

真空冷却中的上海青表面温度变化规律

宋晓燕, 刘宝林^{*}

(上海理工大学低温生物与食品冷冻研究所, 上海 200093)

摘要: 基于叶类蔬菜内部水分通道的组成特点, 研究上海青叶子表面温度在真空冷却过程中的变化规律。结果表明: 在真空冷却过程中, 大叶脉附近和小叶脉附近基本保持连续降温状态, 而叶边温度却会回升; 大叶脉附近与小叶脉附近之间以及小叶脉附近与叶边之间, 在预冷过程中一直存在温差, 而且温差均呈现出先增大后减小的趋势; 随着终压的升高, 叶边的终温一直升高, 而大叶脉附近与小叶脉附近的终温则是先降低后升高, 因此, 终压不能设置的过低或过高。

关键词: 真空技术, 温度分布, 贮藏, 蔬菜, 真空预冷

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.01.047

中图分类号: TS205.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-01-0266-04

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 Xiaoyan, Liu Baolin. Temperature variation on Shanghaiqing surface during vacuum cooling process[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 266—269. (in Chinese with English abstract)

0 引言

上海青 (*Brassica chinensis* L.) 属于十字花科芸苔属, 是普通白菜的一个变种, 常见于中国南方地区。因为上海青富含人体所需矿物质、维生素, 尤其是维生素 B₂; 因而, 具有很高的营养价值。它不仅具有抑制溃疡、保持血管弹性、改善便秘等功能, 经常食用对皮肤和眼睛的保养也有很好的效果。不过, 上海青储藏期较短, 在常温下可保鲜 1~2 d, 冰箱内也只能保鲜 3 d, 这远远达不到当今社会对食品的质量与安全所提出的要求。因此, 如何延长货架期以保证消费者能够买到高品质的果蔬逐渐成了研究热点。大量的研究表明^[1-9]: 真空预冷不仅可以去除上海青等叶类蔬菜的田间热, 还可以抑制其在储存过程中的呼吸作用, 从而延长保存期。因此, 研究如何提高叶类蔬菜的真空预冷效果具有重要的意义。

真空冷却是通过在低压下蒸发食品内部的一部分水分使其温度降低的一种制冷技术。因为水的蒸发潜热很大, 只需要蒸发少量水分, 便可以使整个食品组织降到很低的温度, 所以温降速率很快^[1]。Noble 曾提出: 蔬菜的相对表面积大小、内部结构致密程度、自由含水量是影响其真空预冷效果的关键因素^[10]。之后的一些研究也表明: 根据卷心菜、蘑菇等蔬菜的内部结构特性设置预冷条件, 可以有效提高预冷效果。然而, 上述研究均以真空预冷具有降温均匀性为基础, 但事实上, 蔬菜自身的特殊结构对其真空预冷效果的影响很大^[11]。上海交通大学的张哲平利用红外热成像技术观察了青菜在真空预

冷中的表面温度变化, 结果表明叶部与茎部的降温速率差别很大^[12], 说明不能将叶类蔬菜简单的简化为几何体做传热传质研究。然而, 除了叶子和茎的降温速率不一致外, 蔬菜叶子自身表面温度分布也极不均匀, 甚至出现局部温度过高或过低的现象, 导致储藏过程中某些部位还未达到预期货架期就已经坏掉, 整颗蔬菜的贮藏期也随之缩短。因此, 研究上海青叶子在真空预冷中表面温度分布规律, 对延长其贮藏期有重要的参考价值。本试验通过测量不同终压下菜叶三个位置的温度值, 研究上海青叶部在真空冷却过程中的表面温度变化规律, 并对终压的设置提出建议。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

上海青, 采自上海市南汇区, 挑选色泽好、无任何损坏的上海青, 简易包装后 2 h 内送至实验室; 66s 型 PE 保鲜膜 (食品包装用), 购于上海卜峰莲花超市, 脱普日用化学品 (中国) 有限公司生产。

