

动态低 O₂ 和高 CO₂ 气调处理对“Bartlett”梨乙烯生成和货架品质的影响

董宇^{1,2,3*}, 支欢欢^{1,4}

(1. 青海大学青海省农林科学院, 青海西宁 810016) (2. 俄勒冈州立大学园艺系, 美国胡德里弗 97031)

(3. 青海大学青藏高原生物技术教育部重点实验室, 青海省马铃薯育种重点实验室, 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)

摘要: 该研究旨在与商业气调(O₂=2.25%且CO₂<0.10%)比较,探究动态气调(O₂=0.90%~1.25%且CO₂=0.06%~0.17%)对“Bartlett”梨贮藏中实时乙烯数量以及两次出库包装后(2019年12月3日和2020年1月21日)在20℃贮藏1和5d各气调库中不同果园梨果实品质和生理病害发生的影响。通过实时乙烯数量与褐斑病发病率之间的关系,预测动态气调处理的果实最适出库包装时间。与商业气调库中(CA23)6个果园果实相比,动态气调库(CA24)中6个果园果实在贮藏过程中乙烯数量减少了42.12%,在20℃贮藏1和5d后能显著抑制果皮叶绿素降解($p<0.05$)以及贮藏5d后褐斑病发生($p<0.05$),但对果实乙烯生成率、出库硬度、软化能力、可溶性固形物和可滴定酸降解影响不显著。在第二次出库包装时,CA23平均褐斑病发病率为30.00%(已达到商业不可接受范围30.00%),但CA24为17.04%。通过实时乙烯数量与褐斑病发病率之间的线性规律,得出在2020年3月7日CA24平均褐斑病发病率为30.00%。相比与商业气调,动态气调可延长1个月果实寿命,使其更具商业应用价值。

关键词: 西洋梨; 动态气调; 实时乙烯数量; 货架品质; 生理病害

文章编号: 1673-9078(2022)11-132-140

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.11.0012

Effect of Dynamic Low-O₂ and High-CO₂ Modified Atmosphere Treatments on Ethylene Production and Shelf Quality of ‘Bartlett’ Pears

DONG Yu^{1,2,3*}, ZHI Huanhuan^{1,4}

(1. Qinghai Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China)

(2. Department of Horticulture, Oregon State University, Hood River, OR 97031, USA)

(3. Key Laboratory of Biotechnology, Ministry of Education Qinghai-Tibet Plateau, Key Laboratory of Potato Breeding Qinghai Province, Qinghai University, Xining 810016, China)

(4. Key Laboratory of Agricultural Integrated Pest Management, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of dynamic controlled atmosphere (O₂=0.90%~1.25% and CO₂=0.06%~0.17%) on the real-time ethylene content of ‘Bartlett’ pears in comparison with commercial controlled atmosphere (CA) (O₂=2.25% and CO₂<0.10%). The effects of each controlled atmosphere on the fruit quality and physiological disease occurrence for the fruits from different orchards stored at 20 °C for 1 day and 5 days after being taken out from the storage chamber for packaging (December 3, 2019 and January 21, 2020). Based on the relationship between the real-time ethylene quantity and the incidence of brown spot disease, the optimal timing for taking the fruit out of the dynamic controlled atmosphere for packaging was predicted. Compared to the pears from 6 orchards in the commercial CA room (CA 23), the ethylene content of the pears from 6 orchards in the dynamic CA room (CA 24) decreased by 42.12% during storage. The dynamic CA treatment

引文格式:

董宇,支欢欢.动态低 O₂ 和高 CO₂ 气调处理对“Bartlett”梨乙烯生成和货架品质的影响[J].现代食品科技,2022,38(11):132-140

DONG Yu, ZHI Huanhuan. Effect of dynamic low-O₂ and high-CO₂ modified atmosphere treatments on ethylene production and shelf quality of ‘Bartlett’ pears [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(11): 132-140

收稿日期: 2022-01-06

基金项目: Washington Tree Fruit Research Commission (PR-17-106); 国家自然科学基金项目 (31501539)

作者简介: 董宇 (1983-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 农产品贮藏与保鲜, E-mail: dongyu8306@hotmail.com

significantly inhibited the degradation of peel chlorophyll ($p < 0.05$) after 1 and 5 d of storage at 20 °C, and the incidence of brown spots after 5 d of storage at 20 °C ($p < 0.05$), whilst causing no changes in the ethylene production rate, fruit firmness, softening potential, soluble solids content, and titratable acid. Upon the second out-for-packing, the average incidence of brown spots for the fruits in CA 23 was 30.00% (which reached the commercially unacceptable range, 30.00%), whilst the average incidence of brown spots for the fruits in CA 24 was 17.04%. According to the linear relationship between the real-time ethylene cumulative quantity and the incidence of brown spots, the average incidence of brown spots for the fruits in CA 24 would be 30.00% on March 7, 2020. Compared to the commercial CA treatment, the dynamic CA treatment extends the fruit storage life by 1 month, indicating that the dynamic CA treatment is more valuable for commercial applications.

