DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251215006
引用格式: 宋儒齐, 陈文禹, 程嘉宝, 等. 储藏温度联合施肥处理对库尔勒香梨果实品质的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(10): 244–252.
SONG RQ, CHEN WY, CHEN JB, *et al*. Study on the effects of storage temperatures and fertilization treatments on the quality of *Pyrus sinkiangensis* Yu fruits [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(10): 244–252. (in Chinese with English abstract).

储藏温度联合施肥处理对库尔勒香梨果实品质的影响研究

宋儒齐[1,2#], 陈文禹[1#], 程嘉宝[3], 沈 幸[1], 薛颖楠[1*], 刘永杰[3*], 曾茂茂[4]

(1. 新疆农业大学资源与环境学院, 乌鲁木齐 830000; 2. 新疆农业大学草业学院, 乌鲁木齐 830000; 3. 库尔勒市香梨研究中心, 库尔勒 841000; 4. 江南大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 无锡 214122)

摘 要: 目的 系统探究不同储存温度和采前施肥处理对库尔勒香梨采后品质的协同影响机制, 从而确定出最为理想的保鲜方案。**方法** 研究运用 3(施肥)×3(温度)×3(生物学重复)的实验设计方式, 以不同储存温度(4、12、20 ℃)和不同采前施肥处理[草木樨绿肥(CM)、葵花绿肥(DK)以及不施肥(CK)]的方式, 在为期 55 d 的储存期间, 借助质构仪按期测定果实重量损失率、硬度、脆度、内聚性、弹性、咀嚼性、胶黏性、回复性、黏附性 8 项质构指标。**结果** 储存温度是起主导作用的因素: 4 ℃处理可把果实最终重量损失率明显控制在 0.13%~0.31%, 比 12 ℃ (0.14%~0.41%)和 20 ℃ (0.28%~0.74%)更优, 并且更为有效地维持了果实的质地。在储存期第 50 d 时, 4 ℃下果实的硬度能够保持在更高的水平, 然而 CK+20 ℃组的硬度却降低到了 8.86 kN。在相同的 4 ℃条件之下, 施肥处理所产生的效应较为明显, 其中草木樨绿肥组(CM+4 ℃)的表现最为出色, 其弹性值在第 30 d 时依然能够达到 0.60, 高于 CK+4 ℃组(0.32)和 DK+4 ℃组(0.28), 而且像内聚性等指标在多数时间点都能够保持相对稳定的态势。**结论** “4 ℃低温储存”联合“采前草木樨绿肥管理”能够凭借内外协同机制, 极为有效地维持库尔勒香梨采后的重量以及食用品质, 这一方案对库尔勒香梨采后品质保存具有十分明确的实践指导意义。

关键词: 库尔勒香梨; 储藏温度; 施肥处理

收稿日期: 2025-12-15
基金项目: 国家自然科学基金项目(32360802); 新疆土壤与植物生态过程重点实验室项目(23XJTRZW05); 新疆维吾尔自治区香梨产业技术体系项目(XJLGCYJSTX05-2025-06)

#宋儒齐和陈文禹为共同第一作者
第一作者: 宋儒齐(2004—), 男, 主要研究方向为库尔勒香梨果实品质。E-mail: underdog23@qq.com
陈文禹(2001—), 男, 主要研究方向为库尔勒香梨果实品质。E-mail: chenwenyu666666@163.com
***通信作者:** 薛颖楠(1996—), 女, 讲师, 主要研究方向为库尔勒香梨果实品质研究。E-mail: xueyingnan@xjau.edu.cn
刘永杰(1974—), 女, 正高级工程师, 主要研究方向为库尔勒香梨绿色生态品质调控与品种选育。E-mail: 597270780@qq.com

Study on the effects of storage temperatures and fertilization treatments on the quality of *Pyrus sinkiangensis* Yu fruits

SONG Ru-Qi[1,2#], CHEN Wen-Yu[1#], CHEN Jia-Bao[3], SHEN Xing[1], XUE Ying-Nan[1*], LIU Yong-Jie[3*], ZENG Mao-Mao[4]

(1. *College of Resources and Environment*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830000, *China*; 2. *College of Grassland Science*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830000, *China*; 3. *Korla Fragrant Pear Research Center*, *Korla* 841000, *China*; 4. *National Key Laboratory of Food Science and Resource Exploitation*, *Jiangnan University*, *Wuxi* 214122, *China*)

ABSTRACT: Objective To systematically investigate the synergistic influence mechanism of different storage temperatures and pre-harvest fertilization treatments on the post-harvest quality of *Pyrus sinkiangensis* Yu, determine the most ideal preservation strategy. **Methods** The study utilized a 3 (fertilization)×3 (temperature)×3 (biological replicates) experimental setup. Pears subjected to different pre-harvest fertilization treatments [melilotus officinalis green manure (CM), sunflower green manure (DK) and no fertilizer (CK)] were stored at different temperatures (4, 12 and 20 °C). Over a 55 d storage period, a texture analyzer was used to periodically determine 8 texture parameters: Weight loss rate, hardness, fracturability, cohesiveness, springiness, chewiness, gumminess, resilience and adhesiveness. **Results** Storage temperature played a crucial role: The 4 ℃ treatment considerably restricted the final fruit weight loss to within the range of 0.13%–0.31%, performing better than the 12 ℃ (0.14%–0.41%) and 20 ℃ (0.28%–0.74%) treatments, and also maintained texture more effectively. For instance, by the 50th day of storage, the fruit hardness at 4 ℃ stayed at a relatively higher level, while the CK+20 ℃ group dropped to 8.86 kN. Under the same 4 ℃ condition, the fertilization treatment had a notable effect, with the melilotus officinalis green manure (CM+4 ℃) exhibiting the overall best performance: Its elasticity value was still 0.60 on 30 d, which was notably higher than CK+4 ℃ (0.32) and DK+4 ℃ (0.28), and cohesion and other parameters mostly remained stable at various time points. **Conclusion** The combined application of “4 °C low-temperature storage” and “pre-harvest melilotus officinalis green manure management” effectively maintains the postharvest weight and edible quality of *Pyrus sinkiangensis* Yu through an internal-external synergistic mechanism. This strategy provides clear practical guidance for preserving the postharvest quality of *Pyrus sinkiangensis* Yu.

