

马超, 王如福, 陈光贤, 等. 外源褪黑素处理对红托竹荪鲜品贮藏品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(16): 363–370. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120009

MA Chao, WANG Rufu, CHEN Guangxian, et al. Effect of Exogenous Melatonin Treatments on the Storage Quality of *Dictyophora rubrovolvata* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(16): 363–370. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120009

· 贮运保鲜 ·

外源褪黑素处理对红托竹荪鲜品 贮藏品质的影响

马 超^{1,2}, 王如福², 陈光贤³, 徐二娟¹, 杨再群¹, 周小青¹, 杨庭梅¹, 王 瑞^{1,*}

(1. 贵阳学院, 贵州贵阳 550003;

2. 山西农业大学园艺学院, 山西晋中 030801;

3. 贵州美味鲜竹荪产业有限公司, 贵州毕节 552102)

摘 要: 本研究采用红托竹荪鲜品作为材料, 旨在探讨不同浓度外源褪黑素处理的红托竹荪鲜品贮藏期间品质变化规律。将红托竹荪鲜品分为 4 个处理 (CK 处理、50 $\mu\text{L/L}$ 褪黑素处理、100 $\mu\text{L/L}$ 褪黑素处理及 150 $\mu\text{L/L}$ 褪黑素处理), 贮藏于 $(1\pm 0.5)^\circ\text{C}$ 环境中。每 3 d 测定不同褪黑素处理对红托竹荪鲜品贮藏期间感官评价、腐烂率、呼吸强度、丙二醛含量、褐变指数、能量水平、超氧阴离子产生速率、 H_2O_2 含量及抗氧化酶的影响。结果表明: 贮藏 12 d 时, CK、Y1、Y2 和 Y3 处理组感官评价综合得分为 2.68、6.48、8.52 及 7.28, 腐烂率分别为 30.48%、19.29%、5.48% 及 6.99%, 此外, 褪黑素处理还能够显著 ($P<0.05$) 抑制呼吸强度、丙二醛含量、褐变指数、超氧阴离子产生速率和 H_2O_2 含量的上升, 维持能量水平及抗氧化酶系统的活性。由此可知, 外源褪黑素处理可减缓贮藏期间红托竹荪鲜品的衰老过程, 更好得维持其商品性, 其中 100 $\mu\text{L/L}$ 褪黑素处理效果最佳。

关键词: 红托竹荪, 褪黑素, 抗氧化酶, 贮藏品质

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)16-0363-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120009

本文网刊:



Effect of Exogenous Melatonin Treatments on the Storage Quality of *Dictyophora rubrovolvata*

MA Chao^{1,2}, WANG Rufu², CHEN Guangxian³, XU Erjuan¹, YANG Zaiqun¹, ZHOU Xiaoqing¹,
YANG Tingmei¹, WANG Rui^{1,*}

(1. Guiyang University, Guiyang 550003, China;

2. College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China;

3. Guizhou Meiweixian Dictyophora Rubrovolvata Development Co., Ltd., Bijie 552102, China)

Abstract: In order to explore effect of exogenous melatonin treatments on storage quality of the fresh *Dictyophora rubrovolvata*, using fresh *Dictyophora rubrovolvata* as test material, samples were divided into four treatments (CK, 50 $\mu\text{L/L}$ melatonin, 100 $\mu\text{L/L}$ melatonin and 150 $\mu\text{L/L}$ melatonin). The storage temperature was $(1\pm 0.5)^\circ\text{C}$. Every 3 d, the sensory quality evaluation, rot ratio, respiration rate, malondialdehyde content (MDA), browning degree index, energy metabolism, O_2^- generation rate, mass H_2O_2 fraction and antioxidant capacity were detected. The results showed that the sensory quality of CK, Y1, Y2 and Y3 at 12 d were 2.68, 6.48, 8.52 and 7.28 while rot ratio were 30.48%, 19.29%, 5.48% and 6.99%. Beside that, all the exogenous melatonin treatments could significantly ($P<0.05$) inhibit the respiration rate, MDA content, browning degree index, O_2^- generation rate and mass H_2O_2 fraction of the fresh *Dictyophora rubrovolvata* increased, and could maintain the energy metabolism and the antioxidant capacity. These results suggested that exogenous

收稿日期: 2021-12-02

基金项目: 贵州省科技支撑计划 (黔科合支撑 [2020]1Y126 号); 贵州省优秀青年科技人才计划 (黔科合平台人才 [2019]5644); 贵阳市科技计划项目 (筑科合同 [2021]43-17 号); 贵阳学院大学生创新创业项目 (0203008002009); 贵阳学院科研资金资助 ([GYU-KY-(2022)])。

作者简介: 马超 (1988-), 男, 博士, 高级实验师, 研究方向: 农产品贮藏与保鲜, E-mail: chaomagu@126.com。

*** 通信作者:** 王瑞 (1979-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品贮藏与保鲜, E-mail: wangrui060729@126.com。

melatonin treatment could inhibit the senescence process and maintain the commodity of the fresh *Dictyophora rubrovolvata*. Among them, exogenous melatonin at 100 $\mu\text{L/L}$ had the best preservation effect on the fresh *Dictyophora rubrovolvata*.

