

三种形态叶菜真空预冷过程的比较研究

吴欣蔚^{1,2}, 朱志伟^{1,2}, 孙大文^{1,2}

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510641) (2. 华南理工大学现代食品工程研究中心, 广东省冷链食品智能感知与过程控制工程技术研究中心, 广东广州 510006)

摘要: 本研究以结球甘蓝、白菜和菜心为对象, 针对其形态结构差异, 在不同预冷终压和处理量条件下对样品进行真空预冷处理, 探讨蔬菜包裹形态、紧密程度, 叶片非叶脉部分面积占表面积比例和叶片厚度等特点对预冷过程时间、失重率和温差的影响。结果表明, 结球甘蓝、白菜、菜心均经过真空预冷实现快速冷却, 在预冷终压 500 Pa、处理量 2400 g 条件下, 三种叶菜均能在 25 min 以内降至 4 °C。但不同压力和处理量条件下, 结球甘蓝、白菜和菜心在预冷时间、失重率和温差方面均存在显著性差异 ($p < 0.05$)。包裹形态和紧密程度在影响预冷时间和预冷温差方面起主要作用, 叶片组织特性包括叶片非叶脉部分面积占表面积比例和叶片厚度则对预冷失重率有较大影响。叶菜的形态结构是影响预冷效果的重要因素, 真空预冷压力和处理量的设置需结合蔬菜形态结构特性设定。

关键词: 真空预冷; 蔬菜; 形态特征; 温差

文章编号: 1673-9078(2017)9-128-133

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.9.019

A Comparative Study of Three Types of Vegetables During the Vacuum Precooling Process

WU Xin-wei^{1,2}, ZHU Zhi-wei^{1,2}, SUN Da-wen^{1,2}

(1. School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China) (2. Academy of Contemporary Food Engineering, South China University of Technology, Engineering and Technological Research Centre of Guangdong Province on Intelligent Sensing and Process Control of Cold Chain Foods, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Cabbage (*Brassica oleracea L. var. capitata L.*), Chinese cabbage (*B. rapa pekinensis*), and flowering cabbage (*B. campestris L. ssp. chinensis var. utilis Tsen et Lee*) were treated with vacuum precooling under different precooling final pressures and processing loads. The effects of leaf wrapping shape, compactness, non-vein leaf ratio, and leaf thickness on the precooling time, weight loss rate, and temperature difference were investigated. The results showed that three types of leafy vegetables (2400 g) were quickly cooled by vacuum precooling to 4 °C in less than 25 min with a precooling final pressure of 500 Pa. Significant differences ($p < 0.05$) in cooling time, weight loss, and temperature differences among cabbage, Chinese cabbage, and flowering cabbage were observed during the vacuum cooling process at various pressures and processing loads. The wrapping shape and compactness of cabbages affected the precooling time and temperature, and the other tissue characteristics of leaves, including the non-vein ratio and thickness, had major effects on weight loss during vacuum precooling. The morphological structure of the leaf was an important factor affecting the vacuum precooling process, and the final pressure and processing load during vacuum cooling could be determined based on the morphological characteristics of the specific vegetable.

Key words: vacuum cooling; vegetable; morphological characteristics; temperature difference

快速预冷是有效控制果蔬呼吸代谢强度, 保持果蔬的新鲜度和减少储运过程中的损耗的重要环节^[1]。

收稿日期: 2017-03-20

基金项目: 广东普通高校国际暨港澳台合作创新平台 (2015KGGJHZ001); 农产品保鲜物流共性技术创新团队 (2016LM2154); 广州市科技计划项目 (201508020097)

作者简介: 吴欣蔚 (1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品工程专业, 冷链技术研究

通讯作者: 朱志伟 (1974-), 男, 副教授, 主要从事冷冻冷链技术方面研究

真空预冷作为一种新型预冷技术, 不同于传统的传热式降温, 其原理是产品的部分水分在低压下快速蒸发时吸热降温, 相对传统预冷方式具有冷却速度快及冷却均匀的特点^[2,3]。我们课题组和其他研究者已经对生菜^[4-7]、卷心菜^[8]、蘑菇^[9]、切花^[10,11]、熟肉^[12]和米饭^[13]等的真空预冷做了研究, 并建立了从液体到多孔物质等的真空预冷传热传质模型^[14,15]。然而由于蔬菜外形特征和内部结构较为复杂的, 不能简化为均一的几何体, 真空预冷技术在蔬菜中尚未建立起统一的理论

