不同真空预冷抽气速率对卷心菜预冷过程及贮藏后品质的影响

廖彩虎，单斌，钟瑞敏，谢思芸，黄美凤

（韶关学院英东食品科学与工程学院，广东韶关 512005）

摘要：利用风冷预冷、不同真空预冷抽气速率（降压速率指数 Y 值分别为 A-0.126 min^{-1}；B-0.185 min^{-1}；C-0.315 min^{-1}）等技术对卷心菜进行预冷，预冷后包装并放置于 5±2 ℃冷库贮藏。通过测定其过程以及贮藏过程中的相关指标来评价不同预冷方式对卷心菜的影响。结果表明，无论何种抽气速率预冷都要快于风冷，但 C 组(65 min)与 B 组（70 min）预冷时间相当，且差异性不显著(P>0.05)。同一真空抽气速率对卷心菜不同部位的降温几乎是同时的。贮藏 6 d 后，B 较其他组而言，其呼吸速率 183.9 mg/(kg h)及顶端 CO_2（7.2%）含量要明显低于 A、C 组，而维生素含量 C（46 mg/kg）及顶端 O_2（2.1%）则相反，且差异性均显著（p<0.05）。综上所述，0.185 min^{-1} 的抽气速率更适合于卷心菜的预冷。

关键词：真空预冷；抽气速率；重量损失；卷心菜；降温速率

文章篇号：1673-9078(2016)07-182-187 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.7.029

Effect of Evacuation Rates on Vacuum Precooling of Iceberg Lettuce and Its Post-storage Quality

LIAO Cai-hu, SHAN Bin, ZHONG Rui-min, XIE Si-yun, HUANG Mei-feng

(Yingdong Food Science and Engineering Institute, Shao Guan University, Shaoguan 512005, China)

Abstract: The techniques of slow air precooling and vacuum precooling with different evacuation rates (pressure reduction rates at A-0.126 min^{-1}, B-0.185 min^{-1}, and C-0.315 min^{-1}) were applied to precool iceberg lettuce, and all samples were packaged after precooling and stored in a cold room (5 ±2 ℃). The effects of different precooling methods on iceberg lettuce were evaluated by measuring related indices for precooling and storage processes. The experimental results showed that vacuum precooling at any evacuation rate was more effective in removing heat than in slow air cooling. However, the precooling times of groups B (65 min) and C (70 min) were equivalent, showing no significant difference (p > 0.05). Nearly the same amount of time was required to remove the heat in different parts of the iceberg lettuce when the evacuation rate was the same. After six days of storage, group B showed a significantly lower respiration rate 183.9 mg/(kg h) and CO_2 concentration (7.2%), and significantly higher vitamin C (46 mg/kg) and O_2 (2.1%) concentrations at the top of the packaging bag than groups A and C. All differences were significant (p < 0.05). In conclusion, an evacuation rate of 0.185 min^{-1} is suitable for precooling of iceberg lettuce.

Key words: vacuum precooling; evacuation rate; weight loss; iceberg lettuce; temperature reduction rate

真空预冷是一种基于在真空状态下快速蒸发物料的水分以达到降温效果的预冷方式。较传统的预冷方式而言，真空预冷的降温速率要快的多，这主要是因为水分蒸发时需要吸收大量的热量来维持高能量状态下的蒸汽分子运动[1]，该热量被称为相变潜热。蒸发时吸收的大量来自于物料本身从而导致物料温度快速下降。基于此，真空预冷已被广泛地应用于比表面积大且自由水含量高的叶菜[2~4]。

卷心菜以其独特的质构和口感在人们饮食中扮演了极其重要的角色。卷心菜与其他蔬菜类似，采摘后都务必及时冷却[2~4]来保持其品质。卷心菜是一类具有较大比表面积和自由水分的叶菜，从理论上来讲非常适合于真空预冷[5]。当然，卷心菜又属于较为特殊的一类叶菜，其特殊之处就在于其结构极其致密，所以通常也可以认为其属于“根茎类”蔬菜的一种。正是由于其结构的特殊，所以通常将其作为研究对象来探讨其在真空预冷过程中所呈现不同压力和温度的分布（较其他结构疏松叶菜而言），为真空预冷在蔬菜

