活性大于空白对照组的, 但是贮藏 4 d 时, 2 mmol/L MT 处理组样品的 PAL 活性显著小于空白对照组的; 贮藏 1 d 后, 3 mmol/L MT 处理组样品的 PAL 活性显著低于空白对照组的。说明高浓度褪黑素处理可以抑制鲜切山药 PAL 活性的增大。

2.4 褪黑素处理对贮藏期间鲜切山药活性氧代谢的影响

从表 2 中可以看出, 贮藏 0~3 d, 各组样品 CAT 活性变化不大; 但贮藏 4 d 时, 各组样品 CAT 活性急剧增加, 且 MT 处理组的 CAT 活性均显著高于空白对照组的, 1、2、3 mmol/L MT 处理组样品的 CAT 活性分别为空白对照组的 1.14 倍、1.67 倍、1.96 倍, 说明褪黑素处理可以促进鲜切山药 CAT 活性的增大。空白对照组样品中 H_2O_2 含量随着贮藏时间的延长而不断增大, 而 MT 处理组样品中 H_2O_2 含量增速较缓慢, 尤其是 3 mmol/L MT 处理组样品, 在贮藏期内 H_2O_2 含量变化不明显, 且均显著低于空白对照的(0 d 时除外); 贮藏 4 d 时, 1、2、3 mmol/L MT 处理组样品中 H_2O_2 含量比空白对照组分别小 19.6%、50.0%、84.8%, 说明褪黑素处理可以降低鲜切山药中 H_2O_2 含量。

2.5 褪黑素处理对贮藏期间鲜切山药膜脂代谢的影响

从表 2 可以看出, 随着贮藏时间的延长, 所有样品 LOX 活性都是先增大, 贮藏 1 d 时最大, 随后, LOX 活性又逐渐减小; 贮藏 1 d 后, 褪黑素处理组样品的 LOX 活性显著低于空白对照组的, 贮藏 4 d 时, 1、2、3 mmol/L MT 处理组样品的 LOX 活性比空白对照组的分别小 8.9%、11.7%和 24.6%, 说明褪黑素处理可以抑制鲜切山药中 LOX 的活性。0~1 d 时, 各组样品中 MDA 含量均迅速增大, 其后保持相对平稳的趋势; 贮藏 2 d 后, MT 处理组中 MDA 含量显著低于空白对照组的; 贮藏 4 d 时, 1、2、3 mmol/L MT 处理组样品中 MDA 含量比空白对照组的分别小 8.7%、14.7%、21.0%, 说明 MT 处

理可以抑制鲜切山药中 MDA 的生成。

2.6 褪黑素处理贮藏期间对鲜切山药抗氧化性能的影响

从表 3 可以看出, 除贮藏 1、2 d 的 1 mmol/L MT 处理组的 ABTS 自由基清除率外, MT 处理组样品的 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力均大于空白对照组的, 且贮藏 0~2 d 时, MT 的浓度越高, 差别越明显, 但在贮藏 3~4 d 时, 不同组别间的差距逐渐缩小; 贮藏 4 d 时, 2、3 mmol/L MT 处理组样品的 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力均显著大于空白对照组的, 其中 3 mmol/L MT 处理组样品的 DPPH 和 ABTS 自由基清除率中比空白对照组的分别提高了 20.6%、18.7%, 而 1 mmol/L MT 处理组的与空白对照组的差异不大。

表 3 贮藏期间鲜切山药的抗氧化性能

贮藏时间/d	MT 用量/ (mmol L ⁻¹)	DPPH 自由基 清除率/%	ABTS 自由基 清除率/%
0	0	(5.30±0.65)d	(7.32±0.55)c
	1	(8.52±0.45)c	(8.30±0.45)c
	2	(14.32±0.39)b	(12.33±0.89)b
1	3	(30.81±0.95)a	(25.81±1.65)a
	0	(8.25±1.44)d	(15.22±0.68)c
	1	(12.21±0.92)c	(14.41±0.42)c
2	2	(16.81±1.52)b	(16.84±0.52)b
	3	(26.32±0.24)a	(23.33±0.94)a
	0	(11.73±0.92)c	(18.71±0.88)b
3	1	(18.85±1.21)b	(17.82±0.61)b
	2	(21.11±1.27)b	(19.16±0.67)b
	3	(24.21±0.88)a	(21.62±1.08)a
4	0	(21.53±1.43)b	21.91±1.29
	1	(25.61±0.82)a	23.62±0.82
	2	(26.61±0.47)a	24.61±0.87
4	3	(25.27±1.08)a	22.20±0.58
	0	(26.21±1.13)c	(24.55±1.05)b
	1	(27.33±0.75)c	(25.38±1.35)b
4	2	(29.41±0.89)b	(28.51±0.68)a
	3	(31.62±0.62)a	(29.14±0.82)a