模型。已有的研究表明蔬菜在真空预冷期间叶子和茎的降温速率不一致^[16], 针对内部结构特性设置预冷参数条件可有效提高卷心菜的真空预冷预冷效果^[8], 由此可见蔬菜自身的形态结构对其真空预冷效果有一定影响。

一般认为蔬菜表面积体积比大小、结构致密程度和自由水含量等都会影响真空预冷效果, 但少见深入的分析研究。同属叶菜类的结球甘蓝、白菜、绿叶类在形态结构上具有明显差异, 对应的真空预冷过程控制也可能存在差异。因此, 本研究以结球甘蓝、白菜和菜心三种组织形态存在差异的叶菜为对象, 分析三者间在预冷过程的时间、失重率和温度分布可能存在的差异, 以期真空预冷装备控制参数优化和数值模型的建立提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用的结球甘蓝 (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L.)、白菜 (*Brassica rapapekinensis*) 和菜心 (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis* Tsen et Le) 购于广州某蔬菜市场, 挑选大小、色泽一致, 无病虫害与机械损伤的样品进行实验。将样品进行简单的修整分级, 结球甘蓝去除最外层叶子, 重量 $800\text{ g}\pm 30\text{ g}$ 。白菜去除最外层的叶子, 重量 $600\text{ g}\pm 20\text{ g}$ 。菜心长度 $18\text{ cm}\pm 2\text{ cm}$, 底茎直径 $1.7\text{ cm}\pm 0.2\text{ cm}$ 。每种蔬菜分成 3 组, 每组 2400 g 进行预冷降温曲线的测定, 重复 3 次。研究终压对预冷效果影响的实验中, 在 500 Pa 、 600 Pa 、 700 Pa 和 800 Pa 压力条件下卷心菜每组处理一颗 (约 800 g)、白菜每组处理 1 颗 (约 600 g)、菜心每组处理 500 g 。研究处理量对预冷效果的影响时, 卷心菜各组分别处理 800 g 、 1600 g 、 2400 g 和 3200 g , 白菜各组处理 600 g 、 1200 g 、 1800 g 和 2400 g , 菜心各组处理量为 500 g 、 1000 g 、 1500 g 和 2000 g 。

1.2 仪器与设备

与企业合作搭建实验用小型真空预冷设备, 主要由①真空泵 (莱宝 D8B 型, 抽气速率 $8\text{ m}^3/\text{h}$, 极限压力 $1\times 10^{-4}\text{ mbar}$); ②独立可视真空腔体 (有效容积 0.125 m^3 , 最大蔬菜处理量 3.5 kg); ③测温系统, 包含 8 根 T-型热电偶 (美国 OMEGA 工程公司); ④数据采集系统, PLC 采集模块, 30 s 采集一次温度、压力、时间数据并记录保存至计算机中; ⑤制冷系统; ⑥控制系统六部分组成。电热恒温鼓风干燥箱 (DHG-9023A 型, 上海申贤恒温设备厂)。

1.3 真空预冷处理及过程参数测定记录

设定预冷终温为 $4\text{ }^\circ\text{C}$, 将结球甘蓝、白菜或菜心样品分别放入真空腔内进行真空预冷处理, 由于蔬菜并非均一整体, 存在组织差异较大的部分, 为衡量其在降温过程中的不均匀程度, 需分别测定其中心与表面的温度。中心温度的测量: 3 根 T 型热电偶插入中心, 具体为结球甘蓝中心、白菜茎部中心或菜心茎部距底面切口 2 cm 的中心位置; 表面温度的测量: 另外 3 根 T 型热电偶放置在蔬菜表面, 具体为结球甘蓝最外层与次外层叶子之间、白菜叶部或菜心叶部。关闭真空腔门, 启动真空预冷机并进行温度与压力数据采集, 当真空腔体压力达到预设终压时, 泄压阀开始工作, 协调真空泵共同维持真空腔体内的压力保持恒定, 实验蔬菜温度由室温 $27\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $4\text{ }^\circ\text{C}$ (为防止冷害, 以示数最低的热电偶温度为准) 时结束预冷, 记预冷结束时中心温度与表面温度之差即为预冷温差。样品取出后进行后续水分含量的测定。

