红毛丹果实保鲜技术研究进展

陈娇[1]，李芬芳[1]，李奕星[1]，袁德保[1,2]，蒋跃明[2]
（1.中国热带农业科学院海口实验站，海南省香蕉遗传改良重点实验室，海南海口 570101）
（2.中国科学院华南植物园，广东广州 510650）

摘要：红毛丹果实风味好且营养价值高，被联合国粮农组织列为优先推广“四大水果”之一，在运输及贮藏的过程中极易发生失水、褐变、腐烂等问题，极大影响外观品质和营养品质。现有保鲜技术存在技术单一、针对性不强、应用难、不安全等问题。本文对红毛丹果实的机械损伤、失水失重、果实冷害、酶促褐变、采后病害和虫害等贮运中存在的问题进行了详细阐述，从采前、采收以及采后环节对保鲜技术进行了归纳总结。着重从商品化处理、物理、化学、生物和综合保鲜等方面，概述了近年来国内外红毛丹采后保鲜技术的研究进展，并展望了今后红毛丹保鲜技术研究与应用的发展方向，以期为红毛丹尤其是国产红毛丹保鲜技术的深入研究提供一定的理论指导。

关键词：红毛丹果实；存在问题；保鲜；发展趋势
文章篇号：1673-9078(2020)06-328-334 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.6.1046

Research Progress in Preservation of Rambutan Fruit

CHEN Jiao[1], LI Fen-fang[1], LI Yi-xing[1], YUAN De-bao[1,2], JIANG Yue-ming[2]
(1.Haikou Experimental Station, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Hainan Key Laboratory of Banana Genetic Improvement, Haikou 570101, China) (2.South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Rambutan fruit has good flavor and high nutritional value, and is promoted as one of the "four major fruits" by FAO. The fruit is extremely prone to water loss, browning, and rot during transportation and storage, which greatly affects fruit’s appearance and nutritional quality. The existing preservation technologies have problems such as single technology, weak pertinence, high application difficulty and insecurity. In this paper, the problems associated with rambutan fruit such as mechanical damage, water and weight loss, chilling injury, enzymatic browning, post-harvest diseases and insect pests are discussed in detail, and the pre-harvest, harvest and post-harvest preservation technologies are summarized, with the focus on commercialized treatment, and physical, chemical, biological and comprehensive preservation techniques. The recent research progress in preservation technologies for rambutan fruit domestically and abroad is overviewed. The development trend of research and application of the preservation technologies for rambutan in the future is prospected, which provides certain theoretical guidance for further research of the storage and preservation technologies for rambutan, especially the domestic rambutan.

Key words: rambutan fruit; existing problems; preservation; development trend

引文格式：

陈娇,李芬芳,李奕星,等.红毛丹果实保鲜技术研究进展[J].现代食品科技,2020,36(6):328-334

CHEN Jiao, LI Fen-fang, LI Yi-xing, et al. Research progress in preservation of rambutan fruit [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(6): 328-334

红毛丹（*Nephelium lappaceum* L.），无患子科热带高大乔木果树，别名毛荔枝。被联合国粮农组织列为优先推广“四大水果”之一。泰国、马来西亚、越南、缅甸、印度尼西亚、菲律宾、澳大利亚、斯里兰卡、中美洲国家、南非、美国夏威夷和波多黎各及中国海南保亭县、三亚、琼中都有较大量种植。红毛丹含有丰富的营养，味甜至酸甜，果肉甘香甜美厚而多汁，抗坏血酸（Vc）含量范围为 22~47 mg/100 g FW，可溶性固形物含量（SSC）为 17%~21%，可滴定酸（TA）为 0.18%~0.55%，长期食用可清热解毒、滋润肌肤、提高人体免疫力[1,2]。作为典型的热带非跃变型果实，

收稿日期：2019-10-28
基金项目：海南省自然科学基金青年项目（318QN289）；海南省科技计划项目（ZDYF2018147）；海南省重点研发计划项目（ZDYF2019208）；中国热带农业科学院基本科研业务费专项（1630092018008）
作者简介：陈娇（1983-），女，博士，副研究员，研究方向：采后科学
通讯作者：袁德保（1982-），男，博士，副研究员，研究方向：果蔬贮藏与加工

