

5 种不同处理对鲜红托竹荪贮藏保鲜品质的影响

黄成运^{1,2,3,4,5}, 刘宏宇^{2,3,4}, 桂阳^{2,3,4}, 卢颖颖^{2,3,4}, 李岩^{1,5}, 朱国胜^{2,3,4*}, 石汉英^{3,6}

1. 贵州大学生命科学学院, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州省农业科学院贵州省农作物品种资源研究所, 贵州贵阳 550006; 3. 贵州省食用菌育种重点实验室, 贵州贵阳 550006; 4. 贵州省食用菌现代农业产业技术体系资源育种功能实验室, 贵州贵阳 550006; 5. 贵州大学农业生物工程研究院/山地植物资源保护与种质创新省部共建教育部重点实验室, 贵州贵阳 550025; 6. 贵阳护理职业学院, 贵州贵阳 550081

摘要: 鲜红托竹荪现采用的贮藏保鲜方法保鲜期短, 品质劣变快, 大大限制了鲜红托竹荪的市场销售, 探讨揭示鲜红托竹荪贮藏保鲜过程中品质劣变特征, 找到关键控制点并进行控制是减缓劣变和延长保鲜期的关键。采用 5 种保鲜处理方式: (1) 无处理 (CK); (2) 干燥剂处理; (3) 臭氧干燥剂处理; (4) 干燥剂保鲜纸处理; (5) 干燥剂吸湿纸保鲜纸处理对样品进行处理后, 将其置于低温 4 °C 和常温 25 °C 贮藏保鲜, 定时取样进行感官评价、酶活和质构测定, 通过腐烂率、失重率、颜色、气味等感观指标变化, 苯丙氨酸解氨酶、多酚氧化酶和几丁质酶等酶活指标变化, 硬度、弹性和咀嚼性等质构指标变化等 3 个层面揭示鲜红托竹荪贮藏保鲜过程中品质劣变特征和关键控制点。结果表明: 保鲜处理中的常温干燥剂处理和低温臭氧干燥剂处理对保持红托竹荪的重量有显著效果, 失重率最低, 分别为 4.82% 和 7.36%, 其次是常温臭氧干燥剂处理和低温干燥剂处理, 分别为 7.66% 和 7.42%; 常温 2 d 时臭氧干燥剂处理的腐烂率为 13%, 低温 22 d 时为 0%; 臭氧干燥剂处理的感官评价变黄程度最小, 气味恶变分数最低, 且变黄程度及气味强度变化慢; 而质构各项测试中, 臭氧干燥剂处理的综合评价最高, 同时该处理对与劣变相关酶系的抑制作用最佳, 有效地将红托竹荪的保鲜期从常用保鲜方法的 5 d 延长至 20 d。通过结果可知, 臭氧在初期可有效降低红托竹荪子实体表面杂菌的种类和数量, 在后续的保鲜过程中减缓杂菌的增殖速度, 抑制了红托竹荪子实体的腐坏变黄; 而干燥剂能够降低表面湿度, 减缓了几丁质酶对细胞壁的破坏, 也抑制了表面杂菌的繁殖, 起到了延缓红托竹荪软塌变黄的作用。低温臭氧干燥剂处理为红托竹荪保鲜最佳处理。

关键词: 红托竹荪; 复合保鲜; 臭氧; 干燥剂; 质构; 酶活

中图分类号: S646.8 文献标识码: A

Effects of Different Treatments on Quality Deterioration of *Phallus rubrovolvatus* During Storage

HUANG Chengyun^{1,2,3,4,5}, LIU Hongyu^{2,3,4}, GUI Yang^{2,3,4}, LU Yingying^{2,3,4}, LI Yan^{1,5}, ZHU Guosheng^{2,3,4*}, SHI Hanying^{3,6}

1. College of Life Science, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. Institute of Crop Germplasm Resources, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang, Guizhou 550006, China; 3. Guizhou Key Laboratory of Edible Fungi Breeding, Guiyang, Guizhou 550006, China; 4. Resource Breeding Function Laboratory of Guizhou Modern Agricultural Industry Technology System of Edible Fungi, Guiyang, Guizhou 550006, China; 5. Institute of Agro-Bioengineering, Guizhou University / Key Laboratory of Plant Resources Conservation and Germplasm Innovation in Mountainous Region (Ministry of Education), Guiyang, Guizhou 550025, China; 6. Guiyang Nursing Vocational College, Guiyang, Guizhou 550081, China

收稿日期 2022-04-24; 修回日期 2022-09-22

基金项目 贵州省高层次创新型人才培养项目 (黔科合平台人才[2016]4013 号); 贵州省食用菌育种重点实验室项目 (黔科合平台人才[2019]5105 号); 贵州省科技计划项目 (黔科合服企[2018]4006 号)。

作者简介 黄成运 (1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 红托竹荪保鲜。*通信作者 (Corresponding author): 朱国胜 (ZHU Guosheng), E-mail: zgsah@163.com。