Key words: *Pyrus communis* L.; dynamic O₂ and CO₂; real-time ethylene cumulative; shelf quality; physiological disorders

在美国西北地区（主要包括华盛顿州和俄勒冈州），“Bartlett”梨（*Pyrus communis* L.）是目前种植面积仅次于“d'Anjou”梨的重要西洋梨品种之一^[1]。作为典型的呼吸跃变型果实，西洋梨需达到需冷量阈值，即经过低温（1 到-1.1 °C）处理后，才能启动果实在货架市售过程中（20 到 24 °C）后熟、软化，并散发出诱人的香气^[2-6]。对于美国西北地区所产的“Bartlett”梨，果实在冷库（-1.1 °C）贮藏~30 d 后可激活其后熟软化，如果是在气调环境中（O₂ 体积分数为 2.00%~2.50%且 CO₂ 体积分数 < 1.00%）则需要~60 d 才能启动后熟^[7,8]，由此可知气调贮藏能增加“Bartlett”梨果实的需冷量。如果果实需冷量未达到阈值，则在市售过程这些果实将可能丧失软化能力或需要更长的货架时间才能变软，此时果实因香气不足，口感极差，严重影响消费者的购买欲^[2-4,6]。此外，本实验室前期研究发现降低 O₂ 体积分数从 2.00%到 1.00%可显著延长“Bartlett”梨的需冷时间，使其软化速度变慢，但果实腐烂率和褐斑病发病率均低于 2.00% O₂ 贮藏的果实^[9]。因此，如何在降低 O₂ 浓度的同时不影响梨果实后熟软化，并抑制相关生理病害发生，是西洋梨包装厂所面临迫切解决的关键问题。

目前研究已证实“Bartlett”梨果实软化速度是受乙烯所调控^[2-4,10,11]。但采收时梨果实内源乙烯生成量很低，故采收后无法立即启动后熟软化，因此需要在低温贮藏过程中逐渐增加果实内源乙烯合成相关酶活性[如 1-Aminocyclopropane-1-Carboxylic Acid（ACC）Oxidase（ACO）和 ACC Synthase（ACS）酶]以及相关基因表达（如 *PcACS1a* 和 *PcACO1*），以便在货架过程中生成大量乙烯，促进果实后熟，释放香气^[12,13]，而较低的 O₂ 浓度可显著抑制 ACC 和 ACS 酶活性，最终延缓果实后熟软化。但如果过度延长贮藏时间则会增加果实生理病害的发生（如腐烂率和褐斑病发病率 > 30.00%，超出包装厂可接受的范围），并伴随着果肉干缩、汁液少、木栓化严重、香气丧失^[14-18]，最终造成终端消费市场大范围退货，严重影响包装厂和果农收益。因此，在气调贮藏过程中，找到最适出库包装时间且

降低生理病害发生，对整个西洋梨产业具有重要意义。故本试验采用动态低 O₂ 和高 CO₂ 浓度处理“Bartlett”梨，对比 2 个商业出库时间梨果实的货架品质和生理病害发生率，为商业化应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

从 2019 年 8 月 17 日到 8 月 27 日，“Bartlett”梨陆续采自以下 10 个果园，编号为 Lot021、Lot123、Lot301、Lot320、Lot333、Lot361、Lot450、Lot655、Lot850 和 Lot854（Hood River, Oregon, USA）。每个果园选择成熟度相近、无病虫害和机械损伤的果实（采收时各果园的果实硬度未测定），立即放入储梨箱（每个储梨箱 1.50×1.50×1.00 m，每箱~1500 kg）中，共计 100 个，其中 Lot320 和 Lot655 果园 200 箱。将 Lot122、Lot301、Lot320、Lot655、Lot850 和 Lot854 果园的梨果实（每个果园 100 箱）放入 Duckwall-Pooley 包装厂的商业气调库 CA 23（0 °C）；Lot021、Lot320、Lot333、Lot361、Lot450 和 Lot655 果园的梨果实（每个果园 100 箱）放入气调库 CA 24（0 °C）。待所有果园果实入库后，开始进行气调处理，且贮藏温度由 0 °C 降至 -1.1 °C。在 2019 年 12 月 3 日（第一次出库包装时间每个果园取出 3 个储梨箱）和 2020 年 1 月 21 日（第二个出库包装时间每个果园取出 97 个储梨箱）分别从 CA 23 和 CA 24 气调库中取出“Bartlett”梨，随后进行清洗、分拣及包装处理，然后将包装后的各果园果实取 6 箱（每箱 100 个果实），立即运回美国俄勒冈州胡德里弗农业研究和推广中心进行货架品质及生理病害调查。

1.1.2 仪器设备

实时乙烯数量监测仪，美国 Strella 公司；GC-8A 型气相色谱仪，日本 Shimadzu 公司；GS-14 型质构仪，南非 Güss 公司；FRM01-F 型果实叶绿素含量测定仪，意大利 Sinteleia 公司；6001 型榨汁机，美国 Acme 公司；PAL-1 型手持数字糖度计，日本 Atago 公司；DL-15

型自动终点滴定分析仪, 美国梅特勒公司。

1.2 材料处理

2019年8月27日, 待所有果园果实放入到CA23和CA24气调库后开始进行气调处理。CA23的O₂和CO₂体积分数在气调处理的第6d(2019年9月2日)稳定在2.25%和0.90%。气调库CA24的O₂和CO₂在气调处理的第6d(2019年9月2日)到2019年11月1日一直稳定在0.90%和0.06%, 随后上升至1.25%和0.17%。在第一次出库包装时间(2019年12月3日), 当所有样品从CA23和CA24气调库中取出后, 迅速通入N₂并在6h后将各气调库中O₂和CO₂浓度调整到相应浓度。

将包装处理后的各气调库各果园果实分别置于20℃货架下贮藏5d, 测定第1和5d的果实品质变化, 每个时间点各气调库各果园用果3箱, 每箱果实为1组重复。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 气调库中相对乙烯数量测定

6个实时乙烯数量监测仪分别放置在气调库CA23或CA24的四个角落以及最上层和最下层储梨箱。实时乙烯数量监测仪从气调开始之日(2019年8月27日)开始记录, 但由于各气调库中乙烯相对数量较低, 未达到仪器检测的最低阈值, 所以2019年10月3日之前的数据未显示在图1中。从2019年10月3日开始, 实时乙烯数量监测仪开始检测到两个气调库相对乙烯数量(CA23和CA24中相对乙烯数量分别为20.12和22.09), 并在每天中午12点测定一次, 同时传输回美国Strella公司, 数据为6个实时乙烯测定仪所测数值的平均值, 记为*n*。