红毛丹成熟果实 25 ℃下呼吸速率变化范围为 40~100 mg/(kg·h)，且贮藏期间易发生病害使呼吸速率和乙烯生成率增加导致腐烂等，另外红毛丹果实采后易发生冷害、失水快，严重降低了红毛丹果实货架期和商品价值[3]。因此，研究红毛丹果实保鲜技术对于保证果品商品价值具有重要意义，同时可提高果品耐贮藏和运输能力，拓宽销售市场范围。目前，关于红毛丹的贮藏保鲜技术，国内外的研究都还比较少，实际应用较多的气调、低温等保鲜方法虽然具有节能、贮藏期长等优点，但一般经济投入大，很难大规模应用。而现有的在红毛丹上运用的化学保鲜技术存在化学成分残留的隐患问题，尤其是红毛丹果皮较薄，破损后果实内部易渗入化学毒物。另外，现有研究基本针对国外红毛丹品种开展单一技术研究，然而果实贮运过程复杂且国内外红毛丹果实贮藏特性差异大。因此，本文根据近年来的研究成果对红毛丹采后贮运中存在的问题及保鲜技术的发展等方面进行综述，为进一步进行安全、高效、绿色的红毛丹尤其是国产果实采后保鲜技术的研究提供参考借鉴。

1 红毛丹果实贮运中存在问题

1.1 机械损伤

红毛丹果实软刺脆弱极易发生机械损伤，过于粗放的采收方式、包装过于紧密和散装运输等都会导致机械损伤。机械损伤会加速红毛丹果实软刺褐变[4]，并给采后病原菌制造入侵的伤口。

1.2 失水失重

果实失水大于 25%时就完全失去商品价值[5]。红毛丹果实采后贮运时，失重率依次为软刺、果皮、果肉[6]。红毛丹软刺与果皮内维管束相连，并具有高比表面积特性以及相当于果皮 5 倍的高密度气孔分布，使得红毛丹果实极易通过软刺失水。因此，软刺密度大的品种，更易失水失重[5]。‘Seechompoo’果实的气孔密度比‘Rongrien’果实大[7]，我国海南产红毛丹果实中 BR7 号的软刺密度最小为 4.6 根每平方厘米，S-BR1 号的软刺密度最大为 11.48 根每平方厘米，其他品系介于两者之间[8]。

1.3 果实冷害

红毛丹果实易出现冷害，且冷敏性跟品种和成熟度密切相关。大部分品种贮藏温度不能低于 10 ℃，并且成熟度越高越耐冷。‘Jitlee’、‘R156’和‘Lebakbulus’果实在 5~7.5 ℃间出现冷害[9]，而‘R7’和‘R162’果实能忍受 7.5~8 ℃的低温[9]。冷害发生时，红毛丹果实果皮中的花色苷含量下降，黄色品种果实呈现古铜色，而红色品种果皮发黑[10]。

1.4 酶促褐变

红毛丹果实采后易发生褐变，通常从软刺顶部向底部移动进而延伸到果皮，当软刺底部发生损失时会加速该区域褐变速度，从而严重影响红毛丹果实的商品价值和货架期[5]。红毛丹果皮色泽鲜红，花青素含量丰富，而褐变是一系列导致花青素降解为醌的生化反应结果[11]。细胞中花青素结构的稳定与细胞液 pH 直接相关，果实失水失重是影响细胞液 pH 并发生酶促褐变的一个重要原因[12]。95%以上高湿贮藏环境能大幅减少果实失水，减轻褐变的发生[12]。而干燥失水使细胞液 pH 值增加，花青素逐渐转化为无色的甲醇碱，产生褐变。同时，干燥失水破坏了细胞生物膜完整性，进而液泡中多酚和花青素与多酚氧化酶（PPO）、过氧化物酶（POD）等相关酶反应，发生褐变[5]。‘Rongrien’和‘Seechompoo’果实在 25 ℃、60%~70%相对湿度（RH）贮藏时，软刺中 PPO 和 POD 活性高于果皮且 PPO 活性高于 POD 活性[13]。总之，红毛丹果实果皮的褐变敏感性与软刺的失水特性、蜡状物质的完整性以及 PPO 和 POD 活性紧密相关[6,13]。

1.5 采后病害

病害是影响红毛丹采后贮藏期的重要因素[9]。蒂腐病、褐斑病和炭疽病为红毛丹的主要采后病害[14]。蒂腐病病原微生物通过潜伏性感染或者茎末端切面伤口入侵，使红毛丹果实从茎末端开始褐变腐烂、并在 4~5 d 内扩展到整个果实[9]。褐斑病早期症状为果皮出现水浸状浅棕色斑点，随后棕色斑点变大、颜色变深进而长出灰褐色菌丝。炭疽病通过真菌潜伏感染或直接侵入，发病初期类似褐斑病，后期黑色圆形病灶体积增大形成大面积凹陷，常温高湿环境下产生橙色孢子。目前，在泰国、斯里兰卡和美国夏威夷、波多黎各等地产红毛丹果实中都已分离到 *Gliocephalotrichum bulbilium*[15]病原菌；在墨西哥、泰国、马来西亚、文莱以及美国夏威夷等地产红毛丹腐烂果实中分离到 *Lasiodiplodia theobromae*，*Pestalotiopsis* spp.，*Phomopsis* sp.[16,17]病原菌；已报道的致腐病原菌还有 *Calonectria hongkongensis* 和 *Glomerella* sp.[18]；从澳大利亚产红毛丹果实中分离到 *Colletotrichum* sp.，*Dothiorella dominicana*，*Fusarium* sp.，*Penicillium* sp.，*Pestalotiopsis* sp.，*Phomopsis* sp.，和 *Phoma sp.*[19]病原菌；*Lasmenia* 是夏威夷红毛丹最

