

食品流通与包装

穿孔薄膜包装在果蔬保鲜中的应用研究进展

袁树枝, 李晓菲, 左进华, 王清, 郑淑芳

(北京市农林科学院蔬菜研究中心 a.农业部蔬菜产后处理重点实验室 b.果蔬农产品保鲜与加工北京市重点实验室 c.农业部华北地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室 d.农业部都市农业(北方)重点实验室, 北京 100097)

摘要: **目的** 介绍穿孔气调包装(Perforation-Mediated Modified Atmosphere Packaging, PM-MAP)的研究进展, 为 PM-MAP 在果蔬保鲜中的应用提供一定的思路和依据。**方法** 总结 PM-MAP 在果蔬保鲜中的应用现状, 概述影响穿孔介导气体交换的关键因素, 以及穿孔对包装内 O_2 、 CO_2 和湿度的影响。重点介绍 PM-MAP 技术对包装果蔬产品营养品质、风味和微生物的影响, 展望未来的研究前景和面临的挑战。**结果** PM-MAP 有效避免了包装内形式厌氧环境, 维持了果蔬品质, 延长了货架期。**结论** 随着新鲜和即食性果蔬需求的不断增加, 加速了 PM-MAP 的发展, 尤其穿孔在活性包装中具有广阔的研究前景。

关键词: 薄膜包装; 果蔬; 品质; 微生物

中图分类号: TS255.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)07-0131-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.07.018

Recent Advances on Perforation-Mediated Film Packaging of the Preservation of Fruits and Vegetables

YUAN Shu-zhi, LI Xiao-fei, ZUO Jin-hua, WANG Qing, ZHENG Shu-fang

(a.Key Laboratory of the Vegetable Postharvest Treatment of Ministry of Agriculture b.Beijing Key Laboratory of Fruits and Vegetable Storage and Processing c.Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops (North China), Ministry of Agriculture d.Key Laboratory of Urban Agriculture (North), Ministry of Agriculture, Vegetable Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

ABSTRACT: The work aims to introduce the recent advances on perforation-mediated modified atmosphere packaging (PM-MAP), and provide certain ideas and basis for the application of PM-MAP in the preservation of fruits and vegetables. This paper presents an overview on the application of PM-MAP in the preservation of fruits and vegetables, focuses on the key factors affecting gas exchange through perforation, and the effects of O_2 and CO_2 and humidity in perforation-mediated packaging. Furthermore, the effects of PM-MAP technology on nutritional quality, flavor and microorganism of packaged fruit and vegetable products are highlighted, and further research prospects and challenges are prospect-ed. PM-MAP effectively avoids the anaerobic environment in packaging, maintains the quality of fruits and vegetables and extends the shelf life. With the increasing demand for fresh and ready-to-eat fruits and vegetables, the development of PM-MAP is accelerated. In particular, perforation has a broad research prospect in the active packaging.

KEY WORDS: film packaging; fruits and vegetables; quality; microorganism

收稿日期: 2020-10-12

基金项目: 现代农业产业技术体系“北京市果类蔬菜创新团队项目”(BAIC01-2021); 北京市农林科学院蔬菜中心科研创新基金(KYCX202002-05); 国家自然科学基金(32001763)

作者简介: 袁树枝(1989—), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为果蔬采后品质控制。

通信作者: 郑淑芳(1963—), 男, 研究员, 主要研究方向为果蔬采后保鲜与鲜切果蔬加工。

果蔬因富含膳食纤维、维生素和矿物质等微量营养素,同时具有丰富的抗氧化物质,如花色苷、多酚、类黄酮和类胡萝卜素等,成为人们日常饮食中不可或缺的食物。果蔬的摄取量常作为低能量营养健康饮食的标识,用来抵抗久坐不动等不良生活方式带来的危害,以及衰老和恶性疾病(如抑郁、糖尿病、心血管和癌症等)^[1-2]。为此,新鲜和即食性果蔬越来越受到人们的青睐。采后果蔬,尤其是初级加工后的产品和鲜切产品,品质会迅速下降,严重制约了新鲜果蔬产品的流通^[3]。

包装是果蔬从采摘到销售商品化处理的过程,对新鲜果蔬和鲜切产品的安全操作和运输、配送至关重要,影响商品的品质和价值。传统果蔬包装常采用高阻隔性能的薄膜材料,易导致包装内形成不良的气体环境和水蒸气凝结,加速微生物生长,加剧果蔬品质劣变,减少保鲜期^[4-5]。目前,气调包装技术(Modified Atmosphere Packaging, MAP)通过控制产品周围的气体成分来保持新鲜果蔬产品的品质和延长货架期,是应用最广泛的包装技术^[6]。在实际应用中为了操作的可行性,MAP常在薄膜包装初期充入适宜的气体再进行密封包装,随后包装内气体成分的变化与产品的呼吸强度、蒸腾速率和包装薄膜的渗透性等密切相关^[7]。穿孔气调包装(Perforation-Mediated MAP, PM-MAP)技术是在包装薄膜上打一定数量的孔来提高薄膜的透气性,使包装内气体(O_2 、 CO_2 和水蒸气)和外界环境气体实时地进行高效率交换,避免形成厌氧环境^[8]。PM-MAP气体交换效率受包装材料、穿孔、果蔬产品、外界环境等众多因素的影响^[6,9]。为全面了解PM-MAP的研究现状和进一步促进其发展,文中将着重综述影响PM-MAP气体交换的因素,穿孔介导包装内气体平衡的效果,以及PM-MAP对果蔬和鲜切产品品质、风味和微生物的控制效果。

1 穿孔气调薄膜包装材料及在果蔬包装中的应用

与传统薄膜包装相比,PM-MAP可安全有效地改良薄膜包装内的气体环境,保证果蔬的贮藏品质和安全性^[10]。对近些年PM-MAP技术涉及的包装材料,以及在新鲜果蔬、即食性和鲜切果蔬中的保鲜研究现状进行了统计(见表1)^[11-33]。PM-MAP常用于传统的低透气性的聚合薄膜,如聚乙烯(Polyethylene, PE)^[11-19]、聚丙烯(Polypropylene, PP)^[5,10,13,20-28]、聚氯乙烯(Polyvinyl Chloride, PVC)^[29]、聚对苯二甲酸乙二酯(Polyethylene Terephthalate, PET)^[30]等,占穿孔包装材料的90%以上。其中,PP薄膜分为定向拉伸聚丙烯(Oriented Polypropylene, OPP)^[5,26]、双向拉伸聚丙烯(Bi-axially Oriented Polypropylene,

BOPP)^[28]、PE薄膜包含低密度聚乙烯(Low Density Polyethylene, LDPE)^[17-18]、高密度聚乙烯(High Density Polyethylene, HDPE)等^[19]。一些复合型薄膜如PP/PA(Polypropylene/Polyamide)^[31,34]、PET/PE^[32]、PE/PP^[35]、BOPP/PE^[36]也用于新鲜果蔬产品的穿孔包装。此外,随着绿色可降解生物基薄膜材料的不断发展,穿孔技术也开始应用在聚乳酸(Polylactic Acid, PLA)^[23,33]、纤维素膜^[5]等生物可降解材料中。