收稿日期：2015-07-30

基金项目：广东省公益研究与能力建设项目(2015A020209193)；韶关市科技计划项目 2013CX/K51；韶关市科技计划项目 2014CX/K295

作者简介：廖彩虎（1984-），男，博士研究生，讲师，主要从事食品加工与贮藏方向

通讯作者：单斌（1975-），男，高级实验师，主要从事农副产品精深加工

类的应用特别是在结构致密和根茎类蔬菜中的应用提供理论依据，也为真空预冷在其他食品预冷过程中就如何优化操作参数提供了借鉴依据，比如控制抽气速率[2]、多阶段恒压操作[3]和终压大小[4]等。虽然目前真空预冷对卷心菜的应用较多，但并未对卷心菜真空预冷过程中的一些宏观指标作出分析，特别是对一些涉及到卷心菜真空预冷过程中水分损失、卷心菜内部易出现水珠、卷心菜内部传质传热等现象作出分析。因此，本文研究的目的就在于采用不同的抽气速率来研究卷心菜在真空预冷过程中所出现的水分迁移（传质）和温度梯度（传热），不仅为卷心菜真空预冷提供最佳的操作参数，同时为根茎类蔬菜或者结构致密食品真空预冷过程中的操作参数提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 原辅材料

供试卷心菜（韶关本地产卷心菜）全部购自广东省韶关市第二农贸市场，采购时间为上午 5 点。选取当天采摘，新鲜度高，大小适中（直径 14±0.5 cm，重量 950±10 g），色泽均匀一致，无机械损伤的卷心菜作为实验材料。

1.2 仪器设备

KM-50 真空预冷机，东莞科美斯制冷设备有限公司；Testo175-T2 温度计，德国德图公司；Testo174H 温湿度记录仪，德国德图公司；Center309 温度计，台湾群特公司；Geotech-CO_2 分析仪-G100，英国 Geotech 公司。

1.3 试验方法

利用不同的预冷方式（风冷和真空预冷）对卷心菜进行预冷。真空预冷方式是采用三种不同的抽气速率 A、B、C（A、B、C 所对应的抽气速率指数分别为 0.126 min^{-1}、0.185 min^{-1}、0.315 min^{-1}，抽气速率指数由 1000 mbar 降至 6.5 mbar 所需时间计算而得，如表 1 所示）来对卷心菜进行预冷，风冷方式是直接采用冷库（2±2 ℃，风速为 0.5~1 *m/s*，相对湿度为 95~100%）来对卷心菜进行预冷。每组实验平行三次，每次平行实验有四组样品。每组含 8 个卷心菜样品，其中 3 个样品用于做温湿度检测（分别将德图温湿度计放入卷心菜中心、四分之一、表面处来记录），1 个样品用于重量变化检测（利用电子称检测并记录，真空预冷检测其每分钟温度变化，风冷只检测预冷始终温度变化），1 个样品用于温度变化检测（利用台湾群特温度计记录，温度探头插入卷心菜几何中心），3 个样品分别于第 2、4、6 d 进行检测品质指标。数据结果用平均值±方差表示。同时，真空预冷机冷媒介质的温度设为-10~-5 ℃。真空预冷和风冷均将卷心菜中心温度冷至 5 ℃，然后密封包装。

备注：压强下降速率模拟指数衰减公式，如公式（1）所示：

$$P = P_i e^{-Yt} \quad (1)$$

其中：P：运行过程中真空预冷箱体内绝地压强，mbar；P_i：当地大气压（初压），mbar；t：设备抽气时间；Y：抽气速率指数，min^{-1}。

表 1 压强下降速率

Table 1 Pressure reduction rates

序列号	时间/min (1000mbar~6.5mbar)	P_i /mbar	Y 值 /min^{-1}
A	40	1000	0.126
B	27	1000	0.185
C	16	1000	0.315

