DOI:10.12441/spyswjs.20240828003 [文章编号] 1673-1689(2025)10-0094-09

晚熟甜樱桃呼吸特性及受温度和包装方式的影响

支欢欢[1,2,3,4] 董 宇[1,2,3,5*]

(1. 青海大学农林科学院,青海 西宁 810016; 2. 青藏高原种质资源研究与利用实验室,青海 西宁 810016; 3. 青藏高原生物技术教育部重点实验室(青海大学),青海 西宁 810016; 4. 青海省农业有害生物综合治理重点实验室,青海 西宁 810016; 5. 俄勒冈州立大学园艺系,美国 俄勒冈州 胡德里弗 97031)

摘要:【目的】为不同呼吸特性的甜樱桃品种制定适宜的包装策略。**【方法】**以甜樱桃‘拉宾斯’和‘雷吉纳’为试验材料,在0、5、10 ℃封闭系统中,探究O_2体积分数对2种甜樱桃O_2消耗率、CO_2消耗率及呼吸熵的影响;采用聚乙烯(polyethylene,PE)袋包装和气调包装(modified atmosphere packaging,MAP)2种包装方式处理甜樱桃,分析其在0、5、10 ℃贮藏4周后的气体组分、品质和生理病害变化。**【结果】**在相同贮藏温度下,贮藏初期甜樱桃‘拉宾斯’的O_2消耗率和CO_2消耗率均低于‘雷吉纳’,且‘拉宾斯’发生无氧呼吸时的O_2体积分数低于‘雷吉纳’。随着贮藏温度的升高,2种甜樱桃在MAP内的O_2消耗速率均加快,其中在10 ℃贮藏4周后,‘雷吉纳’的MAP内O_2体积分数已降至该品种发生无氧呼吸的O_2体积分数范围。通过对果实品质、生理病害和感官品质分析发现,‘拉宾斯’和‘雷吉纳’的果实硬度、可滴定酸质量分数、质地评分和风味评分均随贮藏温度的升高而降低。在同一贮藏温度下,MAP的‘拉宾斯’和‘雷吉纳’的果实品质和感官风味评分均高于PE处理组。此外,方差分析结果显示,品种×贮藏温度×包装方式的交互作用对O_2体积分数、CO_2体积分数和风味评分有显著影响。**【结论】**甜樱桃‘雷吉纳’比‘拉宾斯’具有更高的呼吸水平,且其发生无氧呼吸的O_2体积分数阈值更高;但在0~5 ℃下,MAP可有效抑制2个品种的O_2消耗率,维持较高的贮藏和感官品质,降低生理病害发生率。

关键词:甜樱桃;呼吸;包装;病害;感官品质

Respiratory Characteristics of Late-maturing Sweet Cherry Cultivars and Their Influence by Temperature and Packaging Methods

ZHI Huanhuan[1,2,3,4] *DONG Yu*[1,2,3,5*]

(1. Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Laboratory for Research and Utilization of Qinghai-Tibet Plateau Germplasm Resources, Xining 810016, China; 3. Key Laboratory of Qinghai-Tibetan Plateau Biotechnology (Qinghai University), Ministry of Education, Xining 810016, China; 4. Key Laboratory of Agricultural Integrated Pest Management, Xining 810016, China; 5. Department of Horticulture, Oregon State University, Hood River 97031, USA)

Abstract: [**Objective**] This study aims to develop suitable packaging strategies for sweet cherry varieties with different respiratory characteristics. [**Method**] The sweet cherry cultivars ‘Lapins’ and ‘Regina’ were put in closed systems with different O_2 volume fractions at 0, 5, and 10 ℃. The changes in O_2 consumption rate, CO_2 consumption rate, and respiratory quotient were monitored. Additionally, the changes of gas components, quality, and physiological disorders were assessed for the two cultivars treated with polyethylene (PE) and modified

基金项目:青海省基础研究计划应用基础研究项目(2023-ZJ-762)。

通信作者:董宇(1983—),男,博士,助理研究员,硕士研究生导师,主要从事农产品贮藏与保鲜研究。E-mail: dongyu8306@hotmail.com

收稿日期:2024-08-28 **修回日期:**2024-10-28

atmosphere packaging (MAP) after 4 weeks of storage at 0, 5, and 10 ℃. [**Result**] ‘Lapins’ had lower O_2 consumption rate and CO_2 consumption rate than ‘Regina’ at the beginning of storage under the same temperature. The O_2 volume fractions of ‘Lapins’ were lower than those of ‘Regina’ during anaerobic respiration. For both cultivars, the O_2 consumption in the MAP accelerated as the storage temperature increased. After storage at 10 ℃ for 4 weeks, the O_2 volume fraction of ‘Regina’ in the MAP fell into the O_2 volume fraction range in the case of anaerobic respiration. The analyses of fruit quality, physiological disorders, and sensory quality showed that the fruit firmness, titratable acid mass fractions, texture scores, and flavor scores of ‘Lapins’ and ‘Regina’ decreased with the increase in storage temperature. At the same storage temperature, the fruit quality and sensory flavor scores of ‘Lapins’ and ‘Regina’ treated with MAP were higher than those treated with PE. In addition, Analysis of variance revealed that cultivar × storage temperature × packaging method significantly affected O_2 volume fractions, CO_2 volume fractions, and flavor scores. [**Conclusion**] ‘Regina’ displayed higher respiratory level and O_2 volume fraction threshold for anaerobic respiration than ‘Lapins’. At 0~5 ℃, MAP inhibited the O_2 consumption, maintained high storage and sensory quality, and reduced the incidences of physiological disorders in both cultivars.