Abstract: The current preservation methods of *Phallus rubrovolvatus* not only result in short shelf life and rapid quality deterioration but also greatly limit its market sales. Consequently, exploring the characteristics of quality deterioration during the preservation of *P. rubrovolvatus* and corresponding key control points is essential to slow down the deterioration and prolong the shelf life. In this study, the samples were processed with no treatment (control), silica gel desiccant treatment, ozone and silica gel desiccant treatment, silica gel desiccant and preservative paper treatment, and silica gel desiccant, active paper, and preservative paper treatment, respectively. After treatment, the samples were preserved at low temperature (4 °C) and normal temperature (25 °C), respectively, and were collected regularly for sensory evaluation, enzyme activity determination, and texture determination. The quality deterioration characteristics and key control points of *P. rubrovolvatus* during preservation were revealed based on the changes in sensory indexes decay rate, weight loss ratio, color and odor, the changes in enzyme activity of phenylalanine ammonia-lyase (PAL), polyphenol oxidase (PPO) and chitinase, etc., and the changes in texture indexes such as hardness, elasticity, and chewability. The results showed that silica gel desiccant treatment at normal temperature, ozone and silica gel desiccant treatment at low temperature had a significant effect on maintaining the weight of *P. rubrovolvatus*, with the 4.82% and 7.36% at low temperature, respectively, followed by ozone and silica gel desiccant treatment at normal temperature, silica gel desiccant treatment at low temperature with a weight loss ratio of 7.66% and 7.42%, respectively. With ozone and silica gel desiccant treatment, the decay rate was 13% at normal temperature at 2 d and 0% at low temperature at 22 d. The sensory evaluation under ozone and silica gel desiccant treatment demonstrated that the yellowing degree and odor deterioration score were the lowest, and the changes in yellowing degree and odor intensity were slow. According to the texture determination, ozone and silica gel desiccant treatment presented the highest comprehensive score and had the best inhibitory effect on deterioration-related enzymes, which effectively prolonged the shelf life of *P. rubrovolvatus* from 5 d to 20 d. Based on the results, ozone treatment at the initial stage can effectively reduce the species and quantity of miscellaneous bacteria on the surface of fruiting bodies of *P. rubrovolvatus*, and slow down the proliferation rate of miscellaneous bacteria during subsequent preservation, thus inhibiting the decay and yellowing of the fruiting bodies of *P. rubrovolvatus*. In addition, silica gel desiccant treatment can decrease the surface humidity, slow down the damage of chitinase to the cell wall, and inhibit the reproduction of miscellaneous bacteria on the surface, thereby delaying the softening, collapse, and yellowing of *P. rubrovolvatus*. The best treatment for the preservation of *P. rubrovolvatus* is ozone and silica gel desiccant treatment at low temperature.

Keywords: *Phallus rubrovolvatus*; composite preservation; ozone; silica gel desiccant; texture; enzyme activity

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.08.022

红托竹荪 (*Phallus rubrovolvatus*)^[1]为鬼笔属真菌,素有“真菌皇后”的美称,为贵州特色珍稀主栽食用菌品种^[2],国宴佳品^[3],是目前唯一可鲜品规模化销售的竹荪。红托竹荪在采后呼吸作用不停止^[4-5],菌裙菌柄易变黄、软塌,受外界微生物感染和机械损伤后易腐烂变质^[6]。

目前还没有专门针对鲜红托竹荪的贮藏保鲜研究。现主要采用泡沫盒内加冰袋及吸水纸的贮藏保鲜,是借用其他食用菌贮藏保鲜方法,该方法 2~6 d 品质即出现急剧劣变,即便采用冷链甚至航空运输,货架期仅剩 1~3 d,鲜红托竹荪的规模化销售仅限贵州省及周边省份,直接制约了产业的发展。减缓劣变和延长保鲜期是解决这一问题的关键。

食用菌领域的保鲜研究中,张沙沙等^[7]采用形态、气味、色泽等感官评价标准研究不同预处理对羊肚菌保鲜品质的影响。白晋豪^[8]使用质构特性评价不同温度和时间对海鲜菇品质特性的影响。李瑶^[9]采用酶活评价复合保鲜方法对金针菇

的保鲜效果,陈凤美^[10]采用酶活评价异抗坏血酸处理对灰树花子实体的保鲜效果。纵观不同食用菌的不同保鲜方法,首先感官品质可以从颜色变化、外观形态、气味等方面直观地判断其新鲜度,其次结合物性学分析,使用仪器设备对食用菌的质构做量化分析,侧面印证感官评价的准确度,最后通过变色诱导和细胞形态维持相关酶的活性变化,综合分析不同保鲜方法对食用菌胞内代谢的影响。如此,本研究采用感官、质构和酶活 3 个方面对不同贮藏保鲜方法处理的鲜红托竹荪进行评价,揭示鲜红托竹荪子实体贮藏保鲜过程中品质劣变特征和关键控制点,提出最佳控制方法,减缓劣变和延长保鲜期。

1 材料与方法

1.1 材料

新鲜无腐烂的红托竹荪鲜品,材料购自贵州省织金县;保鲜盒:PE 材质,规格为 19.5 cm×

14.0 cm×9.0 cm, 温州益腾智能设备有限公司; 保鲜膜: 锁鲜覆盒膜材质, 上海复命新材料科技有限公司; 保鲜纸: α -环糊精包结 1-MCP (1-methylcyclopropene) 功能纸, 规格为 20 cm×30 cm, 咸阳西秦生物科技有限公司; 吸湿纸: 规格为 25 cm×75 cm, 成都诚志纸制品实业有限公司; 干燥剂: 变色硅胶, 每袋约 5 g, 东莞市欣荣天丽科技实业有限公司; 苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 试剂盒 (PAL-1-Y)、多酚氧化酶 (PPO) 试剂盒 (PPO-1-Y)、几丁质酶 (chitinase) 试剂盒 (JDZM-1-G), 苏州科铭生物技术有限公司。

DF250T 台式保鲜盒封口机, 温州达胜智能设备有限公司; TMS-PRO 质构仪, Food Technology Corporation; FL-810Y 臭氧消毒机, 深圳市飞立电器; Multiskan SkyHigh 微孔板分光光度计, 赛默飞世尔科技 (中国) 有限公司。

1.2 方法

1.2.1 红托竹荪预处理及保鲜试验 去掉新鲜红托竹荪子实体菌盖, 4 °C 预冷 4 h 后, 挑选外观大小接近, 菌柄无折断, 菌裙无破损, 各部位无霉变、变色、染色、异味、生虫和软化的红托竹荪, 避免相互挤压, 分装至保鲜盒内, 每盒(100±10) g。

分装完成后, 依照下述要求按表 1 进行各保鲜处理: (1) 每包干燥剂 5 g, 每处理 1 包^[11], 竖直贴盒壁放置; (2) 吸湿纸每处理 1 张, 一半铺底并将另一半包覆在竹荪上方; (3) 保鲜纸每处理 1 张^[12], 置于竹荪与保鲜纸之间; (4) 将需进行臭氧处理的包装盒及样品置于臭氧浓度已经达到 17.14 mg/m³ 的 4 °C 冰箱内^[13]30 min, 取出后再