1.4 指标测定

1.4.1 失重率的测定

采用电子天平（精确到 0.001 g）称量好卷心菜的重量 m_1，待预冷后再称量卷心菜的重量 m_2，平行样做三次。

$$失水率 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$

1.4.2 德图温湿度值的测定

本试验采用 Testo174H 温湿度计来进行测定。实验时选取三个大小及重量较一致的卷心菜。其中一个用锋利小刀将卷心菜对半切开，并挖出一个大小长×宽×高（8×4×2 cm）的槽来填放温湿度计；另外一个同样用锋利小刀将卷心菜四分之一处切开，同样挖出一个类似于上一个大小的槽来填放温湿度计；最后一个样品将卷心菜表面切开类似上一个大小的槽来填放温湿度计。每个样品均平行测定 3 次，并取其平均值进行比较。

1.4.3 呼吸率的测定

采用静置法测定，同时参考杨振生和袁唯[6]的方法。

1.4.4 包装袋顶端气调比例测定

利用 Geotech-CO_2 气体分析仪来检测冷藏后包装袋内的气体比例。具体方法是将包装袋顶板的包装线慢慢打开至大约 20 mm^2，然后迅速将 Geotech-CO_2 气体分析仪软管插入袋内，待气体比例稳定后读数。

1.4.5 维生素 C 含量的测定

参考 Martinon[7]等的方法。

1.5 数据处理

测定和分析结果采用 SPSS 13.0 for Windows、TA Universal analysis 和 Excel 2003 进行处理。

2 结果与分析

2.1 不同真空预冷抽气速率对卷心菜重量及压强变化曲线

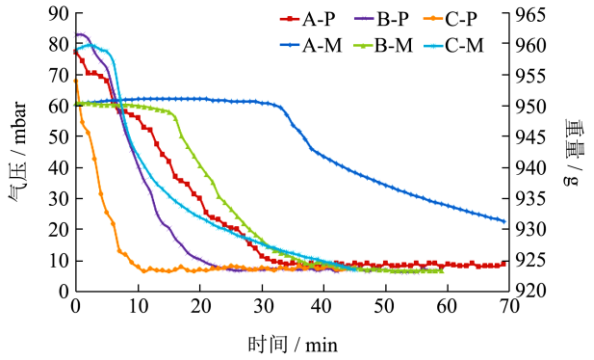


图 1 不同真空预冷抽气速率对卷心菜重量及压强变化曲线

Fig.1 Variation curve of the weight of iceberg lettuce and pressure under vacuum precooling at different evacuation rates

注：由于莱宝真空计在 100 mbar 所显示的范围内为准确数据，所以数据从 100 mbar 内开始记录。

图 1 显示了不同抽气速率对卷心菜重量及压强的变化。通过调节电子阀不同的开度，获取三条不同的压强下降曲线，其降压速率指数 Y 值分别为 A-0.126 min^{-1}；B-0.185 min^{-1}；C-0.315 min^{-1}。不难发现，真空预冷过程中，卷心菜的质量下降均存在着延迟性。其原因主要是由于卷心菜温度下降必须是箱体内绝地压强小于或等于该温度下卷心菜所对应的饱和蒸汽压，卷心菜才会开始蒸发。所以，抽气速率越小，质量恒定延续时间也越长。其中，A 抽气速率下的重量下降速率要快于 B、C 组的抽气速率，表明抽气速率越大，其水分蒸发也越快。

2.2 不同预冷方式对卷心菜温湿度变化的影响

图 2 描述了不同预冷方式和真空预冷不同抽气速率对卷心菜不同部位温湿度变化。结果表明，真空预冷所引起的温湿度变化与风冷引起的温湿度变化明显不同，真空预冷后卷心菜温湿度变化都呈现出先大幅度的下降而后再上升最后保持平稳的过程。该结论与 Ozturk[4]等人对卷心菜真空预冷的结果相似。