Key words: *Dictyophora rubrovolvata*; melatonin; antioxidant enzyme activities; storage quality

红托竹荪(*Dictyophora rubrovolvata*), 是鬼笔科竹荪属, 属于多孔性食用菌, 其含有丰富多糖和氨基酸, 具有抗氧化、抗癌、降血糖等功效, 深受消费者喜爱^[1-2]。新鲜的蔬菜和水果对人体的健康非常有益^[3]。因此, 随着消费观念的升级以及消费市场红托竹荪鲜品的需要, 红托竹荪鲜品市场销售比例将日益增大。然而, 红托竹荪鲜品表面组织脆嫩、缺乏有效的保护组织、子实体含水量高, 采后失水、自溶、腐烂现象频频发生, 严重影响商品价值^[4]。因此, 开展红托竹荪鲜品贮藏保鲜技术研究具有重要意义。

褪黑素(Melatonin, MT), 又名 N-乙酰基-5-甲氧基色胺, 是一种广泛存在于植物体内的吲哚类植物激素, 在调节植物生长发育、延缓衰老、促进果实成熟等多种生理过程中发挥作用^[5]。此外, 褪黑素还可以作为一种抗氧化剂, 可以直接清除活性氧, 激活抗氧化酶, 提高其它抗氧化剂的效率, 从而提高果蔬对非生物和生物胁迫的耐受性^[6]。因此, 褪黑素作为一种新型、天然、安全的保鲜剂, 在果蔬采后贮藏保鲜方面具有较好的应用前景^[7]。研究表明, 褪黑素主要是通过清除自由基、抑制乙烯合成、诱导蛋白氧化损伤修复酶及调控能量代谢 4 个方面的作用来延缓果蔬衰老^[8]。一分子褪黑素可以清除 10 个以上自由基分子, 减缓植物所受的氧化胁迫程度^[9]。Liu 等^[10]采用 0.1 mmol/L 外源褪黑素处理草莓, 发现褪黑素可以促进 *FaTDC*、*FaT5H*、*FaSNAT*、*FaASMT* 4 个与内源褪黑素合成相关的基因上调, 促进内源褪黑素的合成, 延缓草莓衰老, 此外, Morteza 等^[11]也发现 0.1 mmol/L 处理可以维持草莓较高的二磷酸腺苷、三磷酸腺苷及较高的能荷。Ma 等^[12]研究表明, 褪黑素处理能够提高 CAT、SOD 活性, 减少氧化应激, 延缓木薯生理品质的下降。Zhang 等^[13]报道, 0.4 mol/L 褪黑素处理可以上调荔枝 *LcMsrA1*、*LcMsrA2*、*LcMsrB1* 和 *LcMsrB2* 四个氧化损伤修复酶基因的表达, 延缓荔枝的衰老进程。褪黑素处理还可诱导双孢菇帽酚类物质和抗坏血酸的含量增加, 改善双孢蘑菇帽的营养品质^[14]。除此以外, 褪黑素还在番茄^[15]、黄瓜^[16]、香蕉^[17]、猕猴桃^[18]等果蔬得贮藏中都取得了很好的效果。然而, 目前关于红托竹荪鲜品的保鲜, 尤其是褪黑素应用于红托竹荪鲜品保鲜的文章还未见报道。本研究以“黔优 1 号”红托竹荪鲜品为材料, 通过不同浓度褪黑素处理, 研究红托竹荪鲜品贮藏期间品质及活性氧代谢的变化, 以期褪黑素在红托竹荪鲜品中的应用提供有效支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

红托竹荪(八成熟, 子实体破壳后, 菌裙露出菌盖

后不超过菌柄三分之一) 采摘于贵州省美味鲜竹荪产业有限公司基地, 采摘当天运抵实验室, 挑选大小均一、成熟度基本一致、无机械损伤、无病虫害的红托竹荪鲜品进行处理; 褪黑素 上海源叶生物科技有限公司; PE20 保鲜膜 国家保鲜工程技术研究中心(天津); 其他试剂 均为分析纯。

CR400-色差仪 日本柯尼卡美能达有限公司; Spectra-MAX-M2 多功能酶标仪 美国 Molecular Devices; H2100A 型台式高速冷冻离心机 长沙湘仪离心机有限公司; Check Piont II 便携式残氧仪 丹麦丹圣有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 清除红托竹荪菌托和菌盖后, 随机分成四组, 进行喷施褪黑素处理, 以水珠开始下滴为准, 对照组: 喷施蒸馏水, 记为 CK; 处理组: 喷施褪黑素处理(根据课题组前期预实验结果, 以蒸馏水为溶剂, 配制不同浓度褪黑素溶液, 其中 Y1 为 50 $\mu\text{L/L}$ 褪黑素处理, Y2 为 100 $\mu\text{L/L}$ 褪黑素处理, Y3 为 150 $\mu\text{L/L}$ 褪黑素处理), 自然晾干后, 将红托竹荪鲜品转移至阴凉处通风 30 min, 随后放入 $(3\pm 0.5)^\circ\text{C}$ 预冷 4 h, 最后将样品装入 PE20 保鲜膜内, 扎袋后, 贮藏于 $(1\pm 0.5)^\circ\text{C}$ 环境中。每 3 d 进行指标测定, 结果取平均值。

1.2.2 指标测定方法

1.2.2.1 感官品质评价 参照赵伟璐等^[19]测定方法, 略有改动, 由 6 名食品专业本科生(3 名男生, 3 名女生)组成的评价小组, 对贮藏末期(12 d)时的红托竹荪的品质、外观、气味等感官指标进行评价, 具体评价标准见表 1。

1.2.2.2 腐烂率的测定 以表面流水、长霉或自溶记作腐烂红托竹荪, 采用计数法测定红托竹荪的腐烂率, 计算公式如下:

$$\text{腐烂率}(\%) = (\text{腐烂红托竹荪根数} / \text{红托竹荪总根数}) \times 100$$

1.2.2.3 呼吸强度的测定 参照邓淑芳等^[5]方法略作改进。称取 6 根红托竹荪鲜品, 置于 100 mL 密封罐内, 密闭 4 h 后测定 CO_2 浓度, 记录容器体积 V, 红托竹荪净重 W, 测定温度 T_0 , 顶空分析仪空白对照数据 D_0 , 空分析仪空白实验数据 D_1 , 按照式(1)计算呼吸强度。

$$\text{呼吸强度}(\text{mg/kg} \cdot \text{h}) = \frac{44 \times (D_1 - D_0) \times 0.1 \times 273}{22.4 \times (273 + T_0) \times W \times 4}$$

式(1)