常见的真菌疾病，93%的夏威夷品种果实中都分离出了 *Lasmenia*[15]。

1.6 采后虫害

红毛丹果实表面害虫包括粉蚧、介壳、蓟马、疥癣和蚂蚁等，它们通常不会损害果肉，但会严重影响果实的外观和商品性状。同时，地中海实蝇和东方果蝇易寄生在红毛丹果实上，红毛丹果实出口到没有这些害虫的国家或地区前需进行检疫处理[20]。另外，海南部分果园因采前管理不当导致蒂蛀虫发病严重，使得红毛丹果实完全失去贮藏价值和商品价值。

2 红毛丹果实保鲜技术研究进展

2.1 采前控制技术

红毛丹不同品种果实的品质和货架期差别较大。比表面积和软刺密度大的品种采后更易发生失水褐变；薄皮品种大雨后果皮更易开裂；部分品种具有更强的抗病性，如‘R167’[12]。同时，果树修剪、水肥管理以及病害控制方法对果实品质和产量有较大影响[3]。因此，选用抗病品种、采前喷洒杀菌剂、加强果园卫生管理和果树修剪等是减轻红毛丹果实发生采后病害的关键技术。

2.2 采收控制技术

红毛丹作为非跃变型果实，一般在完熟时采收，未完全成熟时采收，果实偏酸且风味不佳，过熟采收时，果实颜色偏暗、淡而无味、果肉浑浊且质感蓬松。一般可通过红毛丹果皮和软刺的颜色及糖酸比等风味判断果实成熟度。同时，需结合不同品种自身表型特征确定采收时间。如‘Banjo’、‘Lebakbulus’、‘Rongrien’和‘Jitlee’等果实变成红橙色时适合采收；‘R156’的果皮和软刺为黄色且软刺根部为粉红色时适合采收；‘Seematjan’的果皮和软刺呈略带粉红的黄色时适合采收[11,12]。另外，我国海南本地品系如保研 1 号、2 号、3 号、4 号、5 号、6 号和 7 号红毛丹果实一般在 6 月份到 11 月份之间采收[8]。每棵树通常只采收 1 次，一般在清晨采收，用枝剪或杆式剪枝器手工成串收割。红毛丹果实采收后成串捆绑，可进行简单冰水预冷后装框或箱，并快速运至包装处理地，运送过程要注意避震，以免造成机械损伤。

2.3 采后控制技术

2.3.1 采后商品化处理

果实的采后商品化处理包括预冷、清洗、分级、杀菌、打蜡、包装等。许多商业果园都采用了成套采后处理系统，包括去果梗机、浸泡槽、分拣台、分级机、纸箱组装区和包装区。快速预冷能有效减轻失重、延缓颜色变化、延长货架期，而水冷法是一种去除田间热的有效方法[21]。在澳大利亚，果实收获后通过喷洒冷水以去除田间热或者用水喷洒后置于高湿和 8~10 ℃较低温环境中以实现快速预冷。‘Rongrien’果实采收后通过 10 ℃水冷进而 13 ℃冷藏能显著抑制果实褐变，有效保持果实外观和抗坏血酸含量、可溶性固形物含量等营养品质，并有效减少呼吸速率。然而采用 2 ℃水冷时，冷害指数、失重率和呼吸速率增加、果实品质下降[21]。目前主要通过分级环、果实重量或市场特定需求而对果实进行分等和分级。另外，已有部分研究探讨了不同蜡质配方对红毛丹果实失重、外观品质及腐烂控制的影响[3]，如果实打蜡后于 10 ℃贮藏 14 d，果实外观仍呈鲜艳红色[3]。同时，红毛丹目前主要采用 2.25 或 4.50 kg 规格纤维纸箱、打孔或不打孔的塑料盒、泡沫箱进行包装。而在东南亚等地区，红毛丹果实也常有成簇销售的情况。