加入对应的保鲜物料; (5) 将所有完成对应处理的红托竹荪样品盒采用锁鲜膜热压封口。

常温组 2 d 进行一次取样观测, 低温组每 4 d 进行一次取样观测, 至样品全部腐烂或在感官评价中已不宜食用时停止观测。如图 1, 0、2、4、8、12、16、20 d 分别为第 0、2、4、8、12、16、20 天, A~E 为常温处理, F~J 为低温处理。每个处理中有 8 盒用于记录和统计感官变化; 3 盒用于常温组酶活的取样, 6 盒用于质构和低温组酶活的取样。

1.2.2 菌裙变黄率评价 统计 5 盒样品中菌裙变黄的个数占总个数的比率: $Y_R = \frac{Y_n}{Y_s} \times 100\%$ 。式中,

Y_R 为变黄率; Y_n 为变黄个数; Y_s 为总个数。

1.2.3 菌裙变黄程度评价 菌裙变黄程度由菌裙变黄面积大小和颜色深浅决定, 以 1~5 分为分值范围, 变黄面积越大, 颜色越深, 分值越高 (表 1)。

1.2.4 菌柄变软率评价方法 统计 5 盒样品中菌柄变软的个数占总个数的比率: $S_R = \frac{S_n}{S_s} \times 100\%$ 。

式中, S_R 为变软率; S_n 为变软个数; S_s 为总个数。

1.2.5 菌柄变软程度评价方法 菌柄变软程度由菌柄软硬度决定, 分值范围 1~5 分, 菌柄越软分值越高 (表 1)。

1.2.6 气味评价方法 气味由霉味、酒味、酸味组成, 分值均为 1~5 分, 气味越浓分值越高 (表 1), 统计 5 盒样品中的气味分值计算平均数。

1.2.7 失重率评价方法 测量 3 盒样品的重量, 计算平均值, 测量重量时, 将盒内红托竹荪以及

表 1 红托竹荪保鲜试验感官评价指标

Tab. 1 Experimental fresh-keeping treatments of *P. rubrovolvatus*

| 处理 Treatment | 常温组编号 No. of normal temperature group | 低温组编号 No. of low temperature group | 分数 Score | 变黄程度 Yellowing degree | 变软程度 Softening degree | 气味感知 (基于除红托竹 荪本身味道外) Odor perception (other than the taste of <i>P. rubro- volvatus</i>) |
|-----------------|---|---|-------------|--------------------------|--------------------------|--|
| 无处理 (CK) | A | F | 0 | 无明显变黄区域 | 轻按有弹性, 能复原 | 没有可察觉的气味 |
| 干燥剂 | B | G | 1 | <1/2 区域变浅黄色 | 轻按有弹性, 有轻微凹陷, 能复原 | 有可察觉的气味 |
| 臭氧干燥剂 | C | H | 2 | >1/2 区域变浅黄色 | 轻按有弹性, 有较大凹陷, 能复原 | 有可察觉可辨别的气味 |
| 干燥剂保鲜纸 | D | I | 3 | <1/2 区域变深黄色 | 轻按有弹性, 有凹陷, 基 本复原 | 中度气味 |
| 干燥剂吸湿纸保 鲜剂 | E | J | 4 | >1/2 区域变深黄色 | 轻按有轻微弹性, 不能复原 | 中度强烈的气味 |
| | | | 5 | 所有区域变深黄色 | 轻按无弹性, 不能复原 | 强烈气味 |



图 1 不同处理对常温和低温贮藏红托竹荪的外观影响

Fig. 1 Effect of different treatments on appearance of *P. rubrovolvatus* stored at normal and low temperature

子实体残渣尽数称重, 采用质量法测定, 按公式计算: $W_L = \frac{(W_0 - W_t)}{W_0} \times 100\%$ 。式中, W_L 为失重

率; W_0 为初始重量; W_t 为最终重量。

1.2.8 腐烂率评价方法 统计感官变化的 8 盒的腐烂率, 以子实体表面出现一个可见霉点或细菌菌落即为腐烂, 计数腐烂 1 个, 腐烂率为腐烂个数占总个数的比率: $R_R = \frac{R_n}{R_s} \times 100\%$ 。式中, R_R

为腐烂率; R_n 为腐烂个数; R_s 为总个数。

1.2.9 质构测试方法 使用质构仪对红托竹荪进行测试^[14], 包括硬度、弹性和咀嚼性^[15]。随机取红托竹荪菌柄部分, 任意 3 个点, 每个点取 1 cm × 1 cm 小块, 菌柄外部朝上正放测量。测试参数为: 力量感应元量程 1000 N, 探头提升样品表面上高度 10 mm, 形变量 80%, 检测速度 80 mm/min, 起始力 0.2 N。

1.2.10 酶活测试方法 依照对应试剂盒说明书进行测试, 测试的所有样品均为 5 个重复。

2 结果与分析

2.1 不同处理对红托竹荪感官品质的影响

2.1.1 红托竹荪颜色、气味和变软程度 由表 2、图 1 可知, 常温组各处理中, 菌裙在 2 d 迅速变黄软塌, 出现酒味等气味, 随后菌柄变软, 在 4 d 商品性状极差。而低温环境中, 红托竹荪的劣变比常温环境开始得晚且程度轻, 出现的酒味等气味很淡, 变软率及变软程度也有不同程度的降低, 变黄现象在 4 d 才出现且程度轻。

常温组处理 B 和 C 的变黄率和变黄程度最低, 低温组中处理 H 和处理 J 最低, 即臭氧干燥剂处理在常温和低温环境下有助于延缓变黄和减轻变黄程度。

常温组处理 C、D 和 E 的不良气味分数低,

表 2 不同处理对常温和低温贮藏红托竹荪的感官品质影响

Tab. 2 Effect of different treatments on sensory quality of *P. rubrovolvatus* stored at normal and low temperature