1.4 指标测定

失重率的测定:

$$\text{失重率}(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\%$$

式中 M_1 为样品预冷前的重量, 单位 g ; M_2 为样品预冷后的重量, 单位 g 。

物料中水分含量的测定: 直接干燥法 (GB 5009.3-2010)。

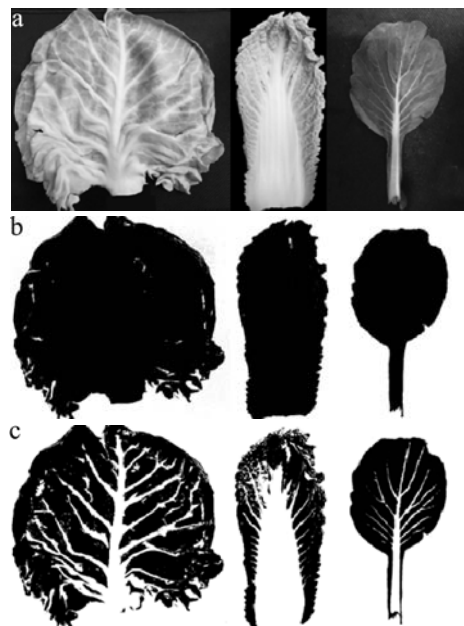


图 1 非叶脉部分占叶片比例测定示意图

Fig. 1. Schematic diagram of non-vein leaf ratio measurement

注: A 表示原始图像; B 表示背景分离图; C 表示茎叶分

离图。

叶片厚度的测定：选取蔬菜叶子非叶脉部分 5 片叠在一起，用 50 分度格游标卡尺测量，重复 3 次取均值。

蔬菜叶片非叶脉部分面积占总表面积的比例（后简称非叶脉占比）测定：先测定单片叶子中非叶脉部分面积占叶片面积的比例，取结球甘蓝、白菜和菜心典型叶片，平铺于黑色背景板上采集图像，利用 ImageJ 软件对原始图像 a 进行阈值分割分别得到图 b（叶片和背景分离）、图 c（茎与叶片及背景分离）的二值化图像^[17]，然后利用 matlab 软件分别计算茎、叶面积，得到非叶脉部分面积占叶片面积比例。考虑结球甘蓝与白菜的整体形态由多片叶组成，主茎占表面积的部分可忽略不计，可由单片叶中非叶脉部分面积占叶片面积比例代表非叶脉占比；菜心由于具明显外露的茎，不可忽略其表面积，其非叶脉占比计算公式如下：

$$\text{菜心非叶脉占比} = \frac{\text{各叶片的非叶脉部分面积之和}}{\text{各叶片表面积} + \text{茎部表面积}}$$

1.5 数据分析

用 SAS 软件及 Origin 8.5 软件进行数据统计分析与作图，采用 SAS 中的 Duncan 方法对不同样品平均值进行方差分析，确定显著性差异，方差分析置信度为 95%。

2 结果与讨论

2.1 结球甘蓝、白菜和菜心形态特征及水分含量对比分析

表 1 结球甘蓝、白菜和菜心的基本特征

Table 1 The basic characteristics of three kinds of vegetables

叶菜	叶片组织特性		包裹特性		含水量/%
	非叶脉占比/%	叶片厚度/mm	包裹形态	紧密程度	
结球甘蓝	79.46	0.64	层层包裹成球状，顶端闭合	紧	93.22
白菜	51.08	0.21	层层包裹成椭球状，顶端半开放	半紧	95.14
菜心	80.20	0.30	叶呈完全开放状，具圆锥状茎	开放	92.71