同列不同字母示同一贮藏时间组间差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.7 主成分分析

从图 2 中可以看出, 主成分 PC1 和主成分 PC2

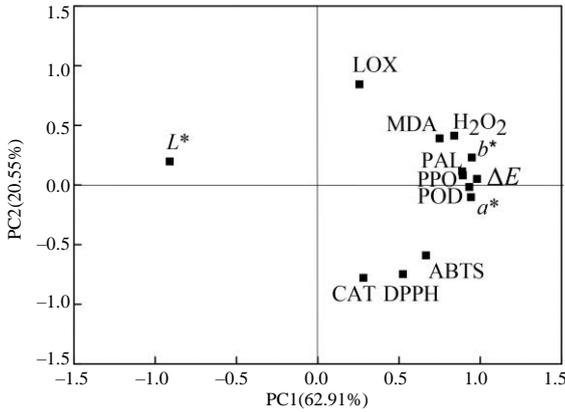


图 2 褪黑素处理组和空白对照组鲜切山药贮藏过程中各指标的二维主成分分析结果

Fig.2 Two-dimensional principal component analysis result of all analyzed traits of control and treated fresh-cut yam during storag

表 4 褪黑素处理组和空白对照组鲜切山药贮藏过程中各指标的 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficient of each index during storage of fresh cut yam in melatonin treatment group and control group

指标	Pearson 相关系数					
	<i>L*</i>	<i>a*</i>	<i>b*</i>	ΔE	PPO 活性	POD 活性
<i>a*</i>	-0.977**					
<i>b*</i>	-0.829**	0.875**				
ΔE	-0.925**	0.963**	0.951**			
PPO 活性	-0.793**	0.809**	0.811**	0.870**		
POD 活性	-0.902**	0.916**	0.886**	0.913**	0.829**	
PAL 活性	-0.700**	0.768**	0.835**	0.837**	0.812**	0.789**
CAT 活性	-0.404	0.333	0.159	0.259	0.090	0.183
H ₂ O ₂ 含量	-0.722**	0.767**	0.925**	0.852**	0.784**	0.796**
LOX 活性	0.014	0.116	0.459*	0.287	0.211	0.123
MDA 含量	-0.471*	0.552*	0.781**	0.710**	0.666**	0.600**
DPPH 自由基清除率	-0.526*	0.509*	0.287	0.441	0.434	0.470*
ABTS 自由基清除率	-0.597**	0.599**	0.495*	0.583*	0.513*	0.571**

指标	Pearson 相关系数					
	PAL 活性	CAT 活性	H ₂ O ₂ 含量	LOX 活性	MDA 含量	DPPH 自由基清除率
CAT 活性	0.176					
H ₂ O ₂ 含量	0.710**	-0.095				
LOX 活性	0.307	-0.493*	0.530*			
MDA 含量	0.855**	0.008	0.673**	0.628**		
DPPH 自由基清除率	0.415	0.599**	0.117	-0.410	0.165	
ABTS 自由基清除率	0.538*	0.609**	0.290	-0.162	0.391	0.942**

数据后“*”“**”“***”分别示 0.05、0.01 的显著性水平。

3 结论与讨论

本研究中，用不同浓度的褪黑素处理鲜切山药，通过测定其颜色参数 *L**、*a**、*b**和 ΔE 发现，褪黑素处理不仅可以延缓鲜切山药表面颜色变暗、变红和变黄，还可以减小其酶促褐变的速率，保护鲜切山药表面原本的颜色，抑制其颜色发生变化。

的方差解释率分别占 62.91%和 20.55%，累计方差解释率达到 83.46%，表明这 2 个主成分因子代表了褪黑素处理组和空白对照组鲜切山药各指标的大部分信息；各因子选取矩阵中载荷绝对值大于 0.7 的指标，第 1 主成分主要由 *L**、*a**、*b**、 ΔE 、PPO 活性、POD 活性、PAL 活性、H₂O₂ 含量和 MDA 含量构成。对各指标进行相关性分析，结果列于表 4。从表 4 可以看出，鲜切山药的 ΔE 与 *L**、*a**、*b**、PPO 活性、POD 活性、PAL 活性、H₂O₂ 含量和 MDA 含量均呈极显著相关，与 ABTS 自由基清除率呈显著相关。

