

果蔬气调贮藏国内外研究进展*

刘颖¹ 邬志敏¹ 李云飞² 王如竹³

1(上海理工大学制冷技术研究所, 上海, 200093) 2(上海交通大学食品科学与工程系, 上海, 201101)

3(上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海, 200030)

摘要 综述了近年来国内外果蔬气调贮藏领域的研究进展, 主要包括气调保鲜机理、气调贮藏环境模拟与优化、气调包装及气调库系统设计、气调保鲜寿命预测、气调环境下果蔬呼吸速率模型建立等方面的理论和实验研究情况, 对气调贮藏新技术及其发展方向进行了总结。

关键词 自然降氧气调贮藏, 快速降氧气调贮藏, 呼吸速率, 果蔬

气调贮藏是在低温冷藏基础上, 进一步提高贮藏环境的相对湿度, 并人为改变环境气体组分和贮藏保鲜方法。它能够在维持果蔬采后正常生理活动前提下, 有效抑制其呼吸作用和蒸发作用, 最大限度减少激素和微生物作用等不良影响, 延缓果蔬的生理代谢过程, 推迟后熟衰老和腐败变质发生, 延长保鲜期。

气调保鲜技术研究在国外已开展了数十年, 在我国也有一定研究基础, 建立了一批有实用价值的数学模型, 对不同品种果蔬进行了大量不同条件下的气调贮藏试验。本文综述了国内外果蔬气调保鲜领域的研究进展, 主要包括气调保鲜机理、气调贮藏环境模拟与优化、自然降氧及快速降氧气调贮藏系统设计、气调保鲜寿命预测、气调环境下果蔬呼吸速率模型建立等方面的近期理论和实验研究情况, 对气调包装及气调库这一目前的研究热点进行了重点论述, 以期对该领域的研究现状、未来的技术发展和实际应用情况有一个概括性认识, 有利于气调贮藏技术在我国的发展。

1 气调技术分类及国内外研究概况

气调贮藏按气调方式可分为采用自然降氧的自发气调贮藏(modified atmosphere storage, 简称 MA)) 和采用人工快速降氧的机械气调库贮藏(controlled atmosphere storage, 简称 CA)。MA 是指依靠果蔬自身的呼吸代谢来降低环境中的 O₂, 提高 CO₂ 含量, 主要包括气调包装(modified atmosphere packaging, 简称 MAP)和塑料薄膜帐硅窗气调。其特点为成本低,

操作简便, 但达到气调工作状态所需时间长, 气体浓度指标不易控制, 影响了果蔬贮藏效果。CA 指采用机械气调库, 依靠制冷系统、气调系统和加湿系统的运行, 将气调工艺参数(温度、气体成分、相对湿度等)严格控制在恒定范围内, 主要包括充氮降氧气调、最适浓度指标气体置换和减压气调等形式。它具有设备先进、贮藏量大、贮藏期长、贮藏品种多、质量好的特点, 是当今最先进的果蔬贮藏技术之一, 代表着今后气调贮藏的发展方向 and 主流。但是其成本高, 耗能多, 操作复杂, 一般适合高附加值果蔬产品的保鲜。

气调贮藏理论 1918 年由英国科学家 Kidd 和 West 提出, 并首次进行了经典的苹果气调贮藏实验。随后, 法国、美国、加拿大、丹麦、澳大利亚、新西兰、南非、瑞士、比利时、意大利、日本等国相继加入该研究和应用领域, 气调贮藏的优越性也逐步为世界各国所认识。我国气调技术的研究和应用起步较晚, 前期以采用自然降氧的硅窗塑料帐(袋)MA 贮藏为主, 很少有真正意义上的 CA 贮藏。早期研究以实验为主, 重点在于探索和验证 MA 贮藏方法的可行性, 筛选薄膜气调系统的设计参数, 得出某一品种果蔬的适宜贮藏指标。近年来, 一批现代化气调库在我国相继出现, 对苹果、梨、猕猴桃等进行较大规模商业贮藏获得成果, 取得了良好的社会和经济效益, 为我国 CA 贮藏技术的发展奠定了基础^[1,2]。

