DOI:10.12441/spyswjs.20241129002 [文章编号] 1673-1689(2025)12-0107-11

美极梅奇酵母和24-表油菜素内酯对葡萄采后保鲜的影响

屈嘉燕[1] 牛会平[1] 李博文[1] 王 晓[1] 王录俊[2,3] 惠竹梅[1,4] 王雪飞[1,4*]

(1. 西北农林科技大学葡萄酒学院,陕西 杨凌 712100; 2. 渭南葡萄研究所,陕西 渭南 714000; 3. 国家葡萄产业技术体系渭南综合试验站,陕西 渭南 714000; 4. 陕西葡萄与葡萄酒工程中心,陕西 杨凌 712100)

摘要:【目的】研究不同处理方式对葡萄采后保鲜的影响。**【方法】**以‘阳光玫瑰’为原料,分别采用0.4 mg/L的24-表油菜素内酯(24-epibrassinolide,EBR)、1×10^9 CFU/mL的美极梅奇酵母及两者复合(YBR)处理,探究生防酵母与EBR对葡萄采后保鲜的影响。**【结果】**与对照(CK)组相比,EBR、美极梅奇酵母及YBR处理均能降低葡萄失水率,维持葡萄硬度,延缓原果胶和果梗叶绿素下降。在贮藏后期,YBR处理可延缓葡萄中类黄酮质量分数下降,较CK组提高了12.95%;YBR处理能降低超氧阴离子和丙二醛(MDA)的质量摩尔浓度,与CK组相比分别降低了25.15%和33.84%;此外,YBR处理可提高葡萄的过氧化物酶(POD)活性,抑制多酚氧化酶(PPO)活性,减少葡萄在贮藏过程中的氧化损伤。**【结论】**该研究证实了美极梅奇酵母与EBR协同处理在保鲜中的应用潜力。

关键词:葡萄;24-表油菜素内酯;美极梅奇酵母;采后保鲜

Effects of *Metschnikowia pulcherrima* and 24-Epibrassinolide on Postharvest Preservation of Grapes

QU Jiayan[1] *NIU Huiping*[1] *LI Bowen*[1] *WANG Xiao*[1] *WANG Lujun*[2,3] *XI Zhumei*[1,4] *WANG Xuefei*[1,4*]

(1. College of Enology, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Weinan Grape Research Institute, Weinan 714000, China; 3. Weinan Comprehensive Experimental Station of National Grape Industry Technology System, Weinan 714000, China; 4. Shaanxi Engineering Research Center for Viti-viniculture, Yangling 712100, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to investigate the effects of different treatments on the postharvest preservation of grapes. [**Method**] The impacts of 0.4 mg/L 24-epibrassinolide (EBR), 1×10^9 CFU/mL *Metschnikowia pulcherrima*, and their combination (YBR) on postharvest storage of ‘Shine Muscat’ grapes were evaluated. [**Result**] Compared with the control (CK) group, EBR, *Metschnikowia pulcherrima*, and YBR treatments effectively reduced the water loss rate, maintained the firmness, and delayed the declines in protopectin and stem chlorophyll content of grape. In the later storage stage, YBR treatment delayed the decrease in flavonoid mass fraction, which was 12.95% higher than that of CK group. At the same time, YBR treatment reduced the mass molar concentrations of superoxide anion and malondialdehyde (MDA) by 25.15% and 33.84%, respectively. In addition, YBR treatment increased the peroxidase (POD) activity and inhibited the polyphenol

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目(2023BCF01023);国家自然科学基金项目(32001991);陕西省重点研发计划项目(2023-YBNY-243)。

通信作者:王雪飞(1986—),女,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事葡萄逆境生理与品质调控研究。E-mail:x.wang@nwafu.edu.cn

收稿日期:2024-11-29 **修回日期:**2025-02-19

oxidase (PPO) activity to alleviate the oxidative damage of grape during storage. [**Conclusion**] This study confirms the application potential of *Metschnikowia pulcherrima* combined with EBR.

Keywords: grape; 24-epibrassinolide; *Metschnikowia pulcherrima*; postharvest preservation

葡萄富含多种营养物质，深受消费者喜爱。但葡萄采后易出现变软、落粒、腐败烂果等问题，降低了葡萄品质，造成了极大的经济损失。目前，葡萄采后保鲜主要采用低温贮藏、SO_2保鲜等方法，但保鲜剂滥用现象严重，存在药物残留风险[1-2]。因此，研发绿色、健康、高效的葡萄保鲜方法具有重要意义。

生防酵母具有安全有效、无污染等优势，在果蔬采后保鲜中发挥着重要作用[3-4]。在果蔬采后贮藏过程中，酵母菌可有效抑制果实呼吸作用，减缓可溶性固形物含量的下降速率，维持果实硬度和总酚含量，减缓采后病害的发生，保持果实良好的外观和品质[5-7]。此外，酵母菌还能促进果蔬中POD、超氧化物歧化酶（SOD）、PPO等酶活性的提升，进而增强果蔬抗病性[8-9]。同时，生防酵母还会分泌具有抗真菌活性的挥发性有机化合物，这类物质易挥发，在密闭空间中对果实采后保鲜具有重要作用[10]。油菜素内酯（brassinolide，BR）广泛存在于植物各器官中[11]，可促进细胞增殖和叶片发育，调节植物体内营养物质分配，缓解多种生物与非生物胁迫造成的氧化损伤[12]。EBR是人工合成的BR类似物，兼具BR的各类生理作用且生物活性较高，低质量浓度EBR即可对植物生理过程产生积极调控作用[13-14]。研究表明，在葡萄幼果期至膨大期对叶面喷施不同质量浓度的EBR，可提高果实的SOD和POD活性，降低MDA质量摩尔浓度[15]。EBR处理还能通过提高果实抗氧化酶活性、降低膜脂过氧化程度来启动抗氧化防御系统[16-17]，同时增强与苯丙烷代谢相关酶的酶活性，从而提升果实采后抗病能力[18]。

目前，葡萄采后保鲜仍以物理或化学方法为主，关于EBR与生防菌剂联合应用提升葡萄采后耐贮性的报道较少。作者所在课题组前期分离获得的美极梅奇酵母菌P01C004可有效维持果实采后品质，具有良好的应用前景[19]。前期研究结果显示，BR与美极梅奇酵母联合使用对葡萄果实灰霉病的防治效率提升了23.64%，还能显著提高葡萄中的酚类物质质量分数，激活果实BR信号转导途径，上调*VvBZR1*和*VvPR1*基因的表达水平，维持植物免疫反应，增强葡萄对病原菌的防御能力[15]。因此，作者选用美极梅奇酵母与EBR复合处理，探究其对葡萄采后生理的影响及贮藏保鲜效果，为开发更安全有效的葡萄保鲜方法提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

葡萄：品种为‘阳光玫瑰’，选取大小和成熟度一致、无机械损伤的果实，于2022年10月19日采自陕西省渭南市临渭区下邽镇北七村鲜食葡萄产业园；美极梅奇酵母P01C004：作者所在实验室保藏菌株。