| 处理 Treatment | 时间 Time/d | 变黄率 Yellowing rate/% | 变黄程度 Yellowing degree | 气味 Odor | 变软率 Softening rate/% | 变软程度 Softening degree |
|-----------------|--------------|-------------------------|--------------------------|------------|-------------------------|--------------------------|
| A | 2 | 100 | 4 | 14 | 0 | 0 |
| | 4 | 100 | 5 | 15 | 100 | 5 |
| B | 2 | 83 | 3 | 9 | 0 | 0 |
| | 4 | 100 | 5 | 14 | 100 | 5 |
| C | 2 | 45 | 2 | 3 | 14 | 3 |
| | 4 | 100 | 5 | 10 | 73 | 5 |
| D | 2 | 100 | 5 | 4 | 0 | 0 |
| | 4 | 100 | 5 | 10 | 86 | 4 |
| E | 2 | 100 | 5 | 4 | 17 | 3 |
| | 4 | 100 | 5 | 10 | 50 | 5 |
| F | 4 | 33 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| | 8 | 42 | 4 | 5 | 17 | 4 |
| | 12 | 92 | 4 | 5 | 33 | 4 |
| | 16 | 100 | 5 | 10 | 75 | 4 |
| | 20 | 100 | 5 | 12 | 83 | 5 |
| | 4 | 25 | 1 | 2 | 0 | 0 |
| G | 8 | 83 | 4 | 3 | 33 | 4 |
| | 12 | 100 | 4 | 3 | 75 | 4 |
| | 16 | 100 | 5 | 6 | 83 | 4 |
| | 20 | 100 | 5 | 8 | 100 | 5 |
| | 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | 8 | 17 | 1 | 2 | 0 | 0 |
| H | 12 | 50 | 2 | 2 | 25 | 1 |
| | 16 | 100 | 3 | 3 | 25 | 2 |
| | 20 | 100 | 4 | 4 | 25 | 3 |
| | 4 | 33 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| I | 8 | 40 | 3 | 2 | 0 | 0 |
| | 12 | 80 | 4 | 3 | 40 | 3 |
| | 16 | 100 | 5 | 4 | 60 | 4 |
| | 20 | 100 | 5 | 6 | 70 | 5 |
| J | 4 | 20 | 1 | 0 | 30 | 3 |
| | 8 | 60 | 3 | 2 | 0 | 0 |
| | 12 | 100 | 4 | 3 | 90 | 3 |
| | 16 | 100 | 5 | 4 | 100 | 5 |
| | 20 | 100 | 5 | 6 | 100 | 5 |

低温组中处理 H、I 和 J 最低, 即臭氧干燥剂处理、干燥剂保鲜纸处理、干燥剂保鲜纸吸湿纸处理在不同温度环境下都对气味有抑制作用, 且在低温环境下可以延缓气味的出现和降低气味的程度。

常温组处理 E 的变软率最低, 处理 D 的变软程度低, 低温组中处理 H 和 I 的变软率和变软程度最低, 且臭氧材料比保鲜纸吸湿纸材料对变软率的降低更有效, 臭氧干燥剂处理和干燥剂保鲜

纸处理在不同温度环境下都最有效。

综上所述, 低温保鲜的效果明显优于常温保鲜, 且采用处理 H (低温臭氧干燥剂处理) 可以有效保持红托竹荪鲜品的商品性状, 有效延长其保鲜期。

2.1.2 红托竹荪失重率 常温组中处理 ($P=0.001<0.05$) 和时间 ($P=0.003<0.05$) 对重量呈显著性差异, 低温组中处理 ($P=0.000<0.05$) 和时间

($P=0.000<0.05$) 对重量呈显著性差异。如图 2 所示, 常温和低温环境下, 贮藏期结束时 4 种保鲜处理的失重率相差不大, 常温干燥剂处理和低温臭氧干燥剂处理的失重率最低。

2.1.3 红托竹荪腐烂率 由表 3 可知, 常温 2 d 时即有腐烂且 4 d 时均达到 100%, 低温 20 d 才开始出现腐烂, 低温可延缓腐烂。与对照处理相比, 常温环境下, 处理 C (常温臭氧干燥剂处理)、处理 D (常温干燥剂保鲜纸处理) 和处理 E (常温干燥剂吸湿纸保鲜纸处理) 等复合保鲜处理对红托竹荪的腐烂有一定的抑制作用。低温环境下, 处理 H 和处理 J 可显著降低腐烂率, 但处理 J 随着时间延长降低腐烂率的作用逐渐消失, 20 d 时处理 F、处理 G 和处理 I 的腐烂率不超过 10%, 处理 H、处理 J 的腐烂率均为 0。22 d 时处理 H 腐烂率依然为 0, 优于其余各处理。

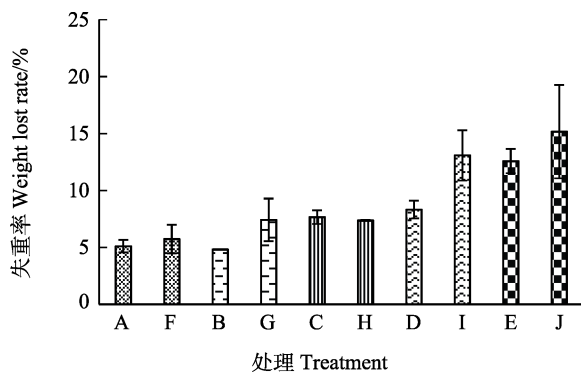


图 2 不同处理对常温和低温贮藏红托竹荪的失重率影响
Fig. 2 Effect of different treatments on weight loss ratio of *P. rubrovolvatus* stored at normal and low temperature

2.2 不同处理对红托竹荪质构的影响

由图 3 可知, 红托竹荪保鲜过程中, 各处理的硬度、弹性、咀嚼性曲线走向一致, 均为整体的先上升后下降趋势, 并在下降过程中伴随着波动。咀嚼性是由弹性和硬度共同决定的, 反映了咀嚼固体需要的能量。

由表 4、表 5、表 6 可知, 各处理的弹性和硬度及咀嚼性在 0~4 d 都是上升趋势, 保鲜初期菇体呼吸作用不停止, 自身代谢导致失掉一部分水分, 此时红托竹荪结构完整, 劣变不明显, 失去这部分水使其更有韧性, 导致硬度增加弹性上升, 咀嚼性也因此上升。从 4 d 开始, 各处理因子实体劣变使硬度及弹性降低导致咀嚼性下降, 8~20 d 时, 红托竹荪子实体细胞失水使硬度和弹性上升, 是由中期内部和外环境失水使红托竹荪干