Keywords: sweet cherry; respiration; packaging; disorder; sensory quality

甜樱桃因其独特的口感且富含多种人体必需的维生素和矿物质，深受国内外消费者喜爱。然而，甜樱桃属于易腐水果，且果实含糖量较高，若贮藏温度过高、湿度较大，易导致果实遭受病原菌侵染而腐烂变质，还会出现果面皱缩失去光泽、果梗失绿、果肉褐变并伴有苦涩味等问题，严重降低消费者的购买欲[1-4]。目前，MAP技术已在国内外甜樱桃出口包装中得到广泛应用[5-6]。该技术利用果实自身的呼吸作用及包装材料的透气性，被动降低袋内O_2体积分数并提高CO_2体积分数，从而有效降低果实的呼吸速率、延缓衰老进程，减少生理病害发生，实现延长甜樱桃贮藏期的目的[7]。然而，若在甜樱桃MAP策略中未充分考虑甜樱桃品种[8]、贮运温度[9]、MAP材料[10]等因素，反而会加剧品质劣变与生理病害的发生。因此，根据品种特异性和温度适应性制定针对性的MAP策略，对延长甜樱桃贮藏期、保持其高品质具有重要意义。甜樱桃‘拉宾斯’和‘雷吉纳’是美国俄勒冈州和华盛顿州的主栽晚熟品种，这2个品种的果实主要经MAP后海运销往亚洲市场。美国农业部（USDA）统计，2024年美国甜樱桃出口量达8.5万t，位居世界第二。基于此，研究这2个甜樱桃品种的呼吸特性，可为相关包装企业制定适宜的贮藏包装方案提供理论依据和技术支撑。

贮运温度是影响甜樱桃品质的关键因素[9,11]。通常，甜樱桃采收后会立即采用0 ℃冷水或冷风进行降温处理，该方法不仅能快速移除果实田间热量、提高果实硬度，还可缓解清洗、分拣及包装过程中可能产生的机械损伤[12]。将包装好的甜樱桃迅速放入0 ℃冷库并进行冷风处理，能够快速消除包装过程中果实内部出现的温度回升现象[13]。然后通过冷链将甜樱桃运至国内（7~10 d）及海外（空运1周、海运3~5周）市场，最终送到消费者手中[14]。研究表明，如果从果实采收到消费者购买的整个环节维持0 ℃贮藏，甜樱桃品质劣变进程会显著减缓，且生理病害发生率显著降低。但在实际贮运过程中，很难保证整个环节维持低温运输[15]。因此，作者首先分析了甜樱桃‘拉宾斯’和‘雷吉纳’的呼吸特性，随后采用PE袋和MAP处理果实，研究其在0 ℃（模拟贮藏温度）、5 ℃（模拟冰箱温度）和10 ℃（模拟运输和货架温度）条件下贮藏4周后，不同处理组的气体组分、品质、生理病害及感官品质变化。该研究旨在为后续针对不同甜樱桃品种制定个性化的MAP策略提供理论基础与科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

甜樱桃‘拉宾斯’与‘雷吉纳’：均于2019年7月采自美国俄勒冈州立大学哥伦比亚农业研究及推广中心的果园。果实筛选标准为：依据甜樱桃成熟色卡（Centre Technique Interprofessionnel

des Fruits et Légumes），选择果皮颜色 5~6 级且无病虫害和机械损伤的果实；其中‘拉宾斯’果实硬度（288.43±8.43）g/mm，可滴定酸质量分数（0.77±0.07）%，可溶性固形物质量分数（18.27±0.75）%；‘雷吉纳’果实硬度（249.17±4.09）g/mm，可滴定酸质量分数（0.97±0.05）%，可溶性固形物质量分数（20.67±0.40）%。

MAP 袋：澳大利亚 Amcor 公司，商品名为 LifeSpan®，型号 L227，尺寸为 280 mm×200 mm，袋厚度为 25 μm，其 O_2 透过率和 CO_2 透过率分别为 3.0×10^{-7}、6.5×10^{-7} mol/(m^2·s)；PE 打孔袋：美国 Ziploc 公司，尺寸为 177 mm×188 mm，袋厚为 35 μm，每袋打孔 8 个，孔径 8 mm，孔距 50 mm，透气率为 2.0%。

硬度计：FirmTech-2 型，美国 BioWork 公司；顶空气体测定仪：900161 型，美国 Bridge 分析公司；榨汁机：ACME 6001C 型，美国 Waring 公司；终点滴定分析仪：DL-15 型，瑞士 Mettler-Toledo 公司；数字糖度计：PAL-1 型，日本 Atago 公司。