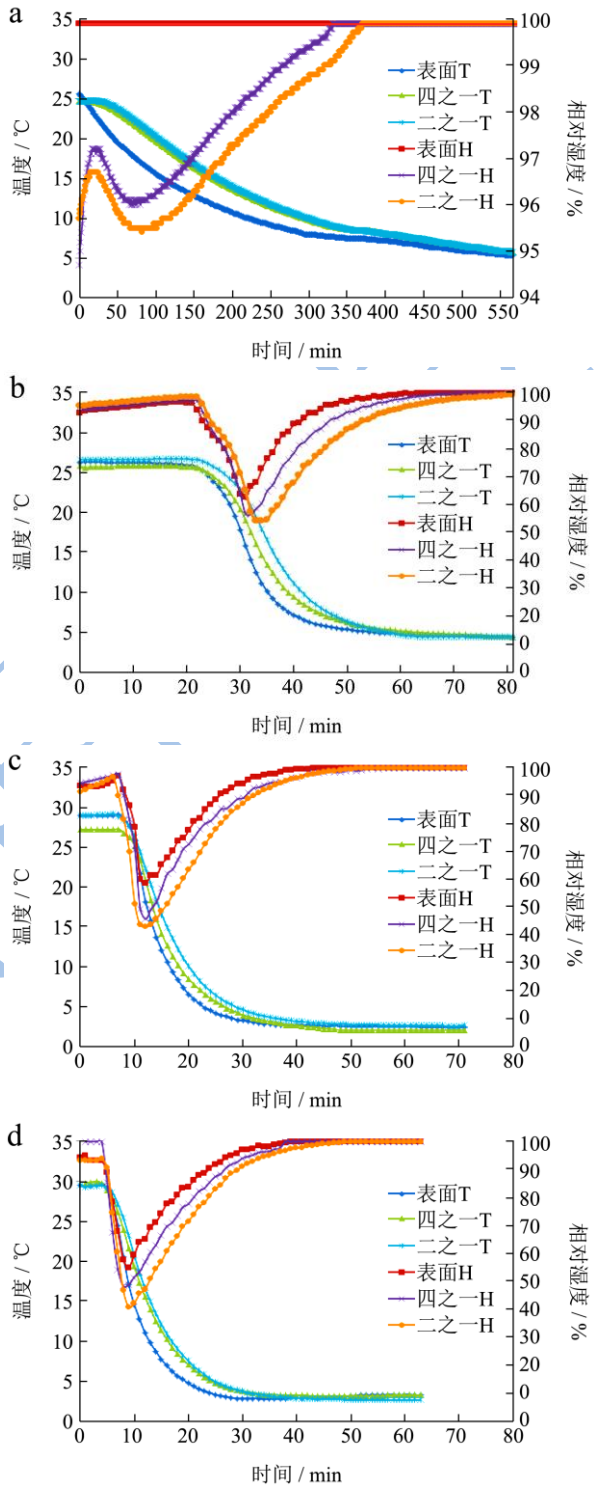


图 2 不同预冷方式都卷心菜不同部分的温湿度变化图

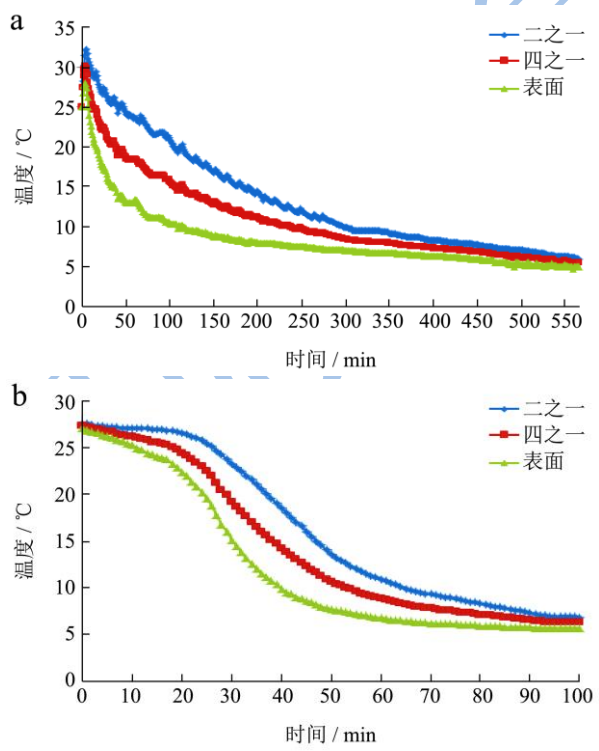
Fig.2 Variation in temperature and relative humidity in different parts of iceberg lettuce subjected to different precooling methods