2.3.2 物理保鲜技术

2.3.2.1 低温贮藏

低温贮藏可显著延长果实贮藏寿命。红毛丹果实的贮藏寿命与贮藏温度紧密相关[3]。不同品种红毛丹果实适宜贮藏温度范围为 8~12 ℃，15~20 ℃贮藏时易发生衰老褐变，0~5 ℃贮藏时易发生冷害[9]。因此，贮运中，需根据不同品种果实选取适宜的温度并保证温度的相对稳定，从而减轻果实水分流失、果皮褐变、病害及冷害的发生，延长货架期。‘R162’果实 7.5 ℃贮藏时货架期最长；‘Jitlee’、‘R156’果实 10 ℃贮藏时货架期最长；‘Rongrien’果实 12 ℃贮藏时货架期最长[9]；‘Malaysian Red’果实 14 ℃和 95%湿度下贮藏寿命能达到 14 d；‘Malaysian Yellow’果实 10 ℃下贮藏寿命不足 7 d[10]；而 10 ℃低温能有效抑制海南红毛丹果实的呼吸强度，降低腐烂率，延长贮藏期[22,23]。另外，10 ℃低温结合真空贮藏可显著降低果皮褐变指数和延缓衰老，避免高浓度 CO_2 中毒，减少病原微生物侵染[22]。

2.3.2.2 气调贮藏

气调贮藏是果蔬采后贮藏中最常用的保鲜技术。气调贮藏包括人工气调保鲜(controlled atmosphere, CA)和自发性气调保鲜(modified atmosphere, MA)。CA 贮藏已被证实能有效延长红毛丹果实贮藏期。不同品种红毛丹果实 CA 贮藏条件一般为 7%~12% CO_2 和 3%~5% O_2[9]。例如，7~10 ℃和 95%湿度贮藏可使红毛丹果实贮藏期达 10~15 d，而增加 CO_2 浓度到

9%~12%可将贮藏期延长至 18~20 d[24]；1%~15% CO_2 结合 13 ℃和 90%~95%湿度可使‘Rongrien’果实失重、呼吸和乙烯产生速率下降，延迟果实衰老[25]。3% O_2 和 7% CO_2 结合 13.5 ℃低温贮藏可延长‘Malwana Special Selection’果实贮藏期至 21 d[26]；5%~10% CO_2 和≥2% O_2 使‘Rongrien’果实贮藏期延长[27]；5% O_2 或 9% CO_2 结合 10 ℃低温贮藏可使斯里兰卡相关品种贮藏期由 26 ℃贮藏时的 6~7 d 延长至 25~30 d[28]。但是，O_2 过低（1%）和 CO_2 过高（20%或 40%）都易导致果实出现异味[27]。

自发性气调包装（MAP）是指利用果实的呼吸作用和包装材料的选择透过性从而实现气体成分改变，达到气调贮藏效果。0.01 mm 和 0.04 mm 厚的 PE 袋能防止红毛丹果实发生失水褐变、延长红毛丹贮藏寿命至 6 d[29]。并且，MAP 与低温贮藏相结合后能大幅度延长果实贮藏寿命。例如，MAP 处理的红毛丹果实 20 ℃贮藏下很快发病，而 15 ℃低温贮藏能减轻腐烂并使贮藏期延长至 10 d；10 ℃低温结合 PE 袋贮藏，袋内 CO_2 含量从 7.5%增加至 9.2%，使‘Jitlee’果实贮藏 12 d 时，褐变和腐烂显著减少[30,31]。另外，果实于库中贮藏时，贮藏温度相对稳定，可最大化发挥 MAP 效应，而运输时极易出现温度波动，MAP 对果实贮藏寿命的影响则较难预测。相同设定低温条件下，运输时的果实发病率较高。所以运输情况下的包装材料的研发及相应 MAP 效应还需更多的研究。现有研究认为防潮性聚乙烯袋可用于低温下红毛丹的贮运[32]。

2.3.2.3 热处理

热处理包括热风、蒸热和热水处理等。为确保产品的生物安全，目前常采用强制热风及蒸热等检疫处理进出口果实，以杀灭果蝇、粉虱、介壳和蚂蚁等。另外，热水处理是控制果实采后病害的常用方法，但要注意处理温度和时间。致使病原菌萌发或菌丝生长完全灭活的热处理温度称为热灭活点，不同病原菌的热灭活点不一样，如 52 ℃热水处理 3 min 可抑制红毛丹病原菌 *C. gloeosporioides* 和 *G. microchlamydosporum* 的孢子萌发[20]。45 ℃热处理后 8 ℃低温贮藏可延迟红毛丹果皮 PPO 与 POD 峰值出现、抑制 PPO 活性、延缓 POD 活性下降、阻止果皮相对电导率升高、降低 V_C 和 SSC 损失[33]。红毛丹果实 48 ℃处理 1 min 后 10 ℃低温贮藏 4 d，能有效降低抗坏血酸和花青素损失；红毛丹果实 48 ℃处理 1 min 后 13 ℃和 95%湿度下贮藏使贮藏期延长至 14 d[33]。然而，进一步提高处理温度或延长处理时间，PPO 活性会增加从而导致褐变加重、腐生真菌生长，进而导致 SSC 下降和 TA 增加。50 ℃以上温度的热水处理超过 1 min 会造成后续低温贮藏中的果实失水失重[33]。