EBR、多聚半乳糖醛酸：分析纯，上海源叶生物科技有限公司；氢氧化钠、草酸、丙酮、二氧化硅、乙酸、无水乙醇：分析纯，西陇科学股份有限公司；愈创木酚、邻苯二酚、二硫苏糖醇（DTT）、聚乙烯吡咯烷酮（PVP）、Triton X-100、PEG 6000：分析纯，生工生物工程（上海）股份有限公司。

1.2 仪器与设备

电子天平：UW2200H型，岛津企业管理（中国）有限公司；分析天平：X35-1CN型，赛多利斯莱珀思（上海）贸易有限公司；葡萄酒分析仪：Lyza 5000 Wine型，安东帕（上海）商贸有限公司；果实硬度计：GY-1型，上海沪沁仪器设备有限公司；电导率仪：SevenGo™ pH-SG3型，梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；紫外分光光度计：SP-756P型，上海光谱仪器有限公司；酶标仪：SpectraMax iD5型，美谷分子仪器（上海）有限公司；冷冻干燥机：FD5-37型，金西盟（北京）仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 试验设计

试验共设4个处理组：CK组为无菌水对照组，EBR组为0.4 mg/L EBR处理组，Y组为1×10^9 CFU/mL美极梅奇酵母处理组，YBR组为1×10^9 CFU/mL美极梅奇酵母+0.4 mg/L EBR处理组。采摘成熟度和大小一致的葡萄果穗，在上述4种处理溶液中浸泡30 s并晾干，每组处理25穗葡萄。将处理后的葡萄在4 ℃、相对湿度90%条件下贮藏

60 d，每15 d取样一次。

1.3.2 葡萄果实基本理化指标的测定

葡萄果实的可溶性固形物、可滴定酸、葡萄糖及果糖质量浓度采用葡萄酒分析仪测定，每个指标重复3次。贮藏期间葡萄的失水率通过称质量法统计，按式(1)计算失水率。

$$\Delta m=\frac{m_1-m_2}{m_1}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

Δm——失水率，%；

m_1——贮藏前葡萄质量，g；

m_2——贮藏后葡萄质量，g。

1.3.3 葡萄果实软化相关指标的测定

葡萄果实的硬度参照荀军平[20]的方法测定，每个处理组随机选取30粒葡萄进行硬度测定。葡萄中果胶物质质量分数、多聚半乳糖醛酸酶(polygalacturonase，PG)活性参照曹建康等[21]的方法测定，每个指标重复3次。

1.3.4 葡萄果梗生理指标的测定

果梗相对电导率的测定参照集贤等[22]的方法并稍加修改。将果梗切成约2 mm的薄片，称取1.0 g切好的果梗薄片置于50 mL离心管中，加入20 mL去离子水，振荡10 min后弃去上清液，用去离子水冲洗2次。用吸水纸吸干果梗薄片表面的水分，再次加入20 mL去离子水，于25 ℃条件下振荡2 h，测定溶液电导率。将该溶液煮沸15 min，冷却至25 ℃后测定溶液的电导率，按式(2)计算相对电导率。

$$\gamma=\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\times 100\% \quad (2)$$

式中：

γ——相对电导率，%；

γ_1——煮沸前电导率，S/m；

γ_2——煮沸后电导率，S/m。

果梗叶绿素质量分数的测定参照曹翠玲等[23]的方法并稍加修改。将果梗切成2 mm的薄片，称取0.5 g果梗薄片置于试管中，加入15 mL叶绿素提取液，于室温黑暗环境中浸泡提取过夜，中间轻轻晃动试管3~4次，直至果梗组织变白，随后用提取液定容至25 mL。测定上清液在663 nm和645 nm处的吸光度。

1.3.5 葡萄呼吸强度的测定

参照曹建康等[21]的方法，通过静置法测定葡萄果实的呼吸强度，并按式(3)计算葡萄果实的呼吸强度。

$$R=\frac{(V_1-V_2)\times c\times 22}{m\times t} \quad (3)$$

式中：

R——葡萄果实的呼吸强度，mg/(kg·h)；

V_1——对照组使用的草酸溶液体积，mL；

V_2——处理组使用的草酸溶液体积，mL；

c——草酸浓度，mol/L；

m——葡萄果实质量，kg；

t——测定时间，h；

22——换算系数，mg/mol。

1.3.6 葡萄果皮中酚类物质的测定

酚类物质提取参照荀军平[20]的方法进行，并采用福林-肖卡法[24]测定总酚质量分数，结果以没食子酸当量表示。采用铝离子比色法[25]测定类黄酮质量分数，结果以芦丁当量表示。

1.3.7 葡萄果实氧化相关指标的测定

超氧阴离子质量摩尔浓度参照高俊凤[26]的方法测定，MDA质量摩尔浓度、POD及PPO活性参照曹建康等[21]的方法测定，每个指标重复3次。

1.4 数据处理

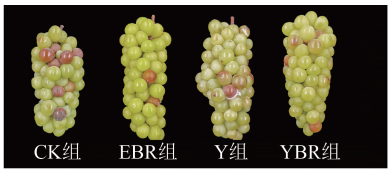
采用SPSS 26.0软件进行单因素方差分析，用Duncan多重比较法进行显著性差异分析，$P<0.05$表示差异显著。使用Origin 2024软件进行图表绘制，结果以平均值±标准差表示。

2 结果与讨论

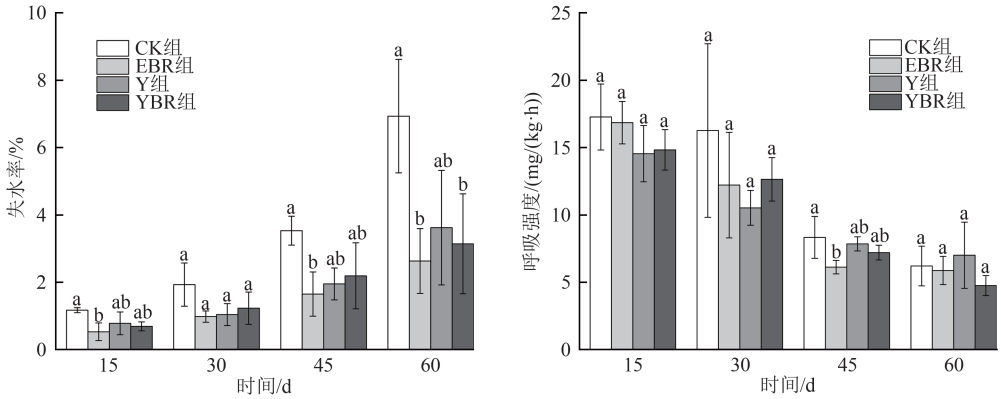
2.1 不同保鲜处理对葡萄贮藏过程中失水率和呼吸强度的影响

如图1(a)所示，当‘阳光玫瑰’贮藏至60 d时，CK组果实霉菌感染程度较重，而EBR组和YBR组果实霉变程度相对较轻。不同保鲜处理对贮藏期间葡萄果实失水率和呼吸强度的影响见图1(b)~(c)。与CK组相比，当贮藏至45 d时，EBR组失水率显著降低了49.22%；贮藏至60 d时，EBR组和YBR组葡萄的失水率均显著降低。从整个贮藏周期来看，葡萄果实的失水率随贮藏时间的延长呈逐渐上升趋势，其中EBR处理对果实失水的抑制效果最明显。当贮藏至45 d时，EBR组的呼吸强度较CK组下降了26.72%。与各处理组贮藏至15 d的葡萄相比，贮藏至60 d时CK组、EBR组、Y组