注：a.风冷，b.真空预冷（A 抽气速率），c.真空预冷（B 抽气速率），d.真空预冷（C 抽气速率）；由于样品的二分之一、四分之一及表面均被切开后再重新组装过，故温度下降速率要

较未切开的预冷速率快。

同时还得出如下结论：1）无论何种抽气速率都能发现卷心菜不同部位温度下降速率与相对湿度凹槽深度呈反比关系；2）不同抽气速率对卷心菜温湿度变化曲线相似，都存在先下降后上升最终趋于平稳的趋势，不同的是抽气速率越小（如 A 抽气速率），则相对湿度凹槽最低点相对于其他抽气速率而言会更高；3）同一抽气速率似乎对卷心菜不同部位出现凹槽拐点（时间）没有影响，这足以说明真空预冷过程中卷心菜不同部位降温发生的时间是同时的，并未出现时间差；4）无论何种抽气速率，都能发现表面所对应的凹槽度越小，越容易达到相对湿度 100%，说明其完成卷心菜降至预定温度也越快。相对湿度指标作为一种重要的参数能够较好地反映出真空预冷卷心菜过程中的传质和传热现象。该结论与金听祥[9]等有关熟肉真空冷却过程中水分迁移理论结果极其相似。金听祥[9]等人通过建立熟肉预冷的模型并与实验结果对比得出结论为真空预冷过程中样品整体区域会出现蒸发降温现象，不过内部降温过程中所产生的水蒸气无法及时被抽走而导致样品表面区域压强高于该温度下样品所对应的饱和蒸汽分压，从而导致降温速率慢。

2.3 不同预冷方式对卷心菜不同部位温度变化的影响



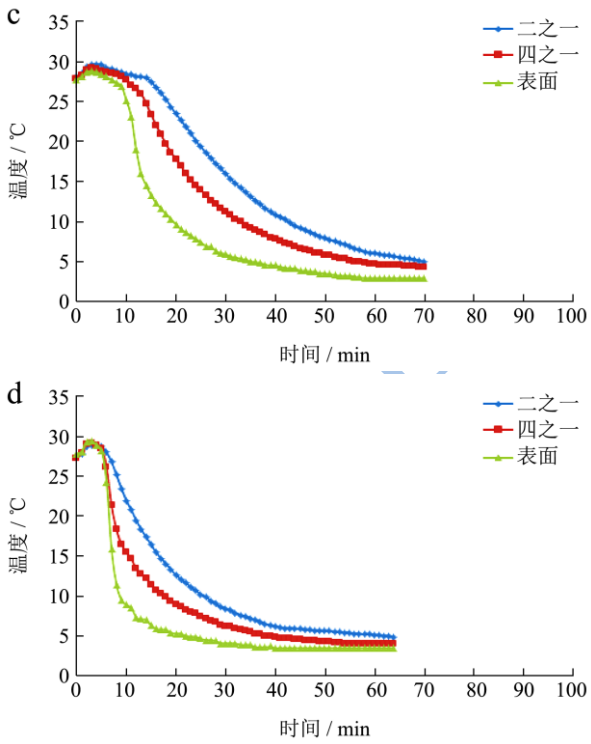


图 3 不同预冷方式对卷心菜不同部位的温度变化图

Fig.3 Variation in temperature in different parts of iceberg lettuce subjected to different precooling methods

注：a.风冷，b.真空预冷（A 抽气速率），c.真空预冷（B 抽气速率），d.真空预冷（C 抽气速率）；卷心菜仅被热电偶插入至指定位置，实验前样品未被切开或破坏。