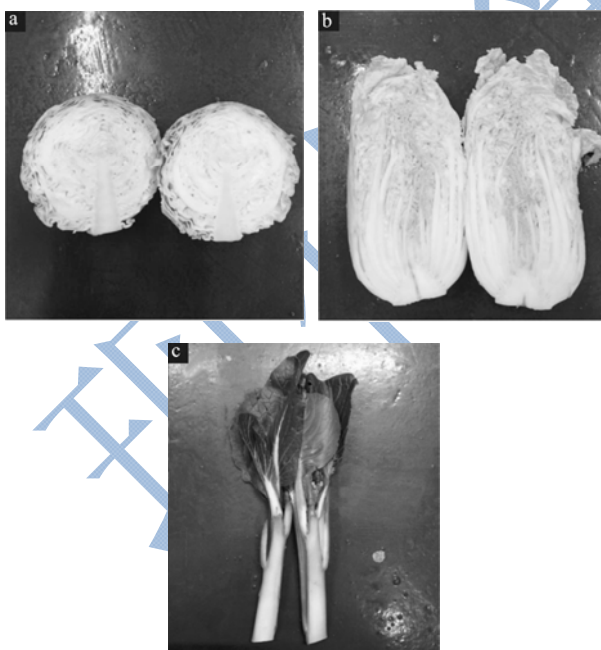


图 2 结球甘蓝、白菜和菜心横切面

Fig. 2. Longitudinal sections of three leafy vegetables

注：a 表示结球甘蓝；b 表示白菜；c 表示菜心。

结球甘蓝、白菜和菜心的整体含水量差异不大，但包裹形态各异，叶片组织特性有较大差异，对应非

叶脉占比分别为 79.5%、51.1%和 80.1%(表 1 和图 2)。结球甘蓝的叶子交错层层包裹成紧密球状，内部各层叶子之间形成小的空隙空间；白菜的叶子交错半包裹呈椭球状，半开放与外界空间相连；菜心的叶片为完全开放状，叶子完全暴露空气中未形成包裹结构，但具有明显的圆锥状茎。

2.2 结球甘蓝、白菜和菜心真空预冷过程降温

曲线

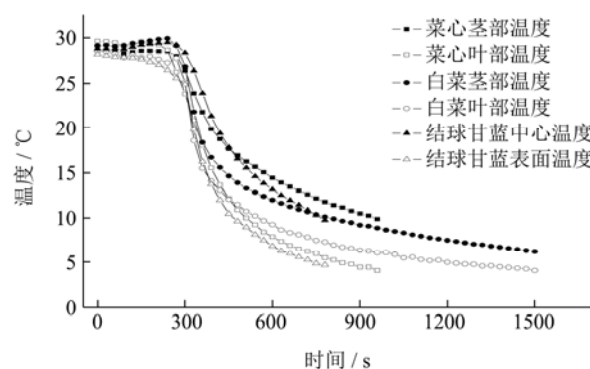


图 3 结球甘蓝、白菜和菜心真空预冷降温曲线

Fig. 3 Temperature curves of the three types of leafy vegetables

during vacuum precooling

图3为结球甘蓝、白菜和菜心在500 Pa终压、处理量2400 g条件下从室温27.5±1.5℃降至终温4℃真空预冷过程中温度随时间变化曲线。由图3可知,结球甘蓝、白菜和菜心均在25 min之内完成了预冷,说明叶类蔬菜均可应用真空预冷技术实现快速降温,但不同种类的叶菜降温过程仍存在明显差异。

预冷时间270 s时,结球甘蓝、白菜和菜心的中心和表面几乎同时到达闪点(flash point)开启快速蒸发降温,说明三种蔬菜中心和表面的组织均处于同样的低压环境,同步开始蒸发降温,不受其包裹特性和水分含量高低的影响。在预冷时间300 s到480 s的快速降温阶段,结球甘蓝、白菜和菜心的表面组织降温速率最快,为5.67℃/min。白菜茎部降温速率4.94℃/min,结球甘蓝内层叶和菜心茎部降温速率最慢,为3.34℃/min。叶部降温速率最快是由于分布着数量众多的气孔,水分易于蒸发带走热量。结球甘蓝的内层叶降温速率较外层叶小,可能是结球甘蓝的紧密包裹结构使得内层叶子水分蒸发阻力较大。快速降温阶段组织的降温速率受叶片组织特性和蔬菜包裹形态的影响。在预冷最后阶段,各部分组织降温速率减慢,温度下降达到预设终点温度或逐渐趋于稳定。白菜叶部在这一阶段降温速率最慢,可能是白菜非叶脉占比小且叶部组织薄嫩随着蒸发持续,可供蒸发的自由水分不足,依赖茎与叶脉的水分供给,压力差带来的蒸动力与水分迁移阻力之差逐渐减小,因此降温慢。可见蔬菜组织真空预冷最终能达到的极限温度受叶片组织特性和可蒸发自由水量限制。