燥所致, 之后因微生物滋生引起的分解逐步使硬度和弹性降低, 咀嚼性也随之降低。该过程中处理 H 和处理 I 基本一致, 而处理 H 是各处理中变化值最小的, 且处理 H 在各个时期中的弹性变量均为最低, 减缓了红托竹荪菌柄变软的速度, 与感官评价结果一致, 较好地维持了商品性状。

综上, 处理 H 的硬度、弹性和咀嚼性在保鲜试验的各个时期均保持在较好水平, 该处理很好地保持了红托竹荪的商品性状, 有效延长其保鲜期, 故该处理是最佳的红托竹荪保鲜处理。

2.3 不同处理对红托竹荪胞外酶活性的影响

为进一步探究红托竹荪在不同温度、不同保鲜处理的贮藏过程中颜色和硬度差异的成因。通过感官评价和质构测量的结果, 选择处理 A、处理 F、处理 E、处理 J、处理 C、处理 H 的不同保鲜时长的保鲜竹荪作为样本, 进行苯丙氨酸解氨酶和多酚氧化酶、几丁质酶的酶活性检测及其关联分析 (图 4、图 5)。

常温组的苯丙氨酸解氨酶在 0~2 d 时, 对照处理 A 的酶活性升高, 保鲜处理 C 和处理 E 下降; 2~4 d 时处理 A 的酶活性最高为 6.53 U/g, 对应感官中处理 A 子实体变色最早、程度最高, 处理 E 的酶活性最低为 3.70 U/g。在低温组中, 0~4 d 时处理 F 的酶活性升高, 竹荪变色发生早; 8 d 时处理 H 和处理 J 的酶活性才开始上升, 且处理 H 的酶活性处于更低的水平, 说明处理 H 有效延缓了由苯丙氨酸解氨酶引起变色的时间和程度。

常温组的多酚氧化酶酶活性在 0~2 d 时, 处理 E 的抑制效果最差, 处理 C 的抑制效果最佳; 4 d 时处理 C 的酶活力最低, 对褐变的抑制效果较好。低温的各处理在 0~4 d 时, 处理 F、处理 J 的酶活性上升、处理 H 降低; 4~12 d, 处理 F 和处理 H 上升后下降, 处理 J 下降后上升; 16~20 d 时, 各处理的酶活性升高, 在 20 d 时酶活性为处理 F>处理 J>处理 H, 可知处理 H 可有效抑制由多酚氧化酶引起的子实体变色现象。

常温组的几丁质酶活性在 0~4 d 时, 处理 A 和处理 C 酶活变化结果相似, 趋势平稳, 增减均不超过 1 mg/(h·g), 处理 E 该酶活性激增, 说明保鲜处理对常温组的几丁质酶活性并无明显抑制作用。而低温组各处理中, 0~8 d 时, 各处理均为上升后下降的趋势, 处理 F 酶活性最高, 处理 H 最低; 各处理的几丁质酶活性从 8 d 开始逐步升高, 说明保鲜处理作用开始减弱; 8~20 d, 处理 J

表 3 不同处理对常温和低温贮藏红托竹荪腐烂率的影响

Tab. 3 Effect of different treatments on decay rate of *P. rubrovolvatus* stored at normal and low temperature

| 处理 Treatment | 腐烂率 Decay rate/% | | | | | | |
|-----------------|------------------|-----|-----|------|------|------------|--------------|
| | 2 d | 4 d | 8 d | 12 d | 16 d | 20 d | 22 d |
| A | 79(31/39) | 100 | - | - | - | - | - |
| B | 51(24/47) | 100 | - | - | - | - | - |
| C | 13(6/47) | 100 | - | - | - | - | - |
| D | 17(7/41) | 100 | - | - | - | - | - |
| E | 12(4/34) | 100 | - | - | - | - | - |
| F | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.00(3/50) | 12.00(6/50) |
| G | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.25(3/48) | 20.83(10/48) |
| H | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.08(1/48) | 6.98(3/43) |
| J | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0(0/42) | 11.90(5/42) |

注：表中括号内为腐烂个数和总个数的数值；-表示常温组试验结束。

Note: The brackets in the table are the number of decays and the total number; - indicates the end of the normal temperature group test.

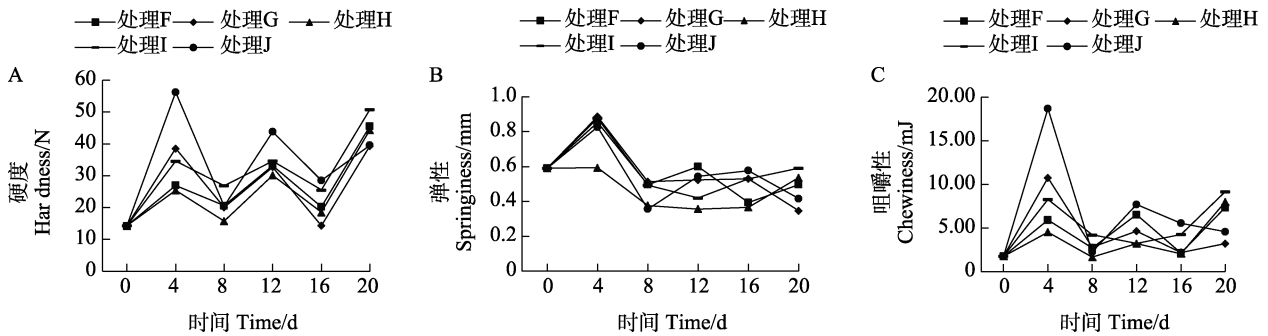


图 3 不同处理对低温贮藏红托竹荪质构的影响

Fig. 3 Effect of different treatments on texture of *P. rubrovolvatus* stored at low temperature

表 4 不同处理对低温贮藏红托竹荪硬度的影响

Tab. 4 Effect of different treatments on hardness of *P. rubrovolvatus* stored at low temperature

| 处理 Treatment | 硬度 Hardness/N | | | | | |
|-----------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| | 0 d | 4 d | 8 d | 12 d | 16 d | 20 d |
| 处理 F | 14.3000 ^a | 26.9667 ^{hij} | 20.6000 ^{mn} | 33.1333 ⁿ | 20.2333 ⁿ | 45.6000 ⁿ |
| 处理 G | 14.3000 ⁿ | 38.6000 ⁿ | 20.0333 ⁿ | 32.7000 ^{ab} | 14.3333 ^{bc} | 39.3667 ^{cd} |
| 处理 H | 14.3000 ^{cde} | 25.4000 ^{def} | 15.7333 ^{def} | 30.1667 ^{efg} | 18.5333 ^{gh} | 44.4000 ^{gh} |
| 处理 I | 14.3000 ^{ghi} | 34.6000 ^{hijk} | 26.9000 ^{ijk} | 34.6333 ^{jk} | 25.5667 ^k | 50.8000 ^{kl} |
| 处理 J | 14.3000 ^{kl} | 56.2333 ^{lm} | 20.5000 ^{lm} | 43.8333 ^{lm} | 28.5333 ^{lmn} | 39.5667 ^{mn} |

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P < 0.05$).