VCE-15 型真空预冷机 (上海锦立新能源科技有限公司)^[5,8]。温度的测量采用铂温度传感器 Pt100 和微型薄片式热电偶 (专用于测量表面温度), 测温范围分别为 -50~180℃ 和 -50~175℃, 误差为 ±0.5℃。其中, 微型薄片式热电偶的测温端, 直径为 1.6 mm, 带有背胶, 可黏贴于测温表面, 反应时间为 0.3 s。压力的采集选用电容薄膜式压力变送器, 测压范围为 10 Pa~20 kPa。

1.2 试验方法

1) 先将上海青分成 3 份, 每份 3 棵, 每颗大约 10 片叶子, 并用保鲜膜分别包好放在实验台上。

2) 打开真空门, 把上海青放在托盘上, 任意选取一片叶子, 将事先标记好的三根热电偶 (No. 0、No. 1 和 No. 2) 的测温端粘在其大叶脉附近、小叶脉附近及叶边 3 处 (如图 1 所示)。

收稿日期: 2011-03-03 修订日期: 2011-09-23

作者简介: 宋晓燕 (1985—), 男, 博士研究生, 研究方向: 真空预冷, 上海上海理工大学低温生物与食品冷冻研究所, 200093。

Email: xishi.rujin@163.com

*通信作者: 刘宝林, 教授, 博士生导师。上海上海理工大学低温生物与食品冷冻研究所, 200093。Email: bliuk@163.com

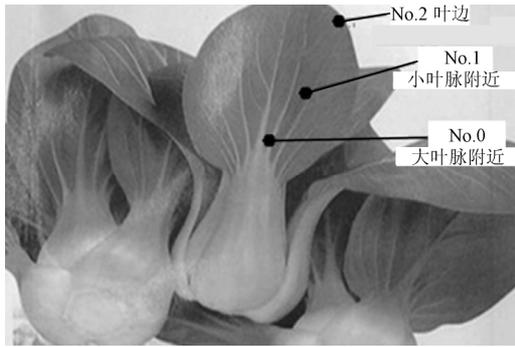


图 1 热电偶布置图

Fig.1 Schematic of thermocouple arrangement

3) 关上真空门, 设置终压为 700 Pa, 将数据采集间隔设为 5 s, 启动自动运行模式 (制冷机组首先开启; 当捕水器表面温度达到 -6°C 时, 真空泵自动开始对真空室抽真空; 当真空室的压力降到设定的终压值的时候, 渗气阀开始工作, 与真空泵协同保持真空室内的压力恒定; 此外, 由 PLC 自动控制制冷机组的开启, 将捕水器的温度维持在 $-12\sim-17^{\circ}\text{C}$ 之间)。

4) 当三根热电偶的温度均不再有明显浮动时, 关闭预冷机, 保存数据。

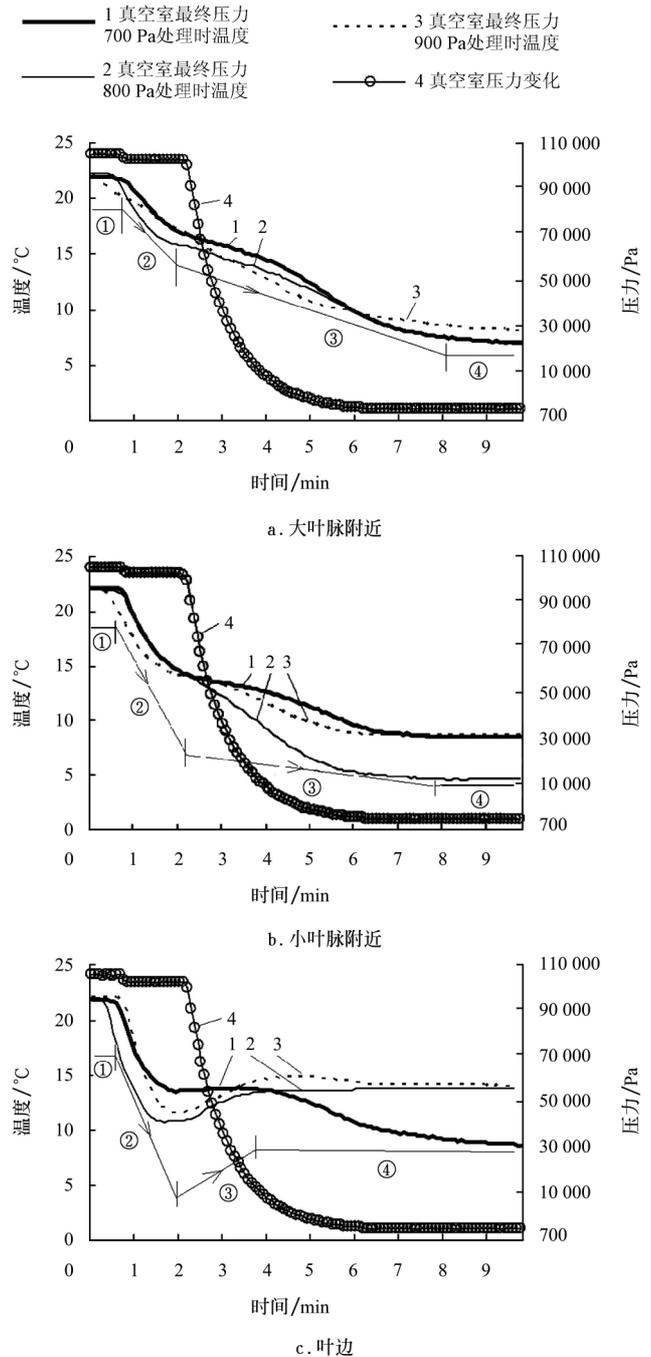
5) 重复上述过程 2)、3) 与 4), 并将终压分别设为 800 和 900 Pa。