2.3 终压选择对结球甘蓝、白菜和菜心真空预冷的影响

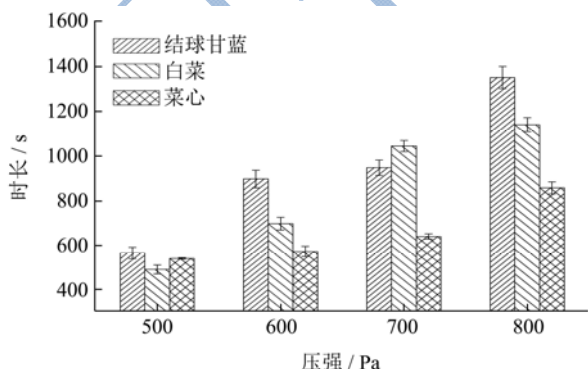


图4 不同预冷终压下三种蔬菜的预冷时间

Fig. 4 Cooling times of the three types of vegetables under different precooling final pressures

由图4可知,总体上三种蔬菜的预冷时间随预冷

终压的降低而缩短。但是在不同预冷终压条件下,蔬菜形态结构上的差异对预冷时间产生不同程度的影响。当终压压强为500 Pa时,结球甘蓝、白菜和菜心预冷至4℃所需的预冷时间分别为563 s、489 s和538 s,相差不大;而当选择较高预冷终压800 Pa时,结球甘蓝、白菜和菜心预冷至4℃所需的预冷时间差距明显,分别为1351 s、1139 s和856 s。结合表1和图2对结果进行分析的,虽然从非叶脉占比数据上看,菜心与结球甘蓝接近,但是非叶脉占比的大小对似乎对预冷时间影响较小,而叶菜的包裹结构和包裹程度可能在影响预冷时间方面起到主导作用。

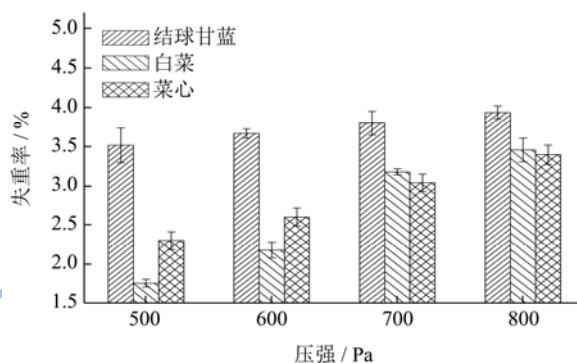


图5 不同预冷终压下三种蔬菜的失重率

Fig. 5 Weight loss rates of the three types of vegetables under different precooling final pressures

如图5所示,结球甘蓝、白菜和菜心的失重率总体上随压力的增加而上升,但不同终压条件下,蔬菜结构形态上的差异对失重率产生不同程度的影响。当压强为500 Pa时,蔬菜的失重率最低,分别为结球甘蓝3.51%、白菜1.75%和菜心2.30%。当压强为800 Pa时,结球甘蓝、白菜和菜心的失重率分别提高了11.94%、97.24%和47.73%。结合表1和图2对结果进行分析,结球甘蓝具有相对较大的非叶脉占比,且叶片质厚含水量充足,失重率大且受终压影响小。非叶脉占比最小的白菜,失水率受压强增加的影响最大。可见蔬菜包裹形态和包裹程度对预冷失重率的影响较小,叶片组织特性包括非叶脉占比大小和叶片组织厚度在影响预冷失重率方面起到主要作用。

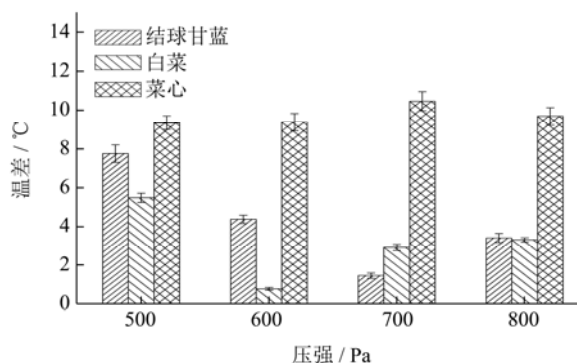


图6 不同预冷终压下三种蔬菜的温差

Fig. 6. Temperature differences for the three types of vegetables under different precooling final pressures