表 5 不同处理对低温贮藏红托竹荪弹性的影响

Tab. 5 Effect of different treatments on springiness of *P. rubrovolvatus* stored at low temperature

| 处理 Treatment | 弹性 Springiness/mm | | | | | |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 0 d | 4 d | 8 d | 12 d | 16 d | 20 d |
| 处理 F | 0.5900 ^{bc} | 0.8533 ^a | 0.4967 ^{de} | 0.6000 ^b | 0.3933 ^f | 0.4967 ^{de} |
| 处理 G | 0.5900 ^{bc} | 0.8867 ^a | 0.5133 ^{cd} | 0.5233 ^{bcd} | 0.5300 ^{bcd} | 0.3467 ^f |
| 处理 H | 0.5900 ^{bc} | 0.5933 ^{bc} | 0.3767 ^f | 0.3567 ^f | 0.3667 ^f | 0.5367 ^{bcd} |
| 处理 I | 0.5900 ^{bc} | 0.8767 ^a | 0.4933 ^{de} | 0.4200 ^{ef} | 0.5300 ^{bcd} | 0.5900 ^{bc} |
| 处理 J | 0.5900 ^{bc} | 0.8267 ^a | 0.3567 ^f | 0.5433 ^{bcd} | 0.5767 ^{bcd} | 0.4167 ^{ef} |

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P < 0.05$).

表 6 不同处理对低温贮藏红托竹荪咀嚼性的影响
Tab. 6 Effect of different treatments on chewiness of *P. rubrovolvatus* stored at low temperature

| 处理 Treatment | 咀嚼性 Chewiness/mJ | | | | | |
|-----------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| | 0 d | 4 d | 8 d | 12 d | 16 d | 20 d |
| 处理 F | 1.7600 ^l | 5.9267 ^{efgh} | 2.7333 ^{ijkl} | 6.5233 ^{edfg} | 2.1433 ^l | 7.3400 ^{def} |
| 处理 G | 1.7600 ^l | 10.7600 ^b | 2.8000 ^{ijkl} | 4.6567 ^{ghi} | 2.2000 ^{kl} | 3.2000 ^{ijkl} |
| 处理 H | 1.7600 ^l | 4.5300 ^{ghi} | 1.6833 ^l | 3.2267 ^{ijkl} | 2.0600 ^l | 7.9867 ^{cd} |
| 处理 I | 1.7600 ^l | 8.3000 ^{cd} | 4.2267 ^{hijk} | 3.2433 ^{ijkl} | 4.2767 ^{hij} | 9.1633 ^{bc} |
| 处理 J | 1.7600 ^l | 18.7000 ^a | 2.2667 ^{ijkl} | 7.6900 ^{cde} | 5.5533 ^{feh} | 4.5833 ^{ghi} |

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P < 0.05$).

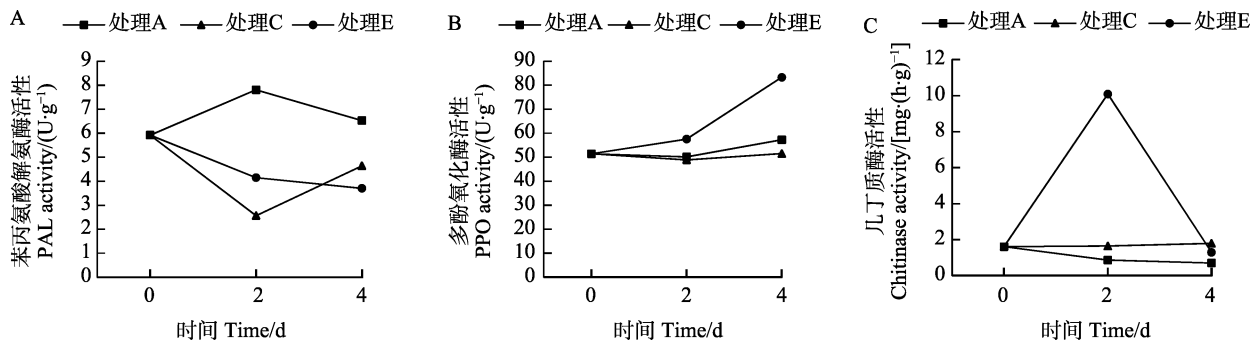


图 4 不同处理对常温贮藏红托竹荪胞外酶活性的影响

Fig. 4 Effect of different treatments on extracellular enzyme activities of *P. rubrovolvatus* stored at normal temperature

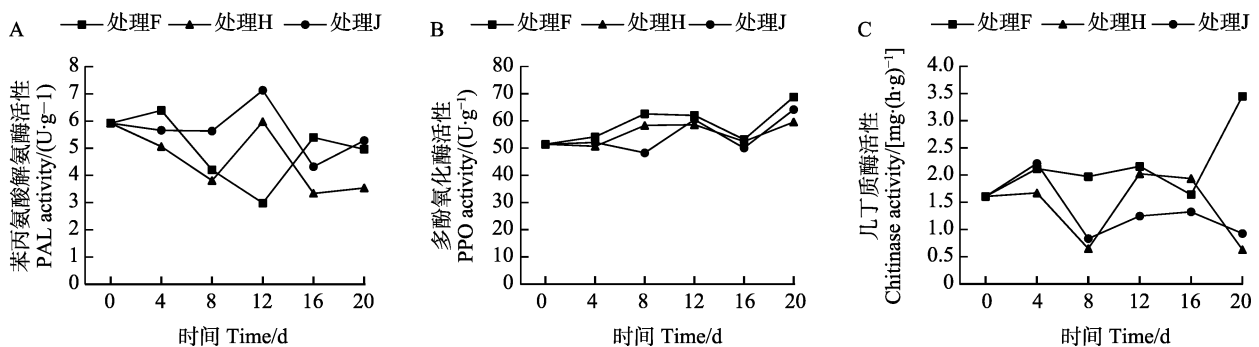


图 5 不同处理对低温贮藏红托竹荪胞外酶活性的影响

Fig. 5 Effect of different treatments on extracellular enzyme activities of *P. rubrovolvatus* stored at low temperature