和YBR组的呼吸强度分别下降了64.31%、65.40%、52.08%和68.26%。这与Li等[27]的研究结果一致，即EBR和YBR处理可通过减少果实水分流失、降低呼吸强度等方式有效延缓葡萄果实的采后变质进程。已有研究表明，生防酵母可与植物激素协同作用抑制果实的呼吸消耗，减缓果实腐烂速度[17,28]。本研究结果表明，相较于EBR组和Y组，YBR处理在降低果实呼吸强度和失水率方面的效果最优。



(a) 贮藏60 d葡萄果实的外观图



(b) 失水率　(c) 呼吸强度

相同时间不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图1　不同保鲜处理对葡萄贮藏过程中失水率和呼吸强度的影响

Fig. 1　Effects of different preservation treatments on the water loss rate and respiration intensity of grapes

2.2　不同保鲜处理对葡萄贮藏过程中基本理化指标的影响

可溶性固形物和可滴定酸是反映果实采后营养品质的重要指标[29]。由表1可知，与CK组相比，YBR处理可有效减缓贮藏期间葡萄果实中可溶性固形物质量浓度的下降。贮藏至60 d时，EBR组和YBR组的可溶性固形物和可滴定酸质量浓度显著高于CK组；EBR组、Y组与YBR组果实的葡萄糖质量浓度显著高于CK组，Y组与YBR组果实的果糖质量浓度显著高于CK组。在整个贮藏过程中，YBR处理对葡萄果实呼吸强度的抑制效果优于EBR组和Y组，见图1(c)。呼吸作用以糖类为主要底物，其强度越高，糖分消耗速率越快，果实可溶性固形物含量下降也越快[30]。因此，YBR处理可抑制果实呼吸强度，能够更好地维持可溶性固形物、葡萄糖及果糖等物质的水平，从而有效保持果实品质。

2.3　不同保鲜处理对葡萄贮藏过程中软化指标的影响

由图2(a)可知，在贮藏期间，EBR、Y及YBR处理均可延缓果实硬度下降；贮藏60 d时，与CK组相比，EBR组、Y组和YBR组的果实硬度分别提高了14.71%、13.15%和14.90%。综合来看，EBR处理抑制葡萄果实硬度下降的效果最显著。这一结果与其他研究者的结论一致，如EBR处理可减缓草莓[31]、杏[32]在贮藏期间的硬度下降，假丝酵母菌处理能延缓水蜜桃[33]硬度的下降。由图2(b)可知，贮藏至15 d时，与CK组相比，EBR和YBR处理显著降低了葡萄果实中的PG活性；贮藏至30 d时，EBR组葡萄果实的PG活性较CK组降低了14.96%；贮藏至45 d时，EBR组和YBR组的PG活性较CK组分别降低了16.55%和15.13%；贮藏至60 d时，EBR组、Y组和YBR组的PG活性较CK组分别降低了20.47%、18.46%和21.76%。整体来看，随着贮藏时间的延长，果实的PG活性呈逐渐上升趋势，且YBR处理降低PG活性的效果最佳，这与李志文等[34]的研究结果一致。PG作为一种细胞壁降解酶，在贮藏过程中会改变细胞壁的组分和结构，已有研究表明，果实采后硬度降低与细胞壁降解酶活性的增强密切相关[5]。因此，YBR处理可通过调控PG活性来延缓果实硬度下降。

表1　不同保鲜处理对葡萄贮藏过程中基本理化指标的影响

Table 1　Effects of different preservation treatments on the basic physical and chemical indexes of grapes during storage