1.2.2.4 丙二醛(MDA)含量的测定 参照 Li 等^[20]的方法略作改进。准确称取 5 g 经液氮冻样的样品

表 1 感官品质评价标准
Table 1 Sensory quality evaluation standard

感官特征	评分标准(分)				
	0~1.9	2~3.9	4~5.9	6~7.9	8~10
外观新鲜度	不新鲜	略新鲜	较新鲜	很新鲜	非常新鲜
色泽	严重褐变	褐变	有一点褐变	稍有褐变	无褐变
水分	一点也不多	有点多	较多	很多	丰富
黏度	非常黏	很黏	较黏	有点黏	一点也不黏
异味	非常浓	很浓	较浓	稍有一点	一点也没有
香味持久性	一点也不好	有点好	较好	很好	非常好
自溶	严重自溶	较多自溶	部分自溶	少许自溶	无自溶
综合评价	品质很差,完全失去商品及食用价值	品质差,已无商品价值	品质中等,有部分缺陷,但仍有商品及食用价值	品质较好,商品价值及食用较好	品质完好,高商品及食用价值

在 10 mL 的 5%(w/v)三氯乙酸(TCA)中匀浆,随后在 9000×g,4 ℃ 的条件下离心 20 min。将上清液(2 mL)与 2 mL 10% TCA 混合,在 95 ℃ 下加热 10 min。立即在冰浴中冷却,随后在 10000×g,4 ℃ 的条件下离心 10 min,取上清液,在 450、535 和 600 nm 测定吸光度值,按照式(2)计算 MDA 含量。

$$MDA = 6.45 \times (OD_{535} - OD_{600}) - 0.56 \times OD_{450}$$
 式 (2)

1.2.2.5 褐变指数的测定 参考贾乐等^[21]方法略作改进,每处理随机取 20 根红托竹荪,在子实体中部进行测定,记录色差仪上 L^* 、 a^* 和 b^* ,结果取平均值,褐变指数 BI 计算公式如下:

$$BI = [100 \times (x - 0.31)] / 0.172$$
 式 (3)

其中:

$$x = \frac{a^* + 1.75 \times L^*}{5.645 \times L^* + a^* - 3.012 \times b^*}$$
 式 (4)

1.2.2.6 三磷酸腺苷(ATP)、二磷酸腺苷(ADP)、一磷酸腺苷(AMP)质量分数及能荷测定 参考 Liu 等^[22]方法测定,准确称取 1 g 经液氮冻样的样品,在 6 mL 0.6 mol/L 的高氯酸能荷进行研磨,随后在 12000×g,4 ℃ 的条件下离心 15 min,取上清液,立即用 1 mol/L 的 KOH 溶液调节 pH 至 6.5~6.8,30 min 后,定容至 3 mL,过滤,在 254 nm 处采用高效液相色谱检测。A 相中为 0.06 mol/L 磷酸氢二钠和 0.04 mol/L 磷酸二氢钾,溶解在去离子氢水中,加入 0.1 mol/L 氢氧化钾,调整至 pH 为 7.0。流动相 B 为纯甲醇。用 85% A 和 15% B 洗脱 15min,流速为 1 mL/min。按照式(5)进行计算:

$$\text{能荷} = [\text{ATP} + 1/2\text{ADP}] / [\text{ATP} + \text{ADP} + \text{AMP}]$$
 式 (5)

1.2.2.7 超氧阴离子($\text{O}_2^{\cdot-}$)产生速率与 H_2O_2 含量测定 参考邓淑芳等^[5]方法进行测定。准确称取 0.1 g 经液氮冻样的样品,加入 1 mL pH7.8 的 50 mmol/L 磷酸提取缓冲液后冰浴匀浆,随后在 10000×g,4 ℃ 的条件下离心 20 min,取上清置于冰上待测。取待测液 0.5 mL 于试管中,加入 0.4 mL 1 mmol/L 盐酸羟胺溶液,混匀后于 37 ℃ 水浴 20 min。加入 17 mmol/L

4-氨基苯磺酸和 7 mmol/L 的 α -萘胺各 0.3 mL,混匀后,37 ℃,20 min。加入氯仿 0.5 mL,混匀,8000×g、25 ℃ 离心 5 min,取上清液 1.0 mL 于 530 nm 测定吸光度值,即为超氧阴离子($\text{O}_2^{\cdot-}$)含量。

准确称取 0.02 g 经液氮冻样的样品,加入 0.2 mL 2 g/L 三氯乙酸匀浆,随后在 12000×g,4 ℃ 的条件下离心 5 min 后取上清液。取 0.1 mL 上清液于 1.5 mL 离心管中,加入 0.2 mL 1 mol/L 碘化钾溶液,轻轻混匀后于室温(25±3)℃ 下放置 30 min,然后测定反应体系在 560 nm 处的吸光度,即为 H_2O_2 含量。

1.2.2.8 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性的测定 均参考田平平等^[23]方法进行测定。

超氧化物歧化酶(SOD)活性:准确称取 2 g 经液氮冻样的样品,加 5 mL 0.1 mol/L,随后在 10000×g,4 ℃ 的条件下离心 15 min,上清液于 4 ℃ 保存。配制反应体系:依次加入 2.4 mL 0.1 mol/L pH8.7 硼酸硼砂缓冲液、0.2 mL 130 mmol/L 甲硫氨酸溶液、0.2 mL 100 $\mu\text{mol/L}$ 乙二胺四乙酸溶液、0.1 mL 酶提取液、0.2 mL 750 $\mu\text{mol/L}$ 氮蓝四唑溶液和 0.1 mL 20 $\mu\text{mol/L}$ 核黄素溶液,用缓冲液代替酶液做空白,充分混匀。取 3 支试管,其中一支置于暗处,其他两支及测定管均在光强为 4000 lx 的日光灯下光照 1 h,然后立即遮光停止反应,以暗处放置的空白管调零,然后测定反应体系在 560 nm 处的吸光度。以不加酶液的试管为最大还原管,以内抑制 NBT 光还原 50% 的酶液量为一个酶活单位(U)。

过氧化物酶(POD)活性:准确称取 2 g 经液氮冻样的样品,加 5 mL 0.1 mol/L 的磷酸缓冲溶液,冰浴研磨,随后在 10000×g,4 ℃ 的条件下离心 20 min,上清液于-20 ℃ 保存。配制反应体系:依次加入 1 mL 粗酶液、1 mL 磷酸缓冲溶液、1 mL 0.25% 愈创木酚、0.5 mL 0.75% H_2O_2 ;以蒸馏水代替酶液为对照。测定 470 nm 处 3 min 内的吸光度变化情况,以每分钟 470 nm 处吸光值上升 0.01 作为一个酶活单位(U)。