2 穿孔气调果蔬包装中气体交换数学模型的应用

穿孔气调包装中最佳穿孔数主要依赖2种方法获得:通过在包装上定制不同数目的穿孔进行筛选,以获得最佳的穿孔数^[11-12,37-38];根据产品的呼吸速率和薄膜的渗透性,基于数学模型计算包装的最适宜穿孔数^[9,27,33,39]。目前,气体和水蒸气通过穿孔薄膜交换的数学模型已经成功地应用于包装设计和薄膜性能预测^[22,32]。常用的数学模型有Fick定理、Maxwell-Stefan定理、Del-Valle表达式、Emond lumped-capacity模型和水力流理论^[8]。气体通过穿孔薄膜与外界环境交换主要基于以下2种假设中的任一个来计算:假设穿孔作为气体传输的主要路径,同时将气体通过薄膜的渗透作为附加值,计算最终的气体传递速率;假设薄膜是不可渗透的,气体仅通过穿孔进行交换。其中,Fick定理因其简单合理被广泛应用于穿孔果蔬包装^[9,33]。在多组分体系中,Maxwell-Stefan定理表明了流量和浓度梯度间的关系,可以更恰当、更精确地描述气体传质^[40-41]。

数学模型可以描述各种因素的影响,以使不同的实验变量之间达成妥协,指导平衡气调包装的设计和关键参数优化,以实现最佳的气体组分^[7-9]。大多数用于预测气体交换的模型通常在特定温度和较低湿度下仅依赖果蔬产品的呼吸速率和薄膜渗透率去计算,但果蔬的呼吸速率和薄膜渗透率在不同温度下存在差异,使预测模型和实际实验之间存在较大的误差^[42-44]。为避免产品暴露在不适的气体和湿度条件下,在建模的过程中需要考虑贮藏和流通过程中的温度波动、湿度变化和薄膜渗透性改变等引起的动态变化。近些年来,活性材料如吸湿剂、 O_2 吸收剂、 CO_2 吸附剂、乙烯清除剂等逐渐应用于生鲜果蔬包装系统,可以动态影响果蔬的生理活动和包装内的气体环境^[45]。仅基于果蔬的呼吸、蒸腾特性和包装膜的渗透性建立的数学模型难以直接应用于此类复杂的包装系统中,模型的建立需要考虑活性材料对果蔬产品、薄膜渗透性、包装内气体成分等的影响。在未来的研究工作中需要更多关注数学模型在穿孔结合活性材料的包装系统中的应用,探究穿孔、果蔬、活性材料和薄膜之间的相互作用。

表 1 穿孔气调包装在果蔬保鲜中的应用
Tab. 1 Application of perforation-mediated modified atmosphere packaging in the preservation fruits and vegetables

薄膜材料	穿孔规格	包装规格	平衡气体浓度	贮藏条件	果蔬	生理和品质	参考文献
PE	0.8 mm, 3, 6 个	100 g, 15.1 cm×10.6 cm×2.5 cm	O ₂ (17.6%)+CO ₂ (1.3%) (3 个孔); O ₂ (18.6%)+CO ₂ (0.6%) (6 个孔)	5 °C, 95%	石榴籽	维持品质, 抑制微生物生长, 花色苷和总酚含量增加, 抗氧化能力增强	[11—12]
	1 个	250 g, 30 cm×25 cm	O ₂ (18.0%)+CO ₂ (2.5%)	7 °C	樱桃番茄	保持果实硬度; 对营养品质无效果	[13]
	0.18 mm, 6 个	1.5 kg, 35 cm×55 cm	CO ₂ (10%)	±0.3 °C	甜玉米	保持可溶性糖、SSC、Vc 和风味	[14]
	0.9 cm, 1 个	35 g, 14 cm×20 cm		室温	小青菜、菠菜	缓解叶绿素、Vc 和蛋白质的降解, 较好维持感官品质	[15]
	50 μm, 12, 18 个	300 g, 16 cm×30 cm	O ₂ (19%~20%)+CO ₂ (1.8%~2.3%)	6 °C	枇杷	维持硬度, 减缓 SSC、Vc 降解, 抑制 PPO 和 POD 活性, 延缓衰老	[16]
LDPE	0.003 824 mm ² , 4 个	150 g, 18 cm×15 cm	O ₂ (5%~7%)+CO ₂ (7.8%)	2 °C	胡萝卜	减缓 β-胡萝卜素降解, 减少微生物	[17]
	0.4 mm, 3 个	200 g, 0.022 mm ²	O ₂ (7.2%)+CO ₂ (14.1%)	4 °C, 94%	豌豆	降低质量损失, 保持 Vc 和感官品质	[18]
HDPE	4 mm, 36 个	12 个, (286±15) g/个		5 °C, 90%~95%	石榴	减少水分凝结和腐烂	[19]
PP		80 g, 230 mm×400 mm	O ₂ (1.9%~7.4%)+CO ₂ (8.5%~9.6%)	10 °C	羽衣甘蓝	维持组织水分含量, 减缓叶绿素和类胡萝卜素的降解, 提高 Vc 含量	[20]
	1 个	250 g, 30 cm×25 cm	O ₂ (19.3%)+CO ₂ (2.5%)	7 °C	樱桃番茄	保持果实硬度, 对营养品质无效果	[13]
	0.8 mm, 1 个	400 g, 0.975 L	O ₂ (7.0%)+CO ₂ (12.6%)	15 °C	草莓	质量损失率 0.3%	[21]
	3 mm, 1, 3, 7 个	199.7 g, 20 cm×12 cm×11 cm	O ₂ (19.7%~20.6%)+CO ₂ (0.3%~1.3%)	10 °C, 60%	草莓		[22]
	0.225 mm, 1 个	(140±20) g; 25 cm×20 cm	O ₂ (8.3%)+CO ₂ (10.5%)	12 °C, 75%	斐济果	13 d 质量损失率 1.48%	[23]
	3 mm, 10 个	450 g	O ₂ (20.9%)+CO ₂ (0.1%)	5 °C	李子	质量损失率 0.13%, 无结露产生	[22]
	0.33 mm, 30 个	12 个果实, 20 cm×32 cm		13 °C, 80%~85%	山竹	减少花萼和茎的褐变和收缩、质量损失和果皮硬化	[24]
	60 μm	200 g, 15 cm×8 cm	O ₂ (19~20.5%)+CO ₂ (≤2.7%)	5 °C, 90%	即食葡萄	抑制褐变, 维持品质	[10]
	0.3 mm, 5 个	500 g, 10 cm×10 cm	O ₂ (9.2%)+CO ₂ (4.1%)	4~6 °C, 45%	青椒	维持质构、色泽、Vc 和商品性	[25]
	0.18 mm, 1, 3, 6 个	1.4 kg, 45 cm×50 cm	O ₂ (3.4%~13.9%)+CO ₂ (5.4%~7.9%)	(0.1±0.3) °C	生菜	抑制水分散失, 保持较高的叶绿素、Vc 含量和 SSC; 丙二醛和乙醇含量无明显上升	[26]
	0.18 mm, 1, 3 个	1.6 kg, 40 cm×65 cm	O ₂ (5.3%~10.3%)+CO ₂ (5.9%~6.3%)	(0.1±0.3) °C	油菜	保持感官品质和营养物质	[26]
	0.18 mm, 1, 3, 10 个	2.5 kg, 30 cm×95 cm		(0±0.1) °C	芹菜	保鲜效果不显著	[26]