2 气调贮藏近期研究热点

2.1 气调保鲜机理研究

该研究旨在从生物化学角度分析果蔬生理特征与贮藏环境气体成分之间的联系, 为气调保鲜提供植物生理学基础。Solomos 等人在 1982 年研究表明, 低 O₂ 和高 CO₂ 对呼吸速率的抑制作用是低 O₂ 下呼吸

第一作者: 博士, 讲师。

*上海市重点学科建设项目资助(No. T0503), 上海理工大学具有博士学位教师科研启动经费资助(No. X530)

收稿日期: 2006-02-08

链中氧化酶活性降低的缘故; Suzhuki 等人发现, 气调贮藏可以减少果蔬中氨基酸、Vc、果胶物质等的损失; Siriphanich 等人认为, 气调也影响着许多参与新陈代谢的酶系统, 低 O_2 和高 CO_2 可以抑制与后熟有关的酶, 这些酶与有机酸、糖类、脂肪酸等的代谢有关, 决定着植物的衰老进程^[3]。

2.2 MA 贮藏系统热质传递研究

在实验研究的基础上, 近年来在薄膜贮藏系统设计中引入数学模型的研究日益增加。1984 年, 加拿大研究者 Kok 等人发表了第一个薄膜气调贮藏的集中参数模型, 取得了与实验定性一致的计算结果; 1990 年, 梁大为等人建立了基于非平衡热力学理论的薄膜气调贮藏系统动态集中参数模型, 对苹果的硅窗气调过程进行了数值模拟, 并进行了实验验证; 李明伟等人利用计算机进行模拟寻优, 探讨了气调帐空隙率, 薄膜透性、透比对系统动态过程的影响, 找出了主要设计参数与系统动态过程的定性关系, 给出了薄膜气调系统的优化设计公式, 并进行了常温下苹果的硅窗气调贮藏实验; Emond 等根据三元混合气体扩散原理对 MA 系统内的气体浓度动态分布进行了三维数值模拟, 建立了分层模型, 考虑了各层货物的 O_2 消耗率、 CO_2 产生率、孔隙率等因素的影响^[4~6]。为了预测 MA 环境下新鲜果蔬的水分损失, Jun Soo Kang 等人提出了基于新鲜果蔬与贮藏环境间热、质平衡的稳态蒸发模型, 考虑了果蔬表皮的生物物理学特征、呼吸热及货物内部的温度分布等因素对蒸发速率的影响, 将通过表皮的水分传递视作果蔬生物物理特性和热物理特性的函数^[7]。

2.3 MAP 系统设计及贮藏寿命预测

建立正确的薄膜透气性与果蔬呼吸速率间的平衡关系是 MAP 系统设计的关键。近年来, 一些关于气调包装内气体成分与果蔬呼吸速率、塑料薄膜透气性关系的数学模型被提出, 以便利用计算机作模拟包装, 缩短试验所需时间。1991 年, Emond 等人模拟了打孔气调包装系统的气体交换过程, 对不同包装直径、薄膜厚度和温度下 CO_2 和 O_2 的渗透性进行了预测, 给出了茶椰菜和草莓的气调包装设计依据; 叶保平等人依据整个贮藏过程中干物质分解量为环境稳定前后干物质分解量之和的原理, 给出了最大贮藏时间计算模型, 已知贮藏条件(气体空间体积、环境稳定时 CO_2 浓度)和果蔬特性(呼吸强度、含水量、干物质临界分解百分数), 可预测果蔬的贮藏寿命; 2002 年雷桥等人研究了低温低氧条件下番茄的呼吸特性和

薄膜透气率, 采用动态平衡模型方程, 给出了番茄主动气调包装设计, 可用于包装量的确定及包装材料的选择等; 田平海等人(2003)建立了黄桃主动气调包装数学模型, 运用该模型预测了黄桃的贮藏寿命, 并进行了 0.5 和 10 $^{\circ}C$ 下黄桃主动气调包装贮藏实验, 结果表明, 贮藏温度和包装材料特性是影响黄桃贮藏品质的主要因素, 采用实验推荐的组合可取得满意的保鲜效果^[8~11]。