2 结果与分析

2.1 在不同终压下不同部位降温过程分析

由图 2a 与图 2b 可知, 大叶脉附近与小叶脉附近叶肉的温度变化过程均由四部分组成: 过程① (0~1 min), 温度保持在 22°C (真空室初始温度) 不变; 过程② (1~2 min), 温度快速降低; 过程③ (3~7 min), 温度以较慢速度降低; 过程④ (8~10 min), 温度基本保持终温不变。原因是: 当真空预冷机刚刚开启的时候, 捕水器温度还很高, 不具备捕捉水分的能力, 因此, 真空室的压力没有变化, 叶子内部的水分也不会蒸发; 当第 1 min 结束时, 捕水器表面温度低于真空室内湿空气的露点温度, 大量水蒸汽凝结于捕水器表面, 使得真空室内水蒸气分压力降低 (图中体现于真空室整体压力的降低), 于是叶子内外形成水蒸气压力差, 促使叶子内部水分蒸发, 使其自身温度快速降低; 第 2 min 结束时, 捕水器表面温度达到 -6°C , 真空泵开启, 真空室压力开始迅速降低, 直至设定的终压值, 叶肉中的水分在此阶段进一步蒸发^[13]; 随着叶子内部自由水的逐渐减少, 蒸发阻力越来越大, 温降速率慢慢减小, 当第 8 min 结束时, 叶子内部水分受到的各种力达到平衡, 不再蒸发, 叶肉温度基本保持不变。

不过, 由图 2c 中曲线 2 和 3 的过程③也可知, 叶边还会出现升温现象, 原因有两个: 一是叶边不仅气孔数量多而且有排水器, 失水率较大, 导致其比热容减小; 二是因为叶边是叶子最薄的部位, 如果叶脉没有及时将水分输送到叶边, 它很容易在真空室内湿空气 (温度在 14°C 左右) 的对流作用下降温^[14-15]。当然, 若水分能及时输送到叶边, 它的温度将会继续降低, 如图 2c 中曲线 1 的过程④所示。



注: 因为 700、800、900 Pa 3 个终压之间的差别与大气压相比很小, 所以图中仅以终压为 700 Pa 时的压力曲线做定性描述。

图 2 不同部位温度变化曲线

Fig.2 Different temperature curves in different parts of the vegetable

2.2 在不同终压下不同部位间温差变化过程分析

由图 3a 可知, 大叶脉附近与小叶脉附近的温差 (t_0-t_1) 在整体上呈现出先增后减的趋势: 终压为 700 Pa 时, 温差由 0°C 先升到 2.5°C , 再逐渐减小到 -1.5°C ; 当 800 Pa 时, 先经小的波动降到 -0.8°C , 然后升到 5.3°C , 再逐渐减小到 2°C ; 当 900 Pa 时, 温差由 0°C 先升到 3.5°C , 再逐渐减小到 -0.5°C 。这是因为, 叶脉中导管的输水能力比形成层和韧皮部强得多, 叶子失水后, 来自蔬菜根部的水分会依次通过大叶脉和小叶脉中的导管达到失水部位的叶脉末梢, 被其吸收^[16-17]。由于小叶脉附近的叶肉中包埋了许多叶脉末梢, 所以, 相对于大叶脉附近的叶肉