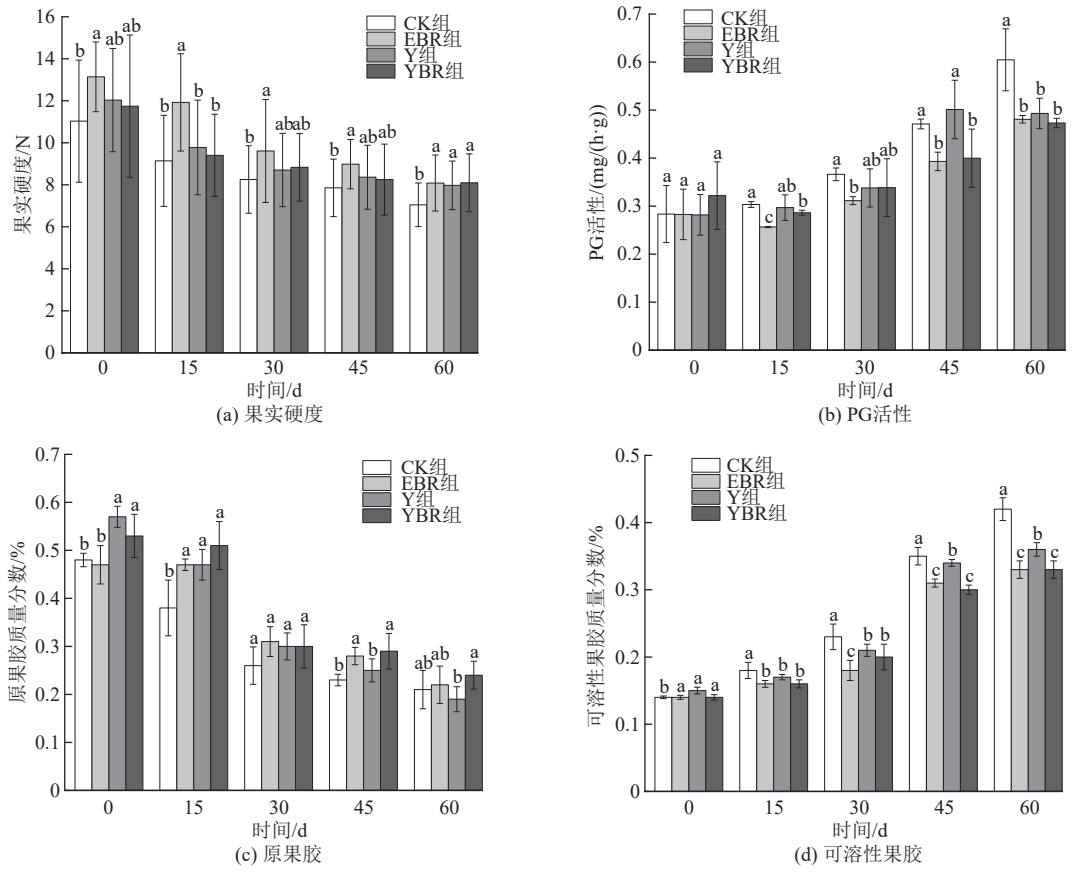
贮藏时间/d	处理组	可溶性固形物质量浓度/(g/L)	可滴定酸质量浓度/(g/L)	葡萄糖质量浓度/(g/L)	果糖质量浓度/(g/L)
0	CK组	185.00±0.20^{c}	3.63±0.03^{c}	63.07±0.21^{c}	95.77±0.06^{b}
	EBR组	179.33±0.12^{d}	3.74±0.04^{b}	62.50±0.10^{d}	91.87±0.06^{c}
	Y组	186.47±0.25^{b}	3.70±0.05^{b}	64.60±0.10^{b}	95.73±0.12^{b}
	YBR组	188.43±0.15^{a}	3.89±0.02^{a}	69.03±0.31^{a}	100.63±0.06^{a}
15	CK组	160.10±4.11^{c}	3.69±0.10^{b}	54.93±1.89^{c}	82.60±2.19^{c}
	EBR组	173.90±4.10^{b}	3.90±0.05^{a}	60.30±1.84^{b}	88.50±2.26^{b}
	Y组	167.83±3.27^{b}	3.72±0.09^{ab}	57.87±1.50^{bc}	86.30±1.73^{bc}
	YBR组	186.20±2.94^{a}	3.84±0.07^{ab}	64.90±1.30^{a}	94.53±1.59^{a}
30	CK组	170.17±0.32^{d}	3.54±0.04^{d}	58.33±0.06^{d}	88.60±0.02^{c}
	EBR组	171.37±0.15^{c}	3.64±0.04^{c}	58.83±0.21^{c}	89.07±0.12^{b}
	Y组	175.67±0.15^{b}	3.71±0.02^{b}	60.37±0.15^{b}	91.17±0.12^{a}
	YBR组	177.30±0.02^{a}	3.82±0.01^{a}	61.65±0.07^{a}	91.30±0.14^{a}
45	CK组	167.33±0.15^{a}	3.37±0.02^{b}	56.40±0.10^{a}	87.37±0.15^{a}
	EBR组	169.60±0.20^{a}	3.45±0.05^{a}	56.57±0.35^{a}	88.93±0.21^{a}
	Y组	167.93±3.93^{a}	3.47±0.02^{a}	56.50±1.65^{a}	87.30±2.08^{a}
	YBR组	170.30±0.20^{a}	3.42±0.02^{ab}	57.60±0.26^{a}	88.77±0.21^{a}
60	CK组	147.67±0.58^{c}	2.28±0.11^{c}	56.35±0.07^{d}	91.55±0.07^{b}
	EBR组	153.67±0.58^{b}	2.77±0.01^{b}	57.25±0.07^{b}	92.00±0.28^{b}
	Y组	145.00±0.02^{d}	2.40±0.18^{c}	56.65±0.07^{c}	93.10±0.14^{a}
	YBR组	159.33±0.58^{a}	3.02±0.11^{a}	59.05±0.07^{a}	93.00±0.14^{a}

注：同列相同贮藏时间的不同字母表示各处理间差异显著（P<0.05）。

由图2(c)~(d)可知，随着贮藏时间的延长，葡萄中的原果胶质量分数逐渐降低，可溶性果胶质量分数逐渐升高。当贮藏至15 d时，EBR组、Y组和YBR组的原果胶质量分数均显著高于CK组，可溶性果胶质量分数均显著低于CK组；贮藏至30 d时，与CK组相比，EBR组、Y组和YBR组的可溶性果胶质量分数分别降低了21.74%、8.70%和13.04%；贮藏至45 d时，与CK相比，EBR组和YBR组的原果胶质量分数分别提高了21.74%和26.09%，可溶性果胶质量分数分别下降了11.43%和14.29%。在果实成熟软化过程中，原果胶会逐渐降解为可溶性果胶，导致果实组织松弛、质地变软、硬度下降[35]。张家铭[14]研究发现，褪黑素与BR复合处理可有效延缓PG、果胶甲酯酶(pectin methylesterase，PME)、β-半乳糖苷酶(β-galactosidase，β-Gal)和纤维素酶(cellulase，Cx)等与果实软化相关酶的酶活性上升，抑制原果胶水解和纤维素含量降低，从而有效延缓葡萄果实软化。综上所述，YBR处理可通过减缓PG活性升高和可溶性果胶积累，抑制原果胶降解，进而延缓葡萄在贮藏过程中的软化。

2.4　不同保鲜处理对葡萄贮藏过程中果梗生理指标的影响

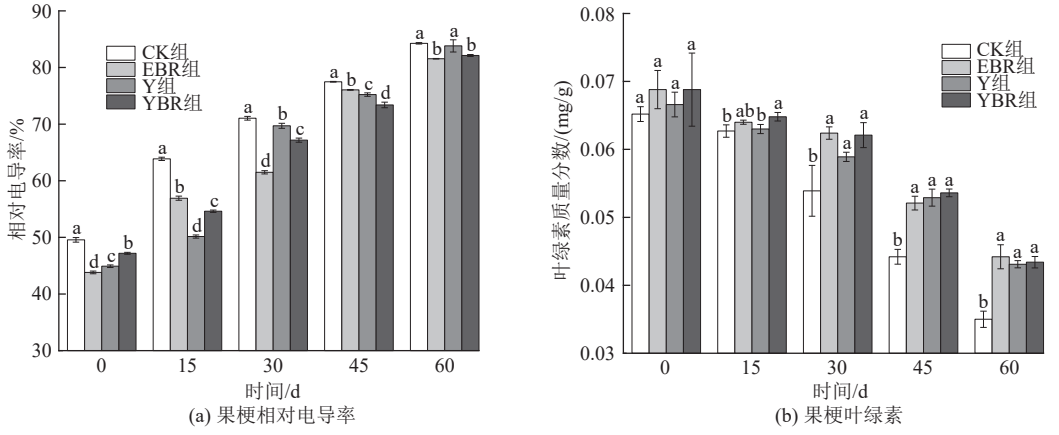
由图3可知，随着贮藏时间的延长，葡萄果梗的相对电导率逐渐上升，叶绿素质量分数逐渐降低。在整个贮藏过程中，EBR和YBR处理均能显著降低葡萄果梗的相对电导率；Y处理在0~45 d内可显著降低葡萄果梗的相对电导率。贮藏至60 d时，EBR组和YBR组果梗的相对电导率较CK组分别下降了3.23%和2.55%。贮藏至15 d时，YBR组果梗的叶绿素质量分数显著高于CK组；贮藏至30~45 d时，EBR、Y和YBR处理均能有效维持葡萄果梗叶绿素质量分数；贮藏至60 d时，EBR组、Y组和YBR组果梗叶绿素质量分数较CK组分别提高了26.29%、23.14%和24.00%，均有效减缓了叶绿素质量分数的下降，从而维持果梗品质，这与Li等[27]的研究结果一致。果梗叶绿素质量分数可以间接反映果梗的褐变程度；而相对电导率升高表明细胞膜完整性受到损害，导致细胞内的溶质渗出，这也是果梗劣变的典型特征[36]。综上所述，EBR和YBR处理在维持葡萄果梗品质方面的效果更优。