KEY WORDS: *Pyrus sinkiangensis* Yu; storage temperatures; fertilization treatments

0　引　言

库尔勒香梨(*Pyrus sinkiangensis* Yu), 通常简称为“香梨”, 以其独特的果香、皮薄、肉脆、甜度高及汁液丰富等综合品质特性, 在消费市场中获得了广泛好评[1], 该品种原产于中国, 属于具有地方特色的优质梨资源。库尔勒香梨的优异品质得益于其独特的产地条件: 充足日照、较大温差与肥沃矿质土壤共同作用, 形成了其特有的香脆甜润口感[2]。在果实完成采摘之后, 依旧会处于活跃的生理代谢状态之中, 易受到温度、湿度这类环境因素的作用, 进而引发衰老、腐烂以及营养成分的流失等情况出现[3]。随着公众健康饮食意识不断增强, 水果消费市场持续扩大, 库尔勒香梨的市场需求也相应呈现稳步上升趋势。传统的储藏方式已然无法适应现代市场针对果实品质所提出的高标准要求[4], 致使大量的优质果实在储藏以及运输的过程中遭受了损失。

施肥管理这类采前农业举措, 或许会对果实的初始营养成分以及细胞结构产生影响, 进而给采后的储藏性能带来持续性的影响。绿肥作为一种传统土壤改良与养分补充方式, 其施用对果实采后品质及耐储性的影响机制有待深入研究[5]。在影响果实采后品质的环境因子中, 储藏温度被认定为是最为关键的控制因素之一。合适的低温可以有效地对果实的呼吸强度以及乙烯释放速率起到抑制的作用, 从而延缓新陈代谢活动, 让营养物质消耗、质地软化以及组织衰老等情况得以减缓[6]。当下, 在实际的生产操作当中, 香梨的储藏往往会采用常温或者准低温的方式, 然而针对不同梯度温度(比如模拟家庭储藏的 20 ℃、常规商业储藏的 12 ℃以及冷链标准的 4 ℃)对其采后品质, 特别是在不同绿肥施用模式下, 对果实综合质构特性影响的系统比较研究, 目前仍显不足。本研究对香梨在不同储藏

温度下所出现的重量损失率进行了测定, 重量损失率是衡量果实外观商品性以及生理代谢强度最为直观的核心指标, 能够直接反映出水分与干物质的消耗速率[7–8]。质地剖面分析法(texture profile analysis, TPA)通过模拟口腔咀嚼过程, 可对硬度、弹性、咀嚼性、内聚性等质构参数予以量化评价, 其所得结果和人的感官评价有着相当高的相关性[9]。以硬度和脆度作为核心的质构指标, 直接界定了香梨标志性的口感, 是消费者感知新鲜度的首要标准[10]; 咀嚼性属于一项综合性感官指标, 它模拟了口腔咀嚼时的整个过程, 其优劣是由硬度、内聚性和弹性共同来决定的; 弹性与回复性展现了细胞组织在外力作用之后的变形恢复能力, 是评价果肉质地“嫩”与“韧”的关键所在; 内聚性则体现了果肉内部抵抗分层、维持结构完整的能力, 是维持上述硬度、脆度等口感指标稳定性的细胞学基础。胶黏性与咀嚼过程所需要的持续力相关联, 会影响到口感的醇厚感; 黏附性则呈现了果肉对牙齿的黏附程度, 影响了口感是否清爽。这 9 个指标并不是孤立存在的, 而是构成了一张动态关联的网络, 在这张网络里, 卓越的内聚性和回复性是维持高硬度与清脆脆度的内在保障; 重量损失所导致的细胞膨压下降会直接引发硬度与弹性的衰退; 异常的黏性或黏附性变化通常预示着细胞组分或汁液状态的改变。

本研究探究施肥与储藏温度对库尔勒香梨采后品质的协同影响, 利用质构仪定期测定果实硬度、脆度、弹性、内聚性、胶黏性、咀嚼性、回复性、黏附性等 8 项质构参数, 并同步记录重量损失率。本研究可为果农提供科学的储藏管理方案, 并为相关企业的保鲜技术创新与应用提供指导, 从而促进库尔勒香梨产业的可持续发展, 增强其市场竞争力。在全球气候变暖的背景下[11–12], 能对库尔勒香梨种植气候的适宜性展开科学的分析。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究选取位于新疆库尔勒市阿瓦提农场的香梨生产基地当作试验样地, 其经纬度分别为东经 86°08′12″以及北纬 41°36′45″。该地区具有干旱强光、昼夜温差大的气候特点, 同时土壤条件优异, 土壤中的有机质含量高, 富含矿质元素。

1.2 样品采集与处理

试验材料采集于果实生理成熟期前 30 d, 采样的位置是树冠外围中部的东、南、西、北这 4 个方向, 采用随机抽样的方式一共获取了 1350 个果实样本。这些果实均符合以下标准: 单果重的差异不超出 5%, 果皮色泽均匀且保持一致, 不存在明显的机械损伤或者病虫害症状, 果柄完整, 不出现脱落的情况。

依据田间施肥管理方面的举措, 把所采集到的果实样本划分成 3 个施肥处理组, 分别是 DK 组(施用葵花绿肥)、CM 组(施用草木樨绿肥)以及 CK 组(作为未施肥的对照组), 每组都有 450 个果实, 共计 1350 个样本。为了确保实验结果具备一定的统计效力并且可靠, 每个施肥处理组都设置了 3 次独立的生物学重复: 把每个施肥组的 450 个果实随机且均匀地分成 3 份, 其中每一份包含 150 个果实, 这 150 个果实就代表着一次独立重复。在每一次独立重复当中, 又会将这 150 个果实随机且均匀地分成 3 个亚组(每个亚组有 50 个果实), 然后分别把这些亚组放置于 20 ℃(用来模拟室温)、12 ℃(用来模拟冷链运输过程中冷藏车能够达到的温度)以及 4 ℃(用来模拟冷链储藏)这 3 个恒温条件之下进行储藏。

1.3 试剂与仪器

PX5202ZH 型电子天平(精度 0.01 g, 奥豪斯仪器有限公司); ENS-iPilot 型质构仪(北京盈盛恒泰科技有限责任公司)。

1.4 实验设计

本研究运用 3×3 双因素设计方式。为了能够切实保障实验具备足够的严谨性以及统计效力, 总共挑选了 1350 个库尔勒香梨当作实验材料, 设置了 CK、DK、CM 3 个不同的施肥处理情况。每一个施肥处理又分别设置了 20、12、4 ℃ 3 个储存温度, 并且针对每个“施肥×温度”的组合都设置了 3 个完全相互独立的平行对照, 便形成了 27 个处理组。在整个 55 d 的储存期间当中, 每隔 5 d 就要对各个处理组测定一次重量损失率以及硬度、脆度等多达八项的质构指标, 之后再借助方差分析来对不同处理间存在的差异展开比较分析。