续表 1

薄膜材料	穿孔规格	包装规格	平衡气体浓度	贮藏条件	果蔬	生理和品质	参考文献
OPP	1 个	100 g, 11.1 cm×15.5 cm×3.4 cm	O ₂ (3%~5%)+CO ₂ (14%)	10 °C, 75%	樱桃番茄	24 d 质量损失率 0.32%; 15 d 腐烂发生	[5]
	0.5 mm, 2 个	125 g, 185 mm×145 mm×70 mm	O ₂ (2%~3%)+CO ₂ (10%~12%)	4 °C, 80%	芝麻菜	延缓品质劣变	[27]
BOPP	0.5 mm, 2 个	200 g, 22 cm×26 cm	O ₂ (7%~8%)+CO ₂ (11%~13%)	10 °C,	西兰花	11 d 质量损失率 1.4%, 抑制花蕾黄化, 阻止硫化物积累	[28]
PVC	0.05 mm, 10 个	80 g, 12.3 cm×9 cm×3 cm	O ₂ (4.2%)+CO ₂ (5.9%)	4 °C	鲜切木瓜	延长保鲜期, 维持硬度, 提高 TSS	[29]
PET	1.8 mm, 3 个	160~200 g, 14 cm×11 cm×7 cm	O ₂ (17.1%)+CO ₂ (2.7%)	12 °C	鳄梨	12 d 质量损失率 1.23%	[30]
PP/PA	0.011 个/cm ²	100 g, 22 cm×32 cm		5 °C	鲜切菜心		[31]
PET/PE	113.5 μm	150~200 g, 6.0 cm×17.5 cm×7.0 cm	O ₂ (13%)+CO ₂ (17%)	4, 10 °C, 85%~90%	鲜切榴莲	硫化物积累	[32]
PLA	200 μm, 5 个	250 g	CO ₂ (4%)	20 °C, 60%~65%	樱桃番	质量损失率 4.66%; 腐烂率 4%	[33]
	200 μm, 100 个	700 g	CO ₂ (2%)	20 °C, 60%~65%	茄桃	9 d 质量损失率低于 4%; 腐烂率 12%	
	0.225 mm, 1 个	(140±20) g, 25 cm×20 cm	O ₂ (7.8%)+CO ₂ (13.5%)	12 °C, 75%	斐济果	13 d 质量损失率 3.29%	[23]
IBC	1 个	100 g, 11.1 cm×15.5 cm×3.4 cm	O ₂ (3.7%)+CO ₂ (4.9%)	10 °C, 75%	樱桃番茄	24 d 质量损失率 4.38%; 颜色无影响, SSC 无影响; pH 略有增加	[5]

注: 文中的气体 (O₂, CO₂) 浓度均为体积分数; 贮藏条件中百分数均为相对湿度; IBC 为 Intact Bitter Cassava; POD 为 Peroxidase 过氧化物酶; PPO 为 Polyphenol Oxidase 多酚氧化酶; SSC 为 Soluble Solids Content 可溶性固形物含量

3 影响 PM-MAP 气体交换的因素

3.1 穿孔特性

果蔬 PM-MAP 的穿孔直径通常为 50~200 μm 的微孔 (micro-perforation), 也有直径大于 200 μm 的大穿孔 (macro-perforation)^[8,46]。目前对微穿孔和大穿孔直径的大小还没有明确的界限, 有些研究将直径大于 200 μm 且小于 1 mm 的穿孔也称为微孔^[27,36~37]。Ramos 等^[47]研究影响穿孔 OPP 薄膜的渗透因素时发现, 穿孔直径是比穿孔总面积和穿孔数量更重要的参数。穿孔的大小和规则程度取决于穿孔技术, 直接影响气体的交换效率。常见的薄膜穿孔技术有管道穿孔、机械/半自动冷针或热针穿孔和激光穿孔^[8,48]。其中, 管道穿孔是早期应用的穿孔技术, 因其在包装上操作比较困难而使用受到限制; 机械/半自动冷针或热针穿孔又简称针刺孔, 穿孔速度慢且耗时长, 常形成直径大于 1 mm 的不规则孔洞; 激光穿孔技术是近些年兴起的穿孔技术, 形成的圆形孔洞更加规则一致, 孔洞直径甚至可控制在 55~60 μm, 这些特性对

PM-MAP 非常重要^[49~52]。孔洞的不规则性使穿孔面积难以计算, 造成数据模型的预测值与实验值之间产生偏差。现有的薄膜穿孔技术很难得到几何学上边缘整齐的微孔, 即使激光打孔形成的孔洞边缘也不整齐^[51~52]。此外, 穿孔的末端效应 (end effects) 也对包装气体交换产生影响。穿孔末端效应形成的原因是孔的有效长度大于孔的实际长度 (即薄膜厚度), 与包装内外分压、穿孔技术和孔径大小等因素相关^[53]。当 CO₂ 通过微孔扩散时, 孔外侧靠近孔边缘的范围内, CO₂ 分压低于周围的 CO₂ 分压, 相当于孔的有效长度增加。穿孔的末端效应因子 κ 通常为 0.4~1.0, 而 Fick 定律中忽略末端效应的存在, 认为 $\kappa=0$, 即孔的有效长度等于膜的厚度^[33]。

穿孔数量、位置对包装内气体成分的平衡也有重要影响, 通常地, 穿孔数量越多, 包装内 O₂ 浓度越高和 CO₂ 浓度越低。在斐济果实包装平衡系统中, 2 个穿孔 (直径为 0.225 mm) 的 PP 袋比单个穿孔的 PP 包装袋具有更高的 O₂ 浓度和更低的 CO₂ 浓度^[23]。相似地, 带有 1, 3, 7 个穿孔 (直径为 3 mm) 包装草莓 (200 g) 在 10 °C、60% 下贮藏 24 h 后, 包装

顶空气体浓度分别达到 $O_2(19.7\%)+CO_2(1.3\%)$, $O_2(20.4\%)+CO_2(0.6\%)$, $O_2(20.6\%)+CO_2(0.3\%)$ ^[22]。穿孔直径和数量设计不当时不能有效调节包装内的气体环境, 如直径为 0.5~0.7 mm、数量为 4 个/cm² 的穿孔 PE/PP 包装内 O_2 和 CO_2 浓度与空气接近, 在整个贮藏期内没有显著变化^[35,54]。此外, 由于间距和位置不佳, 2 个相同大小的穿孔或许不能等同单个穿孔的累加效果, 可能使包装内形成通风, 产生不良的气体环境^[9]。Mistriotis 等^[33]研究发现, 当穿孔间距不小于穿孔直径 5 倍时, 穿孔膜的传输速率与穿孔数量呈线性关系, 这表明在此情况下, 穿孔之间的气体传质互不干涉, 即多孔气体扩散体积流量是各孔流量之和。当穿孔包装产品堆码存放时, 穿孔位于包装侧面而非顶部, 这可以最大限度地降低因包装堆积堵塞穿孔气体交换的风险^[47]。

穿孔数量和位置分布同样影响包装内水蒸气的浓度和空间分布。穿孔数量的增加有助于提高水蒸气向包装外渗透, 降低包装内的湿度, 防止因湿度高造成水蒸气在包装内结露。当李子和草莓果实包装分别有 10, 40 个穿孔 (直径为 3 mm) 时, 包装内的相对湿度低于 100%, 没有水蒸气凝结发生, 此时包装内的气体环境接近外界的气体环境^[22]。穿孔对称分布可以使包装内湿度的空间分布更加均匀一致。当上下表面均匀对称各分布 6 个穿孔时, BOPP 包装内湿度分布均匀, 相对湿度保持在 83%~93%, 均值为 $(89\pm 2.7)\%$ 。当所有的孔都位于 BOPP 包装的上表面时, 湿度分布均匀性降低, 相对湿度保持在 83%~97%, 均值为 $(87\pm 3.6)\%$, 此分布使包装中心部位的水蒸气浓度增加, 两侧区域水蒸气浓度降低^[9]。尽管 2 种分布方式包装内的平均湿度相差不大, 但非均匀对称排列使包装内一部分中心区域的相对湿度达到 97%, 此区域的水蒸气极有可能发生凝结。