如图6所示为结球甘蓝、白菜和菜心中心与表面在不同终压下的温差。随着终压升高,结球甘蓝和白菜的组织温差先降后升,分别在600 Pa和700 Pa时取得最小的温差,菜心的组织温差受终压的影响则不显著,叶与茎的温差始终保持在9℃左右。结合表1和图2对结果进行分析,包裹形态紧密叶菜的组织温差对终压的变化更为敏感。当终压升高时,包裹形态紧密的蔬菜预冷时间显著增加。可能是预冷后期表层叶温度趋于稳定,但中心部分的温度继续下降,因此中心与表面的温差逐渐缩小。当终压继续升高时,预冷时间进一步增加,叶表温度有所波动回升,而中心部分的温度趋于稳定,因此中心与表面的温差略有扩大。可见叶菜的包裹结构和包裹程度可能对预冷温差影响较大。对于包裹紧密的蔬菜应当选择适中的预冷终压。

由上述分析可知,当终压改变时,不同形态结构的蔬菜在预冷时间、失重率和组织温差方面具有不同的影响。其中叶菜的包裹特性包括包裹形态和紧密程度在影响预冷时间和预冷温差方面起主要作用。叶片组织特性包括非叶脉占比和叶片厚度则对预冷失重率有较大影响。失重率与温差是衡量预冷效果的重要因素,预冷时间则会影响整个预冷处理的效率和经济效益,对于不同形态结构的蔬菜,应结合其包裹特性与叶片组织特性等物性特点综合设置适宜的终压。

2.4 不同处理量对结球甘蓝、白菜和菜心真空预冷的影响

图7为不同处理量条件下,对结球甘蓝、白菜和菜心的预冷时间、失重率及温差的影响,由图7a可知,随着处理量的增加,不同形态结构叶菜的预冷时间也显著增加,处理量为1000 g时预冷时间在12 min以内,当处理量为2400 g时,三种蔬菜的预冷时间均在15 min以上。其中白菜在处理量2400 g时预冷时间增加显著,可能的原因是白菜非叶脉占比小且叶部组织薄嫩,当处理量较大时预冷时间延长,白菜叶部可供蒸发的水分不足,难以克服叶内水分迁移的阻力。如图7b所示,处理量增加时,失重率随之增加。结球甘蓝、菜心和白菜每千克处理增量对应失重率分别提高0.09%、0.47%和0.88%,可能由于蔬菜叶片组织特性差异而有不同程度影响,如图7c所示,随着处理量的增加,结球甘蓝、白菜和菜心的温差减小。具包裹结构的蔬菜表层叶温度趋于稳定,但中心部分或茎部的

温度继续下降,因此中心与表面的温差逐渐缩小。在实际应用中,虽然增加单批次的处理量可以提高设备效率,但对设备抽气速率和冷凝器补水能力要求也更高。处理量的选择需要综合考虑蔬菜包裹形态、叶片组织特性、设备处理能力和经济效益多方面因素。

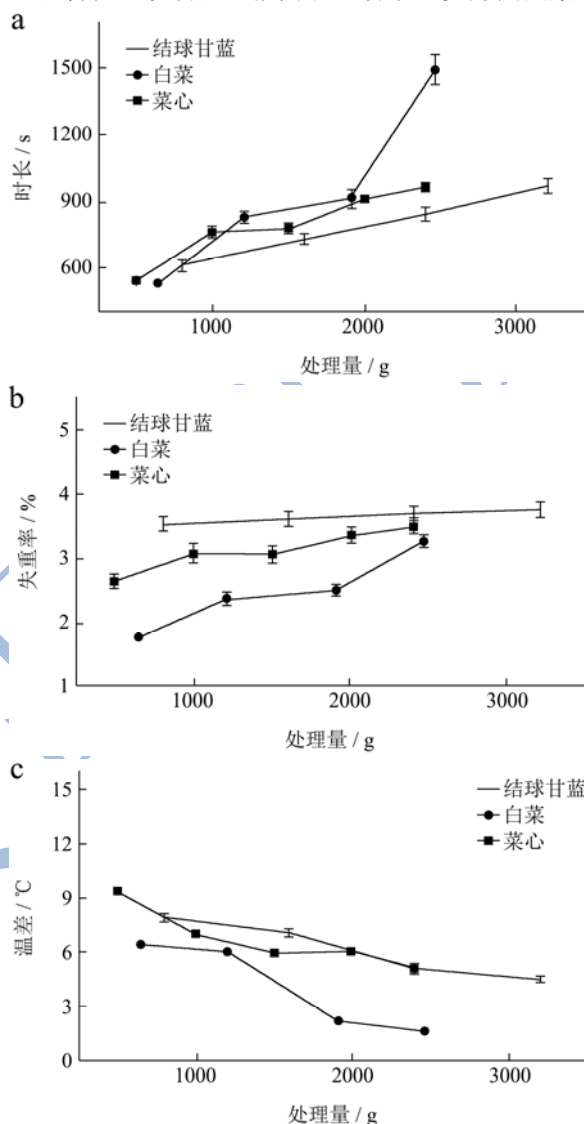


图7 不同处理量对三种蔬菜预冷时间、失重率和温差的影响

Fig.7 Cooling time, weight loss rate, and temperature differences for the three types of vegetables under different processing loads