2.3.2.4 辐射处理

辐射处理即通过 X-射线、电子束等辐照果品干扰植物呼吸代谢、抑制微生物活动、延缓果实的衰老。辐射处理与传统技术相比，具有高效、安全且能耗低等优点。红毛丹果实从夏威夷出口到美国大陆时，常采用 400 Gy 辐照处理以杀灭果蝇和粉虱和介壳等表面害虫[20]。强制热风处理果实 10 ℃贮藏 4 d 后，果实品相较差，而果实辐照后 10 ℃贮藏至 8 d 时果实外观品质尚可接受，并且 0.75 kGy 剂量辐照的红毛丹果实风味相较对照好[20]。

2.3.3 化学保鲜技术

化学保鲜是指利用化学物质喷洒、涂抹或浸泡果蔬，通过抑制或杀死表面、周围环境中的微生物，以达到保鲜的目的。因其操作简便，在常温运输和贮藏中多运用此法。早期较多使用化学防腐剂，如多菌灵、抑霉唑、扑海因、噻苯咪唑和苯菌灵等杀菌剂对红毛丹果实采后病害有不同控制效果[34]。然而，传统化学合成杀菌剂的使用污染环境并杀死了果实表面的有益微生物，同时许多病原菌对传统化学合成杀菌剂产生了耐药性[34]。因此，越来越多的替代手段受到大家的关注。肉桂醛、苯甲醛、乙醛、芥末精油、丁香精油等挥发性化合物同样具有杀菌性能。30 μL/L 肉桂醛、70 μL/L 苯甲醛或 50 μL/L 乙醛能完全抑制 *C.gloeosporioides*, *B. theobromae* 和 *G. microchlamydosporum* 的孢子萌发和菌丝生长[35]。30 μL/L 的肉桂醛处理结合 13.5 ℃和 95%湿度贮藏能延长‘Malwana Special Selection’果实贮藏期至 18 d。但大于 50 μL/L 的高浓度肉桂醛会对红毛丹果皮产生药害[34]。适宜浓度的芥末精油也能明显抑制红毛丹果实腐烂并维持果实较好品质[36]。另外，焦亚硫酸钾溶液能解离并释放二氧化硫，因而具有杀霉菌活性。250 μL/L 的焦亚硫酸钾能完全抑制 *C. gloeosporioides*、*B. theobromae* 和 *G.microchlamydosporum* 的孢子萌发和菌丝生长。250 μL/L 焦亚硫酸钾溶液对 *C. gloeosporioides*、*B. theobromae* 和 *G. microchlamydosporum* 的果胶裂解酶和聚半乳糖醛酸酶具有体内和体外抑制效果[19]。250 μL/L 焦亚硫酸钾处理 10 min 结合 13 ℃和 95%湿度贮藏条件可延长‘Malwana Special Selection’果实贮藏期至 18 d[37]。氯化钙与焦亚硫酸钠混合液处理 5~10 min 结合 8 ℃低温贮藏能将贮藏期延长至 17 d 并使水果的损失率降低 10%~20%。同时，还有研究发现发现酶抑制剂处理损伤果实，在高湿度贮藏下可有效减少褐变[12]。新鲜乳状液涂抹红毛丹果实 10 ℃贮藏或者“Sta-fresh-7005”

蜡结合苯菌灵处理果实贮藏期可延长至 14 d[38]。

2.3.4 生物保鲜技术

生物保鲜是近年来的新兴保鲜技术，通常从活体中提取或通过生物工程改造获得生物保鲜剂，具有成本低，储藏条件可控，无有害物质的残留等优点，在保持果蔬品质和口感中被广泛应用[39]。目前运用较多的是微生物保鲜。微生物保鲜主要通过微生物如真菌、细菌或酵母等的拮抗作用和利用初生、次生代谢产物保持果蔬采后品质，具有资源丰富，数量多，代谢方式多样，易于规模化发酵且无公害、无抗药性等优点，在果蔬保鲜中应用较多[39]。例如，拮抗细菌悬液浸泡结合 13 ℃低温贮藏红毛丹果实至 20 d 时，*C. gloeosporioides* 病原菌发病率为 42.5%，对照为 85%，*Phomopsis* sp.病原菌发病率也较低并能完全控制 *Pestalotiopsis* sp[40]。*Lactobacillus Beijerinck* 单独或与壳聚糖结合，可酸化红毛丹果皮延迟褐变并保持果实品质[40]。*Trichoderma harzianum* 能分泌葡聚糖酶和几丁质酶等细胞壁降解酶，同时能产生烷基吡喃酮、呋喃酮和抗菌肽等抗菌物质[41]。*Trichoderma harzianum* 对红毛丹病原菌 *C. gloeosporioides*、*B. theobromae* 和 *G. microchlamydosporum* 呈现拮抗效应，对 *G. microchlamydosporum* 的控制效果最好[26]。*Trichoderma harzianum* 分生孢子悬浮液浸渍结合 13.5 ℃和 95%湿度贮藏可使‘Malwana Special Selection’果实贮藏期延长至 12 d，显著减少自然感染并维持采后果实品质[26]。同时，*Trichoderma harzianum* 可有效防治红毛丹果实的炭疽病、蒂腐病和褐斑病，而且将螯合钙单独或与 *Trichoderma harzianum* 结合喷洒于红毛丹树，可有效降低采后果实的发病率和发病程度[19]。