3.2 薄膜材料

气体通过穿孔和连续薄膜的机理是扩散和渗透, 薄膜材料对 O_2 、 CO_2 和水蒸气的渗透性能会影响穿孔介导包装内气体的平衡。PE, OPP, BOPP 等传统薄膜是市场上最受欢迎的商品包装材料之一, 适用于食品包装产业。这些传统薄膜对 O_2 、 CO_2 和水蒸气具有较高的阻隔性能, 这意味着包装顶空的气体交换只能通过穿孔发生^[9]。一些生物降解膜, 如 PLA, 具有高的水蒸气透过率, 对 O_2 和 CO_2 的阻隔性能与 BOPP 薄膜相似^[9]。这些特性表明生物降解膜对 O_2 和 CO_2 的交换也主要依赖于穿孔, 对水蒸气的交换可同时在穿孔和薄膜上发生。穿孔在不同渗透性的薄膜材料中介导气体平衡的效果存在差异^[37]。在同穿孔数量 (0.5 cm, 4 个) 且同厚度 (0.03 mm) 的 PE 和 PVC 包装枣果实 (成熟度为半红期), 在 $(0\pm 0.5)^\circ\text{C}$ 下贮藏 30 d 时 PE 和 PVC 袋内气体浓度分别为

$O_2(19.6\%)+CO_2(1.7\%)$, $O_2(20.1\%)+CO_2(0.3\%)$ ^[55]。在同样单个穿孔 (直径为 0.225 mm) 的 PP 和 PLA 包装斐济果实中, PLA 袋内的气体平衡浓度为 $O_2(7.8\%)+CO_2(13.5\%)$, 而 PP 袋内气体平衡浓度为 $O_2(8.3\%)+CO_2(10.5\%)$, 这归因于 PLA 对 O_2 和 CO_2 的渗透性低于 PP 包装; PLA 对水蒸气的渗透率约为 PP 的 100 倍, PP 包装袋在 1 d 内顶空的相对湿度达到 100%, PLA 包装袋顶空水蒸气没有达到饱和, 相对湿度快速达到 84% 后保持平衡, 由此造成 PLA 袋内果实的质量损失率高于 PP 袋^[23]。在 BOPP 中添加对水蒸气具有高渗透性的纤维素材料时, 包装内的相对湿度维持在 97%, 穿孔后使包装内的相对湿度维持在 92%, 有效阻止了水蒸气在薄膜上的结露^[28]。同样地, 单个穿孔的可降解 IBC 薄膜 (对 O_2 、 CO_2 和水蒸气的渗透性高) 对包装内平衡顶空 O_2 浓度无影响, 单个穿孔的 OPP 薄膜 (对 O_2 、 CO_2 和水蒸气的渗透性低) 对包装内平衡顶空 O_2 浓度有显著的影响^[5]。具有同样穿孔的 PP 和 PE 薄膜包装番茄后袋内 O_2 平衡浓度分别为 18.0% 和 19.3%; 在控制包装湿度方面, 穿孔可以提高 PP 包装内的湿度, 对 PE 包装内的湿度没有显著影响^[13]。此外, 虽然薄膜厚度可以通过降低透气率来影响气体传递, 但 Techavises 等^[42]研究穿孔 (直径为 2~15 mm) 对不同厚度 (0.012, 0.025 mm) LDPE 薄膜气体交换的影响时发现, 薄膜厚度不是影响穿孔渗透的主要因素。相似地, 使用不同厚度 (0.03, 0.05 mm) 的穿孔 (直径 0.5 cm, 4 个) PVC 薄膜包装枣果实时, 贮藏过程中袋内的 O_2 和 CO_2 浓度没有差异^[55]。

3.3 外界环境

包装外界的贮藏和流通环境, 包括气体成分 (O_2 和 CO_2)、空气流动性和包装周围环境的温度和相对湿度等, 可以与穿孔、包装材料直接相互作用进而影响包装内的气体组分^[47]。温度越高, 果蔬消耗的 O_2 和产生的 CO_2 越多, 从而降低包装内 O_2 浓度和提高 CO_2 浓度^[56]。在 18 °C 和 6 °C 贮藏条件下, 单个穿孔 (直径为 0.225 mm) OPP 包装袋内平衡气体浓度分别为 $O_2(4\%)+CO_2(14\%)$ 和 $O_2(15\%)+CO_2(6\%)$, 2 个穿孔 OPP 包装袋内平衡气体分别为 $O_2(7\%)+CO_2(13\%)$ 和 $O_2(14\%)+CO_2(7\%)$ ^[23]。穿孔 (直径为 3 mm, 20 个) PP 包装草莓 (400 g) 在 5, 10, 15 °C 贮藏条件下形成的平衡气体分别为 $O_2(20.92\%)+CO_2(0.10\%)$, $O_2(20.79\%)+CO_2(0.16\%)$ 和 $O_2(20.57\%)+CO_2(0.27\%)$ ^[22]。穿孔 (直径为 3 mm, 7 个) PP 包装李果实 (400 g) 在 5, 10, 15 °C 贮藏条件下形成的平衡气体分别为 $O_2(20.90\%)+CO_2(0.10\%)$, $O_2(20.80\%)+CO_2(0.15\%)$ 和 $O_2(20.71\%)+CO_2(0.20\%)$ ^[22]。由此可见, 当穿孔使包装内 O_2 浓度接近空气中的浓度时, 外界温度的改变对包装袋内 O_2 浓度无明显影响。外界环境的湿度对

穿孔介导包装内气体浓度没有显著影响。在相同温度和相同穿孔数量下,相对湿度为50%和70%的贮藏环境下PP包装袋内的平衡 O_2 和 CO_2 浓度没有显著差异^[23]。相似地,相对湿度为95%和75%的贮藏环境下穿孔IBC薄膜包装袋内平衡 O_2 浓度也无显著差异^[5]。

4 穿孔对包装内 O_2 、 CO_2 和水蒸气浓度的影响

相较于无穿孔的薄膜包装,大/微穿孔薄膜不易形成缺氧环境,可见大/微穿孔在调节新鲜或鲜切果蔬包装内气体成分方面发挥着重要作用(见表1)。与不带穿孔的OPP相比,激光微孔(直径为97 μm)OPP包装樱桃番茄在20 $^{\circ}C$ 下贮藏时, O_2 浓度从6%升高至15%, CO_2 浓度从12%降至3%^[38]。在160.1 cm^2 的PE薄膜打3或6个直径为0.8 mm的微孔,可以有效避免 CO_2 的积累和缺氧环境的形成,有效维持石榴籽的品质^[11-12]。带有2个微孔(直径为0.5 mm)的OPP薄膜包装芝麻菜,在4 $^{\circ}C$ 下贮藏2 d时形成 $O_2(2\%\sim 3\%)+CO_2(10\%\sim 12\%)$ 的气体环境,无微孔的包装易形成缺氧环境^[27]。用带10个微孔(直径为0.05 mm)的PVC包装鲜切木瓜(80 g),在4 $^{\circ}C$ 下贮藏3 d后形成 $O_2(4.15\%)+CO_2(5.9\%)$ 的平衡气体环境,使鲜切木瓜保鲜期延长至19 d^[29]。激光穿孔(直径为113.5 μm)可以使PET/PE包装内达到鲜切榴莲适宜的气体环境($O_2(13\%)+CO_2(17\%)$),降低包装内乙烯浓度,有效维持了产品的品质特性^[32]。用带有3个微孔(直径为100 μm)的薄膜包装葡萄可以显著降低包装袋内 CO_2 和乙醇的含量^[57]。微孔BOPP薄膜包装西兰花有效防止了包装顶空 CO_2 和挥发性硫化物的积累,以及 O_2 的消耗;在湿度控制方面,无孔BOPP包装内湿度快速升高,在包装12 h后达到饱和,而穿孔包装在贮藏3 d后湿度才达到饱和^[28]。