1.5 指标测定与方法

重量损失率: 其测定方法可参照文献[13], 运用电子天平来精准称量每一个果实于每次测定时刻的鲜重, 进而依据计算所得的与初始鲜重之间的差值所占的百分比, 以此得出重量损失率。重量损失率的测定及得率的计算见式(1):

$$\eta_w/\%=\frac{m_0-m_t}{m_0}\times 100\% \tag{1}$$

式中: η_w 为重量损失率, %; m_0 为果实初始鲜重, g; m_t 为测定时(储藏第 t 天)的果实鲜重, g。

质构特性分析: 质构特性的测定方法可参照文献[14]。运用 TPA 法, 并且借助质构仪来测定其质构参数。具体操作时, 从每个果实的赤道部位两侧分别削去少许果皮之后再开展测定工作。此次测定所涉及的主要参数涵盖了脆性、黏附性、弹性、内聚性、胶黏性、咀嚼性以及回复性等方面。

果实硬度方面，其测定的方法可参照文献[15]，运用质构仪所配备的穿刺探头，按照特定的速度去穿刺果实赤道部位的果肉，而果肉的平均硬度则是指探头刺入果肉后下降至 5 mm 载荷时所测得的平均值。

1.6　数据处理

本研究所有测定数据均以平均值±标准偏差表示。采用 Statistix 9.0 统计软件进行单因素方差分析，当 $P<0.05$ 时判定为差异显著，若存在显著差异则进一步使用最小显著性差异法进行多重比较。图表使用 Origin 2025 软件及 Microsoft Excel 2021 软件制作。

2　结果与分析

2.1　香梨在储藏过程中最佳温度处理

2.1.1　不同温度处理的香梨在储藏过程中的重量损失率

如图 1 所示，DK+4 ℃、CM+4 ℃、CK+4 ℃重量损失率稳定在 0.13%~0.31%，然而处在 20 ℃以及 12 ℃储藏条件下的组别，其损失率整体高于 4 ℃组，其中 20 ℃组为 0.28%~0.74%，12 ℃组为 0.14%~0.41%。观察不同储藏期的变化趋势，在 4 ℃条件下，各个处理组所呈现出的损失率曲线较平缓，并且进一步比较发现，在储藏进入到后期阶段(35~55 d)，4 ℃处理组的损失率相较于其他温度组都要低。重量损失率主要受温度调控。其根本原因在于，低温(4 ℃)可有效抑制果实呼吸作用与乙烯生物合成，降低相关酶活性，从而延缓代谢进程，减少干物质消耗；同时，低温能降低果实与环境的蒸汽压差、维持细胞膜完整性，显著抑制水分蒸散。相比之下，较高温度(12 ℃、20 ℃)会加速呼吸、蒸腾及物质转化，导致水分与干物质损失显著增加。这一规律与已有采后生理学机制一致[16]。

2.1.2　硬度和脆度在储藏过程中的变化

如表 1 所示，在库尔勒香梨果实硬度保持方面，储藏温度以及施肥处理均有着显著的影响($P<0.05$)。观察不同储藏期的变化趋势，DK+4 ℃、CM+4 ℃组硬度总体平缓，但 DK+4 ℃组 20 d 显著下降、CM+4 ℃组 25 d 显著升高；

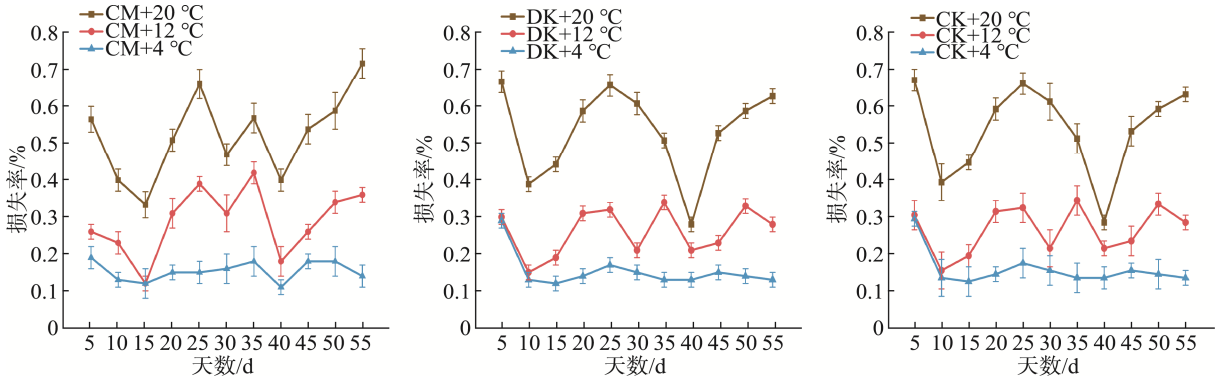


图 1　不同储藏温度库尔勒香梨的重量损失率变化

Fig.1　Changes in weight loss rate of *Pyrus sinkiangensis* Yu at different storage temperatures

表 1　不同储藏温度库尔勒香梨的硬度(kN)

Table 1　Hardness of *Pyrus sinkiangensis* Yu at different storage temperatures (kN)

组别	储藏温度/℃	5 d	10 d	15 d	20 d	25 d	30 d	35 d	40 d	45 d	50 d	55 d
CK	20	10.78±0.78^{Ca}	12.41±1.67^{Ca}	9.15±1.79^{Ca}	10.01±2.33^{Ca}	18.15±3.37^{Ba}	22.76±1.36^{Ab}	11.26±1.74^{Ca}	10.85±1.64^{Ca}	10.97±0.67^{Ca}	8.86±0.29^{Db}	11.60±1.57^{Ca}
	12	11.85±0.72^{Ca}	10.85±1.30^{Ca}	9.54±1.34^{Ca}	9.69±0.63^{Ca}	15.23±1.34^{Bb}	26.05±1.90^{Aa}	8.91±1.27^{Db}	10.41±0.62^{Ca}	11.15±1.60^{Ca}	8.62±1.73^{Db}	8.66±1.05^{Db}
	4	10.74±0.52^{Ca}	9.18±1.37^{Cb}	9.83±0.86^{Ca}	9.64±1.71^{Ca}	17.19±2.27^{Ba}	26.56±1.85^{Aa}	10.41±1.80^{Cb}	11.36±1.01^{Ca}	11.40±1.48^{Ca}	11.93±0.94^{Ca}	9.36±1.30^{Ca}
DK	20	11.60±0.66^{Ba}	12.04±1.24^{Ba}	11.31±1.89^{Ba}	11.23±0.90^{Ba}	17.36±1.15^{Aa}	18.02±1.57^{Aa}	11.85±1.08^{Ba}	10.18±1.62^{Ba}	10.18±1.70^{Ba}	11.78±0.78^{Ba}	12.15±2.65^{Ba}
	12	11.47±1.93^{Ba}	11.32±0.66^{Ba}	13.85±1.75^{Ba}	11.82±1.42^{Ba}	17.87±2.41^{Aa}	9.37±1.46^{Cc}	11.68±2.10^{Ba}	9.65±2.43^{Ca}	9.77±0.80^{Ca}	9.45±0.40^{Cb}	9.68±1.53^{Cc}
	4	11.25±1.94^{Aa}	11.11±0.84^{Aa}	12.04±1.32^{Aa}	9.24±2.11^{Ba}	13.83±1.80^{Ab}	13.37±1.22^{Ab}	12.34±1.34^{Aa}	10.47±1.23^{Ba}	9.24±1.55^{Ba}	9.63±1.10^{Bb}	10.52±0.53^{Bb}
CM	20	11.62±1.06^{Ba}	9.36±0.73^{Cb}	11.50±1.64^{Ba}	11.06±0.44^{Ba}	19.44±2.36^{Aa}	11.08±0.38^{Ba}	13.74±2.11^{Ba}	11.40±1.41^{Ba}	12.36±1.26^{Ba}	10.17±1.32^{Ca}	11.17±2.25^{Ba}
	12	12.01±0.65^{Ba}	12.72±0.67^{Ba}	11.92±2.34^{Ba}	10.29±1.01^{Ba}	16.40±3.67^{Aa}	9.90±1.77^{Bb}	10.47±1.77^{Ba}	9.85±1.73^{Ba}	11.96±1.06^{Ba}	11.28±3.14^{Ba}	11.41±1.33^{Ba}
	4	12.50±0.99^{Ba}	11.73±0.92^{Ba}	10.67±2.25^{Ba}	11.28±1.13^{Ba}	17.88±2.33^{Aa}	10.85±2.12^{Bab}	11.28±0.59^{Ba}	10.18±1.53^{Ba}	10.97±0.94^{Ba}	11.41±1.24^{Ba}	10.32±0.91^{Ba}