1.3.2 乙烯生成率

从各果园各重复中随机选取5个果实, 将果实放置于3.8L玻璃罐中, 20℃密封1h, 随后抽取1.00mL气体样品注射到气相色谱, 利用火焰电离检测器和Porapak Q柱(网孔为80/100, 直径3.00mm, 长2.00m)测定气体样品中的乙烯含量, 注入和检测温度分别为90和140℃, 载体气体流速为0.80mL/s, 单位为μL/(kg·s)。

1.3.3 果实硬度

从各果园各重复中随机选取10个果实, 沿果实赤道部位等距离的两个位置, 用刀削去2.00mm厚果皮, 用直径为11.10mm的探头, 测试距离为9.00mm, 以探头插入果肉时受到最大阻力即为果实硬度(N), 10个果实为1个重复, 取平均值。

1.3.4 果皮叶绿素含量测定

在测定果实硬度之前, 先用叶绿素测定仪沿果实

赤道部位等距离的两个位置进行测定, 单位为I_{AD}。

1.3.5 可溶性固形物含量

测定完果皮叶绿素含量和果实硬度后, 从各重复切取100.00g果肉, 用榨汁机进行榨汁, 可溶性固形物含量用数字糖度计进行测定, 单位为%。

1.3.6 可滴定酸含量测定

采用自动终点滴定分析仪测定可滴定酸含量, 量取上述果汁10.00mL, 加入40.00mL蒸馏水, 放入终点滴定分析仪样品槽中, 用0.10mol/L NaOH溶液进行滴定, 滴定终点设置为pH值8.10, 公式如下:

$$A = \frac{V \times 0.1 \times 0.067 \times 50}{10 \times 100} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

0.1——NaOH标准溶液浓度, mol/L;

0.067——苹果酸的系数;

50——反应液总体积, mL;

10——果汁体积, mL;

100——榨汁前称取果肉的总质量, g;

A——可滴定酸含量;

V——消耗NaOH溶液体积, mL。

1.3.7 腐烂率

在梨果实进包装线前, 随机对每一个果园挑选100个果实进行腐烂率统计。将发生腐烂的果实定义为病果实, 并根据公式:

$$B = \frac{n_1}{n_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

B——果实腐烂率;

*n*₁——发病果实个数;

*n*₀——总果实个数。

计算果实腐烂率, 各果园重复3次。

1.3.8 褐斑病发病率

参考Zhi等^[19]方法, 在20℃货架下贮藏5d后统计果皮褐斑病发病率。将发生褐变面积>0.60cm²定义为发病果实, 根据公式:

$$C = \frac{x_1}{x_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

C——褐斑病发病率;

*x*₁——发生褐斑病果实个数;

*x*₀——总果实个数。

计算果实褐斑病发病率, 各处理重复中随机选取30个果实。

1.4 数据处理

本试验数据采用 SPSS 19.00 软件进行 Fisher's LSD 三因素方差分析, $p < 0.05$ 表示差异显著。同时, 利用 Excel 软件进行线性分析并做图。

2 结果与讨论

2.1 气调库中实时变化的相对乙烯数量

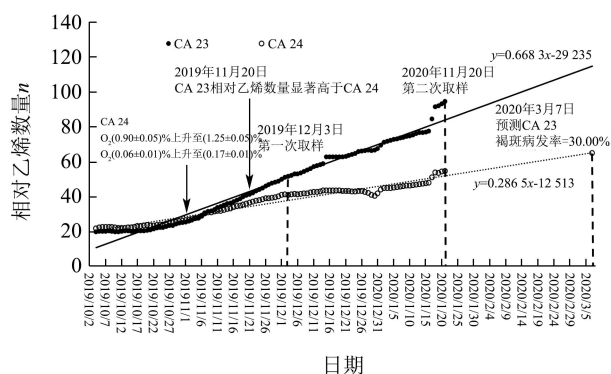


图1 气调库 CA 23 和 CA 24 中相对乙烯数量和预测 CA 24 最适出库包装时间

Fig.1 Relative ethylene cumulative in CA 23 and CA 24 and predict the optimum packing time in CA 24

当气调库 CA 23 和 CA 24 的 O_2 和 CO_2 体积分数分别稳定在 2.25% 和 0.9% 以及 0.90% 和 0.06% 后, 从 2019 年 10 月 3 日到 2019 年 11 月 1 日 CA 23 和 CA 24 中的相对乙烯数量分别由 20.12 和 22.09 上升到 25.53 和 26.70, 且两者之间无差异。Lee 等^[20]研究发现当气调处理的 O_2 体积分数低于 1% 时, 随着贮藏时间延长, 梨果实表皮组织细胞逐渐死亡并形成黑色斑点。Drake^[21]研究发现提高气调处理中 CO_2 体积分数可抑制果实腐烂率和果心褐变。因此, 本试验在 2019 年 11 月 1 日将气调库 CA 24 的 O_2 和 CO_2 体积分数分别调升至 1.25% 和 0.17%, 以避免果实因品质问题对包装厂造成损失。通过实时监测气调库中相对乙烯量发现, 从 2019 年 11 月 6 日之后气调库 CA 23 中的相对乙烯量增速加快, 并在 2019 年 11 月 20 日其相对乙烯量显著高

于气调库 CA 24 (CA 23 和 CA 24 中相对乙烯数量分别为 41.02 和 36.25)。随着贮藏时间延长, 气调库 CA 23 的相对乙烯量迅速增加, 并在 2020 年 1 月 21 日其相对乙烯量是气调库 CA 24 的 1.73 倍 (CA 23 和 CA 24 中相对乙烯数量分别为 94.83 和 54.88)。上述结果表明, 降低 O_2 以及增加 CO_2 体积分数能抑制“Bartlett”梨贮藏过程中乙烯释放, 但是否影响果实品质及相关生理病害发生是本试验接下来的研究重点。此外, 对比之前研究结果^[1,8,9,11,19], 本试验首次利用实时监测乙烯设备对西洋梨气调库中乙烯数量进行测定, 比传统气相色谱测定方法更加直接和高效, 对包装厂精确地找到最适出库包装时间提供有力支持。