1.2 呼吸特性测定

从‘拉宾斯’和‘雷吉纳’2 个品种的果实中随机取 3 组，每组 90 个果实。从中取 30 个果实称质量，并将其放入 1 L 密封罐中，每个密封罐均连接 2 个胶皮管，分别用于连接顶空气体测定仪的进气孔和出气孔，每组设置 3 个密封罐。样品分装后，将各组密封罐分别置于 0、5、10 ℃的恒温库（10 m^3）中静置 4 h，使用顶空气体测定仪测定罐内气体组分，并记录 O_2 与 CO_2 体积分数变化，待密封罐中 O_2 体积分数降至 0.1% 时停止测定。根据式（1）~（3）计算 O_2 消耗率、CO_2 消耗率和呼吸熵[16]。

$$O=\frac{W_1\times(V_1-V_2)}{W_2\times T\times 100} \quad (1)$$

式中：

O——O_2 消耗率，μg/(kg·s)；

W_1——O_2 消耗质量，μg；

V_1——密封罐体积，μL；

V_2——果实体积，μL；

W_2——果实质量，kg；

T——测定时间，s；

100——换算系数，μL。

$$C=\frac{W_2\times(V_1-V_2)}{W_2\times T\times 100} \quad (2)$$

式中：

C——CO_2 消耗率，μg/(kg·s)；

W_2——CO_2 消耗质量，μg；

V_1——密封罐体积，μL；

V_2——果实体积，μL；

W_2——果实质量，kg；

T——测定时间，s；

100——换算系数，μL。

$$R=\frac{C}{O} \quad (3)$$

式中：

R——呼吸熵；

C——CO_2 消耗率，μg/(kg·s)；

O——O_2 消耗率，μg/(kg·s)。

1.3 甜樱桃包装及贮藏处理

将采收后的‘拉宾斯’和‘雷吉纳’果实分别于 0 ℃预冷 24 h，随机分为 3 组，每组含 1 200 个果实，分别对应不同处理温度。将其中 200 个果实装入 1 个 PE 袋（开孔率 2%，厚度 40 μm，规格 40 cm×30 cm）中，共装 3 袋；再将 200 个果实装入 1 个 MAP 袋中，共装 3 袋。完成包装后，将 PE 包装和 MAP 各 3 袋分别置于 0、5、10 ℃的恒温库（相对湿度为 90%）中。贮藏 4 周后，先在各果实贮藏温度下测定包装袋内气体组分；随后将果实取出，在 20 ℃下静置 4 h，待果实中心温度升至室温后，进行果实品质、生理病害测定及感官评价。

1.4 气体组分测定

采用顶空气体测定仪测定各温度下 PE 包装和 MAP 内 O_2 和 CO_2 体积分数，重复测定 3 次。

1.5 果实品质测定

1.5.1 果实硬度

采用硬度计测定果实硬度，测定速度为 12 mm/s，每袋取 50 个果实，重复测定 3 次。

1.5.2 可溶性固形物质量分数

将测完硬度的果实去核，切取 100 g 果肉，用榨汁机榨汁并用 200 目尼龙滤布将果渣与果汁分离，用数字糖度计测定可溶性固形物质量分数，重复测定 3 次。

1.5.3 可滴定酸质量分数

取 1.5.2 节处理后的果汁 10 mL，加入双蒸水至 50 mL。随后用终点滴定分析仪测定样品的可

滴定酸质量分数，使用0.1 mol/L的标准NaOH溶液作为滴定液，当样品pH达到8.1时停止滴定。根据式(4)计算可滴定酸质量分数。

$$K=\frac{c\times V_3\times V_4\times 0.067}{W_3\times V_5}\times 100\% \quad (4)$$

式中：

K——可滴定酸质量分数，%；

c——标准NaOH溶液浓度，mol/L；

V_3——消耗标准NaOH溶液的体积，L；

V_4——待测样品总体积，L；

V_5——果汁体积，L；

W_3——样品质量，g；

0.067——苹果酸折光系数，g/mol。

1.6　生理病害测定

1.6.1　失重率

称量各处理组样品在入库前及贮藏4周后的果实质量[14]，根据式(5)计算失重率。

$$L=\frac{(W_4-W_5)}{W_4}\times 100\% \quad (5)$$

式中：

L——失重率，%；

W_4——包装前果实总质量，g；

W_5——贮藏4周后果实总质量，g。

1.6.2　腐烂率

从各处理组中随机取50个果实[14]，根据式(6)计算腐烂率。

$$f=\frac{R_1}{N}\times 100\% \quad (6)$$

式中：

f——腐烂率，%；

R_1——贮藏4周后腐烂的果实数量，个；

N——果实数量，个。

1.6.3　果梗褐变率

若果梗褐变面积超过总面积的30%，则定义该果实为果梗褐变果实。从各处理组中随机取50个果实[14]，根据式(7)计算果梗褐变率。

$$S=\frac{S_1}{N}\times 100\% \quad (7)$$

式中：

S——果梗褐变率，%；

S_1——贮藏4周后果梗褐变的果实数量，个；

N——果实数量，个。

1.6.4　果面凹陷指数

果实表面凹陷斑分级标准依据凹陷斑的数量和大小进行制定。分级标准为：1级，无凹陷斑；2级，有1~2个凹陷斑，且直径小于1 mm；3级，有2~3个凹陷斑，且直径为1~2 mm；4级，有3~4个凹陷斑，且直径为2~3 mm；5级，多于4个凹陷斑，且直径大于3 mm。从各处理组中随机取50个果实[14]，根据式(8)计算果实凹陷指数。

$$I=\frac{\sum(i\times N_i)}{N} \quad (8)$$

式中：

I——果面凹陷指数；

i——等级，i=1，2，3，4；

N_i——贮藏4周后的果面凹陷数量，个；

N——果实数量，个。

1.7　感官评价

选择10名(男女各半)经过专业培训且具有感官评价经验的人员组成感官评定小组，参照表1对果实的质地和风味进行打分，取平均值[17]。

表1　感官评价标准

Table 1　Sensory evaluation standard

质地	风味	得分/分
果肉干缩	有强烈的异味	1
果肉发软	有轻微的异味	3
果肉略显软	无异味	5
果肉较脆	带有一定的香气	7
果肉质地紧密、脆	香气浓郁	9