相同时间不同字母表示差异显著（P<0.05）。

图 2　不同保鲜处理对葡萄贮藏过程中软化指标的影响

Fig. 2　Effects of different preservation treatments on the softening-related indexes of grapes during storage



相同时间不同字母表示差异显著（P<0.05）。

图 3　不同保鲜处理对葡萄贮藏过程中果梗生理指标的影响

Fig. 3　Effects of different preservation treatments on the physiological indexes of grape fruit stems during storage

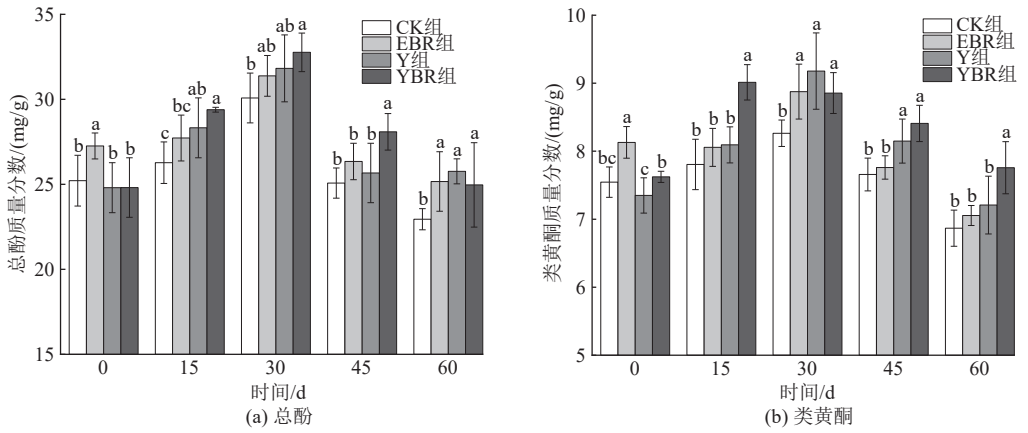
2.5　不同保鲜处理对葡萄贮藏过程中酚类物质的影响

由图 4 可知，贮藏 15~60 d 时，EBR 组、Y 组及 YBR 组葡萄果皮中的总酚质量分数均高于 CK 组；贮藏至 60 d 时，EBR 组、Y 组和 YBR 组葡萄果皮中总酚质量分数较 CK 组分别提高了 9.68%、12.28% 和 8.80%。类黄酮是酚类物质的重要组成部分，贮藏至 15 d 时，YBR 组果皮中类黄酮质量分数较 CK 组提高了 15.47%；贮藏至 30 d 时，EBR 组、Y 组和 YBR 组果皮中的类黄酮质量分数显著高于 CK 组；贮藏至

45 d和60 d时，YBR组果皮中类黄酮质量分数较CK组分别提高了9.80%和12.95%。已有研究表明，EBR处理可促进果实采后酚类物质的积累，维持果实较高的抗氧化活性，进而提高果实的耐贮性和品质[31]；生防酵母能够诱导果实体内总酚、类黄酮的累积[37]。综上所述，YBR处理可通过调控酚类物质和类黄酮的代谢，提高葡萄果实的抗氧化能力，从而延缓贮藏过程中果实品质的下降。

2.6　不同保鲜处理对葡萄贮藏过程中抗氧化能力和膜脂过氧化程度的影响

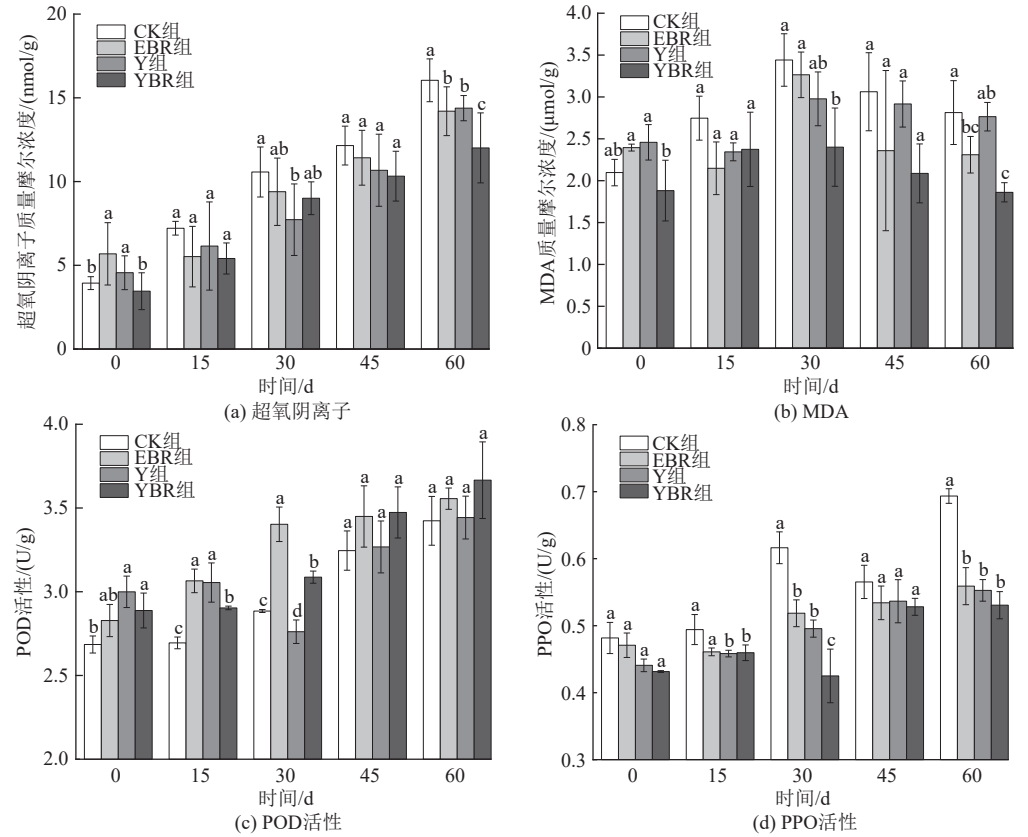
由图5可知，贮藏至60 d时，EBR组、Y组和YBR组葡萄果实中超氧阴离子质量摩尔浓度较



相同时间不同字母表示差异显著（P<0.05）。

图4　不同保鲜处理对葡萄贮藏过程中酚类物质的影响

Fig. 4　Effects of different preservation treatments on the phenolic compounds of grapes during storage