过氧化氢酶(CAT)活性:准确称取 5 g 经液氮冻样的样品置于预冷研钵中,加少许石英砂,加入 2.0 mL

预冷的 0.05 mol/L pH5.7 磷酸缓冲液(PBS),冰浴研磨,再用 5.0 mL PBS 分 3 次冲洗研钵及玻璃棒,转移到 10 mL 离心管中,随后在 10000×g, 4 ℃ 的条件下离心 10 min,上清液于 4 ℃ 保存。配制反应体系:依次加入 1.5 mL 0.05 mol/L 的磷酸缓冲液(pH7.8)、1.0 mL 蒸馏水、0.5 mL 0.3% 的 H_2O_2 溶液和 0.01 mL 的粗酶液,测定 240 nm 处 3 min 内的吸光度变化情况,以缓冲液代替粗酶液作为空白对照,以每分钟 240 nm 处吸光值上升 0.01 作为一个酶活单位(U)。

1.3 数据处理

采用 OriginPro 2018 软件对数据进行统计处理,采用 SPSS19.0 软件的 Duncan 氏新复极差法进行数据差异显著性分析及聚类分析法来分析各样品品质的变化($P<0.05$ 为差异显著, $P<0.01$ 为差异极显著, $P>0.05$ 为差异不显著)。

2 结果与分析

2.1 不同褪黑素浓度处理对红托竹荪鲜品感官评价的影响

红托竹荪鲜品的感官评价是消费者选择产品的重要因素之一。由图 1 可知,贮藏 12 d 时,CK、Y1、Y2 和 Y3 处理组感官评价综合得分分别为 2.68、6.48、8.52 及 7.28,说明不同浓度褪黑素处理均能够有效地延缓红托竹荪鲜品的衰老进程。Y2 和 Y3 处理组在外观新鲜度、水分、香味持久性和异味得分方面无显著性差异($P>0.05$),但色泽、自溶、黏度得分方面,Y2 处理组显著($P<0.05$)高于 Y3 处理组,这与贾乐等^[21]在香菇上的研究结果相似。综上所述,褪黑素处理可以延缓红托竹荪鲜品感官评价得分的下降,其中 100 $\mu\text{L/L}$ 褪黑素处理组效果最好。

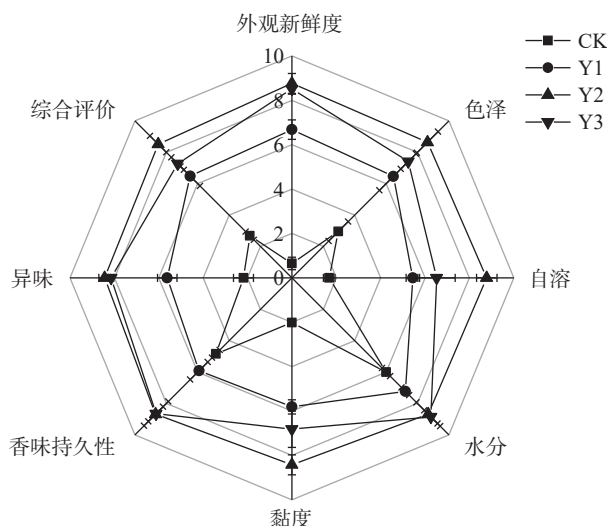


图1 不同褪黑素处理对红托竹荪鲜品感官评价的影响

Fig.1 Effects of different melatonin treatment on sensory properties of fresh *Dictyophora rubrovolvata*

2.2 不同褪黑素浓度处理对红托竹荪鲜品腐烂率的影响

腐烂率是衡量食用菌贮藏效果的最直观标准之一^[24]。图 2 表明,贮藏 3 d 时,各组红托竹荪腐烂率

较低,随后 CK 组腐烂率急剧上升,至第 9 d 时,Y1 处理组腐烂率开始急剧上升。贮藏 12 d 时,CK 处理组腐烂率最高,分别是 Y1、Y2、Y3 处理组的 1.58、5.56 及 4.36 倍,且差异显著($P<0.05$),说明褪黑素处理可以降低贮藏期间红托竹荪鲜品的腐烂率,其中 100 $\mu\text{L/L}$ 褪黑素处理组效果较好。

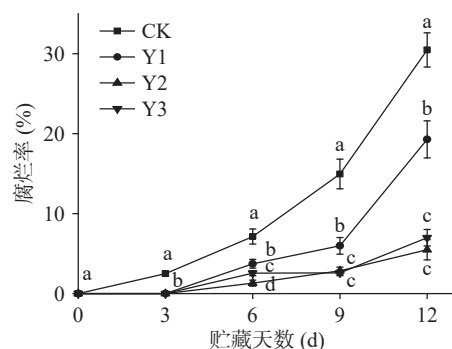


图2 不同褪黑素处理对红托竹荪鲜品腐烂率的影响

Fig.2 Effects of different melatonin treatment on rot ratio of fresh *Dictyophora rubrovolvata*

注:不同小写字母表示同一贮藏时间不同处理间差异显著($P<0.05$);图 3~图 8 同。

2.3 不同褪黑素浓度处理对红托竹荪鲜品呼吸强度的影响

食用菌的呼吸作用一方面会消耗其营养物质,另一方面呼吸作用产生的热量又会加速食用菌的衰老进程^[24]。由图 3 可见,贮藏期间各处理呼吸强度均呈现先下降后上升的趋势,前期的下降可能与温度变化有关^[13],后期的上升则是因为红托竹荪衰老导致。图 3 还可知,CK 处理组的呼吸高峰出现在 9 d,而其余各组呼吸高峰均出现在 12 d 以后,且各处理组峰值均显著($P<0.05$)低于 CK 组。除此之外,Y2 和 Y3 处理组呼吸强度在整个贮藏期间均无显著性($P>0.05$)差异。综上所述,褪黑素处理可以降低贮藏期间红托竹荪鲜品的呼吸高峰峰值,推迟呼吸高峰的到来,其中 100、150 $\mu\text{L/L}$ 褪黑素处理组效果较好。