注：同行不同大写英文字母表示同一储藏温度不同储藏时间在 $P<0.05$ 水平差异显著；同列不同小写英文字母表示同一处理组同一储藏时间不同温度处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著，下表同。

两者与 40~55 d 多数时间点变化不显著。进一步比较发现，在储藏进入到后期阶段(第 40~55 d)，4 ℃处理硬度波动较小；CK 组 50 d 时 20 ℃、12 ℃显著低于 4 ℃ (P<0.05)，CK+20 ℃组的硬度降低到了 8.86 kN，CK+12 ℃组的硬度降低到了 8.62 kN。此外，CM+4 ℃的硬度保持状况最为稳固，在多数储藏时间内未出现明显波动，仅 25 d 出现短暂升高。

如表 2 所示，储藏温度以及施肥处理对于库尔勒香梨果实的脆度产生了显著的影响(P<0.05)。CM+4 ℃脆度多数时间稳定，但 40~45 d 出现显著波动(P<0.05)，其余时间点间差异不显著。在储藏中期(25~30 d)，DK+4 ℃组在 30 d 时脆度显著高于其 12 ℃和 20 ℃处理组(P<0.05)，表现出低温优势；DK+4 ℃组在 25 d 时脆度反而显著低于其 12 ℃和 20 ℃处理组(P<0.05)。此外，CM+4 ℃处理组在整个储藏进程当中脆度的表现平稳，未出现如其他处理组在储藏中期那样的脆度异常峰值，展现出了最为优异的脆度保持能力。上述质地保持效果与草木樨作为豆科植物所具有的改善根际微环境、促进养分均衡供给的特性密切相关[17]。这很可能是通过影响果实发育过程中的细胞壁构建与物质积累，为采后果实抗软化能力奠定了结构基础[18–19]。

表 2 不同储藏温度库尔勒香梨的脆度(kN)

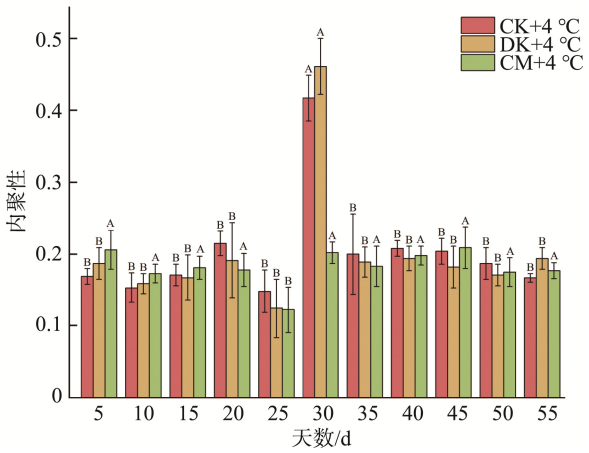
Table 2 Crispness of *Pyrus sinkiangensis* Yu at different storage temperatures (kN)

组别	储藏温度/℃	5 d	10 d	15 d	20 d	25 d	30 d	35 d	40 d	45 d	50 d	55 d
CK	20	9.16±1.01^{Ba}	9.43±2.66^{Ba}	6.69±0.83^{Bb}	6.65±1.24^{Ba}	8.27±2.06^{Ba}	23.71±1.70^{Aa}	7.16±1.92^{Ba}	8.49±2.41^{Ba}	6.07±1.08^{Bb}	5.80±1.50^{Ca}	9.14±2.03^{Ba}
	12	10.81±0.62^{Ba}	8.41±1.92^{Cb}	7.64±1.57^{Cb}	7.77±1.16^{Ca}	7.16±0.58^{Ca}	14.65±1.38^{Ab}	8.95±1.07^{Ba}	7.58±1.16^{Ca}	9.31±1.63^{Ba}	6.32±1.31^{Ca}	6.09±0.66^{Ca}
	4	9.88±0.90^{Ba}	8.69±1.04^{Bb}	9.38±2.33^{Ba}	6.41±0.66^{Ca}	7.31±1.35^{Ba}	24.54±1.80^{Aa}	9.59±1.07^{Ba}	8.72±1.18^{Ba}	6.64±1.24^{Ca}	8.52±2.05^{Ba}	8.22±1.61^{Ba}
DK	20	10.73±0.79^{Ba}	9.77±1.81^{Ba}	6.98±0.72^{Cc}	7.99±1.69^{Ba}	8.48±1.82^{Ba}	20.63±1.27^{Ab}	9.75±0.99^{Ba}	6.78±1.18^{Ca}	8.62±1.80^{Ba}	8.81±1.45^{Ba}	7.72±2.49^{Ca}
	12	9.55±1.47^{Ba}	10.11±0.80^{Ba}	10.95±0.70^{Ba}	7.56±1.94^{Ca}	11.00±1.38^{Ba}	20.31±1.29^{Ab}	9.42±1.59^{Ba}	5.95±2.81^{Ca}	6.33±0.87^{Ca}	7.36±1.81^{Ca}	8.34±1.81^{Ba}
	4	9.42±1.71^{Ba}	8.97±1.66^{Bb}	9.20±1.95^{Bb}	6.83±2.03^{Ba}	4.35±1.74^{Cb}	35.14±2.00^{Aa}	8.75±2.10^{Ba}	6.90±0.94^{Ba}	6.65±1.46^{Ba}	6.65±0.95^{Ba}	7.48±2.31^{Ba}
CM	20	8.79±0.91^{Aa}	8.22±1.24^{Ab}	9.43±1.63^{Aa}	8.01±0.79^{Aa}	9.41±2.50^{Aa}	5.70±0.97^{Ba}	9.58±2.16^{Aa}	9.67±1.57^{Aa}	8.24±1.31^{Aa}	7.12±1.74^{Aa}	7.91±1.08^{Aa}
	12	9.64±1.01^{Aa}	10.96±1.89^{Aa}	7.61±0.73^{Aa}	8.15±0.81^{Aa}	7.57±1.89^{Aa}	7.51±1.85^{Ba}	7.62±1.62^{Aa}	7.15±2.20^{Ba}	8.09±1.60^{Aa}	8.20±2.09^{Aa}	9.78±2.55^{Aa}
	4	9.46±0.84^{Aa}	10.80±0.68^{Aa}	7.76±2.91^{Aa}	9.90±2.76^{Aa}	10.22±1.74^{Aa}	7.13±2.27^{Aa}	9.36±1.60^{Aa}	6.72±1.67^{Ba}	6.17±1.09^{Ba}	8.82±1.87^{Aa}	7.27±2.48^{Aa}