图 3 描述了不同预冷方式对卷心菜不同部位的温度变化的比较。结果表明，真空预冷对卷心菜的预冷速率要明显快于风冷。抽气速率越快，预冷速率也相对越快。不过，从图 3 中可以看出抽气速率 B 和抽气速率 C 在卷心菜中心降温差异不大，抽气速率 B 预冷时间为 70 min，而 C 抽气速率也接近 65 min，且差异性不显著（$p>0.05$）。综上所述，对于卷心菜这种结构致密的蔬菜并非抽气速率越大就能够带来明显的降温效果。其原因可能来自两方面，其一是卷心菜在预冷过程中内外存在温差，即表面温度要低于中心温度，这样容易导致内部所产生的水蒸气在向外界传递过程中遇冷又变成冷凝水反而释放热量，并没有起到降温效果；其二来自于单位时间内内部水蒸汽产生量，水蒸气产生越大，内外温差越大，则更容易导致差的降温效果。不难发现，图 4 与上述描述的现象较为吻合。同时，该结论与 Cheng[10]等人有关阶段恒压降温趋势的结论有相似性。

2.4 不同预冷方式对卷心菜失重率的影响

表 2 不同预冷方式对卷心菜重量变化

Table 2 Variation in weight loss of iceberg lettuce subjected to different precooling methods and evacuation rates

预冷方式	风冷	不同抽气速率		
		A	B	C
水分损失	0.89±0.08%^{d}	2.07±0.15^{c}	2.96±0.18^{b}	3.78±0.24^{a}

注：不同的字母（a、b、c、d）代表差异性显著（p<0.05）。

表 2 显示不同预冷方式对卷心菜预冷终了时的重量变化。结果发现，不同预冷方式存在着显著性差异（P<0.05），风冷水分损失最少。同时，不同的抽气速率导致卷心菜水分损失也不一样，抽气速率越大所导致卷心菜水分损失也越大。其原因可能是抽气速率越大，导致的温差也越大，温差越大易导致内部形成的水蒸气在卷心菜表面（温度更低）形成冷凝水（如图 4 所示），而冷凝水在抽真空的过程中会以液态水的形式向真空箱体内蒸发，所以导致水分损失过大。该结果与 Donald[8]等人研究的结论一致，Donald 等人发现抽气速率越快，熟牛肉水分损失越大，而且随着抽气速率增加，水分损失呈增大趋势。

2.5 不同预冷方式对卷心菜内部水珠分布图



图 4 不同预冷方式对卷心菜内部水珠分布图

Fig.4 Distribution of water drops inside iceberg lettuce subjected to different precooling methods

注：图中红色的点为实验后立即用红色染料沾上的（环境温度 5℃，相对湿度 95%）。

图 4 描述了预冷后卷心菜不同部位水珠分布图。从图 4 可知，预冷速率越快，产生的水珠则越明显，抽气速率越慢产生的水珠越少。风冷后几乎不产生明显的水珠。该结论与图 3 得出的结论吻合。即单位时间内内部所产生的水蒸气越多以及内外温差越大是导致其水珠形成的原因。同时，也可以得出如下结论即并非预冷速率越快越好，选择合理的抽气速率是解决卷心菜这种结构致密蔬菜预冷的最佳方式。

2.6 不同预冷方式下的卷心菜在贮藏过程中的呼吸率变化影响

表 3 不同预冷方式对卷心菜贮藏过程中的呼吸率变化

Table 3 Variation in respiratory rate of iceberg lettuce subjected to different precooling methods, during cold storage

预冷天数/d	风冷 /(mg/kg h)	真空预冷不同抽气速率/(mg/kg h)		
		A	B	C
2	178.6±12.5^{a}	161.9±11.1^{b}	155.9±8.4^{b} Ⅱ	141.9±5.5^{c}
4	201.8±9.3	202.4±15.1	182.6±8.8 Ⅰ	149.9±6.9
6	251.5±14.5^{a}	223.3±7.5^{b}	183.9±16.5^{d} Ⅰ	197.1±13.2^{b}