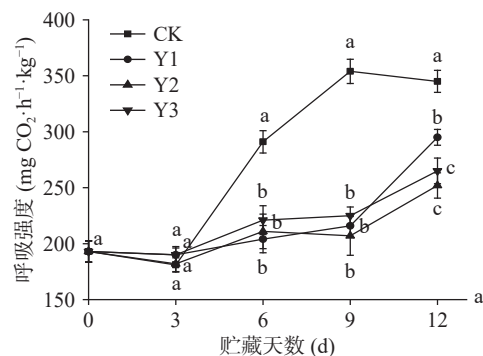


图3 不同褪黑素处理对红托竹荪鲜品呼吸强度的影响

Fig.3 Effects of different melatonin treatment on respiration rate of fresh *Dictyophora rubrovolvata*

2.4 不同褪黑素浓度处理对红托竹荪鲜品丙二醛含量的影响

丙二醛作为脂质过氧化作用的次要终产物,常

被用作膜完整性丧失的代谢指标,反映膜受损的情况^[25]。图 4 可见,贮藏期间各处理组丙二醛含量均呈现上升趋势,贮藏 12 d 时,CK、Y1、Y2 及 Y3 处理组丙二醛含量分别为 8.71、6.67、4.74 及 5.36 mmol·g⁻¹,说明褪黑素处理能够有效抑制丙二醛含量的上升。

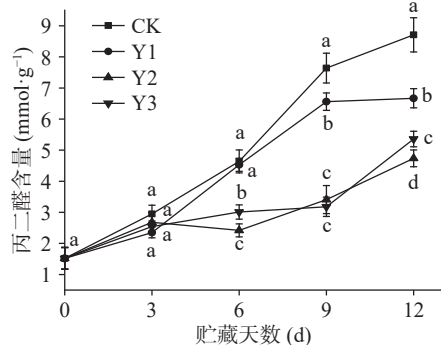


图 4 不同处理对红托竹荪鲜品丙二醛含量的影响

Fig.4 Effects of different treatment on MDA content of fresh *Dictyophora rubrovolvata*

2.5 不同褪黑素浓度处理对红托竹荪鲜品褐变指数的影响

贮藏期间多酚氧化酶可以催化酚类氧化生成醌类,使红托竹荪发生褐变,从而红托竹荪的颜色由白色逐渐转变为褐色,褐变是影响红托竹荪商品价值主要因素之一^[7]。如图 5 所示,在贮藏 3 d 时,各处理组间褐变指数无显著性差异($P<0.05$),随后 CK 组开始加速上升。贮藏 12 d 时,CK、Y1、Y2、Y3 处理组褐变指数分别为 0 d 的 10.90、5.12、1.39、3.51 倍,且各组之间差异显著($P<0.05$)。结果表明,贮藏末期对照组褐变现象严重,而褪黑素处理能够有效的延缓褐变现象的发生,其中 100 μ L/L 褪黑素处理效果最好。

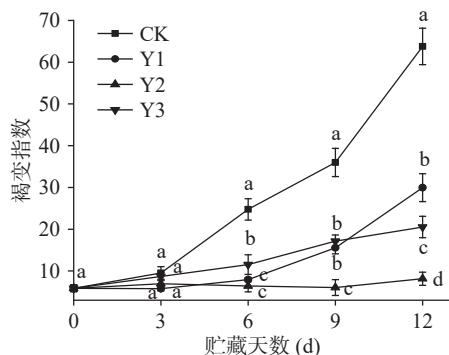


图 5 不同褪黑素处理对红托竹荪鲜品褐变指数的影响

Fig.5 Effects of different melatonin treatment on browning degree index of fresh *Dictyophora rubrovolvata*

2.6 不同褪黑素浓度处理对红托竹荪鲜品能量代谢的影响

细胞中的能量供应是影响果蔬贮藏寿命的关键因素,较低的能量水平会加速果蔬的衰老,影响贮藏品质^[8]。图 6(A)表明,贮藏期间各处理 ATP 质量分数均呈现先上升后下降趋势,CK 组峰值出现在第

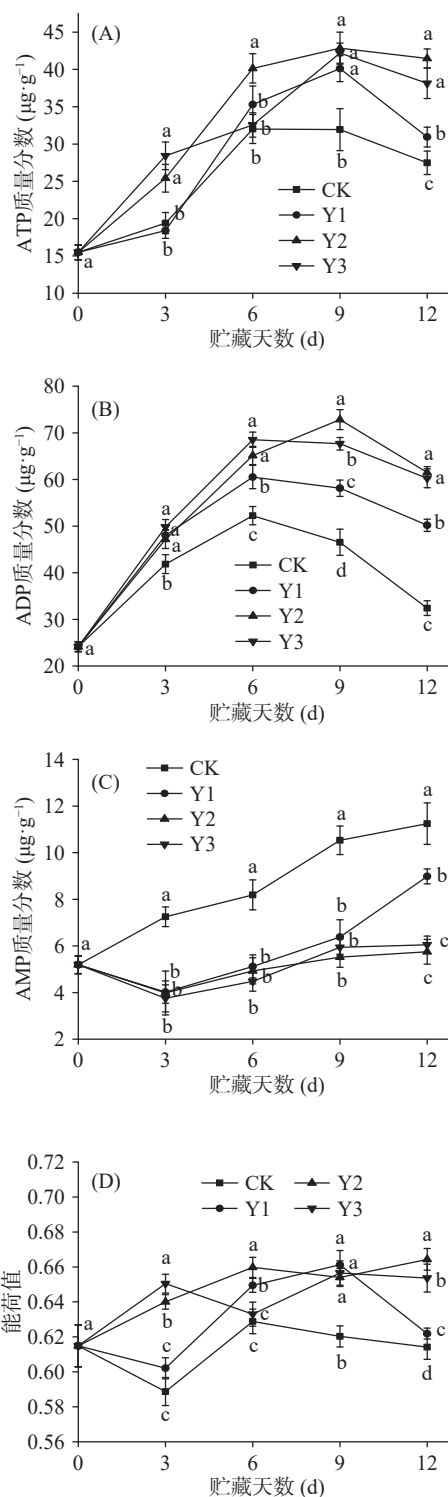


图 6 不同褪黑素处理对红托竹荪鲜品能量代谢的影响

Fig.6 Effects of different melatonin treatment on energy metabolism of fresh *Dictyophora rubrovolvata*