2.2 其他质构指标在最佳储藏温度下的变化

2.2.1 内聚性

如图 2，观察不同储藏期的变化趋势，CM+4 ℃组在所设定的 11 个测定时间点当中，相较于 CK+4 ℃和 DK+4 ℃处理，CM+4 ℃处理的果实内聚性在 55 d 储藏期内保持了更高且更稳定的水平，尤其是在第 30 d 未出现 CK+4 ℃和 DK+4 ℃那样的异常峰值波动，表明其质地变化更为平缓，细胞结构维持更好。进一步比较发现，CM+4 ℃组在多个颇具关键意义的时间点上(5、30、50 d)，其内聚性值都没有出现异常值。在第 30 d 时，CK+4 ℃组以及 DK+4 ℃组都出现了异常的峰值情况，然而 CM+4 ℃组维持在正常水平之上，这说明 CM 处理是能够有效地规避内聚性出现异常波动。除此之外，在储藏进入到后期阶段(40~55 d)，CM+4 ℃组所呈现出来的内聚性值为 0.167~0.209，整体保持相对稳定。内聚性稳定可能得益于采前草木樨绿肥优化细胞壁果胶交联结构，奠定良好初始黏结基础；采后 4 ℃低温有效抑制果胶降解酶活性，减缓细胞间层解体，二者协同维持了细胞间结合力的长期稳定。值得注意的是，尽管均处于 4 ℃这一最适低温条件下，不同绿肥处理组的果实品质维持效果仍表现出明显差异。这说明果实采后表现不仅受贮藏环境调控，采前形成的“初始品质”同样具有关键影响。与以往主要关注绿肥对土壤改良的研究不同[20–22]，该结果揭示了草木樨绿肥在维持果实内聚性这种关键质地参数方面的突出作用。



注：不同字母表示同一处理组不同储藏时间差异显著(P<0.05)，下图同。

图 2 不同绿肥处理的库尔勒香梨的内聚性

Fig.2 Cohesiveness of *Pyrus sinkiangensis* Yu under different green manure treatments

2.2.2　弹　性

如图 3，观察不同储藏期的变化趋势，与 CK+4 ℃和 DK+4 ℃处理相比，CM+4 ℃处理果实的弹性在 55 d 的储藏期内保持了极高的稳定性。最为关键的是，在储藏中期(第 30 d)，当 CK+4 ℃和 DK+4 ℃果实的弹性出现急剧下降(分别降至 0.32 和 0.28)时，CM+4 ℃果实的弹性仍维持在接近初始的高水平(0.60)。此外，CM+4 ℃组在储藏后期(40~55 d)弹性值较早期与中期依然保持较强的稳定性。从机制上看，4 ℃低温可有效抑制多聚半乳糖醛酸酶等细胞壁降解酶的活性，从而延缓果实软化进程[23–26]。本研究结果显示，在 4 ℃条件下，草木樨绿肥处理能更好地维持硬度、内聚性与弹性，说明该处理可能进一步优化了果实的细胞壁组成或结构，从而在低温抑制酶活性的基础上，增强了细胞壁网络的稳定性和回弹能力。

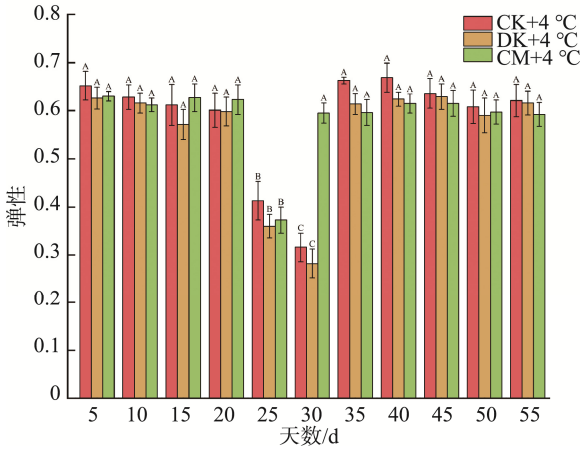


图 3　不同绿肥处理的库尔勒香梨的弹性

Fig.3　Elasticity of *Pyrus sinkiangensis* Yu under different green manure treatments

2.2.3　咀嚼性

如图 4 所示，CK+4 ℃组数值波动剧烈(965.94±63.81 至 3515.22±142.73)，尤其在 30 d 出现异常峰值，此后显著下降(P<0.05)，表明其质地稳定性较差。DK+4 ℃组和 CM+4 ℃组整体较为平稳，未出现如 CK+4 ℃组那样的异常峰值波动，表现出优异的咀嚼性保持能力。原因可能是绿肥改良通过改善土壤养分供应促进果实细胞壁结构完整性，显著提升质地稳定性。已有文献证实绿肥可增强贮藏性能，有机肥能延缓软化[27–28]。本研究中 CM+4 ℃组咀嚼性变异小、无异常波动，正是绿肥维持果胶稳定性的体现；而 CK+4 ℃组因缺乏绿肥改良，初始结构均匀性差，更易受多聚半乳糖醛酸酶、果胶甲酯酶等细胞壁降解酶影响，导致贮藏中后期质地参数剧烈波动。