2.3.5 综合防治

综合防治可以有效减轻红毛丹果实采后病害并延长货架期。杀菌剂与 MAP 或 CA 结合处理是目前应用较多且有效的综合处理方法[42]。例如，红毛丹果实在 250 mg/L 焦亚硫酸钾浸泡后，3% O_2、7% CO_2 结合 13.5 ℃、95% RH 贮藏 21 d 后，发病率为 25%，而对照果发病率为 48%[26]。果实在 *Trichoderma harzianum* 孢子悬浮液浸泡后，在 3% O_2 和 7% CO_2、13.5 ℃、95% RH 贮藏 21 d 后，果实发病率显著低于对照[26]。红毛丹果实采用 3%的二氧化硫熏蒸 10、20、40 或 80 min，而后 50 ℃热水处理 20 min，并在 1 mol/L 的盐酸中浸泡 2 min，然后于 22 ℃贮藏 6 d 后，果实腐烂率降低但失重率升高[43]。

3 结论与展望

迄今为比，国内外学者对红毛丹采后贮运中存在的问题及保鲜技术等方而已开展较多研究，旨在提高品质、延长货架期。然而，目前红毛丹保鲜技术的研究主要针对国外品种，我国红毛丹在贮藏特性上与国外品种存在较大差异且产业管理粗放，因此今后需针对我国产红毛丹果实开展贮运保鲜技术研究。另外，红毛丹保鲜大多采用单一保鲜技术，今后应侧重采前、采收及采后物理、化学、生物保鲜等技术的综合运用研究，为红毛丹保鲜寻求更完善的方法。此外，前人研究主要集中在揭示红毛丹贮运生理指标的变化规律，对红毛丹失水、腐烂等过程中的内在机制研究相对滞后，今后研究应加强分子生物学方而的研究，从而研发出从根本上延长红毛丹贮藏期和货架期的高效、实用、安全的保鲜技术。同时，根据现在人们生活方式的改变以及对优稀高品质水果的追求，应加强红毛丹电商物流保鲜技术和出口海运保鲜技术的研究。

参考文献

[1] Wall M M. Ascorbic acid and mineral composition of longan (*Dimocarpus longan*), lychee (*Litchi chinensis*) and rambutan (*Nephelium lappaceaum*) cultivars grown in Hawaii [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2006, 19: 655-663

[2] Ong PKC, Acree T E, Lavin E H. Characterization of volatiles in rambutan fruit (*Nephelium lappaceum* L.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46: 611-615

[3] Mendoza DB, Pantastico E, Javier FB. Storage and handling of rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) [J]. Philippine Agric, 1972, 55: 322-332

[4] Landrigan M, Morris S C, Gibb K S. Relative humidity influences postharvest browning in rambutan [J]. Hort Science, 1996, 31: 417-418

[5] Paull R E, Reyes M E, Reyes M U. Litchi and rambutan insect disinfestation:treatments to minimeze induced pericarp browning [J]. Postharvest Biology and Technology, 1995, 6(1): 139-148

[6] Landrigan M, Morris SC, McGlasson BW. Postharvest browning of rambutan is a consequence of water loss [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1996, 121: 730-734

[7] Yingsanga P, SriLaong V, Kanlayanarat S, et al. Morphological differences associated with water loss in rambutan fruit *cv. Rongrien* and see-chompoo [J]. Acta

Horticulturae, 2006, 712: 452-460

[8] 赵亚,郭利军,胡福初,等.海南不同地区红毛丹种质资源的果实表型性状差异分析[J].分子植物育种,2018,16(22): 7487-7494
ZHAO Ya, GUO Li-jun, HU Fu-chu, et al. Analysis on phenotypic characters of rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) germplasm resources in different regions of Hainan [J]. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(22): 7487-7494

[9] O'Hare TJ, Prasad A, Cooke AW. Low temperature and controlled atmosphere storage of rambutan [J]. Postharvest Biology and Technology, 1994, 4: 147-157

[10] Wilson Wijeratnam R S, Abesekere A, Sivakumar D. Studies on maturity and low temperature storage of three rambutan cultivars grown in Sri Lanka [J]. Acta Horticulturae, 1996, 464: 514

[11] Paull R E, Chen N J. Changes in longan and rambutan during postharvest storage [J]. Hort Science, 1987, 22: 1303-1304