穿孔包装内水蒸气浓度空间分布存在差异,影响包装内不同位置果蔬的水分损失。在带孔(直径为6 mm)的BOPP包装中,穿孔周围的樱桃番茄果实表面湿度范围跨度较大,离孔较近果皮部位的相对湿度仅65%,远离穿孔果皮的相对湿度为94%^[9]。湿度的不均衡分布会加快果实的水分损失,导致穿孔附近的樱桃番茄果实表面皱缩变形。相反地,在透气性较高的PLA包装内湿度的变化差异较小,微孔(直径为200 μm)周围樱桃果实表面完好^[9]。穿孔包装内果蔬水分损失与包装顶空水蒸气的浓度密切相关,包装内具有较高湿度可以有效减少果蔬产品的水分损失,过高的湿度(相对湿度超过100%)会造成水蒸气凝结,增加产品腐败变质的风险。大/微穿孔可以允许包装微环境的水分在果蔬和外界环境之间交换,有助于减少水分的凝结和降低果蔬的腐烂;与无穿孔包装相

比,穿孔包装果蔬的质量损失增加^[19,58]。如何协调包装内水蒸气凝结和果蔬水分散失之间的矛盾,抑制微生物生长,是PM-MAP保鲜关注的重点之一。

有时仅依靠穿孔很难同时协调包装内获得适宜的 O_2 、 CO_2 和水蒸气含量,穿孔可以结合乙烯清除剂^[28]、 CO_2 吸收剂^[31]、吸湿剂^[21,30]等手段共同调节包装内的气体浓度。Jalali等^[21]利用穿孔(直径为0.8 mm,1个)控制气体浓度且同时利用吸湿托盘调节包装内湿度,使草莓(400 g)在15 $^{\circ}C$ 、50%环境下贮藏6 d时包装内形成 $O_2(7.0\%)+CO_2(12.6\%)$ 的适宜气体组分和97.6%的相对湿度,且果实质量损失率控制在0.3%以下。在带有3个大穿孔(直径为1.3 mm)的PET包装鳄梨果实的动态系统中,没有湿度吸收剂的包装水蒸气在1 d内达到饱和,而有湿度吸收剂(聚丙烯酸钠)调节的包装水蒸气在贮藏6~7 d时才达到饱和^[30]。穿孔PP/PA薄膜结合 CO_2 吸收剂(主要成分为氢氧化钙)使包装内形成的平衡气体($O_2(5\%)+CO_2(\leq 5\%)$)非常接近鲜切菜心的最佳气体环境,贮藏8 d时产品的外观和气味几乎没有变化^[31]。

5 穿孔薄膜包装对果蔬品质的影响

5.1 生理和营养品质

穿孔包装为果蔬创造了一个微环境,可以有效调节包装微环境内 O_2 、 CO_2 的含量及湿度,进而影响果蔬产品的生理代谢和营养品质。激光穿孔OPP包装获得适宜 CO_2 (约3%)、 O_2 (不低于12%)和相对湿度不高于90%的气体环境,可以有效减缓红熟番茄果实硬度、可滴定酸、SSC和Vc的降解速度,减少腐烂发生^[38]。穿孔(0.33 mm,30个)PP包装可以有效减少山竹果实花萼和茎的褐变和收缩、质量损失和果皮硬化,维持SSC和可滴定酸含量,在13 $^{\circ}C$ 下贮藏25 d时果实仍有良好的生理特性^[24]。无穿孔包装袋内形成的高 CO_2 浓度导致鹰嘴豆芽风味丧失和脱壳率升高,微孔(直径为0.85 mm,1个)包装可以有效延长鹰嘴豆芽的货架期,维持芽伸长率、脱壳率和抗氧化能力^[37]。与其他包装材料相比,穿孔黑色LDPE袋可以有效降低土豆的出芽率、质量损失率、果皮绿变率和腐烂率^[59]。在高 O_2 透过率(1.64 $mL/(m^2 \cdot d \cdot Pa)$)的微孔PP薄膜袋中水分从羽衣甘蓝的茎部向叶子转移,低 O_2 透过率(0.03 $mL/(m^2 \cdot d \cdot Pa)$)的微孔PP薄膜包装使羽衣甘蓝保持稳定的水分含量^[20]。穿孔(直径为0.8 mm)包装能提高石榴籽的花色苷和总酚含量,以及抗氧化能力^[12]。与未穿孔的LDPE薄膜包装相比,穿孔(4个)LDPE薄膜包装胡萝卜在2 $^{\circ}C$ 下贮藏时达到 $O_2(5\%\sim 7\%)$ 和 $CO_2(7.8\%)$ 的平衡气体条件,保持胡萝卜的质量,抑制 β -胡萝卜素的降解^[17]。单个穿孔(直径为0.9 cm)PE包装可以有效缓解小青菜和菠菜叶绿素、Vc和蛋白质的降解,

较好维持蔬菜的感官品质^[15]。微孔(直径为0.18 mm, 6个)PE包装降低了袋内乙醇的含量, 较好保持甜玉米的风味和品质^[14]。微孔(直径为50 μm , 12和18个)PE袋内达到的平衡气体为 O_2 (19.0%~20%)+ CO_2 (1.8%~12.3%), 可以较好维持枇杷果实的硬度、缓解SSC和Vc含量的下降, 以及抑制POD和PPO酶活性, 有效延缓果实衰老^[16]。微孔(直径为0.05 mm, 10个)PVC包装可以保持鲜切木瓜的硬度, 显著提高SSC含量, 对鲜切果实的pH值和可滴定酸含量无显著影响^[29]。微孔(5~15 μm , 36个/ mm^2)LDPE包装(70 cm×70 cm)可以避免 CO_2 积累(0%~0.6%), 降低鸭梨果心、果肉褐变, 减少质量损失和果皮皱缩, 同样对果实SCC和可滴定酸含量没有明显影响^[60]。Paulsen等^[13]研究发现, 与未打孔的PE薄膜包装相比, 穿孔(1个)PE和PP包装(30 cm×25 cm)的即食樱桃番茄果实硬度下降迅速, 且番茄红素含量降低。由此可见, 果蔬及产品的品质与穿孔介导包装内的气体成分密切相关, 穿孔薄膜包装可有效避免不适气体成分产生的生理伤害, 有利于维持果蔬的营养品质。

5.2 挥发性风味物质

在研究穿孔影响果蔬挥发性风味物质方面, Cliff等^[61]研究微孔(直径为2~100 μm)薄膜包装(14 cm×14 cm)鲜切苹果时发现, 与无孔包装相比, 贮藏过程中微孔包装内维持低乙烯、高浓度 O_2 (14%)和高浓度 CO_2 (7%)的气体环境, 可以提高包装顶空4-烯丙基苯甲醚、直链酯类等挥发性风味化合物的浓度, 显著提升苹果切片的果香味、多汁、甜味和质感等感官特性。微孔PP薄膜包装能提高鲜食葡萄中亚油酸的含量, 增强脂肪氧合酶(Lipoxygenase, LOX)和过氧化氢裂解酶(Hydroperoxide Lyase, HPL)的活性以及基因的表达, 抑制乙醇脱氢酶(Alcohol Dehydrogenase, ADH)的活性, 增强脂肪酸代谢途径相关中间产物C6/C9化合物, 有效改善鲜食葡萄的风味^[62]。带有2个微孔(直径为0.5 mm)的OPP薄膜包装可以很好地保持芝麻菜的芳香物质, 延迟与异味相关物质(如乙醇、二甲基二硫化物、芳香醛类和异硫氰酸异丙酯)的积累^[27]。激光穿孔(直径为113.5 μm)PET/PE包装可以提高鲜切榴莲硫化物(甲基、乙基二硫化物和二乙基硫化物)的积累, 降低乙酯类化合物的含量^[32]。激光穿孔(100 μm , 13个)使BOPP包装袋内保持低 O_2 和高 CO_2 浓度, 导致胡萝卜无氧呼吸, 且乙醇气味增加, 而针穿孔(330 mm×230 mm)BOPP包装袋内气体环境接近空气, 较好地维持胡萝卜的品质, 无异味产生^[48]。无穿孔LDPE包装豌豆在10℃下贮藏16 d时有轻微异味产生, 贮藏24 d时有强烈的异味产生, 而穿孔LDPE包装可以使豌豆在整个贮藏期间保持良好的风味^[18]。