商业气调贮藏的“Bartlett”梨主要销售季是在每年的 12 月初到次年 1 月低。因此, 本试验选择在 2019 年 12 月 3 日和 2020 年 1 月 21 日开库包装, 并对包装后的“Bartlett”梨在货架过程中的品质及生理病害发生进行分析, 为动态低 O_2 和高 CO_2 气调处理的商业化应用提供有力证据。

2.2 20 °C 货架贮藏 1 d 后果实品质变化

由表 1 可知, 在 20 °C 下贮藏 1 d 后, 两次出库包装时间、不同气调库以及不同果园之间乙烯生成率、果皮叶绿素、可滴定酸和腐烂率均极显著差异 (A、B、C, $p < 0.01$)。例如与第一次出库包装时间相比, 除 CA 23 Lot301 [从 25.18 $\mu L/(kg \cdot s)$ 下降至 24.66 $\mu L/(kg \cdot s)$] 和 Lot854 [从 35.49 $\mu L/(kg \cdot s)$ 下降至 26.97 $\mu L/(kg \cdot s)$] 乙烯生成率降低外, 其他果园果实的乙烯生成率在第二次出库包装时均增加。此外, CA 24 Lot021 [乙烯生成率为 46.52 $\mu L/(kg \cdot s)$]、Lot320 [乙烯生成率为 44.97 $\mu L/(kg \cdot s)$]、Lot333 [乙烯生成率为 44.14 $\mu L/(kg \cdot s)$] 和 Lot361 [乙烯生成率为 49.58 $\mu L/(kg \cdot s)$] 果实的乙烯生成率高于 CA 23 的各个果园。之前研究发现, 当 CO_2 体积分数 $< 0.10\%$ 时, 降低 O_2 体积分数可抑制果实乙烯生成率^[1,8,9,11,19], 但本试验结果与之相反。

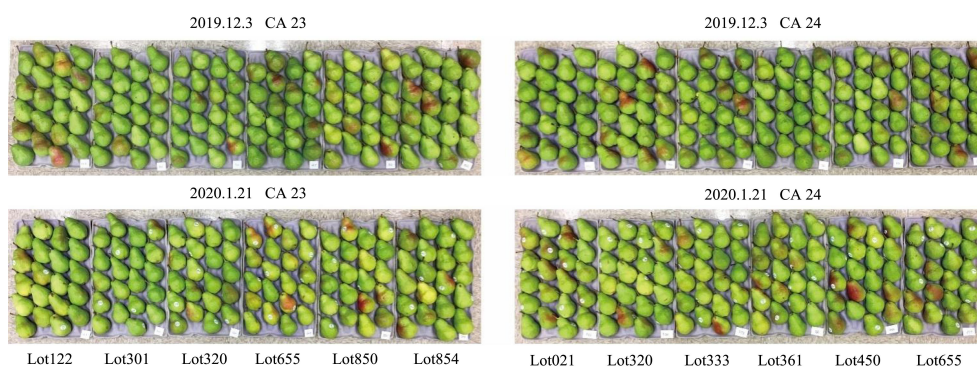


图 2 20 °C 货架贮藏 1 d 后气调库 CA 23 和 CA 24 中各果园的“Bartlett”梨

Fig.2 The ‘Bartlett’ pears stored in CA 23 and CA 24 from different orchards after 1 d of storage at 20 °C

表1 20 °C货架贮藏1 d后“Bartlett”梨乙烯生成率、果实硬度、果皮叶绿素、可溶性固形物、可滴定酸和腐烂率

Table 1 Changes in ethylene production rate, fruit firmness, peel chlorophyll content, soluble solids content, titratable acidity, and decay after 1 d at 20 °C