相同时间不同字母表示差异显著（P<0.05）。

图5　不同保鲜处理对葡萄贮藏过程中抗氧化能力和膜脂过氧化程度的影响

Fig. 5　Effects of different preservation treatments on the antioxidant capacity and membrane lipid peroxidation of grapes during storage

CK 组分别降低了 11.50%、10.35% 和 25.15%。葡萄果实中 MDA 质量摩尔浓度随贮藏时间的延长呈先上升后下降的趋势。贮藏至 30 d 时，与 CK 组相比，YBR 处理显著降低了葡萄果实中 MDA 的水平，降幅达 30.24%；贮藏至 60 d 时，EBR 组和 YBR 组果实中 MDA 质量摩尔浓度较 CK 组分别下降了 17.88% 和 33.84%，这与 Li 等[27]的研究结果一致。MDA 是反映膜脂过氧化程度的重要指标，高水平 MDA 会破坏细胞膜完整性，进而影响果实品质；而超氧阴离子过量积累会诱发膜脂过氧化，加速 MDA 生成[38]。综合整个贮藏周期来看，YBR 处理在降低葡萄果实膜脂过氧化程度方面的效果最优。

贮藏至 15 d 时，EBR 组、Y 组和 YBR 组果实中 POD 活性较 CK 组分别提高了 13.74%、13.37% 和 7.75%；贮藏至 30 d 时，EBR 组和 YBR 组果实中 POD 活性较 CK 组分别提高了 17.96% 和 7.01%。在 PPO 活性方面，贮藏至 15 d 时，Y 组和 YBR 组较 CK 组分别降低了 7.24% 和 7.00%；贮藏至 30 d 时，EBR 组、Y 组和 YBR 组较 CK 组分别降低了 15.85%、19.58% 和 31.04%；贮藏至 60 d 时，EBR 组、Y 组和 YBR 组较 CK 组分别降低了 19.39%、20.30% 和 23.49%。已有研究表明，活性氧激增引起的氧化损伤与葡萄衰老过程密切相关[39]，随着贮藏时间的延长，活性氧过量积累会导致脂质过氧化，造成细胞功能障碍和结构异常，进而加速果实衰老[40]。其中，POD 可参与催化活性氧代谢中过量积累的过氧化氢，维持活性氧代谢平衡；而 PPO 会催化酚类物质氧化，导致果实发生褐变[41]。作者所在课题组前期研究发现，生防酵母与 EBR 复合处理可显著减少自由基氧化分解造成的膜结构破坏，缓解活性氧介导的损伤[17]，这与本研究结果一致。与 EBR 组和 Y 组相比，YBR 复合处理能更有效地抑制超氧阴离子和 MDA 水平的升高，同时维持果实中 POD 活性。因此，综合整个贮藏周期，YBR 处理的葡萄抗氧化效果最优。

2.7　不同保鲜处理对葡萄贮藏过程中品质特征的相关性分析

由图 6 可知，在不同贮藏时期，不同保鲜处理

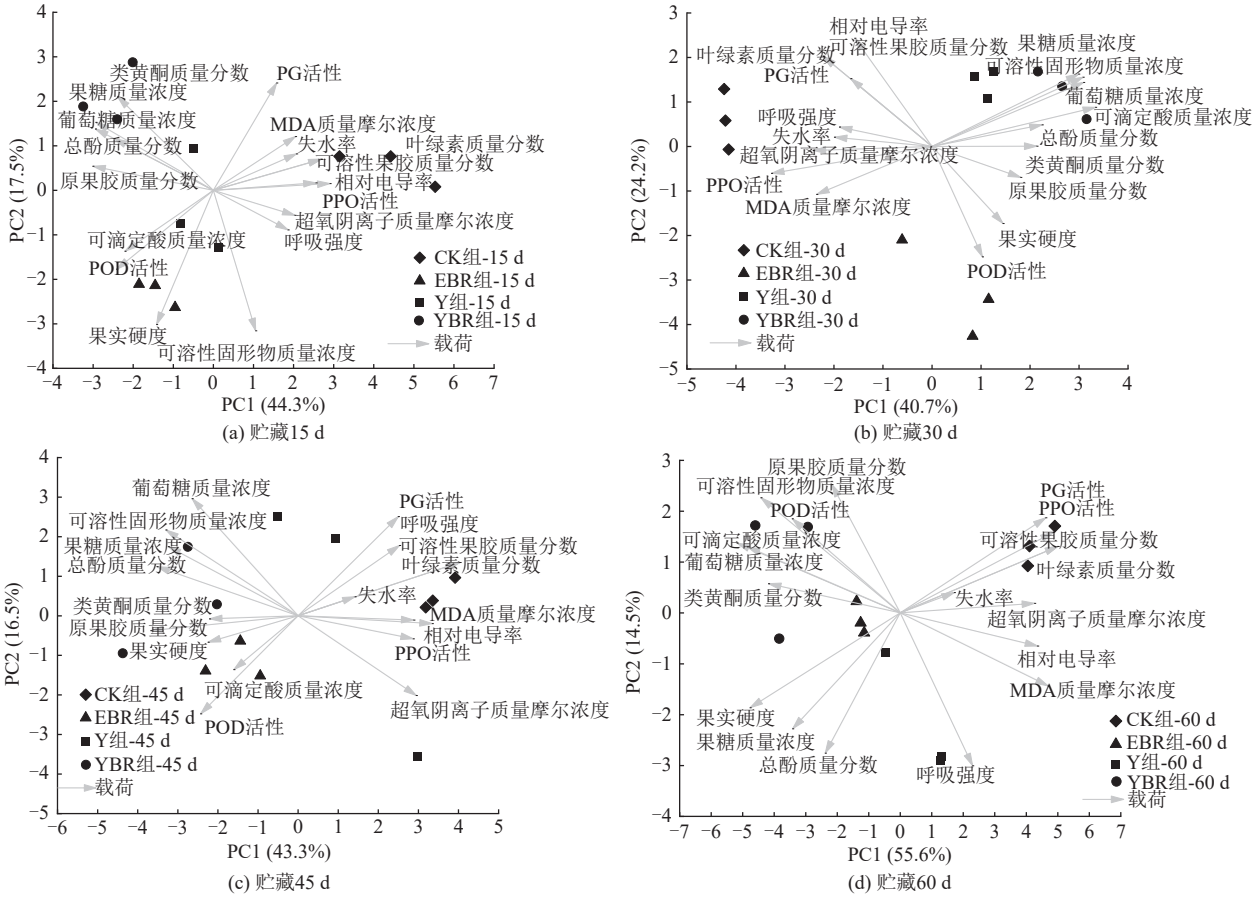


图 6　不同保鲜处理对葡萄贮藏过程中外观品质和采后生理的 PCA 分析图

Fig. 6　PCA plots of appearance quality and postharvest physiology of grapes treated with different preservation methods during storage