[12] Landrigan M, Sarafis V, Morris SC, et al. Structural aspects of rambutan (*Nephelium lappaceum*) fruits and their relation to postharvest browning [J]. Journal of Horticultural Science, 1994, 69: 571-579

[13] Yingsanga P, Srilaong V, Kanlayanarat S, et al. Relationship between browning and related enzymes (PAL, PPO and POD) in rambutan fruit (*Nephelium lappaceum* Linn.) cvs. *Rongrien* and see-chompoo [J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 50: 164-168

[14] Sivakumar D, Wilson Wijeratnam R S, Wijesundera RLC, et al. Antagonistic effect of Trichoderma harzianum on postharvest pathogens of rambutan (*Nephelium lappaceum*) [J]. Phytoparasitica, 2000, 28: 240-247

[15] Nishijima K A, Follett P A, Bushe B C, et al. First report of *Lasmenia* sp. and two species of Gliocephalotrichum on rambutan in Hawaii [J]. Plant Disease, 2002, 86: 71

[16] Keith LM. First report of *Pestalotiopsis virgatula* causing Pestalotiopsis fruit rot on rambutan in Hawaii [J]. Plant Disease, 2008, 92(5): 835.2

[17] Nieto D, Hernandez M G, Teliz D, et al. Causal organisms of black spot on postharvest rambutan in Mexico [J]. Phytopathology, 2010, 100: S89

[18] Serrato-Diaz LM, Latoni-Brailowsky EI, Rivera-Vargas LI, et al. First report of *Calonectria hongkongensis* causing fruit rot of rambutan (*Nephelium lappaceum*) [J]. Plant Disease, 2013, 97(8): 1117

[19] Sivakumar D, Wilson Wijeratnam RS, et al. Effect of GRAS compounds on mycelial growth, pectic enzyme activity and disease severity of postharvest pathogens on rambutans (*Nephelium lappaceum*) [J]. Phytoparasitica, 2001, 29: 135-141

[20] Follett PA, Sanxter SS. Comparison of rambutan quality after hot forced-air and irradiation quarantine treatments [J]. HortScience, 2000, 35: 1315-1318

[21] Nampam K, Techavuthiporn C, Kanlayanarat S. Hydrocooling improves quality and storage life of "Rong-Rein" rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) fruit [J]. Acta Horticulturae, 2006, 712: 763-770

[22] 崔志富,易杰祥,陈兵,等.真空和低温处理对红毛丹保鲜效果的研究[J].基因组学与应用生物,2015,34(9):1988-1992
CUI Zhi-fu, YI Jie-xiang, CHEN Bing, et al. Study on the fresh-keeping of rambutan treated by vacuum combined with low temperature [J]. Genomics and Applied Biology, 2015, 34(9): 1988-1992

[23] 邵远志,李雯.温度、抗坏血酸、柠檬酸和氯化钠对采后红毛丹果实几种生理指标与品质的影响[J].植物生理学通讯,2006,42(2):203-206
SHAO Yuan-zhi, LI wen. Effects of temperature, ascorbic acid, citric acid and NaCl on some physiological indexes and qualities of postharvest rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) Fruits [J]. Plant Physiology Communications, 2006, 42(2): 203-206

[24] O'Hare TJ. Postharvest physiology and storage of rambutan [J]. Postharvest Biology and Technology, 1995, 6(3-4): 189-199

[25] Sopee A, Techavuthiporn C, Kanlavanarat S. High carbon dioxide atmospheres improve quality and storage life of rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) fruit [J]. Acta Horticulturae, 2006, 712: 865-871

[26] Sivakumar D, Wilson Wijeratnam R S, Wijesundera RLC, et al. Control of postharvest diseases of rambutan using controlled atmosphere storage and potassium metabisulphite or *Trichoderma harzianum* [J]. Phytoparasitica, 2002, 30: 403-409

[27] Ratanachinakorn B, Nanthachai S, Nanthachai N. Effect of different atmospheres on the quality of "Rong Rien" rambutan [J]. Acta Horticulturae, 2005, 665: 381-386

[28] 李娘辉.红毛丹果实的发育及采后生理研究[J].华南师范大学学报(自然科学版),1999,2:88-91
LI Niang-hui. Fruit development and postharvest physiology of rambutan fruits [J]. Journal of South China Normal University (Natural Science), 1992, 2: 88-91

[29] Kanlayanarat S, Wongaree C, Maneerat C, et al. Use of film

thickness for modified atmosphere packaging to prolong storage life of rambutan *cv.* 'Rong-Rien' [J]. Acta Horticulturae, 2000, 518: 107-114

[30] Ketsa S, Klaewkasetkorn O. Effect of modified atmosphere on chilling injury and storage life of rambutan [J]. Acta Horticulturae, 1995, 398: 223-232