出库包装时间	气调库	果园编号	乙烯生成率 /[$\mu\text{L}/(\text{kg}\cdot\text{s})$]	果实硬度 /N	果皮叶绿素 /I _{AD}	可溶性固形物 /%	可滴定酸 /%	腐烂率 /%
2019.12.3	CA 23	Lot122	36.68±2.69	74.18±0.87	1.98±0.04	12.47±0.15	0.34±0.00	8.33±0.58
2019.12.3	CA 23	Lot301	25.18±2.79	75.04±1.60	2.05±0.02	13.10±0.10	0.31±0.00	6.33±0.58
2019.12.3	CA 23	Lot320	20.92±1.92	73.64±1.32	1.89±0.04	12.57±0.21	0.35±0.00	9.00±0.00
2019.12.3	CA 23	Lot655	18.40±13.49	81.11±2.27	2.06±0.04	12.67±0.25	0.29±0.01	5.33±0.58
2019.12.3	CA 23	Lot850	19.44±7.18	68.66±2.16	1.80±0.02	12.50±0.10	0.39±0.00	8.00±1.00
2019.12.3	CA 23	Lot854	35.49±6.30	80.97±2.93	1.97±0.03	13.40±0.10	0.30±0.00	4.67±0.58
2019.12.3	CA 24	Lot021	41.26±5.98	80.07±0.50	2.10±0.01	12.47±0.25	0.35±0.00	3.00±0.00
2019.12.3	CA 24	Lot320	38.94±6.99	77.92±0.80	2.02±0.01	12.70±0.26	0.35±0.00	3.33±0.58
2019.12.3	CA 24	Lot333	36.22±8.72	72.65±1.73	1.95±0.04	13.20±0.44	0.37±0.01	3.67±0.58
2019.12.3	CA 24	Lot361	34.15±4.44	74.22±0.89	1.96±0.03	12.83±0.40	0.35±0.01	3.33±1.15
2019.12.3	CA 24	Lot450	28.38±2.57	74.34±2.09	1.94±0.03	12.57±0.38	0.35±0.01	3.33±0.58
2019.12.3	CA 24	Lot655	26.88±3.58	77.49±2.97	2.09±0.02	12.30±0.17	0.32±0.01	3.00±1.00
2020.1.21	CA 23	Lot122	37.87±4.38	70.35±0.56	1.89±0.02	12.57±0.12	0.32±0.01	12.67±1.15
2020.1.21	CA 23	Lot301	24.66±5.37	70.81±1.52	1.99±0.02	13.17±0.15	0.30±0.00	12.00±0.00
2020.1.21	CA 23	Lot320	34.94±1.35	69.38±2.38	1.88±0.09	12.70±0.26	0.34±0.00	14.67±1.53
2020.1.21	CA 23	Lot655	26.04±1.92	73.40±0.94	1.66±0.07	12.80±0.30	0.27±0.00	14.67±1.53
2020.1.21	CA 23	Lot850	35.22±1.24	70.01±1.60	1.74±0.14	12.57±0.15	0.37±0.01	15.00±2.65
2020.1.21	CA 23	Lot854	26.97±1.73	75.17±4.06	1.82±0.07	13.37±0.12	0.28±0.01	13.00±2.00
2020.1.21	CA 24	Lot021	46.52±5.43	66.98±0.43	2.00±0.04	12.30±0.26	0.33±0.00	6.00±1.73
2020.1.21	CA 24	Lot320	44.97±1.34	72.05±3.33	1.94±0.08	12.67±0.15	0.34±0.00	6.33±0.58
2020.1.21	CA 24	Lot333	44.14±0.75	68.89±0.98	1.88±0.03	13.33±0.15	0.35±0.01	7.33±2.08
2020.1.21	CA 24	Lot361	49.58±6.88	69.69±3.29	1.97±0.04	12.87±0.12	0.35±0.01	8.33±2.08
2020.1.21	CA 24	Lot450	35.19±2.36	73.39±1.98	1.97±0.02	12.73±0.32	0.34±0.00	7.33±1.15
2020.1.21	CA 24	Lot655	33.63±5.57	73.15±1.60	2.00±0.03	12.47±0.06	0.31±0.00	6.00±1.73
A/p			0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00
B/p			0.00	0.36	0.00	0.12	0.00	0.00
C/p			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
A×B/p			0.31	0.60	0.01	0.73	0.81	0.00
A×C/p			0.01	0.00	0.00	0.97	0.13	0.10
B×C/p			0.17	0.00	0.04	0.04	0.00	0.16
A×B×C/p			0.41	0.14	0.00	0.60	0.21	0.09

注：CA 23：23号气调库，CA 24：24号气调库。A：出库包装时间，B：气调库，C：果园。表2同。

Wang 等^[22]用 MAP (Modified Atmosphere Packaging) 处理 “Bartlett” 梨后发现，当 MAP 中 O₂ 体积分数由 21.00% 下降至 15.70%~17.50% 且 CO₂ 体积分数由 0.00% 上升至 3.80%~5.70% 时，MAP 处理的果实在货架过程中能生成较高的乙烯量，并保持较高的果实硬度，抑制果皮叶绿素降解。但气调贮藏的 “Rocha” 梨降低 O₂ 体积分数同时升高 CO₂ 体积分数将对其造成严重的果肉褐变^[23]。本试验结果发现，

“Bartlett” 梨乙烯生成对气调中 O₂ 和 CO₂ 体积分数变化反应较敏感，即低 O₂ (0.90%~1.25%) 和高 CO₂ (0.06%~0.17%) 处理可抑制贮藏过程中果实乙烯释放，但提高了货架初期乙烯生成率，这对激活货架后期果实快速软化^[10]及香味散发^[24]具有重要作用。通过对比两次出库时间，各果园的果实硬度在贮藏过程中均呈下降趋势，但是 CA 23 和 CA 24 之间无显著差异 (B, $p=0.36$)。此外，不同出库包装时间和气调库

(A×B, $p=0.60$) 以及不同出库包装时间、气调库和果园 (A×B×C, $p=0.14$) 都未影响果实硬度, 表明降低 O₂ 和升高 CO₂ 对果实硬度的影响与商业气调作用效果一样。此外, 不同出库包装时间、气调库以及果园 (A×B×C, $p=0.60$) 也未影响可溶性固形物含量变化。但是, 无论是不同出库包装时间、气调库以及果园, 降低 O₂ 同时升高 CO₂ 这一动态调节均能延缓果皮叶绿素降解(图 2), 抑制果实腐烂率增加。尽管气调库 CA 23

和 CA 24 中贮藏了多个果园的果实, 但是 Lot320 和 Lot655 的果实在上述气调库中都有贮藏。通过对比气调库 CA 23, CA 24 中 Lot320 和 Lot655 的果实在两次出库包装后都维持了较高的乙烯生成率、较绿的果皮颜色(图 2) 以及低腐烂率, 表明动态低 O₂ 和高 CO₂ 体积分数处理对保证“Bartlett”梨出库品质具有重要作用。

2.3 20 °C 货架贮藏 5 d 后果实品质变化

表 2 20 °C 货架贮藏 5 d 后“Bartlett”梨乙烯生成率、果实硬度、果皮叶绿素、可溶性固形物、可滴定酸和褐斑病发病率

Table 2 Changes in ethylene production rate, fruit firmness, peel chlorophyll content, soluble solids content, titratable acidity, and scald after 5 d at 20 °C