而言,小叶脉附近的叶肉更容易获得补充水分,更有利于降温。随着蒸发过程的进行,两处的温差越来越大;但是,当根部水分损失到一定程度时,水流量由于太小,不足以克服流程阻力,便会优先依次透过形成层和韧皮部向大叶脉附近的叶肉扩散。小叶脉附近叶肉因得不到补充水,降温能力越来越弱,而大叶脉附近叶肉则能保持更长时间的降温状态,甚至低于小叶脉附近的叶肉温度。

由图 3b 可知,小叶脉附近叶肉温度与叶边温度之差 (t_1-t_2) 在整体上也呈现出先增后减的趋势:终压为 700 Pa 时,温差由 0.2℃ 先升到 2.2℃,再逐渐减小到 0℃;当 800 Pa 时,温差由 0.2℃ 先升到 6℃,再逐渐减小到 -9℃;在 900 Pa 时,温差由 0℃ 先升到 2.8℃ 再逐渐减小到 -5℃。与前者不同的是,3 个终压下的温差最高点均出现较早(1 min 左右),而且最终小叶脉的温度均低于叶边。这是因为:叶边的特殊结构可以使其在水分充足的条件下降温能力最强,但是,又会使其在缺水的状态下降温能力最弱,甚至升温

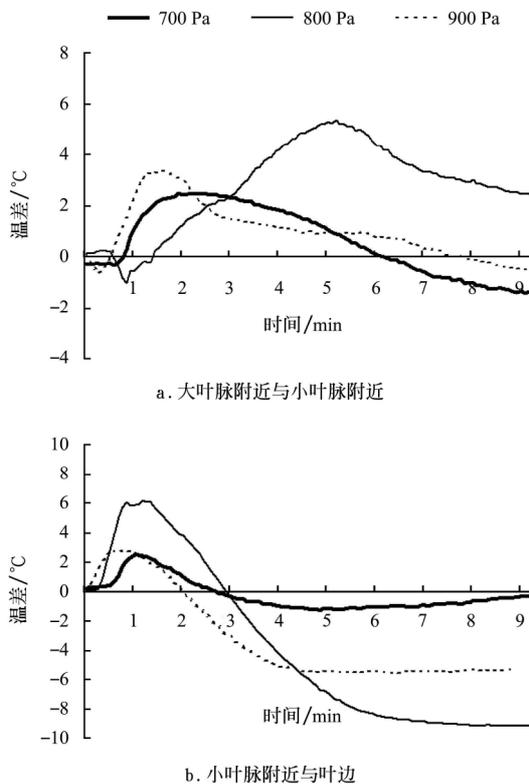


图 3 不同部位间温差变化曲线

Fig.3 Temperature differences between the different parts of the vegetable

2.3 在不同终压下叶部不同部位终温特性分析

由图 4 可知,随着终压的升高,大叶脉附近与小叶脉附近的终温都是先降低再升高,分别为 7.08℃、6.84℃ 和 8.01℃, 8.48℃、4.63℃ 和 8.65℃;这是因为在真空预冷过程中,上海青叶子的气孔开度基本保持不变,可以看做是一个口径不变而且很小的细长型小孔^[18-19]。若终压过低,气孔下室聚集的水蒸气量过大,其中一部分水蒸气会在通过气孔时受到排挤并发生回流,进一步阻碍后来蒸发的水分,导致水蒸气有效蒸发量进一步减少,