2.2.4　胶黏性

如图 5 所示，观察不同储藏期变化趋势，CK+4 ℃与 DK+4 ℃处理的胶黏性均出现显著的阶段性劣变(P<0.05)，

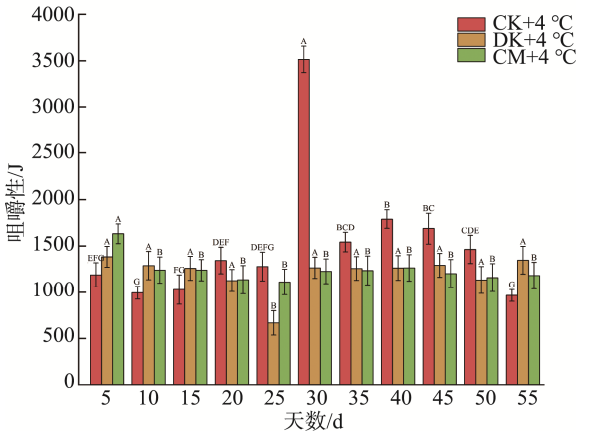


图 4　不同绿肥处理的库尔勒香梨的咀嚼性

Fig.4　Chewiness of *Pyrus sinkiangensis* Yu under different green manure treatments

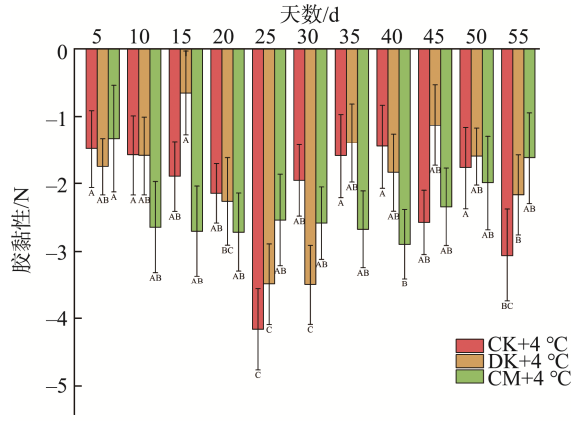


图 5　不同绿肥处理的库尔勒香梨的胶黏性

Fig.5　Adhesiveness of *Pyrus sinkiangensis* Yu under different green manure treatments

CK+4 ℃在第 25 d 降至–4.16，DK+4 ℃则在第 15 d 异常升高后于第 25~30 d 连续陷入低谷，两者波动剧烈。相比之下，CM+4 ℃处理的胶黏性全程保持平稳，始终在–1.33 至 –2.90 的窄幅区间内波动，未发生任何异常骤变。进一步比较发现，在第 25 d 的共同劣变期，CM+4 ℃ (–2.54)的保持效果优于 CK+4 ℃ (–4.16)和 DK+4 ℃ (–3.49)；至储藏 55 d，CM+4 ℃ (–1.62)的恢复状态也更好。因此，无论从自身变化的连续性还是关键节点的横向比较，CM+4 ℃处理都是维持胶黏性长期稳定的最佳选择。胶黏性稳定与高水平可能得益于“采前-采后”协同作用。采前草木樨绿肥通过改善土壤及养分供给，促进果实发育期细胞壁多糖及果胶的稳定沉积，增强组织内聚力。采后 4 ℃低温环境有效抑制果胶酶等多糖降解酶的活性，减缓细胞壁结构破坏，从而在贮藏中后期维持了较高的胶黏性。这些结果与淀粉类食品的老化过程相似，后者同样受温度调控以维持质地[29–30]，进一步印证了温度在维持食品质构方面具有普遍作用。同时，胶黏性与硬度、咀嚼性等质地参数间的关

联变化[31–32]，也系统说明果实质地劣变实质上是细胞结构整体松弛的过程。

2.2.5 回复性

如图 6 所示，观察不同储藏期的变化趋势，CK+4 ℃与 DK+4 ℃表现出相似的剧烈波动模式。两者在绝大多数时间点(5~25 d 及 35~55 d)的回复性值均维持在较低水平(约 0.05~0.09)，但在第 30 d 均出现一个异常、突兀的峰值(CK+4 ℃: 0.25; DK+4 ℃: 0.27)，随后迅速回落。这表明，在 20 ℃储藏下，未施肥或仅施用葵花绿肥的果实，其恢复原状的能力在中期经历了显著的，但可能是短暂的紊乱或结构变化，品质稳定性差。进一步比较发现，CM+4 ℃的回复性总体保持相对稳定，未出现如 CK+4 ℃和 DK+4 ℃组那样的异常峰值波动。CM+4 ℃组在 30~55 d 期间，其回复性值处于 0.07~0.09 范围内，会比其他所有的处理组都要稳定。低温贮藏通过抑制果实生理代谢维持细胞壁完整性，从而保持回复性稳定。已有研究表明，4 ℃处理能显著延缓硬度、弹性及回复性等质地参数的下降，其机制在于低温抑制了淀粉代谢酶活性[33]。有 TPA 研究证实，回复性与硬度、咀嚼性呈显著正相关[34]。本研究中 CM+4 ℃组回复性在多数时间点无显著差异，正是 4 ℃低温有效抑制生理代谢、维持细胞壁结构完整性的体现；而 CK+4 ℃组和 DK+4 ℃组在后期出现的异常峰值，则反映了缺乏低温调控时果实代谢失衡导致的质地参数剧烈波动。

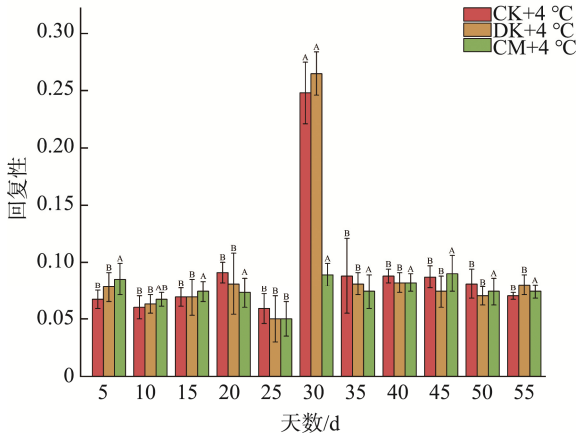


图 6 不同绿肥处理的库尔勒香梨的回复性

Fig.6 Response of *Pyrus sinkiangensis* Yu under different green manure treatments