出库时间	气调库	果园编号	乙烯生成率 ($\mu\text{L}/(\text{kg}\cdot\text{s})$)	果实硬度 /N	果皮叶绿素 /I _{AD}	可溶性固形物 /%	可滴定酸 /%	褐斑病 发病率/%
2019.12.3	CA 23	Lot122	62.50±5.62	19.41±1.25	0.79±0.10	12.57±0.06	0.31±0.00	0
2019.12.3	CA 23	Lot301	63.26±6.19	23.30±2.70	1.17±0.10	13.23±0.06	0.28±0.00	0
2019.12.3	CA 23	Lot320	56.21±5.02	16.64±1.57	0.65±0.05	12.53±0.12	0.33±0.00	0
2019.12.3	CA 23	Lot655	77.25±1.99	19.16±0.57	1.03±0.09	12.87±0.12	0.26±0.01	0
2019.12.3	CA 23	Lot850	41.43±7.84	17.50±0.79	0.49±0.05	12.57±0.06	0.33±0.01	0
2019.12.3	CA 23	Lot854	59.16±6.44	17.41±1.72	0.74±0.06	13.33±0.06	0.27±0.01	0
2019.12.3	CA 24	Lot021	53.64±1.65	16.83±1.06	1.09±0.13	12.57±0.25	0.32±0.00	0
2019.12.3	CA 24	Lot320	48.88±2.20	20.76±0.56	1.25±0.57	12.67±0.12	0.32±0.01	0
2019.12.3	CA 24	Lot333	48.74±2.19	16.24±0.27	0.86±0.16	13.43±0.15	0.34±0.00	0
2019.12.3	CA 24	Lot361	34.62±1.31	17.86±0.74	0.83±0.03	12.90±0.17	0.33±0.00	0
2019.12.3	CA 24	Lot450	43.40±4.63	18.73±1.43	0.93±0.12	12.87±0.31	0.32±0.00	0
2019.12.3	CA 24	Lot655	42.80±7.61	22.62±0.62	1.34±0.08	12.50±0.10	0.30±0.01	0
2020.1.21	CA 23	Lot122	53.64±1.65	21.76±1.60	0.66±0.24	12.57±0.06	0.28±0.01	22.22±1.92
2020.1.21	CA 23	Lot301	48.88±2.20	22.32±1.77	0.81±0.18	13.27±0.06	0.26±0.01	17.78±1.92
2020.1.21	CA 23	Lot320	48.74±2.19	19.41±1.52	0.65±0.13	12.73±0.15	0.30±0.01	53.33±3.33
2020.1.21	CA 23	Lot655	34.62±1.31	21.43±1.34	0.51±0.10	13.03±0.06	0.24±0.00	20.00±3.33
2020.1.21	CA 23	Lot850	43.40±4.63	18.20±0.75	0.32±0.04	12.73±0.21	0.30±0.01	40.00±5.77
2020.1.21	CA 23	Lot854	42.80±7.61	19.17±1.72	0.59±0.07	13.33±0.06	0.25±0.00	26.67±6.67
2020.1.21	CA 24	Lot021	37.51±2.97	17.75±0.74	0.78±0.05	12.47±0.12	0.30±0.00	20.00±3.33
2020.1.21	CA 24	Lot320	66.31±2.89	22.34±1.94	0.64±0.05	12.73±0.12	0.29±0.00	34.44±3.85
2020.1.21	CA 24	Lot333	44.66±3.43	20.11±1.48	0.63±0.08	13.40±0.10	0.31±0.00	17.78±1.92
2020.1.21	CA 24	Lot361	33.39±5.47	20.20±0.72	0.69±0.12	13.03±0.12	0.30±0.01	25.56±1.92
2020.1.21	CA 24	Lot450	42.92±10.28	20.20±0.94	0.64±0.12	13.07±0.12	0.31±0.00	6.67±3.33
2020.1.21	CA 24	Lot655	47.97±16.99	22.02±1.19	1.15±0.08	12.67±0.12	0.28±0.00	35.56±3.85
	A/p		0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
	B/p		0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
	C/p		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	A×B/p		0.31	0.07	0.29	0.55	0.48	0.00
	A×C/p		0.01	0.08	0.78	0.45	0.09	0.00
	B×C/p		0.17	0.17	0.19	0.00	0.00	0.00
	A×B×C/p		0.41	0.45	0.00	0.55	0.96	0.00

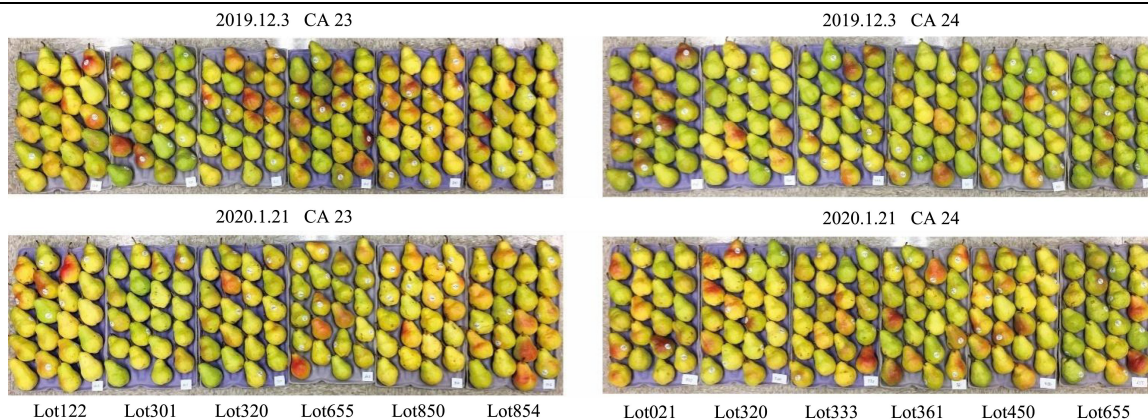


图 3 20 °C 货架贮藏 5 d 后气调库 CA 23 和 CA 24 中各果园的“Bartlett”梨

Fig.3 The ‘Bartlett’ pears stored in CA 23 and CA 24 from different orchards after 5 d of storage at 20 °C