[31] Srilaong V, Kanlayanarat S, Tatsumi Y. Changes in commercial quality of 'Rong-Rien' rambutan in modified atmosphere packaging [J]. Food Science & Technology Research, 2002, 8(4): 337-341

[32] Shao YZ, Xie JH, Chen P, et al. Changes in some chemical components and in the physiology of rambutan fruit (*Nephelium lappaceum* L.) as affected by storage temperature and packing material [J]. Fruits, 2013, 68(1): 15-24

[33] 陈翠,饶振煜,陈沛龙,等.热处理对采后红毛丹果实生理指标的影响[J].中国南方果树,2016,6:74-78
CHEN Cui, RAO Zheng-yu, CHEN Pei-long, et al. Effects of heat treatment on physiological indexes of postharvest rambutan fruits [J]. Fruit Trees in South China, 2016, 6: 74-78

[34] Farungasang U, Farungsang N. Resistance to benomyl of *Colletotrichum* spp. causing anthracnose of rambutan and mango in Thailand [J]. Acta Horticulturae, 1992, 321: 891-897

[35] Sivakumar D, Wilson Wijeratnam RS, Rlc W, et al. Control of postharvest diseases of rambutan using cinnamaldehyde [J]. Crop Protection, 2002, 21(9): 847-852

[36] 李奕星,李芬芳,陈娇,等.3 种植物精油对采后红毛丹的保鲜作用[J].热带作物学报,2018,39(1):168-173
LI Yi-xing, LI Fen-fang, CHEN Jiao, et al. Preservation effects of three essential oils on postharvest rambutan(*Nephelium lappaceum* Linn.) fruit [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(1): 168-173

[37] Sivakumar D, Wilson Wijeratnam RS, Wijesundera RLC, et al. Effect of potassium metabisulphite on low-temperature storage of rambutan [J]. Tropical Science, 2000, 40: 29-37

[38] Lam P F, Ng K H. Storage of waxed and unwaxed rambutan in perforated and sealed polyethylene bags [J]. Food Technology Division: Report, 1982 (251)

[39] 张安妮,吕金慧,郑中兵.红毛丹的贮藏保鲜技术研究进展[J].园艺与种苗,2017,11:9-12
ZHANG An-ni, LYU Jin-hui, ZHENG Zhong-bing. Research progress in preservation methods of rambutan [J]. Horticulture and Seed, 2017, 11: 9-12

[40] Martínez-Castellanos G, Shirai K, Pelayo-Zaldívar C, et al. Effect of Lactobacillus plantarum and chitosan in the reduction of browning of pericarp rambutan (*Nephelium lappaceum*) [J]. Food Microbiology, 2009, 26(4): 444-449

[41] Ordentlich A, Wiesman Z, Gottlieth HE, *et al*. Inhibitory furanone produced by the biocontrol agent *Trichoderma harzianum* [J]. Phytochem, 1992, 31: 485-486

[42] Sivakumar D, Zeeman K, Korsten L. Effect of biocontrol agent (*Bacillus subtilis*) and modified atmosphere packaging on postharvest decay control and quality retention of litchi during storage [J]. Phytoparasitica, 2007, 35(5): 507-518

[43] Paull R E, Reyes MEQ, Reyes Mu. Litchi and rambutan insect disinfestations: treatments to minimize induced pericarp browning [J]. Postharvest Biology and Technology, 1995, 6: 139-148

（上接第 45 页）

[15] Naqvi S, Zhu C, Farre G, et al. Synergistic metabolism in hybrid corn indicates bottlenecks in the carotenoid pathway and leads to the accumulation of extraordinary levels of the nutritionally important carotenoid zeaxanthin [J]. Plant Biotechnology Journal, 2015, 9(3): 384-393

[16] 李新华,杨翠娜,李丹.发芽和提取条件对玉米胚芽中超氧化物歧化酶的诱导作用[J].食品科学,2011,32(5):96-99
LI Xin-hua, YANG Cui-na, LI Dan. Effects of germination and extraction conditions on sod activity in corn germ [J]. Food Science, 2011, 32(5): 96-99

[17] 景岚,鲁战会,胡代欣,等.发芽大豆及其豆腐制品的抗氧化性研究[J].食品科技,2007,32(9):69-71
JING Lan, LU Zhan-hui, HU Dai-xin, et al. Study on antioxidative activities of the germinated soybean and its tofu product [J]. Food Science and Technology, 2007, 32(9): 69-71

[18] 李立立,张敏,任占飞,等.发芽处理对玉米化学成分及抗氧化活性的影响[J].饲料研究,2015,11:5-8
LI Li-li, ZHANG Min, REN Zhan-fei, et al. Effects of germination treatment on chemical constituents and antioxidant activities of maize [J] Feed Research, 2015, 11: 5-8