6 d, 而其余各处峰值出现在第 9 d。贮藏 12 d 时, CK、Y1、Y2 和 Y3 处理组 ATP 质量分数分别为 27.48、30.94、41.48 和 38.14 μ g/g。由图 6(B)可知, ADP 质量分数的变化与 ATP 相似,均为先上升后下降,除 Y2 峰值在第 9 d 外,其余各处理峰值均出现在第 6 d。贮藏末期时,CK 组 ADP 质量分数分别为 Y1、Y2、Y3 处理组的 1.25、1.95、1.86 倍。图 6(C)显示,贮藏期间,CK 组 AMP 质量分数呈现上升趋势

势,而其余各组呈现先下降后上升趋势,且整个贮藏期间 CK 组 AMP 质量分数均显著($P<0.05$)高于其余各组。由此可知,褪黑素处理能够更好的延缓贮藏期间红托竹荪细胞中 ATP 向 ADP 和 AMP 的转化,维持较高的细胞能量水平,延缓红托竹荪的衰老。

能荷值能够反映细胞中腺苷酸系统的能量状态,是衡量细胞中能量可利用率的重要指标^[26]。图 6(D)可见,贮藏期间 CK 和 Y1 处理组能荷值呈现先下降后上升再下降趋势, Y2 处理组能荷值呈现上升趋势, Y3 处理组能荷值呈现先上升后下降趋势,贮藏 12 d 时,CK、Y1、Y2 和 Y3 处理组能荷值分别为 0.6142、0.6219、0.6643 及 0.6536,说明褪黑素处理能够更好的维持贮藏期间红托竹荪能量水平,延缓衰老进程。

2.7 不同褪黑素浓度处理对红托竹荪鲜品超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)产生速率与 H_2O_2 含量的影响

果蔬贮藏过程中活性氧的大量积累及自身抗氧化系统清除活性氧能力的下降是果蔬衰老的主要机制之一^[21]。图 7(A)表明,贮藏 6 d 时,各处理组 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率均呈现上升趋势,且各组之间差异不显著($P>0.05$)。贮藏 12 d 时,CK 处理组 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率为 $2.95 \mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$,是 Y1、Y2、Y3 处理组的 1.52、2.24、1.76 倍。图 7(B)可知, H_2O_2 含量总体呈现上升趋势,与 0 d 相比,贮藏结束时,各处理组 H_2O_2 含量分别上升了 241.91%、195.45%、118.18% 及 159.09%。综上所述,贮藏期间 CK 组活性氧大量积累,而褪黑素处理能够减缓红托竹荪鲜品贮藏期间 H_2O_2 的积

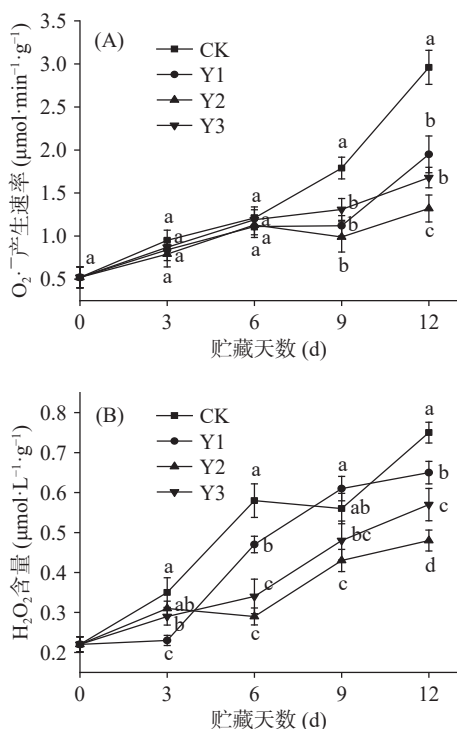


图7 不同褪黑素处理对红托竹荪鲜品 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率(A)与 H_2O_2 (B)含量的影响

Fig.7 Effects of different melatonin treatment on $O_2^{\cdot-}$ generation rate and mass H_2O_2 fraction of fresh *Dictyophora rubrovolvata*

累,抑制的 $O_2^{\cdot-}$ 产生,减少氧化应激,延长红托竹荪贮藏期。

2.8 不同褪黑素浓度处理对红托竹荪鲜品 SOD、POD 和 CAT 活性的影响

在果蔬贮藏的过程中,自由基不断积累造成氧化胁迫不断加剧,一方面加剧了膜脂过氧化等果蔬衰老进程,另一方面也会激活果蔬抗氧化系统以抵御氧化胁迫对果蔬造成伤害,抗氧化系统由抗氧化物质和抗氧化酶构成,其中超氧化物歧化酶(SOD)能够直接将超氧阴离子歧化为 O_2 和 H_2O_2 ,而过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)则将 H_2O_2 氧化为 H_2O 和 O_2 ,这类酶的激活使得果蔬在一定程度上对氧自由基的破坏形成自我保护,但是随着贮藏时间的延长,该类酶系统活性逐渐下降,并伴随着果蔬衰老进程的到来^[24]。如图 8(A)表明,各处理 SOD 活性先上升后下降,前期的上升主要是环境胁迫导致,其中 CK 和 Y1 处理组峰值出现在 6 d,其余各组出现在 9 d,且