与美国西北部地区所产的其他西洋梨品种(“d’Anjou”、“Comice”和“Bosc”)不同,“Bartlett”梨属于夏梨(summerpear),其乙烯生成率较高和果实软化速率较快。例如,用乙烯受体的抑制剂 1-MCP(1-methylcyclopropene)处理“Bartlett”和“d’Anjou”梨时,0.15 μL/L 1-MCP 浓度能完全抑制“d’Anjou”梨变软^[14],但对“Bartlett”梨则需将 1-MCP 浓度提高至 0.30 μL/L^[7],这表明“Bartlett”梨自身能生成大量乙烯,可加速果实软化及香气释放。而随着贮藏时间延长,果实衰老进程加快,果实自身生成乙烯能力逐渐下降,因此较低的乙烯量无法启动果实正常软化,此时果肉干缩汁液少、木栓化严重,且香气不足^[1,9,17,25]。此外,据美国西洋梨业局(USA Pear Bureau)通过在美国以及其他各国进行市场调查,发现大多数消费者选择在购买西洋梨后的 3~7 d 内食用,如果此期间果实能够在最佳赏味期,将进一步提高西洋梨的消费量(华盛顿州果树研究委员 Washington Tree Fruit Research Commission 举办的 2019 年西洋梨梨年会 2019 NW Pear Research Review)。与第一次出库包装时间相比,除了气调库 CA 23 的 Lot850(从 41.43 μL/(kg·s)上升至 43.40 μL/(kg·s))以及 CA 24 的 Lot320(从 48.88 μL/(kg·s)上升至 66.31 μL/(kg·s))和 Lot655(从 42.80 μL/(kg·s)上升至 47.97 μL/(kg·s))的乙烯生成率在第二次出库包装时增加外,其他果园的乙烯生成率均呈下降趋势,此外,CA24 所有果园的果实硬度在 20 °C 贮藏的第 5 d 均低于 24.00 N(表 2)。结果表明,动态气调处理与商业气调一样未影响果实软化能力。但是,动态气调处理能保持果皮较高的叶绿素含量(图 3)和相对较低的果实褐斑病发病率,表明在降低包装厂损失以及提高果实货架品质方面,动态低 O₂ 和高 CO₂ 浓度处理明显优于传统气调处理方式。

2.4 根据实时乙烯相对数量与褐斑病发病率之间的关系预测最适出库包装时间

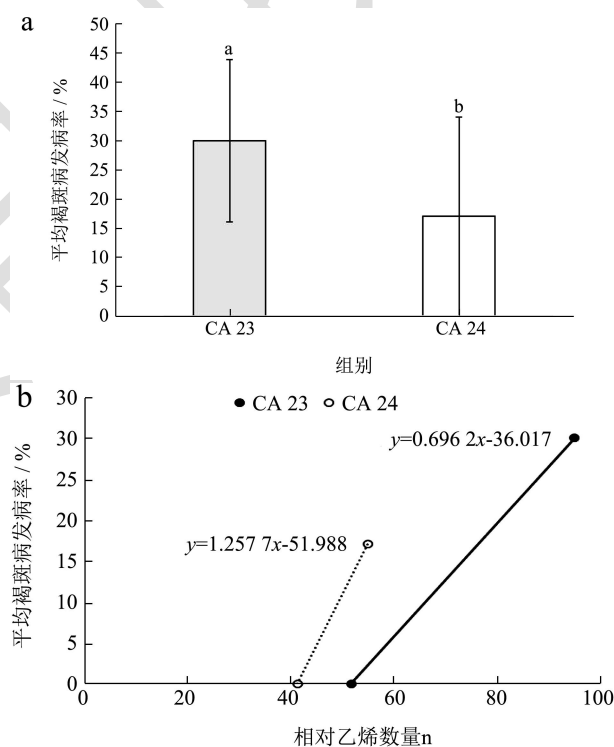


图 4 气调库 CA 23 和 CA 24 各果园的平均褐斑病发病率以及与相对乙烯数量相关性

Fig.4 The average scald incidence and it relationship with relative ethylene cumulative in CA 23 and 24 from different orchards

“Bartlett”梨褐斑病发病率>30.00%时,会造成销售过程中大量梨果实被丢弃或被退回,对包装厂造成严重损失(包装厂会议)。本试验结果发现,在 2020 年 1 月 21 日气调库 CA 23 各果园平均褐斑病发病率已

达到 30.00% (图 4), 如果继续延长贮藏时间, 将影响包装厂收益。而气调库 CA 24 平均褐斑病发病率为 17.04%, 通过对 CA 24 平均褐斑病发病率与相对乙烯量进行线性分析 (见图 4, $y=1.2577x-51.988$) 及其实时相对乙烯量变化趋势 (见图 1, $y=0.2865x-12.513$), 预测当气调库 CA 24 各果园的平均褐斑病发病率达到 30.00% 时, 气调库 CA 24 中相对乙烯量为 65.19, 对应出库时间为 2020 年 3 月 7 日。虽然本试验在 2020 年 1 月 21 日终止了所有气调处理, 但是通过实时监测气调库中乙烯数量可估计出动态低 O_2 和高 CO_2 气调处理能显著延长 “Bartlett” 梨贮藏寿命到次年 2 月, 并使果实褐斑病发病率维持在商业可接受范围之内。