使冷却速率降低。然而,终压的设置过高,则会造成驱动力不足,同样会减小水蒸气的有效蒸发量。因此,终压的设置要与气孔开度相匹配,不宜过高也不宜过低,在此次试验中,终压取 800 Pa 时叶子的整体降温效果较好。此外,不仅不同种蔬菜的气孔形状不一样,同种蔬菜的气孔开度也会因其预冷前状态的不同而有差异。

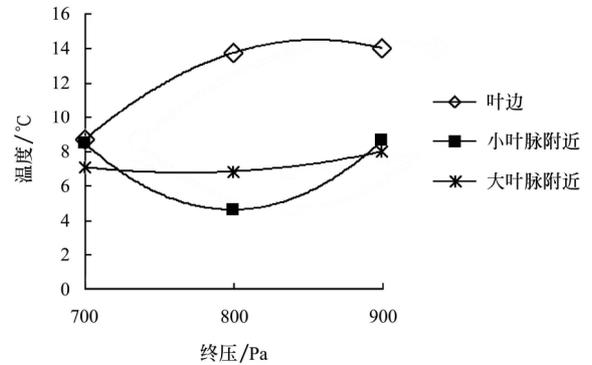


图 4 不同终压下不同部位的终温

Fig.4 Final different temperatures in different places of vegetable under different pressures

由图 4 还可知,在 700、800 与 900 Pa 终压下,叶边的最终温度却随着终压的升高而升高,分别为: 8.7℃、13.77℃ 和 14.01℃;这是因为叶边有排水器存在,水分蒸发面积大,气孔的阻流作用不明显。

3 结论

1) 在真空预冷过程中,大叶脉和小叶脉附近的叶肉温度在没有达到终温之前,一直处于降温状态,而叶边则会因为供水不足提前结束降温,并在真空室湿空气的对流作用下出现升温。

2) 大叶脉附近与小叶脉附近之间以及小叶脉附近与叶边之间,在预冷过程中一直存在温差,而且温差均呈现出先增大后减小的趋势。

3) 由于大部分叶子的温降是靠水蒸气从气孔蒸发获得,而气孔又会对过多的蒸汽产生阻流作用,所以终压不能设置的过高或过低。叶边由于有排水器的存在,气孔的阻流作用不明显,因此终温随终压的升高而升高。根据本试验所得结论,在对上海青做真空冷却处理时,将终压设置为 800 Pa 较为合适。但是,考虑到蔬菜的含水量以及结构特性受产地地理条件以及气候的影响较大,建议在对产自干旱地区的上海青做真空冷却处理时将终压设置在 800~900 Pa 之间,而对于气候湿润且多水的地区所产的上青,可将终压设置在 700~800 Pa 之间。

[参 考 文 献]

- [1] Da W S, Li Y Z. Vacuum cooling technology for the agri-food industry: Past, present and future[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(2): 203-214.
- [2] Karl McDonald, Da-Wen Sun. Vacuum cooling technology for the food processing industry: a review[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 45(2): 55-65.
- [3] 邓东泉, 孙恒, 肖尤明, 等. 真空预冷技术的现状和发展前景[J]. 食品工业科技, 2002, 23(7): 73-75.