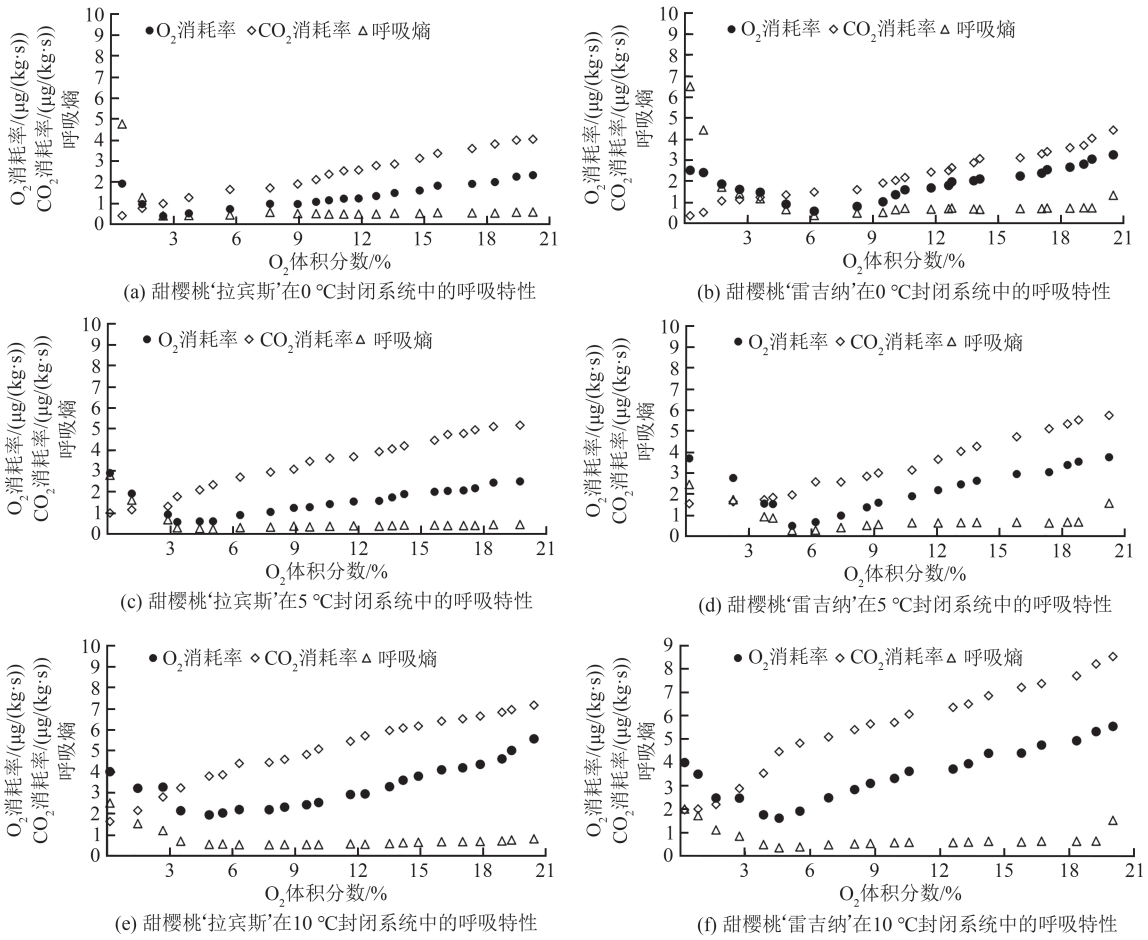
1.8　数据统计

采用DPS软件进行Fisher's LSD单因素、双因素和三因素方差分析，P<0.05表示差异显著，并用Excel软件绘图。

2　结果与讨论

2.1　甜樱桃'拉宾斯'和'雷吉纳'的呼吸特性

作者所在课题组前期研究发现，早熟甜樱桃'宾库'的O_2消耗率和CO_2消耗率均高于晚熟甜樱桃'甜心'[16]。本研究中甜樱桃'拉宾斯'和'雷吉纳'均为晚熟品种，虽然在0、5、10 ℃条件下2个品种的O_2消耗率均随O_2体积分数下降而降低，但在5、10 ℃条件下'雷吉纳'的O_2消耗率高于'拉宾斯'，见图1。结果表明，即使是成熟度相同的甜樱桃，不同品种间仍存在呼吸特性差异。在不同温



(a) 甜樱桃‘拉宾斯’在0 ℃封闭系统中的呼吸特性　(b) 甜樱桃‘雷吉纳’在0 ℃封闭系统中的呼吸特性

(c) 甜樱桃‘拉宾斯’在5 ℃封闭系统中的呼吸特性　(d) 甜樱桃‘雷吉纳’在5 ℃封闭系统中的呼吸特性

(e) 甜樱桃‘拉宾斯’在10 ℃封闭系统中的呼吸特性　(f) 甜樱桃‘雷吉纳’在10 ℃封闭系统中的呼吸特性

图 1　不同温度下 O_2 体积分数对甜樱桃‘拉宾斯’和‘雷吉纳’呼吸特性的影响

Fig. 1　Effects of O_2 volume fractions on respiratory characteristics of ‘Lapins’ and ‘Regina’ at different temperatures