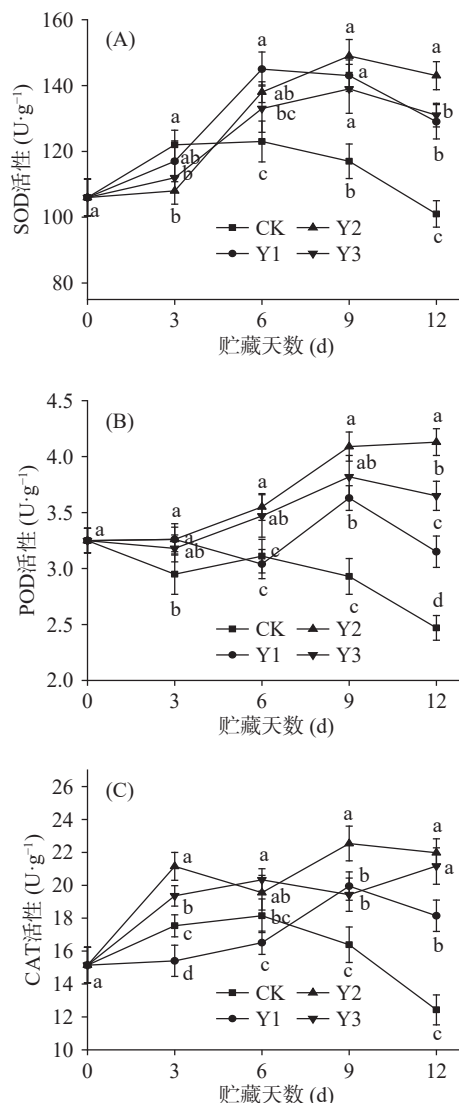


图8 不同褪黑素处理对红托竹荪鲜品 SOD、POD、CAT 活性的影响

Fig.8 Effects of different melatonin treatment on activity of SOD, POD and CAT of fresh *Dictyophora rubrovolvata*

峰值大小顺序为 $Y2 > Y1 > Y3 > CK$ 。由图 8(B)可知,贮藏期间,除 $Y2$ 处理组 POD 活性先下降后上升外,其余各组均呈现先下降后上升再下降趋势,此外,贮藏 9 d 开始, $Y1$ 、 $Y2$ 、 $Y3$ 处理组 POD 活性均显著 ($P > 0.05$) 高于 CK 组。图 8(C)显示,贮藏期间,除 CK 组先上升后下降,其余各组均呈波动上升趋势,贮藏 12 d 时,CK、 $Y1$ 、 $Y2$ 和 $Y3$ 处理组活性分别为: 12.32、18.15、21.98 及 21.17 $U \cdot g^{-1}$, 这可能是因为外源褪黑素作为信号分子,直接清除自由基,激活其他抗氧化系统的能力^[7],也可能是促进了内源褪黑素的生成,增强红托竹荪抗氧化能力导致的^[5]。可见,褪黑素处理能够更好地延缓红托竹荪鲜品贮藏期间抗氧化酶系统酶活性的下降,其中 100 $\mu L/L$ 褪黑素处理组效果较好。

3 结论

本研究发现 100 $\mu L/L$ 褪黑素处理可以有效抑制采后红托竹荪鲜品呼吸强度的上升,延缓其衰老。细胞中的能量供应是影响果蔬贮藏寿命的关键因素,较低的能量水平会加速果蔬的衰老,影响贮藏品质^[8]。除此之外,ATP 的缺乏会阻碍脂肪酰链的去饱和作用,影响脂质的合成,最终影响生物膜的完整性^[8]。本研究结果显示,贮藏期间 100 $\mu L/L$ 褪黑素处理组能荷值始终高于 CK 组,从而延缓维持红托竹荪细胞内的能量供给,延缓因能量亏损造成的衰老进程。果蔬贮藏期间,活性氧的不断积累以及抗氧化系统能力的下降会加速膜脂过氧化进程及蛋白质氧化程度,从而加速果蔬的衰老^[21]。本研究显示,100 $\mu L/L$ 褪黑素处理能够更好的维持贮藏期间红托竹荪鲜品 SOD、POD 和 CAT 的活性,从而减少 H_2O_2 和 MDA 含量的积累,抑制的 $O_2^{\cdot -}$ 产生,维持红托竹荪细胞膜的稳定性,从而保持红托竹荪鲜品的采后品质。贾乐等也发现褪黑素处理能够有效维持香菇采后品质,降低活性氧代谢产物生成速率,提高机体的抗氧化能力^[21]。除此之外,褪黑素处理还可以有效延缓红托竹荪褐变现象的发生,这与代惠芹等^[7] 在双孢蘑菇上的结论相一致。

综上所述,本研究结果表明,外援褪黑素处理有助于保持红托竹荪品质,但其具体作用机制还有待于进一步研究。

参考文献

[1] 龚光禄,杨通静,桂阳,等. 红托竹荪资源收集与生态分布特征[J]. 中国食用菌, 2020, 238(11): 14-17, 21. [GONG G L, YANG T J, GUI Y, et al. *Dictyophora rubrovolvata* resources collection and ecological distribution characteristics[J]. Edible Fungi of China, 2020, 238(11): 14-17, 21.]

[2] 梁亚丽. 红托竹荪各部位营养与风味成分及鲜浆复合面条品质研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2020. [LIANG Y L. A study on the nutritional and flavor components of fresh *Dictyophora rubrovolvata* and the quality of fresh slurry compound noodles[D]. Guizhou: Guizhou University, 2020.]

[3] GROM L C, ROCHA R S, BALTHAZAR C F, et al. Postprandial glycemia in healthy subjects: Which probiotic dairy food is more adequate?[J]. Journal of Dairy Science, 2019, 103(2): 1110-1119.

[4] 魏岸. 竹荪蛋鲜品贮藏保鲜技术研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2020. [WEI A. Study on storage and fresh-keeping technology of fresh products of embryo of *Dictyophora indusiata*[D]. Guizhou: Guizhou University, 2020.]