随着PM-MAP技术在新鲜果蔬和鲜切产品中广泛应用, 挥发性化合物通过穿孔向包装外释放也开始引起人们的关注和担忧。Boonthanakorn等^[32]研究发现, 相对于密封包装, 更多的二乙基硫化物、丙酸甲酯、丙酸乙酯、2-甲基丙酸乙酯和2-甲基丁酸乙酯等挥发性化合物从激光穿孔包装内释放出来; 与鲜切榴莲的产生量相比, 从包装中释放出的挥发物是非常少量的。Del-valle等^[63]研究发现, 挥发性化合物通过多孔包装的渗透性显著增加, 导致果蔬产品风味损失和感官品质迅速恶化。为了更好地控制挥发性化合物的释放和维持包装果蔬产品的风味, 尤其对于具有刺激性气味的果蔬(如洋葱、辣椒、榴莲等), 需要进一步去获得最佳的穿孔包装参数。

6 穿孔薄膜包装产品微生物评价

穿孔包装对微生物的控制效果与所形成的气体浓度和湿度环境等密切相关。在穿孔(直径为0.8 mm, 3或6个, 160.1 cm^2)包装的石榴籽中, 整个贮藏期(15 d)内酵母和霉菌的菌落总数均低于最大可接受值^[11]。与没有穿孔包装相比, 穿孔包装形成的高浓度 O_2 环境虽然在一定程度上增加了嗜氧菌的菌落总数, 但酵母菌和大肠杆菌的菌落数显著降低, 使鹰嘴豆总体保持良好的微生物量^[37]。与带有12个穿孔的LDPE包装袋和对照组(气体环境接近外界空气)相比, 带有4个穿孔包装袋内形成低浓度 O_2 和高浓度 CO_2 的环境有利于胡萝卜切片在贮藏30 d内保持较低的微生物菌落数(5.2 lg(CFU/g))^[17]。与MAP(填充 O_2 (5%)+ CO_2 (15%)+ N_2 (80%))包装相比, 穿孔(直径为0.3 mm, 4个)薄膜包装可以有效抑制即食性蔬菜中沙门氏菌(*Salmonella*)和李斯特菌(*Listeria monocytogenes*)的增长^[64]。激光微孔(直径为60 μm)PP包装内 O_2 和 CO_2 分压(O_2 (19%~20.5%), CO_2 (≤2.7%))相对于空气略有变化, 抑制贮藏和货架期葡萄果实的腐烂, 有效降低中温需氧细菌和酵母菌的菌落总数^[10]。对于完全密封的PE薄膜包装菠菜, 贮藏3 d时包装内产生结露现象, 导致菠菜较快腐烂并有异味产生, 单个穿孔(直径为0.9 cm)则可以改善包装内水蒸气的结露, 维持菠菜的商业价值^[15]。相似地, OPP薄膜因具有很好的阻湿性能, 水蒸气几乎难以穿过, 包装袋内极易形成凝结水, 从而使果蔬产品极易受到霉菌的感染^[5]。即使在OPP包装袋上打4个直径为6 mm的孔洞仍不能有效控制水分凝结, 果实的腐烂现象仍然很严重^[33]。与无穿孔PET/PE包装相比, 激光穿孔PET/PE包装内有少量水分凝结在顶空薄膜上, 降低鲜切榴莲的菌落总数^[32]。同样地, 激光穿孔PLA包装内平均相对湿度可以控制在85.2%, 其果实腐烂率仅为4%^[33]。

目前, 还需要更多的研究去评估PM-MAP技术

在采后果蔬腐败的严重程度和鲜切产品微生物的安全性。有学者认为微生物通过穿孔污染果蔬产品可能是 PM-MAP 技术成功应用的障碍^[8],但实际上因穿孔导致果蔬产品微生物污染的风险是极低的,且目前鲜见相关报道。用大量的微孔(直径小于 55 μm)去代替大孔,从而实现气调包装内的理想气体环境,有利于降低污染物的传播^[8,65]。此外,激光穿孔可结合抗菌缓释剂来保护果蔬免受病原微生物的侵袭^[66]。

7 结语

PM-MAP 的有效应用需要通过综合的系统方法。基于每个果蔬产品包装需求的特异性,应更好地明白影响穿孔介导包装气体交换的关键因素,包括充分认知每个果蔬产品的特定需求、包装薄膜的渗透性和贮藏条件。穿孔作用效果与产品的呼吸速率、薄膜的渗透性、外界环境(温度、湿度)的变化等密切相关,穿孔的设计需要充分考虑这些因素的影响。总体来看,PM-MAP 比传统 MAP 具有更多的优势,可有效防止厌氧微生物,建立包装内适宜的气体环境,保证果蔬及产品的品质和安全卫生。

虽然 PM-MAP 已被证实是一种潜在的采后保鲜手段,可以保持新鲜果蔬及相关产品的营养品质和延长货架期,但仍有一些问题需要解决以获得消费者的信任,这包括产品微生物的安全性、产品水分损失的风险、挥发性化合物的释放等。今后的研究需要继续关注穿孔对薄膜包装新鲜果蔬或加工产品的水分控制、风味、微生物安全性的影响。随着新型纳米复合材料、生物基薄膜、活性材料等进入果蔬包装行业,果蔬、薄膜、活性材料和穿孔之间的相互作用需要更深入的探究。

参考文献:

- [1] ANGELINO D, GODOS J, GHELFI F, et al. Fruit and Vegetable Consumption and Health Outcomes: An Umbrella Review of Observational Studies[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2019, 70(6): 653—667.
- [2] WU Cai-feng, LIU Ping-ping, YUAN Zhan-peng. Fruit and Vegetable Intake is Inversely Associated with Type 2 Diabetes in Chinese Women: Results from the China Health and Nutrition Survey[J/OL]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2020. <https://doi.org/10.1080/09637486.2020.1780567>.
- [3] PORAT R, LICHTER A, TERRY L A, et al. Postharvest Losses of Fruit and Vegetables during Retail and in Consumers' Homes: Quantifications, Causes, and Means of Prevention[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 139: 135—149.
- [4] MANGARAJ S, GOSWAMI T K, MAHAJAN P V. Applications of Plastic Films for Modified Atmosphere Packaging of Fruits and Vegetables: A Review[J]. *Food Engineering Reviews*, 2009, 1(2): 133—158.
- [5] TUMWESIGYE K S, SOUSA A R, OLIVEIRA J C, et al. Evaluation of Novel Bitter Cassava Film for Equilibrium Modified Atmosphere Packaging of Cherry Tomatoes[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2017, 13: 1—14.
- [6] WILSON M D, STANLEY R A, EYLES A, et al. Innovative Processes and Technologies for Modified Atmosphere Packaging of Fresh and Fresh-Cut Fruits and Vegetables: A Review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(3): 411—422.
- [7] BELAY Z A, CALEB O J, OPARA U L. Modelling Approaches for Designing and Evaluating the Performance of Modified Atmosphere Packaging (MAP) Systems for Fresh Produce: A Review[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2016, 10: 1—15.
- [8] HUSSEIN Z, CALEB O J, OPARA U L. Perforation-Mediated Modified Atmosphere Packaging of Fresh and Minimally Processed Produce—A Review[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2015, 6: 7—20.
- [9] GIANNOULIS A, MISTRIOTIS A, BRIASSOULIS D. 3D Numerical Simulation as Optimization Tool for the Design of Novel EMAP Systems[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 143: 119—129.
- [10] LIGUORI G, D'AQUINO S, SORTINO G, et al. Effects of Passive and Active Modified Atmosphere Packaging Conditions on Quality Parameters of Minimally Processed Table Grapes during Cold Storage[J]. *Journal of Berry Research*, 2015, 5(3): 131—143.
- [11] HUSSEIN Z, CALEB O J, JACOBS K, et al. Effect of Perforation-Mediated Modified Atmosphere Packaging and Storage Duration on Physicochemical Properties and Microbial Quality of Fresh Minimally Processed 'Acco' Pomegranate Arils[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 64(2): 911—918.
- [12] OPARA U L, HUSSEIN Z, CALEB O J. Phytochemical Properties and Antioxidant Activities of Minimally Processed "Acco" Pomegranate Arils as Affected by Perforation-Mediated Modified Atmosphere Packaging[J]. *Journal of Food and Preservation*, 2017, 41(3): 12948.
- [13] PAULSEN E, BARRIOS S, LEMA P. Ready-to-Eat Cherry Tomatoes: Passive Modified Atmosphere Packaging Conditions for Shelf Life Extension[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2019, 22: 100407.

- [14] 李家政, 李晓旭, 王晓芸. 甜玉米微孔自发气调包装应用研究[J]. 包装工程, 2015, 36(3): 31—35.
LI Jiang-zheng, LI Xiao-xu, WANG Xiao-yun. Application of Micro-Perforated Modified Atmosphere Packaging of Sweet Corn[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(3): 31—35.
- [15] 王静. 打孔膜包装对叶菜品质的影响[D]. 西安: 西安理工大学, 2017: 11—29.
WANG Jing. Effects of Perforated Film Packaging on Quality of Fresh Leafy Vegetables[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017: 11—29.
- [16] 隋思瑶, 马佳佳, 王毓宁, 等. 自发气调包装对白玉枇杷保鲜效果的影响[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(6): 15—20.
SUI Si-yao, MA Jia-jia, WANG Yu-ning, et al. Effects of Modified Atmosphere Package on Preservation of Baiyu Loquat[J]. Storage and Process, 2019, 19(6): 15—20.
- [17] DAWANGE S P, DASH S K, BAL L M, et al. Quality of Minimally Processed Carrots in Perforation-Mediated Modified Atmosphere Packaging (PM-MAP) [J]. Food Measure, 2016, 10: 746—754.
- [18] ANURAG R K, MANJUNATHA M, JHA S N, et al. Storage Quality of Shelled Green Peas under Modified Atmosphere Packaging at Different Storage Conditions[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 53(3): 1640—1648.
- [19] LUFU R, BERRY T M, AMBAW A, et al. The Influence of Liner Packaging on Weight Loss and Decay of Pomegranate Fruit[J]. Acta Horticulturae, 2018, 1201: 259—263.
- [20] BOERZHIJIN S, MAKINO Y, HIRAI M Y, et al. Effect of Perforation-Mediated Modified Atmosphere Packaging on the Quality and Bioactive Compounds of Soft Kale (*Brassica Oleracea* L Convar Acephala (DC) *Alef* Var *Sabellica* L) during Storage[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 23: 100427.
- [21] JALALI A, RUX G, LINKE M, et al. Application of Humidity Absorbing Trays to Fresh Produce Packaging: Mathematical Modeling and Experimental Validation[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 244: 115—125.
- [22] JALALI A, SEIIEDLOU S, LINKE M, et al. A Comprehensive Simulation Program for Modified Atmosphere and Humidity Packaging (MAHP) of Fresh Fruits and Vegetables[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 206: 88—97.
- [23] CASTELLANOS D A, HERRERA D R, HERRERA A O. Modelling Water Vapour Transport, Transpiration and Weight Loss in a Perforated Modified Atmosphere Packaging for Feijoa Fruits[J]. Biosystems Engineering, 2016, 151: 218—230.
- [24] PHONG N V, NHUNG D T C. Effects of Microperforated Polypropylene Film Packaging on Mangosteen Fruits Quality at Low Temperature Storage[J]. Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences, 2016, 4(6): 706—713.
- [25] SAHOO N R, BAL L M, PAL U S. A Comparative Study on the Effect of Packaging Material and Storage Environment on Shelf Life of Fresh Bell-Pepper[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2014, 8(3): 164—170.
- [26] 王晓芸. 微孔保鲜膜在蔬菜包装上的应用研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015: 23—44.
WANG Xiao-yun. Research and Application of Micro-Perforated Film on the Packaging of Vegetables[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015: 23—44.
- [27] RUX G, CALEB O J, GEYER M, et al. Impact of Water Rinsing and Perforation-Mediated MAP on the Quality and Off-Odour Development for Rucola[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2017, 11: 21—30.
- [28] CALEB O J, ILTE K, FRÖHLING A, et al. Integrated Modified Atmosphere and Humidity Package Design for Minimally Processed Broccoli (*Brassica Oleracea* L Var *Italica*)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 121: 87—100.
- [29] JAYATHUNGE K G L R, GUNAWARDHANA D K S N, ILLEPERUMA D C K, et al. Physico-Chemical and Sensory Quality of Fresh Cut Papaya (*Carica Papaya*) Packaged in Micro-Perforated Polyvinyl Chloride Containers[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(12): 3918—3925.
- [30] GAONA-FORERO A, AGUDELO-RODRÍGUEZ G, HERRERA A O, et al. Modeling and Simulation of an Active Packaging System with Moisture Adsorption for Fresh Produce. Application in 'Hass' Avocado[J]. Food Packing and Shelf Life, 2018, 17: 187—195.
- [31] CEFOLA M, AMODIO M L, COLELLI G. Design of the Correct Modified Atmosphere Packaging for Fresh-Cut Broccoli Raab[J]. Acta Horticulturae, 2016, 1141: 117—122.
- [32] BOONTHANAKORN J, DAUD W, AONTEE A, et al. Quality Preservation of Fresh-Cut Durian cv 'Monthong' Using Micro-Perforated PET/PE Films[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 23: 100452.
- [33] MISTRIOTIS A, BRIASSOULIS D, GIANNOULIS A, et al. Design of Biodegradable Bio-Based Equilibrium Modified Atmosphere Packaging (EMAP) for Fresh Fruits and Vegetables by Using Micro-Perforated