度下，甜樱桃‘拉宾斯’和‘雷吉纳’的 CO_2 消耗率均随 O_2 体积分数下降呈先降低后升高的趋势，但 2 个品种 CO_2 消耗率上升的拐点存在差异，‘拉宾斯’CO_2 消耗率的拐点出现在 O_2 体积分数为 2.73%~3.33% 时，‘雷吉纳’CO_2 消耗率的拐点出现在 O_2 体积分数为 4.57%~6.19% 时。此外，2 种甜樱桃的呼吸熵在各自 CO_2 消耗率拐点处，也随着 O_2 体积分数下降而急剧升高。已有研究表明，低氧条件下呼吸熵快速上升是植物发生无氧呼吸的一个重要特征[18]。综上所述，相较于‘雷吉纳’，‘拉宾斯’的呼吸水平更低，且其发生无氧呼吸的 O_2 体积分数阈值也更低。

2.2　温度和包装方式对甜樱桃‘拉宾斯’和‘雷吉纳’气体组分的影响

由表 2 可知，无论是‘拉宾斯’还是‘雷吉纳’，在 0、5、10 ℃贮藏 4 周后，采用 2% 开孔率的 PE 袋包装的果实，其袋内 O_2 与 CO_2 体积分数未发生明

表 2　温度和包装方式对甜樱桃‘拉宾斯’和‘雷吉纳’O_2 和 CO_2 体积分数的影响

Table 2　Effects of temperature and packaging method on O_2 and CO_2 volume fractions of ‘Lapins’ and ‘Regina’

品种	贮藏温度/℃	包装方式	O_2 体积分数/%	CO_2 体积分数/%
拉宾斯	0	PE 包装	21.0±0.0^{a}	0.0±0.0^{f}
		MAP	8.4±0.2^{b}	8.5±0.2^{e}
	5	PE 包装	21.0±0.0^{a}	0.0±0.0^{f}
		MAP	6.2±0.2^{c}	9.9±0.4^{d}
	10	PE 包装	21.0±0.0^{a}	0.0±0.0^{f}
		MAP	4.6±0.2^{e}	11.8±0.4^{b}
雷吉纳	0	PE 包装	21.0±0.0^{a}	0.0±0.0^{f}
		MAP	8.2±0.1^{b}	8.5±0.2^{e}
	5	PE 包装	21.0±0.0^{a}	0.0±0.0^{f}
		MAP	5.7±0.1^{d}	11.3±0.2^{c}
	10	PE 包装	21.0±0.0^{a}	0.0±0.0^{f}
		MAP	3.5±0.4^{f}	12.7±0.3^{a}

注：同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

显变化（即与外界气体组分一致）；而MAP内O_2体积分数随贮藏温度的升高快速降低，同时CO_2体积分数快速升高。作者所在课题组前期研究发现，当MAP内O_2体积分数控制在6.5%~7.5%、CO_2体积分数维持在8%~10%时，果实于0 ℃贮藏4~6周后，仍能保持较高的贮藏品质及抗坏血酸和可滴定酸含量；若O_2体积分数进一步降低，则果实易发生无氧呼吸，产生大量乙醇，进而对果实造成生理伤害[7]。本研究结果显示，在10 ℃贮藏4周后，甜樱桃‘拉宾斯’和‘雷吉纳’的MAP内O_2体积分数分别降至（4.6±0.2）%和（3.5±0.4）%。结合呼吸特性结果可知，此时‘拉宾斯’的MAP内O_2体积分数尚未达到其无氧呼吸的阈值，而‘雷吉纳’已达到该阈值。表明10 ℃不适合‘雷吉纳’长期贮藏，该温度下贮藏的果实极易发生无氧呼吸。方差分析结果显示，O_2和CO_2体积分数受品种（*A*）、贮藏温度（*B*）、包装方式（*C*）、*A*×*B*、*A*×*C*、*B*×*C*及*A*×*B*×*C*的影响极显著（$P<0.01$），见表3。表明品种、贮藏温度及包装方式共同调节甜樱桃包装袋内的气体组分。

表3　气体组分的方差分析结果

Table 3　Analysis of variance results of O_2 and CO_2 volume fractions

因素	*P*	
	O_2体积分数	CO_2体积分数
A	0.000	0.000
B	0.000	0.000
C	0.000	0.000
A×*B*	0.006	0.002
A×*C*	0.000	0.000
B×*C*	0.000	0.000
A×*B*×*C*	0.006	0.002

2.3　温度和包装方式对甜樱桃‘拉宾斯’和‘雷吉纳’果实品质和生理病害的影响

果实硬度、可溶性固形物及可滴定酸是衡量甜樱桃贮藏品质的关键指标[8,19]。甜樱桃‘拉宾斯’和‘雷吉纳’的果实硬度和可滴定酸质量分数均随贮藏温度的升高而快速降低，见表4。在同一贮藏温度下，采用MAP的‘拉宾斯’或‘雷吉纳’，其果实硬度和可滴定酸质量分数均高于PE包装组。可溶性固形物质量分数虽在不同品种和贮藏温度下存在差异，但可溶性固形物质量分数不受*C*、*A*×*B*、*A*×*C*、*B*×*C*和*A*×*B*×*C*的影响，见表5。结果表明，保持低温（0、5 ℃）环境并采用MAP更有利于甜樱桃‘拉宾斯’和‘雷吉纳’维持较高的果实硬度和可滴定酸质量分数。