2.4 CA 贮藏系统环境模拟和优化设计

降温、气调、废气抽除和湿度控制是 CA 技术的关键, 只有诸因素合理配合, 才能取得良好的保鲜效果。由于我国各地果蔬品种、栽培及采收情况的差异, 造成果蔬采后生理生化特点不同, 其对气调贮藏环境的适应性和最适贮藏条件也各不相同, 缺乏有针对性的贮藏环境参数已成为制约气调技术在我国推广的重要因素。为避免在大规模商业气调贮藏中因气调指标选择不当造成巨大损失, 寻求高效、经济的气调环境参数设计方法已成为亟待研究的课题。在 CA 贮藏系统设计中引入反映果蔬呼吸强度、贮藏温度、气体成分、贮藏时间、气流速度等诸因素对系统动态过程影响的数学模型, 对贮藏环境参数进行寻优成为一种切实有效的方法。它可以大大缩短实验时间, 降低实验成本, 为国产优质果蔬的大规模商业化气调贮藏提供参考。

由于气调库内的热质传递过程包含果蔬的各种生理过程与传热传质过程的耦合, 使所建立的数学模型极为复杂, 需要的计算时间很长。近年来, 国内外一些研究者在控制微分方程去耦合和能量方程线性化方面作了一些尝试, 提高了数学模型的实用性。1990 年 Wang 等人提出冷库内的气体流动形式与温、湿度分布相互独立, 速度场分布与时间无关的假设, 对装有货物的冷库内空气流场和温度场建立了三维动态模型, 借助 PHOENICS 软件包进行了数值计算, 在一个实验室规模的冷藏库内进行了实验验证; Ccampanon 等人在 1995 年针对贮有水果的冷库内的温、湿度分布建立了数学模型, 以降低冷却时间和水分损失为目标进行了优化计算; 1998 年胡浩等人建立了水果气调库内气体流动、传热与传质的三维动态模型, 并将货物区看作多孔介质, 根据水果的呼吸原理建立了货物区的热质传递控制方程, 对一个贮藏苹果的小型气调库内降温、降氧过程中温度和氧组分浓度变化过程进行了数值计算, 测试了气调库内的稳态温度分布及库内一个点的氧组分浓度变化规律, 计算

值与实验值基本吻合,其结果可作为对此类所气调库进行优化设计的依据^[12~14]。

2.5 果蔬呼吸速率模型建立

鉴于呼吸强度函数对气调贮藏系统数学模型的建立至关重要,近年来国内外在此方面的研究十分活跃。由于目前人们对植物呼吸活动的认识水平还远不能达到从理论角度推导出呼吸强度函数,基本上都是根据实验得出的呼吸强度参数进行拟合,所提出的呼吸速率方程主要为多项式和指数形式。如 Gong 等人建立的 20℃ 下番茄呼吸速率方程; Kole 等人建立的不同贮藏温度和气体配比下香蕉、芒果、橙的呼吸速率、呼吸热与温度、CO₂ 浓度及 O₂ 浓度关系的多项式形式回归方程; Beaudry 等人建立的蓝莓在不同温度下的指数形式的呼吸速率方程等。Chevillotte 引入酶动力学原理简化呼吸过程,1991 年 Lee 等人 and Andrich 等人据此以 Michaelis-menten 方程形式分别建立了花椰菜和苹果的呼吸速率方程; Fishman 等人把 CO₂ 作为 O₂ 的非竞争性抑制因素分别建立了青椒和草莓的呼吸速率方程; Peppelenbos 和 Leven 研究了 4 种 CO₂ 抑制机理对果蔬呼吸速率的影响,建立了 CO₂ 和 O₂ 浓度与呼吸速率(O₂ 消耗率)相互关系的方程,并在计算 CO₂ 产生率时考虑了发酵的影响; Joles 等人引入温度系数,建立了树莓的呼吸速率方程;徐步前等人对采用渗透系统的果蔬呼吸速率测定方法进行了改进,使其不仅适用于稳态,也适用于瞬态。目前的研究主要是在酶动力学理论上,探讨温度对 Michaelis-menten 型方程参数的影响,如 Ratti 等人以 CO₂、O₂ 浓度和温度为变量建立的花椰菜呼吸速率模型,Andrich 等人建立的苹果呼吸速率模型,方程中的参数均为温度的函数^[15~19]。