- Deng Dongquan, Sun Heng, Xiao Youming, et al. Current situation and development on the vacuum pre-cooling technology[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2002, 23(7): 73—75. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李素云, 纵伟, 吴柳柳. 不同真空预冷压力对生菜储藏质量的影响[J]. *真空*, 2010, 47(1): 83—85.
- Li Suyun, Zong Wei, Wu Liuli. Effects of different vacuum pre-cooling pressures on lettuce quality during storage[J]. *Vacuum*, 2010, 47(1): 83—85. (in Chinese with English abstract)
- [5] 闫静文, 王雪芹, 刘宝林, 等. 凝水管温度对蔬菜真空预冷过程的影响分析[J]. *食品工业*, 2009, 34(5): 72—74.
- Yan Jingwen, Liu Baolin, Wang Xueqin, et al. Effect of condenser pipe temperature on vacuum cooling of vegetables[J]. *The Food Industry*, 2009, 34(5): 72—74. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王璐, 董庆利, 李保, 等. 不同真空预冷处理条件对鲜切芹菜品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2010, 68(2): 193—196.
- Wang Lu, Dong Qingli, Li Bao, et al. Effect of different vacuum pre-cooling treatment on the quality of fresh-cut celery[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2010, 68(2): 193—196. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈威, 丁伟华. 新鲜蔬菜真空预冷实验分析[J]. *食品科学*, 2007, 28(12): 494—498.
- Chen Wei, Ding Weihua. Study on vacuum pre-cooling experiment inside fresh vegetables[J]. *Food Science*, 2007, 28(12): 494—498. (in Chinese with English abstract)
- [8] 闫静文, 王雪芹, 刘宝林, 等. 基于 S7—300PLC 果蔬真空预冷机控制系统的设计[J]. *食品工业科技*, 2010, 83(3): 320—324.
- Yan Jingwen, Wang Xueqin, Liu Baolin, et al. Design of the control system of a vacuum cooler based on S7-300 PLC[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2010, 83(3): 320—324. (in Chinese with English abstract)
- [9] 周霞. 蔬菜贮藏保鲜技术探讨[J]. *农业知识*, 2009, 46(32): 42—43.
- [10] Noble R A. review of vacuum cooling of mushrooms[J]. *Mushroom Journal*, 1985, 149: 168—170.
- [11] Wang I J, Sun D W. Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology[J]. *Food science and technology*, 2001, 12(5): 174—184. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张哲平, 宋小勇, 李云飞. 红外成像技术在研究不同果蔬真空预冷特性中的应用[J]. *科技通报*, 2005, 25(3): 295—304.
- Zhang Zheping, Song Xiaoyong, Li Yunfei. Application of infrared thermography system in studying the cooling characteristics of different vegetables during vacuum cooling process[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2005, 25(3): 295—304. (in Chinese with English abstract)
- [13] 杨惠敏, 张晓艳, 王根轩. 植物水通道的生理生态特性及其参与气孔运动的研究进展[J]. *植物学通报*, 2005, 22(3): 276—283.
- Yang Huimin, Zhang Xiaoyan, Wang Genxuan. Eco-physiological characters and involvement in stomatal movements of plant water channels[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2005, 22(3): 276—283. (in Chinese with English abstract)
- [14] Cheng H P, Hsueh C F. Multi-stage vacuum cooling process of cabbage[J]. *Journal of Food Engineer*, 2007, 79(1): 37—46.
- [15] Chaerle L, Straeten D V. imaging techniques and the early detection of plant stress[J]. *Trend in Plant Science*, 2000, 5(11): 495—501.
- [16] 雍化年. 植物体内运输的流体力学研究进展[J]. *植物生理通讯*, 1984(4): 1—5.
- Yong Huanian. Research progress of transportation fluid mechanics in the plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 1984(4): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张秀玲. 关于植物细胞水势的计算问题[J]. *植物生物学通讯*, 2008, 52(2): 315—316.
- Zhang Xiuling. Computing problems about water potential of the plant cells[J]. *Plant Physiology Communications*, 2008, 52(2): 315—316. (in Chinese with English abstract)
- [18] Iwabuchi K, Kurata K. Short-term and long-term effects of low total pressure on gas exchange rates of spinach[J]. *Advances in Space Research*, 2003, 31(1): 241—244.
- [19] 叶子飘, 于强. 植物气孔导度的机理模型[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(4): 772—782.
- Ye Zipiao, Yu qiang. Mechanism model of stomatal conductance[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(4): 772—782. (in Chinese with English abstract)

Temperature variation on Shanghaiqing surface during vacuum cooling process

Song Xiaoyan, Liu Baolin^{*}

(Institute of Food Freezing Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the characteristic of internal water passages of leafy vegetable, the disciplinary of temperature variation of “Shanghaiqing” surface during the vacuum cooling process was studied. The temperature near main vein and the one near fine vein both dropped continuously during the vacuum process, while the one around the margin may rise after a fall. Temperature difference between main vein and fine vein and that between fine vein and the margin of leaves, both existed all the time and increased firstly and then decreased. With the increment of final pressure, the final temperature in margin increased, whereas the ones near the main vein and near the fine vein both decreased first and then increased, so the final pressure shouldn't be set too low.

Key words: vacuum technology, temperature distribution, storage, vegetables, vacuum cooling