消费者在选择甜樱桃的过程中，对果实的外在品质有着极高的要求，如腐烂、果梗干枯、果梗变褐、果面皱缩及果面凹陷等均会显著降低消费者的购买欲[20]。在同一贮藏温度下，PE包

表4　温度和包装方式对甜樱桃‘拉宾斯’和‘雷吉纳’果实品质和生理病害的影响

Table 4　Effects of temperature and packaging method on the fruit quality and physiological disorders of ‘Lapins’ and ‘Regina’

品种	贮藏温度/℃	包装方式	果实硬度/（g/mm）	可溶性固形物质量分数/%	可滴定酸质量分数/%	失重率/%	腐烂率/%	果梗褐变率/%	果面凹陷指数
拉宾斯	0	PE包装	310.73±4.52^{b}	18.0±0.2^{c}	0.66±0.02^{e}	2.51±0.06^{e}	1.3±1.2^{ef}	4.7±1.2^{gh}	1.6±0.2^{fg}
		MAP	327.47±4.29^{a}	18.0±0.2^{c}	0.75±0.01^{cd}	0.50±0.04^{i}	0.7±1.2^{f}	0.0±0.0^{i}	1.2±0.1^{i}
	5	PE包装	309.47±8.80^{b}	18.0±0.4^{c}	0.64±0.01^{e}	3.95±0.23^{c}	4.7±1.2^{d}	14.7±3.1^{de}	2.3±0.2^{c}
		MAP	311.50±0.95^{b}	17.9±0.1^{c}	0.72±0.02^{d}	1.20±0.04^{g}	1.3±1.2^{ef}	5.3±1.2^{fg}	1.9±0.1^{de}
	10	PE包装	271.33±4.54^{de}	18.2±0.1^{c}	0.46±0.02^{g}	4.85±0.34^{b}	10.0±4.0^{ab}	24.7±3.1^{b}	3.4±0.1^{a}
		MAP	300.53±0.70^{c}	18.0±0.1^{c}	0.67±0.02^{e}	2.06±0.09^{f}	4.7±1.2^{d}	13.3±2.3^{e}	2.6±0.2^{b}
雷吉纳	0	PE包装	302.80±10.90^{bc}	21.2±0.3^{a}	0.85±0.06^{ab}	3.16±0.10^{d}	2.7±1.2^{e}	6.7±1.2^{fg}	1.2±0.2^{hi}
		MAP	324.47±1.88^{a}	21.0±0.1^{ab}	0.87±0.02^{a}	0.91±0.05^{h}	0.7±1.2^{f}	1.3±1.2^{hi}	1.2±0.1^{i}
	5	PE包装	277.55±4.04^{d}	20.6±0.4^{b}	0.76±0.02^{c}	4.95±0.11^{b}	8.0±2.0^{b}	17.3±1.2^{cd}	2.1±0.3^{cd}
		MAP	299.80±1.55^{c}	20.8±0.3^{ab}	0.82±0.02^{b}	1.81±0.11^{f}	4.7±1.2^{d}	8.7±1.2^{f}	1.5±0.1^{gh}
	10	PE包装	240.33±6.16^{f}	21.2±0.3^{a}	0.59±0.02^{f}	5.88±0.26^{a}	14.0±2.0^{a}	39.3±5.0^{a}	2.7±0.2^{b}
		MAP	268.73±2.46^{e}	20.9±0.1^{ab}	0.74±0.03^{cd}	2.68±0.11^{e}	6.7±1.2^{c}	20.0±2.0^{c}	1.8±0.2^{ef}

注：同列不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

装的甜樱桃‘拉宾斯’和‘雷吉纳’的失重率、腐烂率、果梗褐变率和果面凹陷指数均高于MAP处理组，见表4；且在10 ℃贮藏条件下，生理病害的发生率均显著升高。方差分析结果显示，失重率、腐烂率、果梗褐变率、果面凹陷指数受*A*、*B*、*C*、*B*×*C*的影响显著（$P<0.05$），见表5。表明品种、贮藏温度与包装方式不仅各自对甜樱桃贮藏过程中生理病害的发生有调控作用，贮藏温度与包装方式的交互作用也会影响生理病害的发生。

表5 果实品质和生理病害的方差分析结果

Table 5 Analysis of variance results of fruit quality and physiological disorders

因素	*P*						
	果实硬度	可溶性固形物质量分数	可滴定酸质量分数	失重率	腐烂率	果梗褐变率	果面凹陷指数
A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
B	0.000	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
C	0.000	0.247	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
A×*B*	0.000	0.232	0.046	0.052	0.143	0.000	0.000
A×*C*	0.027	1.000	0.009	0.003	0.346	0.090	0.819
B×*C*	0.002	0.311	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000
A×*B*×*C*	0.055	0.290	0.310	0.775	0.774	0.090	0.054