3 气调贮藏新技术进展

3.1 最适贮藏环境参数预测

从非平衡热力学的新视角对气调贮藏原理进行研究,对植物性食品的耗散结构特性进行分析,运用熵变原理揭示果蔬气调贮藏保鲜的热力学实质,在此基础上给出了热力学意义上果蔬最适贮藏环境的判定依据。应用该判据并根据呼吸熵产率与贮藏温度、氧组分浓度变化关系的数学模型,对果蔬气调贮藏的最适贮藏环境参数进行预测,为建立具有普遍意义的果蔬贮藏环境优化模型提供了理论依据。

3.2 MAP 新技术研究

对 MAP 系统进行持续植物生理学、微生物学和

热动力学研究,以解决目前存在的产品腐烂、安全性及成本问题。(1)完善不同品种果蔬最佳气体环境的选择方法;(2)获取更多有关果蔬与气体成分之间相互作用的数据;(3)开发更有效的计算机软件来帮助选择不同参数条件下(温度、湿度等)最合适的包装材料;(4)采用改进方法或抑制微生物生长的新技术来控制 MAP 系统中微生物危害;(5)开发可通过改变渗透性来抵消外界温度波动的包装薄膜;(6)研究环境更加友好(可生物降解)、具有可食用性、物理性保护的功能性 MAP 包装材料等。

3.3 气调库三维数学模型的建立及通用计算机软件开发

对气调库的数学模型复杂性、经济性和计算结果的有效性进行平衡,作出简化问题的合理假设,建立气调库内气流速度场三维稳态分布参数模型,以及反映气体货物区温度、氧组分浓度变化和三维动态分布参数模型,对充氮降氧阶段气调库内降温、降氧的动态过程进行模拟。开发求解气调库内三维速度场、温度场的氧浓度场的通用计算机软件,对所建模型进行数值求解,对计算结果进行数据处理,并进行相关实验验证。数值模拟结果反映了气调库内诸因素的动态变化规律,为气调系统设计提供了理论依据,并可指导操作人员对贮藏环节进行更为有效的管理。

采用改进的渗透系统法测定果蔬的呼吸速率,开发特定程序,按照 Michaelis-Menten 型酶动力学方程形式对实验数据进行回归,得到不同冷藏温度下呼吸速率随 O₂、CO₂ 浓度变化的数学模型,该模型是果蔬气调贮藏环境参数模拟寻优及气调库内传热传质过程数值模拟的必要依据^[11]。

3.4 新型气调装置研究

近期,国内外对可移动气调装置的研究有了一定发展,如意大利研制出陆用气调集装箱和空运集装箱,孙企达等人在 2000 年研制的真空冷却气调保鲜装置(有车载式和固定式 2 种)等,都具有较高的实用价值^[20]。

4 结 论

气调贮藏是一种极有开发、推广价值的保鲜方法,开展该领域具有很大的工程应用价值和巨大的经济效益。目前,气调贮藏的优越性已为世界范围内大量研究和应用所证明,成为许多国家主要的果蔬贮藏保鲜手段。随着我国加入 WTO,采用气调保鲜也成为增强我国特色果蔬在国际、国内市场竞争力的重要

措施。上述理论、实验研究成果及商业应用的成功实验为我国气调贮藏技术的发展奠定了基础,对其进行较为系统、全面的总结有利于掌握该领域动态,推动研究和应用工作进一步开展。