进一步研究发现，褪黑素处理对鲜切山药表面颜色的保护作用可能与其影响山药中褐变相关酶的活性有关。PPO 可催化果蔬中酚类底物氧化为醌类物质，继而进一步氧化聚合为褐色产物，使果蔬变色^[17]。PAL 是主导酚类物质合成的关键酶^[18]。本研究结果发现，不同浓度的褪黑素处理对鲜切山药 PPO 和

POD 的活性都有抑制作用,高浓度的褪黑素处理对 PAL 活性也存在抑制作用。ZHANG 等^[19]研究褪黑素对荔枝果肉褐变的影响也发现了类似现象。说明褪黑素处理可以通过抑制果蔬内与褐变相关酶的活性来延缓果蔬的酶促褐变,从而达到保护果蔬颜色的作用。

高水平的 H_2O_2 会通过造成细胞膜的氧化损伤和促进酚类底物的氧化而导致果蔬变色。CAT 是植物组织中存在的一种内源性抗氧化酶,它可将植物的 H_2O_2 分解成水和分子氧,从而减少 H_2O_2 对果蔬组织可能造成的氧化损伤^[20]。本试验结果表明,褪黑素处理可促进鲜切山药中 CAT 活性的增强,降低鲜切山药中 H_2O_2 的含量,且其作用效果存在浓度依赖性,高浓度的褪黑素处理效果较好。LOX 是启动膜脂代谢的关键酶,它可催化多不饱和脂肪酸氧化生成氢过氧化物,进而触发细胞膜脂质过氧化^[21]。在应激状态下,膜脂过氧化作用可能发生细胞膜的损伤,降低细胞膜的流动性,增加细胞膜渗透率,导致溶液外渗^[22]。MDA 被认为是多不饱和脂肪酸氧化的最终产物,其含量可以直接反映脂质氧化程度^[23]。本试验结果表明,不同浓度的褪黑素处理均可显著抑制鲜切山药中 LOX 活性,同时鲜切山药中 MDA 含量也显著减小。说明褪黑素处理可以减缓膜脂代谢。水果和蔬菜细胞中的酚类化合物和 PPO 分别存在于液泡和细胞质中,一旦细胞膜受损,细胞内的酚类物质就会与 PPO 接触,导致褐变,这意味着细胞膜的完整性对褐变起着至关重要的作用。而褪黑素处理可以通过减少活性氧和减缓膜脂代谢来保护细胞膜的完整性,最终起到抗褐变的作用。

另外,除贮藏 1、2 d 的 1 mmol/L MT 处理组的 ABTS 自由基清除率降低外,经褪黑素处理后,鲜切山药 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力都得到了提高,尤其是在贮藏前期,褪黑素浓度越高,鲜切山药抗氧化能力越强,而后期各组间差别逐渐缩小。可能是鲜切山药的抗氧化能力一方面来源于山药中的酚类物质,另一方面来源于外源的褪黑素。褪黑素本身具有抗氧化性,因而开始试验的时候褪黑素浓度越高,抗氧化性越强。但随着贮藏时间的延长,一方面 PAL 会主导合成部分酚类物质;另一方面酶促褐变的发生会消耗部分酚类物质,从而呈

现一个比较复杂的局面。但是总体来讲,经褪黑素处理的鲜切山药的抗氧化能力始终高于空白对照的。抗氧化能力提高的同时清除活性氧的作用增强,这与 CAT 活性的增加以及 H_2O_2 含量的降低总体趋势是一致的。

对各指标进行主成分分析和相关性分析发现,与总色差值关系最为密切的指标是颜色参数(L^* 、 a^* 、 b^*),与褐变相关的酶(PPO、POD、PAL)活性, H_2O_2 含量和 MDA 含量等。

可见,褪黑素主要是通过抑制与褐变相关的酶活性和保护细胞膜完整性来防褐变的。褪黑素对鲜切山药的护色保鲜作用十分明显,有望被开发为一种商用的护色保鲜剂。

参考文献:

- [1] BAI T T, LI J X, MURTAZA A, et al. Scavenging of ROS after eugenol treatment as mechanism of slowing down membrane lipid metabolism to maintain the surface color of fresh-cut yam[J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 15(8): 1821–1835.
- [2] ZHOU N, ZENG M N, LI K, et al. An integrated metabolomic strategy for the characterization of the effects of Chinese yam and its three active components on septic cardiomyopathy[J]. Food & Function, 2018, 9(9): 4989–4997.
- [3] FAN W G, CAO Y Y, REN H W, et al. Effects of ethanol fumigation on inhibiting fresh-cut yam enzymatic browning and microbial growth[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(2): 13434–13441.
- [4] JAYARAJAN S, SHARMA R R. Melatonin: a blooming biomolecule for postharvest management of perishable fruits and vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 116: 318–328.
- [5] DOS S COSTA D, ALVIANO MORENO D S, ALVIANO C S, et al. Extension of Solanaceae food crops shelf life by the use of elicitors and sustainable practices during postharvest phase[J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 15(2): 249–274.
- [6] ARNAO M B, HERNÁNDEZ-RUIZ J. Functions of melatonin in plants: a review[J]. Journal of Pineal Research, 2015, 59(2): 133–150.
- [7] LIU S M, HUANG H, HUBER D J, et al. Delay of ripening and softening in ‘Guifei’ mango fruit by postharvest application of melatonin[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 163: 111136.
- [8] KONG X M, GE W Y, WEI B D, et al. Melatonin ameliorates chilling injury in green bell peppers during

- storage by regulating membrane lipid metabolism and antioxidant capacity[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 170: 111315.
- [9] ZHENG H H, LIU W, LIU S, et al. Effects of melatonin treatment on the enzymatic browning and nutritional quality of fresh-cut pear fruit[J]. *Food Chemistry*, 2019, 299: 125116.
- [10] MA Q L, LIN X, WEI Q J, et al. Melatonin treatment delays postharvest senescence and maintains the organoleptic quality of 'Newhall' navel orange(*Citrus sinensis*(L.) Osbeck) by inhibiting respiration and enhancing antioxidant capacity[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 286: 110236.
- [11] 胡燕, 邹建. 不同包装材料对板栗仁的保鲜效果[J]. *贵州农业科学*, 2015, 43(5): 195–198.
- [12] QIAO L P, GAO M, ZHENG J X, et al. Novel browning alleviation technology for fresh-cut products: preservation effect of the combination of *Sonchus oleraceus* L. extract and ultrasound in fresh-cut potatoes[J]. *Food Chemistry*, 2021, 348: 129132.
- [13] LI Z H, ZHANG Y X, GE H B. The membrane may be an important factor in browning of fresh-cut pear[J]. *Food Chemistry*, 2017, 230: 265–270.
- [14] ZHANG Z K, HUBER D J, QU H X, et al. Enzymatic browning and antioxidant activities in harvested litchi fruit as influenced by apple polyphenols[J]. *Food Chemistry*, 2015, 171: 191–199.
- [15] TSAI S Y, HUANG S J, MAU J L. Antioxidant properties of hot water extracts from *Agrocybe cylindracea*[J]. *Food Chemistry*, 2006, 98(4): 670–677.
- [16] SOONG Y Y, BARLOW P J. Antioxidant activity and phenolic content of selected fruit seeds[J]. *Food Chemistry*, 2004, 88(3): 411–417.
- [17] QIAN X C, HOU Q, LIU J N, et al. Inhibition of browning and shelf life extension of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by ergothioneine treatment[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 288: 110385.
- [18] ZHANG S Y, YU Y W, XIAO C L, et al. Effect of carbon monoxide on browning of fresh-cut lotus root slice in relation to phenolic metabolism[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 53(2): 555–559.
- [19] ZHANG Y Y, HUBER D J, HU M J, et al. Delay of postharvest browning in litchi fruit by melatonin via the enhancing of antioxidative processes and oxidation repair [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(28): 7475–7484.
- [20] ZHU D, GUO R, LI W X, et al. Improved postharvest preservation effects of *Pholiota nameko* mushroom by sodium alginate-based edible composite coating[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 12(4): 587–598.
- [21] WANG D, LI D, XU Y Q, et al. Elevated CO₂ alleviates browning development by modulating metabolisms of membrane lipids, proline, and GABA in fresh-cut Asian pear fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 281: 109932.
- [22] ALI S, KHAN A S, MALIK A U. Postharvest L-cysteine application delayed pericarp browning, suppressed lipid peroxidation and maintained antioxidative activities of litchi fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 121: 135–142.
- [23] ZHANG H L, DU W C, PERALTA-VIDEA J R, et al. Metabolomics reveals how cucumber(*Cucumis sativus*) reprograms metabolites to cope with silver ions and silver nanoparticle-induced oxidative stress[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(14): 8016–8026.

责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 柳正