3 结论

叶类蔬菜结球甘蓝、白菜和菜心均可经过真空预冷实现快速冷却,在预冷终压500 Pa、处理量2400 g条件下,三种叶菜均能在25 min以内降至4℃。但不同压力条件下,结球甘蓝、白菜和菜心在预冷时间、失重率和温差方面均存在显著性差异($p < 0.05$)。叶菜的包裹形态和紧密程度在影响预冷时间和预冷温差方面起主要作用。叶片组织特性包括非叶脉占比和叶片

厚度则对预冷失重率有较大影响。结球甘蓝和白菜等包裹紧密型叶菜在较低的终压下可迅速预冷,通过适当的提升终压可减小温差。压力设置对于非叶脉占比小或叶片较薄的蔬菜预冷失重率影响较大。蔬菜组织真空预冷最终能达到的极限温度受叶片组织特性和可蒸发自由水量限制。真空预冷的过程参数(如预冷终压和处理量)的设置应综合考虑蔬菜物性、预冷效果与经济效益。

参考文献

- [1] Brosnan T, Sun D. Precooling techniques and applications for horticultural products-a review [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2001, 24(2): 154-170
- [2] Zheng L, Sun D. Vacuum cooling for the food industry-a review of recent research advances [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2004, 15(12): 555-568
- [3] McDonald K, Sun D. Vacuum cooling technology for the food processing industry: a review [J]. *Journal of Food Engineering*, 2000, 45(2): 55-65
- [4] Martinez J A, Artes F. Effect of packaging treatments and vacuum-cooling on quality of winter harvested iceberg lettuce [J]. *Food Research International*, 1999, 32(9): 621-627
- [5] Ozturk H M, Ozturk H K. Effect of pressure on the vacuum cooling of iceberg lettuce [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32(3): 402-410
- [6] He S Y, Feng G P, Yang H S, et al. Effects of pressure reduction rate on quality and ultrastructure of iceberg lettuce after vacuum cooling and storage [J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2004, 33(3): 263-273
- [7] He S Y, Li Y F. Experimental study and process parameters analysis on the vacuum cooling of iceberg lettuce [J]. *Energy Conversion & Management*, 2008, 49(10): 2720-2726
- [8] Cheng H P, Hsueh C F. Multi-stage vacuum cooling process of cabbage [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 79(1): 37-46
- [9] Tao F, Zhang M, Yu H Q. Effect of vacuum cooling on physiological changes in the antioxidant system of mushroom under different storage conditions [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 79(4): 1302-1309
- [10] Sun D W, Brosnan T. Extension of the vase life of cut daffodil flowers by rapid vacuum cooling [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1999, 22(6): 472-478
- [11] Brosnan T, Sun D W. Influence of modulated vacuum cooling on the cooling rate, mass loss and vase life of cut lily flowers [J]. *Biosystems Engineering*, 2003, 86(1): 45-49
- [12] McDonald K, Sun D W, Kenny T. The effect of injection level on the quality of a rapid vacuum cooled cooked beef product [J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 47(2): 139-147
- [13] Zhang Z, Sun D W. Effects of cooling methods on the cooling efficiency and quality of cooked rice [J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(2): 269-274
- [14] Sun D W, Hu Z. CFD simulation of coupled heat and mass transfer through porous foods during vacuum cooling process [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2003, 26(1): 19-27
- [15] Houška M, Podloucký S, Žitný R, et al. Mathematical model of the vacuum cooling of liquids [J]. *Journal of Food Engineering*, 1996, 29(3): 339-348
- [16] 宋晓燕,刘宝林.真空冷却中的上海青表面温度变化规律[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(1): 266-269
SONG Xiao-yan, LIU Bao-lin. Temperature variation on Shanghaiqing surface during vacuum cooling process [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(1): 266-269
- [17] Alamri S S, Kalyankar N V, Khamitkar S D. Image segmentation by using threshold techniques [J]. *Computer Science*, 2010, 2(5): 83-86