参 考 文 献

- 1 孙祉佑,袁秀玲. 气调贮藏和气调库——水果保鲜新技术[M]. 北京:机械工业出版社,1994
- 2 赵家禄,黄清华,李彩琴. 小型果蔬气调库[M]. 北京:科学出版社,2000
- 3 韩明,菜心自发气调贮藏(MAP)及其生理生化变化的研究[D]. 广州:华南农业大学,1999
- 4 梁大为,曾丹苓. 水果、蔬菜薄膜气调贮藏的数学模型[J]. 工程热物理学报,1990,11(1):5~8
- 5 李明伟,曾丹苓. 水果、蔬菜薄膜气调贮藏的热力学及动力学研究[C]. 高等学校第三届工程热物理全国学术会议论文集,西安交通大学出版社,1990,11,67~70
- 6 Emond J P. Mathematical modeling of gas concentration profiles in modified atmosphere bulk packages[J]. Transactions of the ASAE,1998,41(4):1 075~1 082
- 7 Kang J S Lee D S. A kinetic model for transpiration of fresh produce in a controlled atmosphere[J]. Journal of Food Engineering,198,35(1):65~73
- 8 Emond J P. Mathematical modeling of gas exchange in modified atmosphere packaging[J]. Transactions of the ASAE,1991,34,239~245
- 9 叶保平. 自然气调包装果蔬的贮藏寿命预测[J]. 包装工程,1990,4(11):38~40
- 10 雷桥,徐文达. 新鲜番茄主动气调包装研究[J]. 食品工业,2002(5):39~41
- 11 田平海. 黄桃冷藏气调小包装呼吸速率模型与品质变化实验研究[D]. 上海:上海交通大学,2003
- 12 朱立颖. 小型装配式气调库的传热特性和气密性的实验与研究[D]. 上海:上海水产大学,1996
- 13 Wang H, Touber S. Distributed dynamic modeling of a refrigerated room[J]. International journal of Refrigeration,1990,13:214~222
- 14 胡浩. 水果气调贮藏中温度、氧组分浓度变化过程的三维动态模拟及实验研究[D]. 西安:西安交通大学,1998
- 15 Kole N, Suresh Presas. Respiration rate and heat of some fruits under controlled atmosphere conditions[J]. Int J Refri,1993,17(3):199~204
- 16 Song Y. Modeling respiration-transpiration in a modified atmosphere packaging system containing blueberry[J]. Journal of Food Engineering,2002,53(2):103~109
- 17 Fonseca S C, Oliveira F A R, Brcht J K. Modeling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review[J]. Journal of Food Engineering,2002,52:99~119
- 18 Fishman S. Model for gas exchange dynamics in modified-atmosphere packages of fruits and vegetables[J]. Journal of Food Science,1995,60(5):1 078~1 083
- 19 徐步前,余小林. 薄膜包装中果蔬呼吸强度的测定[J]. 农业工程学报,2000,16(5):110~113
- 20 杜玉宽,杨德兴. 水果、蔬菜、花卉气调贮藏及采后技术[M]. 北京:中国农业大学出版社,2000

The Study Developments of Controlled and Modified Atmosphere Storage for Fruits and Vegetables in China and Abroad

Liu Ying¹ Wu Zhimin¹ Li Yunfei² Wang Ruzhu³

1(Institute of Refrigeration Technology, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China)

2(Department of Food Science and Engineering Shanghai Jiaotong University, Shanghai 201101, China)

3(Institute of Refrigeration and Cryogenics Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

ABSTRACT The development of recent study on MA(modified atmosphere storage) and CA(controlled atmosphere storage) for fruits and vegetables in China and abroad is reviewed, which mainly including the theoretical and experimental research of the storage mechanics, environmental simulation, parameter optimization, system design and shelf-life prediction of MA and CA, as well as the establishment of respiration model for fruits and vegetables under MA and CA condition. The new technologies and the trend in development are also summarized.

Key words modified atmosphere storage, controlled atmosphere storage, respiration rate, study developments, fruits and vegetables