[5] 邓淑芳,王鹏,张怀予,等. 褪黑素处理对枸杞果实采后生理及贮藏品质的影响[J/OL]. 食品与发酵工业: <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.027111>. [DENG S F, WANG P, ZHANG H Y, et al. Effects of melatonin treatment on postharvest physiology and storage quality of goji berry[J/OL]. Food and Fermentation Industries: <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.027111>]

[6] 王纪忠,童瑶,史云勇,等. 外源褪黑素处理对常温货架期梨果实贮藏品质的影响[J]. 果树学报, 2021, 38(4): 569-579. [WANG J Z, TONG Y, SHI Y Y, et al. Effects of exogenous melatonin treatment on storage quality of pear fruits during shelf life at room temperature[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(4): 569-579.]

[7] 代惠芹,董桂君,刘树泽,等. 褪黑素处理对双孢蘑菇采后贮藏品质的影响[J]. 食用菌学报, 2021, 28(6): 143-149. [DAI H Q, DONG G J, LIU S Z, et al. Effect of melatonin on postharvest storage quality of *Agaricus bisporus*[J]. Acta Edulis Fung, 2021, 28(6): 143-149.]

[8] 赵雨晴,陈涛,袁明. 褪黑素在果实发育和采后保鲜中的作用综述[J]. 园艺学报, 2021, 48(6): 1233-1249. [ZHAO Y Q, CHEN T, YUAN M. Review of the role of melatonin in fruit development and postharvest preservation[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2021, 48(6): 1233-1249.]

[9] RESSMEYER A R, MAYO J C, ZELOSKO V, et al. Antioxidant properties of the melatonin metabolite N1-acetyl-5-methoxykynuramine (AMK): Scavenging of free radicals and prevention of protein destruction[J]. Redox Report: Communications in Free Radical Research, 2003, 8(4): 205-213.

[10] LIU C, ZHENG H, SHENG K, et al. Effects of melatonin treatment on the postharvest quality of strawberry fruit[J]. Postharvest Biology & Technology, 2018, 139: 47-55.

[11] MORTEZE S A, JAVAD R F. Melatonin treatment attenuates postharvest decay and maintains nutritional quality of strawberry fruits (*Fragaria × ananassa* cv. Selva) by enhancing GABA shunt activity[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1650-1657.

[12] MA Q, ZHANG T, ZHANG P, et al. Melatonin attenuates postharvest physiological deterioration of cassava storage roots[J]. Journal of Pineal Research, 2016, 60(4): 424-434.

[13] 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 & Food Chemistry, 2018, 66(28): 7475-7484.

[14] SHEKARI A, HASSANI R N, AGHDAM M S, et al. The effects of melatonin treatment on cap browning and biochemical attributes of *Agaricus bisporus* during low temperature storage[J]. Food Chemistry, 2021, 348: 2-8.

- [15] SUN Q Q, ZHANG N, WANG J F, et al. A label-free differential proteomics analysis reveals the effect of melatonin on promoting fruit ripening and anthocyanin accumulation upon postharvest in tomato[J]. *Journal of Pineal Research*, 2016, 61(2): 8–21.
- [16] 辛丹丹, 司金金, 寇莉萍. 黄瓜采后外源褪黑素处理提高品质和延缓衰老的研究[J]. *园艺学报*, 2017, 44(5): 891–901.
- [XIN D D, SI J J, KOU L P. Study on improving quality and delaying senescence of cucumber by exogenous melatonin treatment after harvest[J]. *Journal of Horticulture*, 2017, 44(5): 891–901.]
- [17] WANG Z Q, PU H L, SHAN S S, et al. Melatonin enhanced chilling tolerance and alleviated peel browning of banana fruit under low temperature storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 179: 1–9.
- [18] 胡苗. 采后褪黑素处理对‘华优’猕猴桃果实冷害和成熟衰老的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2018: 18–34. [HU M. Effects of postharvest melatonin treatment on chilling injury, ripening and senescence of ‘Huayou’ Kiwifruit[D]. Xianyang: North West Agriculture and Forestry University, 2018: 18–34.]
- [19] 赵伟璐, 李家政, 冯叙桥. 不同 PE 和 PA 保鲜膜对白灵菇冷藏效果的影响[J]. *食品科学*, 2012, 33(20): 4. [ZHAO W L, LI J Z, FENG X Q. Effect of PE and PA food wrapping films on the quality of mushroom during refrigerated storage[J]. *Food Science*, 2012, 33(20): 4.]
- [20] LI P, ZHANG X, HU H, et al. High carbon dioxide and low oxygen storage effects on reactive oxygen species metabolism in *Pleurotus eryngii*[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2013, 85: 141–146.
- [21] 贾乐, 韩延超, 房祥军, 等. 褪黑素处理对香菇采后品质及活性氧代谢的影响[J]. *食品科学*, 2021, 660(23): 229–236. [JIA L, HAN Y C, FANG X J, et al. Effect of melatonin treatment on postharvest quality and reactive oxygen species metabolism of *Lentinus edodes*[J]. *Food Science*, 2021, 660(23): 229–236.]
- [22] LIU D, XU S, HU H, et al. Endogenous hydrogen sulfide homeostasis is responsible for the alleviation of senescence of postharvest daylily flower via increasing antioxidant capacity and maintained energy status.[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(4): 718–726.
- [23] 田平平, 王杰, 秦晓艺, 等. 采后处理对杏鲍菇贮藏品质及抗氧化酶系统的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(5): 941–951.
- [TIAN P P, WANG J, QIN X Y, et al. Effect of postharvest treatment on the storage quality and antioxidant enzyme system of *Pleurotus eryngii*[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(5): 941–951.]
- [24] 马超, 王如福, 徐帆, 等. 不同处理对花菇贮藏品质及抗氧化酶活性的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(10): 6. [MA C, WANG R F, XU F, et al. Effect of different treatments on the quality and antioxidant enzyme activities of *Lentinus edodes* during storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(10): 6.]
- [25] MIRANDA S, VILCHES P, SUAZO M, et al. Melatonin triggers metabolic and gene expression changes leading to improved quality traits of two sweet cherry cultivars during cold storage[J]. *Food Chemistry*, 2020, 319: 126360.
- [26] DEBNATH B, ISLAM W, LI M, et al. Melatonin mediates enhancement of stress tolerance in plants[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(5): 1040–1043.