对果实各项指标的影响存在明显差异。CK处理与失水率、MDA质量摩尔浓度、相对电导率等氧化应激指标呈正相关，与总酚质量分数、果糖质量浓度、葡萄糖质量浓度、抗氧化酶活性等呈负相关，这一相关性特征表明果实品质随贮藏时间的延长呈下降趋势。EBR处理和Y处理均与抗氧化能力指标相关，但与果糖质量浓度、葡萄糖质量浓度等果实品质指标相关性较弱，这一结果与Li等[27]和王雅歆等[5]的研究结果一致。YBR处理与可溶性固形物质量浓度、葡萄糖质量浓度、果糖质量浓度、总酚质量分数、原果胶质量分数等呈正相关，与MDA质量摩尔浓度、相对电导率、失水率等呈负相关，这说明在采后贮藏过程中，生防酵母与EBR能够发挥协同作用[17]，从而有效维持果实品质并减轻氧化损伤。综合来看，在整个贮藏过程中，YBR处理的葡萄采后保鲜效果最优。

3 结论

在葡萄贮藏过程中，24-表油菜素内酯与美极奇酵母协同处理在维持葡萄果实品质和提升抗氧化活性方面效果最优。该处理能有效抑制果实采后水分散失、降低呼吸强度，从而减缓可溶性固形物、葡萄糖和果糖水平的下降，维持果实硬度与果梗良好外观，保障果实贮藏品质。此外，两者协同处理还可延缓果实中酚类与类黄酮物质水平的下降，降低丙二醛质量摩尔浓度，有效提高葡萄果实的抗氧化能力。本研究在前人单独使用24-表油菜素内酯或生防酵母的基础上进一步优化，证实了24-表油菜素内酯与美极梅奇酵母协同处理在果实采后保鲜中的应用潜力，为葡萄果实采后贮藏与品质保持提供了新途径，对改善葡萄采后品质、延长货架期及增强市场竞争力具有重要意义。然而，本研究仅在实验室条件下进行了研究，尚未全面评估该处理在实际贮藏与运输中的应用效果。因此，未来研究应重点关注该保鲜方法在不同环境下的稳定性及大规模商业应用的可行性与经济效益，并深入解析其具体作用机制。

参考文献

[1] 孟创鸽，曹红霞，韩峪，等. 葡萄贮藏保鲜技术研究进展[J]. 黑龙江农业科学，2022(5)：102-106.
MENG C G，CAO H X，HAN Y，et al. Research progress of grape storage and preservation technology[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences，2022(5)：102-106.(in Chinese)

[2] XUE M Z，YI H L. Induction of disease resistance providing new insight into sulfur dioxide preservation in *Vitis vinifera* L.[J]. Scientia Horticulturae，2017，225：567-573.

[3] 张茜，李洋，王磊明，等. 生物保鲜剂在果蔬保鲜中的应用研究进展[J]. 食品工业科技，2018，39(6)：308-316.
ZHANG X，LI Y，WANG L M，et al. Research progress of application of biological preservative in the preservation of fruits and vegetables[J]. Science and Technology of Food Industry，2018，39(6)：308-316.(in Chinese)

[4] 郭东起，王一林，王洁茹，等. 拮抗酵母菌干粉制剂制备及对冬枣的保鲜效果[J]. 北方园艺，2020(13)：98-104.
GUO D Q，WANG Y L，WANG J R，et al. Preparation of antagonistic yeast dry powder and its preservation effect on winter jujube[J]. Northern Horticulture，2020(13)：98-104.(in Chinese)

[5] 王雅歆，颜菲，李建龙. 3种拮抗酵母菌组合处理对水蜜桃贮藏品质的影响[J]. 河南农业科学，2022，51(7)：173-180.
WANG Y X，YAN F，LI J L. Effects of three antagonistic yeasts treatment on the storage quality of honey peach[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences，2022，51(7)：173-180.(in Chinese)

[6] 佘杰海，周文化，马妍，等. 蓝莓采后品质劣变与保鲜技术研究进展[J]. 食品与机械，2024，40(4)：220-226.
SHE J H，ZHOU W H，MA Y，et al. Research progress on postharvest quality deterioration and preservation technology of blueberry[J]. Food & Machinery，2024，40(4)：220-226.(in Chinese)

[7] 赵利娜，周娅丽，兰晨，等. 汉逊德巴利酵母冻干菌剂制备条件的优化及其对草莓采后软腐病的控制[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(8)：20-30.
ZHAO L N，ZHOU Y L，LAN C，et al. Optimization of preparation conditions of lyophilized *Debaryomyces hansenii* yeast formulation and its control on postharvest soft rot of strawberry[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(8)：20-30.(in Chinese)

[8] 田亚琴，葛念念，周易，等. 美极梅奇酵母抑制芒果炭疽菌的拮抗机理初探[J]. 食品工业科技，2018，39(1)：82-86，91.
TIAN Y Q，GE N N，ZHOU Y，et al. Primary study on antagonism mechanism of *Metschnikowia pulcherrima* yeast inhibiting *Colletotrichum gloeosporioides* in mango fruit[J]. Science and Technology of Food Industry，2018，39(1)：82-86，91.(in Chinese)

[9] ZHANG X Y，YAO Y Q，DHANASEKARAN S，et al. Controlling black spot of postharvest broccoli by

Meyerozyma guilliermondii and its regulation on ROS metabolism of broccoli[J]. Biological Control,2022,170:104938.

[10] 赵春松. 拮抗酵母菌的筛选及其在葡萄采后保鲜中的应用[D]. 兰州:兰州大学,2022.

[11] SASSE J M. Recent progress in brassinosteroid research [J]. Physiologia Plantarum,1997,100(3):696-701.

[12] 舒思晨. 外源MeJA和BR对番茄种子萌发的作用及其干旱胁迫下对幼苗生长的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2022.

[13] ZHABINSKII V N,KHRIPACH N B,KHRIPACH V A. Steroid plant hormones: effects outside plant Kingdom [J]. Steroids,2015,97:87-97.

[14] 张家铭. 褪黑素及2,4-表油菜素内酯复合处理对阳光玫瑰葡萄采后贮藏品质影响研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2024.

[15] 夏澜,傅伟红,应永涛,等. 表油菜素内酯对'阳光玫瑰'葡萄果实品质的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒,2023(4):82-88.
XIA L,FU W H,YING Y T,et al. Effects of spraying 24-epibrassinolide on fruit quality of 'Shine Muscat' grapevine[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine,2023(4):82-88.(in Chinese)

[16] LIU Q,XI Z M,GAO J M,et al. Effects of exogenous 24-epibrassinolide to control grey mould and maintain postharvest quality of table grapes[J]. International Journal of Food Science & Technology,2016,51(5):1236-1243.