2.2.6 黏附性

如图 7 所示，观察不同储藏期的变化趋势，CK+4 ℃波动最剧，中期(30 d)达峰值后末期(55 d)骤降至谷底(1560.85)，品质极不稳定；DK+4 ℃整体数值较高(2037.30~2445.11)且变化平缓，保持力较好；CM+4 ℃则在中后期(20~50 d)于高位窄幅区间保持高度稳定，末期(1822.57)仅小幅回落，展现显著的长期平稳性。进一步比较发现，多数时间点 DK+4 ℃与 CM+4 ℃数值相当且均高于 CK+4 ℃ 末期 CM+4 ℃保持水平明显优于 CK+4 ℃，虽略低于 DK+4 ℃，但其全程稳定的衰退模式更具可控性和可靠性。综合表明，CM+4 ℃(草木樨绿肥)在维持黏附性长期稳定方面表现最优。以上现象可能源于绿肥改良促进果胶稳定性，抑制了多聚半乳糖醛酸酶、甲胶甲酯酶等细胞壁降解酶活性。现有研究表明，富士苹果贮藏期间黏附性与其他质地参数呈负相关[34]，处理组稳定性显著优于对照组，印证了本研究中 CM+4 ℃组在 4 ℃低温下维持细胞壁结构、保持黏附性稳定的优势。

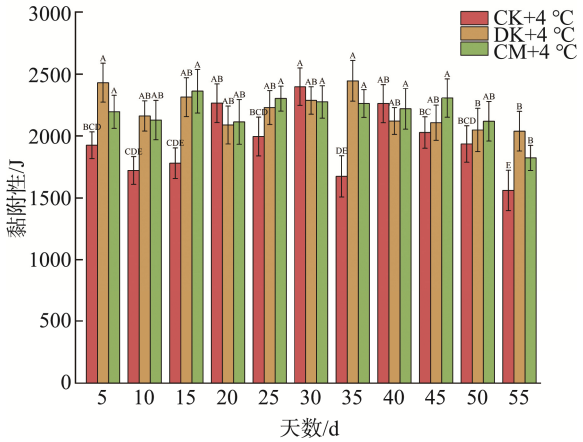


图 7 不同绿肥处理的库尔勒香梨的黏附性

Fig.7 Gumminess of *Pyrus sinkiangensis* Yu under different green manure treatments

3 结 论

此研究结果显示，4 ℃低温冷链是维持库尔勒香梨采后综合品质的最适贮藏温度。该结论基于多项理化与质地指标的系统评估而来：在长达 55 d 的储藏时间内，4 ℃能够较为有效地对果实的生理代谢起到抑制作用，把重量损失率控制在相对较低的水平，该处理有效维持了果实的外观形态与饱满度。4 ℃低温贮藏对维持果实质构特性至关重要，它在硬度、脆度等这些关乎食用品质的关键指标方面，该指标变化幅度最小、波动最低，表现出显著的稳定性。

在 4 ℃最适贮藏温度下，草木樨绿肥处理是提升库尔勒香梨贮藏品质的最优选择。与葵花绿肥处理及无施肥对照组相比，CM 处理在多数质构指标上均表现出优势。该处理不仅能在整个贮藏期内维持较高的硬度和脆度，其弹性、内聚性与回复性也保持相对稳定，有效抑制了 CK 与 DK 组在贮藏中期出现的指标波动。因此，草木樨绿肥结合 4 ℃低温贮藏，可作为保持库尔勒香梨采后品质的较优配套技术方案。

参考文献

[1] 金敏, 张倩, 张天正, 等. 库尔勒香梨短果枝花序维管束与萼片脱落关系研究[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(11): 55–61.

JIN M, ZHANG Q, ZHANG TZ, *et al*. Relationship between the inflorescence vascular bundles of *Pyrus sinkiangensis* Yu pear short fruit branches and sepal shedding [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(11): 55–61.

[2] 张慧岚. 气候条件对库尔勒香梨生长影响的分析[J]. 气象, 2005(8): 84–86.
ZHANG HL. Analysis of the influence of climatic conditions on the growth of *Pyrus sinkiangensis* Yu [J]. Meteorological Monthly, 2005(8): 84–86.

[3] POTT MD, VALLARINO GJ, OSORIO S. Metabolite changes during postharvest storage: Effects on fruit quality traits [J]. Metabolites, 2020, 10(5): 187.

[4] 胡健. 提高水果业竞争力的应对策略[J]. 农村经济, 2003(7): 67–69.
HU J. Strategies to improve the competitiveness of the fruit industry [J]. Rural Economy, 2003(7): 67–69.

[5] 于淑慧, 朱国梁, 董浩, 等. 绿肥间作和滴灌对苹果园土壤肥力和果实品质的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 640–647.
YU SH, ZHU GL, DONG H, *et al*. Effects of intercropping green manure and drip irrigation on soil fertility and apple fruit quality in apple orchards [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(3): 640–647.

[6] LI YL, ZHAO YT, ZHANG ZC, *et al*. Near-freezing temperature storage improves shelf-life and suppresseschilling injury in postharvest apricot fruit (*Prunus armeniaca* L.) by regulating cell wall metabolism [J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132921.

[7] 李世元. 冲击载荷下库尔勒香梨损伤特性及品质劣变规律研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2024.
LI SY. The damage characteristics and mechanism of quality deterioration in *Pyrus sinkiangensis* Yu under impact load [D]. Alaer: Tarim University, 2024.

[8] 吕金海, 伍贤进, 李艳丽, 等. 金秋梨采后的生理变化[J]. 中国南方果树, 2001(5): 36–37.
LV JH, WU XJ, LI YL, *et al*. Physiological changes of *Pyrus pyrifolia* ‘Jinqiu’ after harvest [J]. South China Fruits, 2001(5): 36–37.

[9] 王燕霞, 王晓蔓, 关军锋. 梨果肉质地性状分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(20): 4056–4066.
WANG YX, WANG XM, GUAN JF. Flesh texture characteristic analysis of pear [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(20): 4056–4066.

[10] 张金阁, 周婷, 王鹏, 等. 香梨脆度的力声同步检测[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 290–298.
ZHANG JG, ZHOU T, WANG P, *et al*. Smultaneous mechanical-acoustic measurement of the crispness of pears [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 290–298.

[11] 梁媚聪, 秦圆圆, 樊星, 等. IPCC 第六次评估报告第三工作组报告主要结论解读及对策建议[J]. 环境保护, 2022, 50(13): 72–76.
LIANG MC, QIN YY, FAN X, *et al*. Interpretation of the main conclusions and suggestions of IPCC AR6 working group III report [J]. Environmental Protection, 2022, 50(13): 72–76.

[12] 张敏. 准格尔旗物候变化及其对气候变化的响应[J]. 数字农业与智能农机, 2024(4): 48–50.
ZHANG M. Phenological changes in Jungger Banner and its response to climate change [J]. Digital Agriculture and Intelligent Agricultural Machinery, 2024(4): 48–50.

[13] 费靖淳, 于佳卉, 赵海琳, 等. 姜黄素对即食海参冷藏过程中品质变化的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 367–376.
FEI JC, YU JH, ZHAO HL, *et al*. Effect of curcumin on the quality change of ready-to-eat sea cucumber during cold storage [J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 367–376.