- Poly-Lactic Acid (PLA) Films[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 111: 380—389.
- [34] LA ZAZZERA M, AMODIO M L, COLELLI G. Designing a Modified Atmosphere Packaging (MAP) for Fresh-Cut Artichokes[J]. Advances in Horticultural Science, 2015, 29(1): 24—29.
- [35] ADILETTA G, PETRICCIONE M, LIGUORI L, et al. Overall Quality and Antioxidant Enzymes of Ready-to-Eat 'Purple Queen' Pomegranate Arils during Cold Storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 155: 20—28.
- [36] 李方, 卢立新. 菠菜微孔膜气调保鲜包装的试验研究[J]. 包装工程, 2009, 30(8): 22—24.
LI Fang, LU Li-xin. Experimental Research of Modified Atmosphere Packaging of Fresh Spinach with Microporous Membrane[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(8): 22—24.
- [37] RANJITHA K, SUDHAKAR RAO D V. Modified Atmosphere Packaging of Green Gram (*Vigna Radiata* L) Sprouts for Extending Shelf Life and Acceptance in Indian Market[J]. Asian Journal of Dairy and Food Research, 2014, 33(2): 91—97.
- [38] D'AQUINO S, MISTRIOTIS A, BRIASSOULIS D, et al. Influence of Modified Atmosphere Packaging on Postharvest Quality of Cherry Tomatoes Held at 20 °C[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 115: 103—112.
- [39] 李方, 卢立新. 果蔬微孔膜气调包装模型与试验验证[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 375—379.
LI Fang, LU Li-xin. Theoretical Model and Experimental Validation for Modified Atmosphere Packaging of Fruits and Vegetables with Micro Perforated Film[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4): 375—379.
- [40] RENAULT P, SOUTY M, CHAMBROY Y. Gas Exchange in Modified Atmosphere Packaging 1: A New Theoretical Approach for Micro-Perforated Packs[J]. International Journal of Food Science and Technology, 1994, 29(4): 365—378.
- [41] RENAULT P, HOUAL L, JACQUEMIN G, et al. Gas Exchange in Modified Atmosphere Packaging 2: Experimental Results with Strawberries[J]. International Journal of Food Science and Technology, 1994, 29(4): 379—394.
- [42] TECHAVISES N, HIKIDA Y. Development of a Mathematical Model for Simulating Gas and Water Vapor Exchanges in Modified Atmosphere Packaging with Macroscopic Perforations[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(1): 94—104.
- [43] SIRACUSA V, INGRAO C. Correlation Amongst Gas Barrier Behaviour, Temperature and Thickness in BOPP Films for Food Packaging Usage: A Lab-Scale Testing Experience[J]. Polymer Testing, 2017, 59: 277—289.
- [44] CHEN Jun-ran, HU Yun-feng, YAN Rui-xiang, et al. Modeling the Dynamic Changes in O₂ and CO₂ Concentrations in MAP-Packaged Fresh-Cut Garlic Scapes[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 22: 100432.
- [45] ALMASI H, OSKOUIE M J, SALEH A. A Review on Techniques Utilized for Design of Controlled Release Food Active Packaging[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1783199>.
- [46] 蔡金龙, 王欲翠, 周学成, 等. 微孔膜果蔬气调保鲜研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(16): 318—329.
CAI Jin-long, WANG Yu-cui, ZHOU Xue-cheng, et al. Advances in Studies on Modified Atmosphere Storage of Fruits[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(16): 318—329.
- [47] RAMOS A V, SOUSA-GALLAGHER M J, OLIVEIRA J C. Effect of Hydrodynamic Conditions and Geometric Aspects on the Permeance of Perforated Packaging Films[J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(9): 1527—1536.
- [48] LARSEN H, WOLD A. Effect of Modified Atmosphere Packaging on Sensory Quality, Chemical Parameters and Shelf Life of Carrot Roots (*Daucus Carota* L) Stored at Chilled and Abusive Temperatures[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 114: 76—85.
- [49] GAEBLER F, BÜCHTER E. CO₂ Laser System Enhances Food Packaging[J]. Laser Technik Journal, 2010, 7(5): 39—41.
- [50] WINOTAPUN C, WATCHAROSIN U, KERDDONFAG N, et al. Microhole Formation Behavior of Polypropylene Film Using CO₂ Laser Irradiation[J]. Journal of Fiber Science and Technology, 2017, 73(10): 240—250.
- [51] WINOTAPUN C, KERDDONFAG N, DAUD W, et al. Effect of Biaxial-Simultaneous Stretching Conditions on OTR and CO₂ Permeation of CO₂ laser Perforated Poly(Lactic Acid) Film[J]. Packaging Technology and Science, 2018, 31(8): 545—556.
- [52] OVASKA S, LEMINEN V, TANNINEN P, et al. Characterisation of Pulsed-Fibre-Laser-Perforated Polymeric Food Package Films[J]. Polymers and Polymer Composites, 2018, 26(4): 273—282.
- [53] 李家政, 李晓旭, 王晓芸. 孔末端效应对微孔包装内气体动态平衡的影响[J]. 包装工程, 2013, 34(23): 14—17.

- LI Jia-zheng, LI Xiao-xu, WANG Xiao-yun. Influence of Perforation End Effect on Dynamic Equilibrium of Gas in Perforated Packaging[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23): 14—17.
- [54] LEE J S, CHANDRA D. Effects of Different Packaging Materials and Methods on the Physical, Biochemical and Sensory Qualities of Lettuce[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(5): 1685—1694.
- [55] 王刚. 金铃大枣微孔膜贮藏过程中软化衰老及生理变化的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2009: 20—24.
- WANG Gang. Studies on Soften, Senescence and Physiological Changes of Jinling Jujube during Storage in Microporous Membrane[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2009: 20—24.
- [56] SOUSA A R, OLIVEIRA J C, SOUSA-GALLAGHER M J. Determination of the Respiration Rate Parameters of Cherry Tomatoes and Their Joint Confidence Regions Using Closed Systems[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 206: 13—22.
- [57] TYAGI K, MAOZ I, VINOKUR Y, et al. Enhancement of Table Grape Flavor by Postharvest Application of Monoterpenes in Modified Atmosphere[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 159: 111018.
- [58] SIDHU G K, KAUR P, SINGH M. Retention of Bioactive Compounds in Fresh Fenugreek Leaves during Storage under Modified Atmosphere Packaging[J]. Nutrition & Food Science, 2016, 46(4): 529—541.
- [59] NYANKANGA R O, MURIGI W W, SHIBAIRO S I. Effect of Packaging Material on Shelf Life and Quality of Ware Potato Tubers Stored at Ambient Tropical Temperatures[J]. Potato Research, 2018, 61(3): 283—296.
- [60] LI Jia-zheng, BI Da-peng. Effects of Micro-Perforated Film Packaging on the Quality of Yali Pear Fruit (*Pyrus Bretschneideri* cv Yali) during Storage[J]. Journal of Fruit Science, 2010, 27(1): 57—62.
- [61] CLIFF M A, TOIVONEN P M A, FORNEY C F, et al. Quality of Fresh-Cut Apple Slices Stored in Solid and Micro-Perforated Film Packages Having Contrasting O₂ Headspace Atmospheres[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 58: 254—261.
- [62] LU Hong-yan, WU Wen-hao, LIMWACHIRANON J, et al. Effect of Micro-Perforated Film Packing on Fatty Acid-Derived Volatile Metabolism of "Red Globe" Table Grapes[J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(10): 1807—1817.
- [63] DEL-VALLE V, ALMENAR E, HERNÁNDEZ-MUÑOZ P, et al. Volatile Organic Compound Permeation Through Porous Polymeric Films for Modified Atmosphere Packaging of Foods[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2004, 84(9): 937—942.
- [64] SANT'ANA A S, LANDGRAF M, DESTRO M T, et al. Growth Potential of *Salmonella* and *Listeria Monocytogenes* in Ready-to-Eat Lettuce and Collard Greens Packaged under Modified Atmosphere and in Perforated Film[J]. Journal of Food Protection, 2013, 76(5): 888—891.
- [65] MURATORE G, RESTUCCIA C, LICCIARDELLO F, et al. Effect of Packaging Film and Antibrowning Solution on Quality Maintenance of Minimally Processed Globe Artichoke Heads[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2015, 31: 97—104.
- [66] 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.