[17] 屈嘉燕,周润宇,王晓,等. 油菜素内酯与美极梅奇酵母复配对葡萄灰霉病的抑制作用[J]. 微生物学报,2022,62(11):4541-4550.
QU J Y,ZHOU R Y,WANG X,et al. Combined application of brassinosteroid and *Metschnikowia pulcherrima* against controls *Botrytis cinerea* on grape berries[J]. Acta Microbiologica Sinica,2022,62(11):4541-4550.(in Chinese)

[18] 李丽花,张瑞杰,姚远丽,等. 24-表油菜素内酯调控苯丙烷代谢增强杏果实抗病性的研究[J]. 现代食品科技,2017,33(9):71-76,19.
LI L H,ZHANG R J,YAO Y L,et al. 24-epibrassinolide enhances disease resistance in apricot fruits *via* regulation of phenylpropanoid metabolism[J]. Modern Food Science and Technology,2017,33(9):71-76,19.(in Chinese)

[19] WANG X F,GLAWE D A,KRAMER E,et al. Biological control of *Botrytis cinerea*: interactions with native vineyard yeasts from Washington state[J]. Phytopathology,2018,108(6):691-701.

[20] 荀军平. 24-表油菜素内酯对红地球葡萄抗灰霉病和耐贮性的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.

[21] 曹建康,姜微波,赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京:中国轻工业出版社,2007.

[22] 集贤,张平,朱志强,等. 不同温度及套袋处理对采后'巨峰'葡萄果梗的保鲜效果[J]. 北方园艺,2018(7):121-128.
JI X,ZHANG P,ZHU Z Q,et al. Preservation effects of different temperature and bagging treatments on postharvest 'Kyoho' grape stems[J]. Northern Horticulture,2018(7):121-128.(in Chinese)

[23] 曹翠玲,麻鹏达. 植物生理学教学实验指导[M]. 杨凌:西北农林科技大学出版社,2016.

[24] JAYAPRAKASHA G K,SINGH R P,SAKARIAH K K. Antioxidant activity of grape seed (*Vitis vinifera*) extracts on peroxidation models *in vitro*[J]. Food Chemistry,2001,73(3):285-290.

[25] PEINADO J,LOPEZ DE LERMA N,MORENO J,et al. Antioxidant activity of different phenolics fractions isolated in must from Pedro Ximenez grapes at different stages of the off-vine drying process[J]. Food Chemistry,2009,114(3):1050-1055.

[26] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

[27] LI B B,ZANG Y S,XUN J P,et al. 24-Epibrassinolide improves quality and resistance against *Botrytis cinerea* of harvest table grapes through modulating reactive oxygen species homeostasis[J]. Postharvest Biology and Technology,2024,215:113016.

[28] QIN X J,XIAO H M,XUE C H,et al. Biocontrol of gray mold in grapes with the yeast *Hanseniaspora uvarum* alone and in combination with salicylic acid or sodium bicarbonate[J]. Postharvest Biology and Technology,2015,100:160-167.

[29] SUN M,YANG T,QIAO X H,et al. Hydrogen sulfide delays postharvest ripening of white fleshed strawberry by regulating phytohormone accumulation and ROS generation [J]. Postharvest Biology and Technology,2023,205:112536.

[30] 陈敬鑫,张德梅,李永新,等. 低氧贮藏对采后果实风味的影响研究进展[J]. 食品科学,2021,42(13):273-280.
CHEN J X,ZHANG D M,LI Y X,et al. Progress toward understanding the effect of low-oxygen storage on the flavor of postharvest fruits[J]. Food Science,2021,42(13):273-280.(in Chinese)

[31] 李园园,王莉,周梦洁,等. 2,4-表油菜素内酯对草莓果实贮藏品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学,2018,39(1):279-284.
LI Y Y,WANG L,ZHOU M J,et al. Effect of

2，4-epibrassionolide on postharvest quality and antioxidant activity of strawberry fruit[J]. Food Science，2018，39(1)：279-284.(in Chinese)

[32] 张瑞杰，张杼润，李丽花，等. 24-表油菜素内酯对杏果实贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工，2020，20(1)：36-40.
ZHANG R J，ZHANG Z R，LI L H，et al. Effects of 24-epibrassinolide on the storage quality of apricot fruit [J]. Storage and Process，2020，20(1)：36-40.(in Chinese)

[33] 周秋阳，杨慧慧，王玲，等. 一株桃褐腐病生防酵母菌活性冻干粉的制备及保鲜应用[J]. 食品工业科技，2019，40(21)：96-103.
ZHOU Q Y，YANG H H，WANG L，et al. Preparation and preservation application of a yeast active freeze-dried powder for biocontrol of peach brown rot[J]. Science and Technology of Food Industry，2019，40(21)：96-103.(in Chinese)

[34] 李志文，集贤，闫师杰，等.‘巨峰’葡萄果实采后质地劣变机理研究[J]. 中外葡萄与葡萄酒，2024(5)：38-44.
LI Z W，JI X，YAN S J，et al. Study on mechanism of post-harvest texture deterioration of ‘Kyoho’ grapes[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine，2024(5)：38-44.(in Chinese)

[35] 海龙飞，栗温新，李志谦，等. 软/硬肉葡萄果实细胞壁结构、组分及降解酶活性的变化[J]. 果树学报，2023，40(4)：690-698.
HAI L F，LI W X，LI Z Q，et al. Variations in cell wall microstructure and components and activities of their degradation enzymes in grapes with soft or hard textures [J]. Journal of Fruit Science，2023，40(4)：690-698.(in Chinese)

[36] 梁佳睿，殷贝贝，路帆，等. 商标保鲜卡对‘巨峰’葡萄采后果梗褐变的抑制作用[J]. 食品与发酵工业，2023，49(10)：47-54.
LIANG J R，YIN B B，LU F，et al. Inhibitory effect of table grape preservation pad on stalk browning after harvesting of ‘Kyoho’ grapes [J]. Food and Fermentation Industries，2023，49(10)：47-54.(in Chinese)

[37] 张婕. 两种酵母拮抗菌对采后李果实褐腐病的生物防治效果及机理研究[D]. 重庆：西南大学，2017.

[38] 余经，林育钊，范中奇，等. 果蔬采后病害的发生与活性氧和膜脂代谢的关系研究进展[J]. 亚热带农业研究，2020，16(2)：132-137.
YU J，LIN Y Z，FAN Z Q，et al. Research progress on the relationship between disease occurrence and the metabolism of reactive oxygen species and membrane lipids in postharvest fruits and vegetables[J]. Subtropical Agriculture Research，2020，16(2)：132-137.(in Chinese)

[39] ZHANG Z，XU J，CHEN Y，et al. Nitric oxide treatment maintains postharvest quality of table grapes by mitigation of oxidative damage [J]. Postharvest Biology and Technology，2019，152：9-18.

[40] TAN X L，ZHAO Y T，SHAN W，et al. Melatonin delays leaf senescence of postharvest Chinese flowering cabbage through ROS homeostasis[J]. Food Research International，2020，138：109790.

[41] 刘梦竹，周宏胜，胡花丽，等. 采收期对黄金梨果心褐变和膜脂过氧化的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版)，2020，40(1)：38-43.
LIU M Z，ZHOU H S，HU H L，et al. Effects of different harvest time on membrane lipid peroxidation and browning reaction of fruit core of Whang keumbae[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)，2020，40(1)：38-43.(in Chinese)

（责任编辑：刘冬梅）