酶活性最低, 处理 H 次之, 处理 F 最高, 但在测试中, 其几丁质酶的活力始终处在较低的水平, 尽管 3 个处理表现出了一定差异, 但相比常温组各处理的酶活可知, 采用处理 J 与处理 H 在低温保存中均可较好地抑制几丁质酶的活性, 有效地抑制了几丁质酶对红托竹荪子实体细胞壁的降解, 避免因自身酶系造成的自溶作用。

综上所述, 采用臭氧材料和干燥剂材料的保鲜手段处理红托竹荪子实体, 并在 4 °C 下进行保存, 可有效避免因自身酶系造成的劣化作用。

3 讨论

本研究采用复合保鲜法对红托竹荪进行保

鲜, 各保鲜方法中处理 H (低温臭氧干燥剂处理) 的保鲜效果最佳, 8 d 时菌裙及菌柄出现变黄现象, 12 d 时菌柄出现变软现象, 至 22 d 试验结束时腐烂率为各处理最低。试验采用了感官评价的方法结合质构仪和酶活测定联合分析红托竹荪保鲜效果。结果表明, 处理 H (低温臭氧干燥剂处理) 的商品性状保持最好, 外观颜色保持最佳, 失重率较低, 腐烂率最低, 硬度、弹性等指标变化稳定。

通过感官评价保鲜过程中颜色的变化发现, 低温组变化开始的时间比常温组延迟 2~4 倍, 菌柄菌裙软塌不成形的时间延迟到常温组的 5 倍。

常温环境下处理 D 和处理 E 中保鲜纸、吸湿纸的包裹使竹荪加速了腐烂,而在常温组和低温组中单一的干燥剂处理:处理 B、处理 G,失重率均最低,但感官评价差。在保鲜初期,采用干燥剂和吸湿纸的处理有效降低了包装内的自由水含量,抑制了子实体自身呼吸作用和外源性微生物的滋生,但后期其吸水饱和,会导致与子实体接触处水分积蓄过多,导致局部微生物过量繁殖,反而提高了变黄率和变黄程度。单一的吸湿材料可以在一定时间内有限度地抑制微生物滋生和呼吸作用,但难以长期抑制劣变,需要配合其他保鲜措施一起使用。

质构仪测量结果中硬度的变化趋势,还与竹荪独有的子实体结构有关。竹荪子实体特殊的蜂窝状结构,在菌肉失水后的硬度和弹性变化更为复杂^[16],同时蜂窝状结构带来更大的表面积导致其受到外源性微生物和自身酶系的影响更大。前期子实体失水,在其韧性到达临界值前,其弹性和硬度均可能随着水分流失而上升,而随着保鲜时间的延长,子实体的细胞破裂,硬度和弹性下降;同时,在子实体表面滋生的外源性真菌和细菌的分解作用下,细胞进一步破裂,使其外观塌缩,可压缩程度降低,此时表现出硬度上升但弹性降低,最终导致质构测定结果表现为上下反复的波动。

最佳保鲜处理为低温臭氧干燥剂处理,其中的臭氧材料对红托竹荪保鲜期的延长和感官性状的保持有显著作用。在包装前进行臭氧熏蒸,采用臭氧对子实体处理,从保鲜初始阶段就有效降低了表面菌群的密度和种类,抑制了后续保鲜过程中子实体表面杂菌的增殖^[17-18],进而延缓由微生物增殖引起的腐坏和由微生物胞外活性氧引起的子实体变黄^[19]。臭氧广泛应用于医疗、发酵工业和鲜切蔬菜等领域^[20],具有分解迅速、无残留的优良特性^[21],且臭氧发生器有价格低廉、操作简单、无需耗材,使用成本低的特点,更易于实现推广应用。而干燥剂的配合使用,在保鲜初期就有效降低了包装内的湿度,并避免了局部高湿的情况。可以有效降低红托竹荪子实体的表面湿度,破坏其胞外酶的反应条件,从而减缓了几丁质酶对子实体细胞壁的破坏作用,保持其较好的外观形态和质感,同时抑制了子实体表面微生物的繁殖,也起到了延缓红托竹荪子实体腐坏变黄的作用。该方法是一种成本低廉、易于实现的保