2.4 温度和包装方式对甜樱桃‘拉宾斯’和‘雷吉纳’感官品质的影响

如果贮藏后的甜樱桃仍能保持较高的感官品质（如质地和风味），这对提升消费者购买力具有积极作用[21]。由表6可知，甜樱桃‘拉宾斯’和‘雷吉纳’的质地与风味得分随贮藏温度的升高而下降。在同一贮藏温度下，采用MAP的甜樱桃‘拉宾斯’或‘雷吉纳’的果实质地与风味得分均高于PE包装组。值得注意的是，在10 ℃贮藏温度下，无论是采用PE包装还是MAP，‘拉宾斯’和‘雷吉纳’的质地和风味得分均低于5分，处于消费者不能接受的范围。因此，避免果实长时间暴露在高贮藏温度下，对维持其感官品质具有重要作用[11,22-24]。方差分析结果显示，风味受*A*、*B*、*C*、*A*×*B*、*A*×*C*、*B*×*C*和*A*×*B*×*C*影响，见表7。表明通过风味可快速判断不同品种、贮藏温度和包装方式对甜樱桃感官品质的影响。

表6 温度和包装方式对甜樱桃‘拉宾斯’和‘雷吉纳’感官品质的影响

Table 6 Effects of temperature and packaging method on the sensory quality of ‘Lapins’ and ‘Regina’

品种	贮藏温度/℃	包装方式	质地得分/分	风味得分/分
拉宾斯	0	PE包装	5.7±0.2^{c}	5.3±0.3^{e}
		MAP	6.8±0.3^{a}	7.5±0.4^{b}
	5	PE包装	5.0±0.5^{de}	5.3±0.2^{e}
		MAP	5.3±0.2^{d}	6.3±0.2^{cd}
	10	PE包装	3.2±0.3^{g}	3.1±0.3^{h}
		MAP	4.4±0.4^{f}	4.1±0.2^{g}
雷吉纳	0	PE包装	5.3±0.2^{d}	6.0±0.2^{d}
		MAP	6.1±0.2^{b}	8.0±0.2^{a}
	5	PE包装	4.8±0.2^{e}	5.1±0.1^{e}
		MAP	5.6±0.2^{cd}	6.6±0.2^{c}
	10	PE包装	2.9±0.2^{g}	2.5±0.2^{i}
		MAP	3.7±0.2^{h}	4.7±0.4^{f}

注：同列不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

表7 感官品质的方差分析结果

Table 7 Analysis of variance results of sensory quality

因素	*P*	
	质地得分	风味得分
A	0.001	0.008
B	0.000	0.000
C	0.000	0.000
A×*B*	0.018	0.004
A×*C*	0.750	0.006
B×*C*	0.097	0.001
A×*B*×*C*	0.107	0.006

3 结论

无论哪种甜樱桃品种，在保证冷链（0 ℃）贮藏条件和最适包装容积的前提下，其MAP的果实贮藏期可延长至4~6周。然而在实际操作过

程中，尤其是将果实运输至海外市场时，常会遇到暂时性温度波动，如空运时装载和运输环节、内陆运输过程及海运装箱与运输环节的温度可能达不到0 ℃。因此，对O_2体积分数波动较敏感的品种，受温度的影响更大。虽然作者所在实验室前期研究发现，早熟甜樱桃品种的呼吸强度高于晚熟品种，但该研究发现，即使是晚熟品种，也存在呼吸强度相对较高的品种，且随着贮藏温度的升高，发生无氧呼吸的O_2体积分数阈值也随之升高。MAP可通过提高袋内CO_2体积分数、降低O_2体积分数来抑制果实呼吸，但当贮藏温度升高时，其保鲜效果会随之降低，主要表现为果实品质劣变加速、生理病害发生率上升及感官品质下降。因此，针对特定甜樱桃品种开发专用的MAP以维持其贮藏品质，还需要分析该包装适用的温度范围，只有这样才能充分发挥MAP的最佳效果。该研究发现，甜樱桃‘雷吉纳’较‘拉宾斯’具有更高的呼吸速率，且其发生无氧呼吸的O_2体积分数阈值更高，对低氧环境更为敏感。温度会显著影响果实的呼吸代谢及品质，0~5 ℃结合MAP可有效抑制O_2消耗率、延缓品质劣变、降低生理病害并维持感官品质。而10 ℃贮藏易导致O_2体积分数过低，尤其不利于‘雷吉纳’的贮藏。MAP在适宜温度下优势显著，但需根据品种特性优化包装参数。综上所述，制定基于品种呼吸特性和温度适应性的个性化MAP策略，对提升甜樱桃采后品质与贮运效率具有重要意义。

参考文献

[1] FAIENZA M F, CORBO F, CAROCCI A, et al. Novel insights in health-promoting properties of sweet cherries [J]. Journal of Functional Foods, 2020, 69: 103945.

[2] AFONSO S, OLIVEIRA I, RIBEIRO C, et al. Innovative edible coatings for postharvest storage of sweet cherries [J]. Scientia Horticulturae, 2023, 310: 111738.

[3] BLANDO F, OOMAH B D. Sweet and sour cherries: origin, distribution, nutritional composition and health benefits[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 86: 517-529.

[4] DEVASIRVATHAM V, TAN D K Y. Key determinants of the physiological and fruit quality traits in sweet cherries and their importance in a breeding programme [J]. Horticulturae, 2022, 8(8): 694.