3 结论

普通冷库贮藏的 “Bartlett” 梨其贮藏寿命为 4 个月, 但气调处理可将其延长至 6 个月^[1,4]。而在实际生产中, 包装厂普通冷库贮藏的 “Bartlett” 梨一般在采后 1~3 个月内销售完, 待 3 个月后 (11 月) 开始包装气调贮藏的果实直到次年 1 月, 如果延长气调处理的果实到 2 月将会造成较高的果实腐烂率以及较差的口感和高褐斑病发病率, 严重影响了包装厂和果农的收益 (包装厂会议)。但由于市场在次年 2~3 月仍对 “Bartlett” 梨有较高的需求, 因此包装厂迫切需要对原有气调方式进行改进。本试验研究发现, 虽然动态低 O_2 (0.90%~1.25%) 和高 CO_2 (0.06%~0.17%) 浓度处理的果实硬度和可溶性固形物与商业气调处理的之间无显著差异, 但其处理方式能保持果实出库后较高的乙烯生成率, 抑制果皮叶绿素降解和腐烂率, 延缓褐斑病的发生。通过对气调库进行实时乙烯量监测, 并对比不同出库包装时间果实褐斑病发病率, 可知在原有商业气调处理下, “Bartlett” 梨贮藏寿命仅能到次年 1 月底, 但动态低 O_2 和高 CO_2 浓度处理能将其贮藏寿命延长至 2 月底, 并将果实生理病害控制在商业可接受的范围, 这对整个西洋梨产业具有重要意义。

参考文献

- [1] Li L, Zhang S, Dong Y. Improving storability, physiological disorders, and antioxidant properties of ‘Bartlett’ and ‘d’Anjou’ pears (*Pyrus communis* L.) by pre-harvest 1-methyl cyclopropane spraying [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2021, 56: 115-125
- [2] Villalobos-acuña M, Mitcham E J. Ripening of European pears: the chilling dilemma [J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 49: 187-200
- [3] Hansen E, Mellenthin W M. Commercial Handling and Storage Practices for Winter Pears [M]. USA: Oregon State University, Agricultural Experiment Station Special Report, 1979
- [4] Gallardo R K, Kupferman E M, Beaudry R M, et al. Market quality of Pacific Northwest pears [J]. Journal of Food Distribution Research, 2011, 42: 89-99
- [5] Saquet A A. Storage of pears [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 246: 1009-1016
- [6] Gil M I, Beaudry R M. Controlled and Modified Atmospheres for Fresh and Fresh-Cut Produce [M]. Academic Press: 2020
- [7] Bai J, Mattheis J P, Reed N. Re-initiating softening ability of 1-methylcyclopropane-treated ‘Bartlett’ and ‘d’Anjou’ pears after regular air or controlled atmosphere storage [J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2006, 81: 959-964
- [8] Wang Y, Sugar D. 1-MCP efficacy in extending storage life of ‘Bartlett’ pears is affected by harvest maturity, production elevation, and holding temperature during treatment delay [J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 103: 1-8
- [9] Li M, Zhi H, Dong Y. The influence of pre- and postharvest 1-MCP application and oxygen regimes on textural properties, cell wall metabolism, and physiological disorders of late-harvest ‘Bartlett’ pears [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 173: 111429
- [10] Sugar D, Basile S R. Integrated ethylene and temperature conditioning for inducing pear ripening capacity [J]. Acta Horticulturae, 2015, 1094: 567-572
- [11] Bower J H, Biasi W V, Mitcham E J. Effect of ethylene in the storage environment on quality of ‘Bartlett’ pears [J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 28: 371-379
- [12] Zhao J, Xie X, Dai W, et al. Effects of precooling time and 1-MCP treatment on ‘Bartlett’ fruit quality during the cold storage [J]. Scientia Horticulturae, 2018, 240: 387-396
- [13] Nham N T, Willits N, Zakharov F, et al. A model to predict ripening capacity of ‘Bartlett’ pears (*Pyrus communis* L.) based on relative expression of genes associated with the ethylene pathway [J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 128: 138-143
- [14] Dong Y, Zhang S, Wang Y. Compositional changes in cell wall polyuronides and enzyme activities associated with melting/mealy textural property during ripening following long-term storage of ‘Comice’ and ‘d’Anjou’ pears [J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 135: 131-140
- [15] Chen P M, Borgic D M. Changes in water soluble polyuronides in the pulp tissue of ripening ‘Bosc’ pears

- following cold storage in air or in 1% oxygen [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1985, 110: 667-671
- [16] Li M, Zhi H, Dong Y. Textural property and cell wall metabolism of 'Golden Bosc' and 'd'Anjou' pears as influenced by oxygen regimes after long-term controlled atmosphere storage [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 151: 26-35
- [17] 李小娟, 聂钰洪, 支欢欢, 等. 1-MCP 缓释处理对气调贮藏后的 '安久' 梨货架期品质的影响 [J]. *食品工业科技*, 2021, 42: 306-312
- [18] 马友福, 陈敏, 杨成泉, 等. 九个西洋梨品种果实品质评价分析 [J]. *果树资源学报*, 2021, 2: 30-32
- [19] Zhi H, Dong Y, Wang Y. Effects of controlled atmosphere, edible coating, and 1-methylcyclopropene on improving storage quality of 'Bartlett' pears after long-term storage [J]. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2019, 94: 94-101
- [20] Lee S P, Chen P M, Chen T H, et al. Differences of biochemical components between the skin tissues of normal and black-speckled 'd'Anjou' pears after prolonged low-oxygen storage [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1990, 115: 784-788
- [21] Drake S R. Quality of 'Bosc' pears as influenced by elevated carbon dioxide storage [J]. *Journal of Food Quality*, 1999, 22: 417-425
- [22] Wang Y, Sugar D. Ripening behavior and quality of modified atmosphere packed 'Doyenne du Comice' pears during cold storage and simulated transit [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 81: 51-59
- [23] Martin M S D, Steffens C A, Amarante C V T, et al. 'Rocha' pears stored under controlled atmosphere with ultra-low O₂ associated with different levels [J]. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 2017, 39: e-143
- [24] Wang Y. *Controlled and Modified Atmospheres for Fresh and Fresh-Cut Produce* [M]. USA: Academic Press, 2020
- [25] 李英丽, 张少颖, 董宇. 采前 1-甲基环丙烯处理对货架期 'Bartlett' 梨虎皮病和抗氧化特性的影响 [J]. *食品科学*, 2021, 42: 250-256