[14] 李莉峰, 叶春苗, 韩艳秋. 不同干燥方式对南果梨干理化指标及质构特性的影响[J]. 食品工业, 2018, 39(10): 46–49.
LI LF, YE CM, HAN YQ. Effects of different drying methods on dry physicochemical index and texture characteristics of *Pyrus ussuriensis* ‘Nanguo’ [J]. The Food Industry, 2018, 39(10): 46–49.

[15] 冯慧敏, 郭玉明, 武新慧. 基于穿刺试验苹果力学性质的研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(1): 188–191.
FENG HM, GUO YM, WU XH. Study on mechanical properties of apple based on puncture tests [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(1): 188–191.

[16] 申江, 王晓东, 王素英, 等. 冰温技术应用实验研究[J]. 制冷学报, 2009, 30(4): 40–45.
SHEN J, WANG XD, WANG SY, *et al*. Experimental study on application of ice-temperature technology [J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(4): 40–45.

[17] 李杰, 沈幸, 何展一, 等. 微生物肥与绿肥对库尔勒香梨园土壤真菌群落结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(7): 1297–1315.
LI J, SHEN X, HE ZY, *et al*. Effects of microbial fertilizer and green manure on the soil fungal community structure in *Pyrus sinkiangensis* Yu orchard [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2025, 31(7): 1297–1315.

[18] 熊媛, 任襄襄, 朱慧, 等. 果胶甲酯酶抑制蛋白(PMEIs)的功能性研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 2022, 42(8): 99–108.
XIONG Y, REN XX, ZHU H, *et al*. Recent progress in the functional research of PMEIs [J]. China Biotechnology, 2022, 42(8): 99–108.

[19] 朴一龙, 赵兰花, 薛桂新. 梨果实在贮藏过程中细胞壁成分的变化[J]. 果树学报, 2006(6): 880–883.
PIAO YL, ZHAO LH, XUE GX. Change in cell wall components during storage of pear fruit [J]. Journal of Fruit Science, 2006(6): 880–883.

[20] 万璇, 林欣, 彭俊森, 等. 不同贮藏温度下李果实的品质比较[J]. 现代食品科技, 2024, 40(4): 142–155.
WAN X, LIN X, PENG JS, *et al*. Physiological comparison of plum fruit quality at different storage temperatures [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(4): 142–155.

[21] 袁杨. 生物炭与绿肥对柚园土壤肥力和果实品质的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2023.
YUAN Y. Effects of biochar and green manure on soil fertility and fruit quality in pomelo orchards [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2023.

[22] 丁婷婷, 段廷玉. 果园绿肥对果树-土壤-微生物系统影响研究进展[J]. 果树学报, 2021, 38(12): 2196–2208.
DING TT, DUAN TY. Research progress on the influence of orchard green manure on fruit tree-soil-microbe system [J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(12): 2196–2208.

[23] CHEN JY, CHEN YH, DUAN XW, *et al*. Near-freezing temperature suppresses avocado (*Persea americana* Mill.) fruit softening and chilling injury by maintaining cell wall and reactive oxygen species metabolism

during storage [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2024, 204: 108576.

[24] 苏蒙莎, 莫琼雪, 郭东起, 等. 库尔勒香梨采后品质劣变与贮藏保鲜研究进展[J]. 北方园艺, 2023(23): 129–135.
SU MS, MO QX, GUO DQ, *et al*. Research progress on postharvest quality deterioration and preservation of *Pyrus sinkiangensis* Yu [J]. Northern Horticulture, 2023(23): 129–135.

[25] 邓冰, 韩云云, 韩艳文, 等. 库尔勒香梨缓慢降温后适宜温湿度条件的研究[J]. 包装工程, 2016, 37(7): 45–50.
DENG B, HAN YY, HAN YW, *et al*. Optimal temperature and humidity conditions of *Pyrus sinkiangensis* Yu under slow cooling [J]. Packaging Engineering, 2016, 37(7): 45–50.

[26] 梁洁玉, 朱丹实, 赵丽红, 等. 低温贮藏李子细胞壁酶活性变化对果胶降解的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(5): 212–218.
LIANG JY, ZHU DS, ZHAO LH, *et al*. Effect of changes in cell wall enzyme activity on degradation of pectin during low-temperature storage of plum [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(5): 212–218.

[27] XU R, LI Y, ZHANG H, *et al*. Synergistic benefits of leguminous green manure intercropping for weed control and productivity improvement in pear orchards [J]. Scientia Horticulturae, 2025, 334: 113755.

[28] 常显静, 王然, 王海波, 等. 施用有机肥及套袋处理对苹果桃果实品质及采后保鲜效果的影响[J]. 广东农业科学, 2021, 48(11): 103–110.
CHANG XJ, WANG R, WANG HB, *et al*. Effects of organic fertilizer and bagging treatment on fruit quality and postharvest preservation of apple peach [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2021, 48(11): 103–110.

[29] 杨喆, 韩雪, 张丽娟, 等. 抑制大米制品回生技术的研究进展[J]. 食品工业, 2017, 38(12): 258–262.
YANG Z, HAN X, ZHANG LJ, *et al*. Research progress on anti-retrogradation technique of rice products [J]. The Food Industry, 2017, 38(12): 258–262.

[30] WANG S, LI C, COPELAND L, *et al*. Starch retrogradation: A comprehensive review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2015, 14(5): 568–585.

[31] 徐钰清, 田路明, 曹玉芬, 等. 7 个梨品种不同熟期果肉质地评价分析[J]. 果树学报, 2023, 40(10): 2112–2123.
XU YQ, TIAN LM, CAO YF, *et al*. Evaluation of flesh texture of seven pear varieties at different ripening stages [J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(10): 2112–2123.

[32] 袭祝滨, 王凤昭, 毕金峰, 等. 猕猴桃果实贮藏期特性对蓝莓-猕猴桃复合果浆品质的影响[J/OL]. 农业工程学报, 1–11. [2025-12-09]. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202504241
XI ZB, WANG FZ, BI JF, *et al*. Effect of the kiwifruit's properties during storage on the quality of blueberry-kiwifruit composite pulp [J/OL]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1–11. [2025-12-09]. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202504241

[33] LIU Y, ZHANG Y, CHEN Y, *et al*. Examining starch metabolism in lotus roots during post-harvest storage at different temperatures [J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 210: 117601.

[34] 潘秀娟, 屠康. 质构仪质地多面分析(TPA)方法对苹果采后质地变化的检测[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 166–170.
PAN XJ, TU K. Detection of postharvest texture changes in apple by texture profile analysis (TPA) with texture analyzer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(3): 166–170.

(责任编辑: 安香玉 韩晓红)