[5] GÜNEYLİ A, ONURSAL C E, SEÇMEN T B, et al. The use of controlled atmosphere box in sweet cherry storage [J]. Horticultural Studies, 2022, 39(2): 33-40.

[6] CHIABRANDO V, GARAVAGLIA L, GIACALONE G. The postharvest quality of fresh sweet cherries and strawberries with an active packaging system[J]. Foods, 2019, 8(8): 335.

[7] WANG Y, BAI J H, LONG L E. Quality and physiological responses of two late-season sweet cherry cultivars ‘Lapins’ and ‘Skeena’ to modified atmosphere packaging (MAP) during simulated long distance ocean shipping[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 110: 1-8.

[8] ZHI H H, DONG Y. Evaluation of integrated ultrasound and $CaCl_2$ in hydrocooling water on the quality of ‘Bing’, ‘Lapins’, and ‘Sweetheart’ cherries stored in modified atmosphere packaging[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 299: 111060.

[9] 张雪丹，杨娟侠，木志杰，等. 温度对自发气调包装贮藏“美早”樱桃品质的影响[J]. 山东农业科学，2018，50(11)：143-147.
ZHANG X D, YANG J X, MU Z J, et al. Effect of temperature on quality of Meizao cherry fruit stored with MAP[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018, 50(11): 143-147.(in Chinese)

[10] 支欢欢，马永强，马红斌，等. 两种气调包装对青海地区4种主栽甜樱桃贮藏品质和生理病害的影响[J]. 青海科技，2024，31(1)：174-180.
ZHI H H, MA Y Q, MA H B, et al. Effects of two modified atmosphere packagings on storage quality and physiological disorders of four sweet cherry cultivars in Qinghai regions[J]. Qinghai Science and Technology, 2024, 31(1): 174-180.(in Chinese)

[11] XIN Y, LIU Z Z, ZHANG Y W, et al. Effect of temperature fluctuation on colour change and softening of postharvest sweet cherry[J]. RSC Advances, 2021, 11(37): 22969-22982.

[12] 彭丽，高姗，熊思国，等. 不同预冷温度对甜樱桃果实保鲜效果的影响[J]. 包装工程，2023，44(7)：104-114.
PENG L, GAO S, XIONG S G, et al. Effects of different precooling temperature on the preservation of sweet cherry

[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(7): 104-114. (in Chinese)

[13] RICARDO-RODRIGUES S, LARANJO M, AGULHEIRO-SANTOS A C. Methods for quality evaluation of sweet cherry[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(2): 463-478.

[14] 李小娟,支欢欢,董宇. 外源次生代谢物结合冷水处理对甜樱桃贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技,2019,40(7):237-242.
LI X J, ZHI H H, DONG Y. Effects of exogenous secondary metabolites combined with hydrocooling water on quality attributes of sweet cherry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(7): 237-242. (in Chinese)

[15] SEN F, OKSAR R E, GOLKARIAN M, et al. Quality changes of different sweet cherry cultivars at various stages of the supply chain[J]. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 2014, 42(2): 501-506.

[16] WANG Y, LONG L E. Respiration and quality responses of sweet cherry to different atmospheres during cold storage and shipping[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 92: 62-69.

[17] 支欢欢,刘琦琦,徐娟,等. 微酸电解水结合不同钙源处理改善“尖脆”枣果实采后货架品质[J]. 现代食品科技,2018,34(9):45-50,214.
ZHI H H, LIU Q Q, XU J, et al. Slightly acidic electrolyzed-water in combination with different calcium sources improved storage quality of “Jiancui” jujube fruit during shelf-life storage[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(9): 45-50, 214. (in Chinese)

[18] YAHIA E M. Respiratory metabolism [M]. Cambrigeshire: Woodhead Publishing, 2019: 73-91.

[19] LI M, WANG Y, DONG Y. Pre-harvest application of harpin β protein improves fruit on-tree and storage quality attributes of ‘Lapins’ and ‘Regina’ sweet cherry (*Prunus avium* L.)[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 263: 109115.

[20] HUI Y H. Handbook of fruits and fruit processing[M]. Iowa: Blackwell Pub., 2006: 359-367.

[21] SILVA V, PEREIRA S, VILELA A, et al. Preliminary insights in sensory profile of sweet cherries[J]. Foods, 2021, 10(3): 612.

[22] RICARDO-RODRIGUES S, LARANJO M, AGULHEIRO-SANTOS A C. Methods for quality evaluation of sweet cherry[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(2): 463-478.

[23] 任晓芬,张蕾,童山虎,等. 主被动双模式冷藏集装箱设计及箱内环境特性分析[J]. 食品与机械,2024,40(9):92-98.
REN X F, ZHANG L, TONG S H, et al. Design of active and passive dual modes refrigerated container and analysis of environmental characteristics in the container[J]. Food & Machinery, 2024, 40(9): 92-98. (in Chinese)

[24] 支欢欢,代慧敏,董宇. 不同包装方式下海藻刺激素对冷藏甜樱桃‘雷尼’贮藏品质的影响[J]. 食品与生物技术学报,2024,43(10):130-139.
ZHI H H, DAI H M, DONG Y. Effect of seaweed biostimulant on storage quality of ‘rainier’ sweet cherries during cold storage under different packing methods[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(10): 130-139. (in Chinese)

（责任编辑：刘冬梅）