鲜技术。其大幅延长了红托竹荪的保鲜期,并保持较好的竹荪商品性状,起到了保质增值的效果。

参考文献

- [1] 臧穆, 纪大千. 我国东喜马拉雅区鬼笔科的研究[J]. 真菌学报, 1985, 4(2): 109-117.
ZANG M, JI D G. Notes on Phallaceae from the eastern himalayan region of China[J]. Mycosystema, 1985, 4(2): 109-117. (in Chinese)
- [2] 连宾, 郁建平. 红托竹荪多糖的提取分离及组成研究[J]. 食品科学, 2004, 25(3): 43-45.
LIAN B, YU J P. Study on the polysaccharides extraction from mushroom *Dictyophora rubrovalvata* by TLC[J]. Food Science, 2004, 25(3): 43-45. (in Chinese)
- [3] 朱国胜, 桂阳, 龚光禄. 红托竹荪代料发酵菌棒层架栽培技术[J]. 农技服务, 2018, 35(2): 29-37.
ZHU G S, GUI Y, GONG G L. Laminated cultivation technique of fermented rod of *Phallus rubrovolvatus*[J]. Agricultural Technology Service, 2018, 35(2): 29-37. (in Chinese)
- [4] 孙若兰, 王璐, 易有金, 张强, 桑毅媛, 方正初. 食用菌采后贮藏保鲜[J]. 食品工业, 2020, 41(8): 266-270.
SUN R L, WANG L, YI Y J, ZHANG Q, SANG Y Y, FANG Z C. The storage and preservation of edible fungi after harvest[J]. The Food Industry, 2020, 41(8): 266-270. (in Chinese)
- [5] 夏紫茜, 李辣梅, 严涵, 余春辉, 王瑞. 食用菌采后保鲜研究进展[J]. 中国果菜, 2021, 41(5): 15-22.
XIA Z Q, LI L M, YAN H, YU C H, WANG R. Research progress on postharvest preservation of edible fungi[J]. China Fruit & Vegetable, 2021, 41(5): 15-22. (in Chinese)
- [6] BOURNE M C. Selection and use of postharvest technologies as a component of the food chain[J]. Journal of Food Science, 2006, 69(2): 43-46.
- [7] 张沙沙, 朱立, 曹晶晶, 邓雅元, 郭永红. 采后预处理对羊肚菌保鲜效果的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(13): 319-322.
ZHANG S S, ZHU L, CAO J J, DENG Y Y, GUO Y H. Effect of the pretreatment on quality maintenance of morels[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(13): 319-322. (in Chinese)
- [8] 白晋豪. 预处理对海鲜菇品质特性的影响[D]. 太原: 山西农业大学, 2017.
BAI J H. Effect of different pretreatment on the quality of *Hypsizygus marmoreus*[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [9] 李瑶. 1-MCP 处理结合聚丙烯保鲜盒包装调控金针菇品质

- 劣变机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- LI Y. Study on mechanism of quality deterioration of *Flammulina velutipes* regulated by 1-MCP treatment combined with polypropylene crisper[D]. Chongqing: Southwest University, 2018. (in Chinese)
- [10] 陈凤美. 异抗坏血酸/打孔膜包装对灰树花子实体采后保鲜作用及其机理的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- CHEN F M. Postharvesting effect and its mechanism of combination of erythorbic acid and perforated packaging on *Grifola frondosa* fruiting body[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)
- [11] 黄雪, 员丽苹, 谢瑶, 郭衍银, 郭惠东, 李贺, 田学, 刘进. 15 °C下O₂/CO₂主动自发气调对羊肚菌保鲜效果的影响[J]. 中国果菜, 2019, 39(12): 1-6.
- HUANG X, YUN L P, XIE Y, GUO Y Y, GUO H D, LI H, TIAN X, LIU J. Effects of O₂/CO₂ active modified atmospheres packaging on preservation quality of *Morchella sextelata* under 15 °C[J]. China Fruit & Vegetable, 2019, 39(12): 1-6. (in Chinese)
- [12] 李建挥, 禹霖, 柏文富, 贺艳, 廖鹏, 聂东伶, 吴思政, 梁文斌. 缓释保鲜纸对蓝莓采后冷藏品质的影响[J]. 经济林研究, 2019, 37(1): 193-198, 210.
- LI J H, YU L, BAI W F, HE Y, LIAO P, NIE D L, WU S Z, LIANG W B. Effects of slow-releasing preservative paper on postharvest quality of blueberry under cold storage[J]. Nonwood Forest Research, 2019, 37(1): 193-198, 210. (in Chinese)
- [13] 梁芸志, 季丽丽, 陈存坤, 吴昊, 董成虎, 王成荣. 臭氧、1-MCP 和乙烯吸收剂组合处理对番茄保鲜效果的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(11): 275-280, 286.
- LIANG Y Z, JI L L, CHEN C K, WU H, DONG C H, WANG C R. Combined effects of ozone, 1-MCP and ethylene absorbent on the quality of tomato preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(11): 275-280, 286. (in Chinese)
- [14] RIVERA S, KERCKHOFFS H, SOFKOVA-BOBCHEVA S, HUTCHINS D, EAST A. Data of texture profile analysis performed by different input settings on stored 'Nui' and 'Rahi' blueberries[J]. Data in Brief, 2021, 38: 107313.
- [15] BOURNE M C. Food texture and viscosity concept and measurement[M]. Florida: Academic Press, 2002: 182-186.
- [16] QI C, JIANG F, YANG S. Advanced honeycomb designs for improving mechanical properties a review[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 227: 109393.
- [17] LONE S A, RAGHUNATHAN S, DAVOODBASHA M, SRINIVASAN H, LEE S. An investigation on the sterilization of berry fruit using ozone: an option to 4 preservation and long term storage[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2019, 20: 101212.
- [18] 索标, 侯金会, 常玉婷, 王瑞, 马静一, 李真, 黄忠民, 艾志录. 臭氧水对鲜湿面表面金黄色葡萄球菌的杀菌效果及其储藏安全控制研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(4): 1187-1191.
- SUO B, HOU J H, CHANG Y T, WANG R, MA J Y, LI Z, HUANG Z M, AI Z L. Study on the bactericidal effect of ozone water on staphylococcus aureus on fresh wet surface and its storage safety control[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(4): 1187-1191. (in Chinese)
- [19] 陈丽娇, 聂红云, 王磊, 聂麦茜, 第五振军, 张建, 陈婧. 微生物胞外活性氧的产生及其促进有机污染物降解的研究进展[J]. 微生物学通报, 2022, 49(1): 323-335.
- CHEN L J, NIE H Y, WANG L, NIE M Q, DIWU Z J, ZHANG J, CHEN J. Advances in the production of extracellular reactive oxygen species and its promotion on the biodegradation of organic pollutants[J]. Microbiology China, 2022, 49(1): 323-335. (in Chinese)
- [20] SASMITA E, RESTIWIJAYA M, YULIANTO E, YULIANI, ARIANTO F, KINANDANA A W, NUR M. Effect of ozone technology applications on physical characteristics of red cayenne pepper (*Capsicum frutescens* L.) preservation[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1217(1): 7-12.
- [21] 王文生, 罗云波, 石志平. 臭氧在果蔬贮藏保鲜中的研究与应用[J]. 保鲜与加工, 2004, 4(1): 4-7.
- WANG W S, LUO Y B, SHI Z P. Research and application of ozone in storage of fruit and vegetable[J]. Storage and Process, 2004, 4(1): 4-7. (in Chinese)