注：横向上不同字母（a、b、c、d）表示不同预冷方式之间的差异显著（p<0.05）；纵向上不同数字序号（Ⅰ、Ⅱ）表示贮藏天数之间的差异显著（p<0.05）。

表 3 描述了不同预冷方式对卷心菜贮藏过程中呼吸率变化的比较。结果发现真空预冷后的呼吸速率均小于风冷后的呼吸速率，说明快速的降温仍是抑制呼吸率的有效方法。同时，不同抽气速率之间也存在着显著性差异（p<0.05）。抽气速率 C 指标在前期的数据要明显优于 A、B 组指标，其原因可能是抽气速率越大，降温速率也越快，更能有效地抑制呼吸。不过到第 6d 则发现 B 组的呼吸速率值 183.9 mg/kg h 要更优于 A（223.3 mg/kg h）、C（197.1 mg/kg h）组，这也反过来说明真空预冷技术可能对卷心菜代谢系统和细胞结构产生了一定量的影响，与 He[4]等人的结论较吻合。

2.7 不同预冷方式下的卷心菜在贮藏过程中包装袋顶端气体比例变化

表 4 描述了不同预冷方式后对卷心菜贮藏过程中包装袋顶端气体比例变化的比较。本文对预冷后的卷心菜直接放入包装袋内并扎紧，并检测空气中 O_2 和 CO_2 的比例分别为 20.8%和 0.05%。从表 5 中可以看出，随着贮藏时间的延长，袋中 CO_2 呈上升而 O_2 呈下降趋势。不同的预冷方式及不同真空预冷抽气速率存在着显著性差异（p <0.05）。整体而言，真空预冷 B 抽气速率所获得的指标要优于其他预冷方式或抽气速率组 A、C。当贮藏到第 6 d 时，发现 CO_2 比例接近 8%左右，而 O_2 比例接近 2%左右。该比例仍然较为接近气调比例，说明卷心菜仍然可以保存较长的时间，

不过当 CO_2 比例超过 10%或者 O_2 比例小于 1%时则需要换气或者其他方式处理。

表 4 不同预冷方式对卷心菜贮藏过程中包装袋顶端气体比例的变化

Table 4 Variation in gas ratio at the top of packaging bag of iceberg lettuce subjected to different precooling methods, during cold storage

天数/d	预冷	气体/%	风冷/%	真空预冷不同抽气速率 A/%	B/%	C/%
2		CO_2	5.5±0.2^a	5.1±0.5^b	4.2±0.3^c Ⅱ	4.9±0.4^b
		O_2	6.2±0.3	6.8±0.3	7.6±0.2	7.0±0.2
4		CO_2	7.5±0.9	7.8±1.1	7.0±0.1 Ⅰ	7.0±0.1
		O_2	3.5±0.5	3.2±0.2	3.8±0.4	3.7±0.2
6		CO_2	8.2±0.5	8.2±0.4	7.2±0.5 Ⅰ	7.5±0.4
		O_2	1.6±0.1^a	1.9±0.2^b	2.1±0.3^b	2±0.2^b

注：横向上不同字母（a、b、c、d）表示不同预冷方式之间的差异显著（p<0.05）；纵向上不同数字序号（Ⅰ、Ⅱ）表示贮藏天数之间的差异显著（p <0.05）。

2.8 不同预冷方式下的卷心菜在贮藏过程中的维生素 C 含量变化

表 5 不同预冷方式对卷心菜贮藏过程中维生素 C 的变化

Table 5 Variation in vitamin C of iceberg lettuce subjected to different cooling methods, during cold storage

预冷天数/d	风冷/(mg/100 g)	真空预冷不同抽气速率(mg/100g) A	B	C
2	35.3±3.3^c	41.8±1.7^b	55.8±3.8^a Ⅰ	41.1±1.8^b
4	35.5±1.8	40.3±0.9	48.6±2.2 Ⅱ	44.9±3.2
6	36.1±2.1^c	40.2±2.1^b	46.0±2.1 Ⅱ^a	39.6±2.5^b

注：横向上不同字母（a、b、c、d）表示不同预冷方式之间的差异显著（P<0.05）；纵向上不同数字序号（Ⅰ、Ⅱ）表示贮藏天数之间的差异显著。

表 5 描述了不同预冷方式对卷心菜贮藏过程中维生素 C 的变化比较。从表 3 中数据可以看出，真空预冷不同抽气速率对卷心菜后的维生素 C 均高于风冷，且差异性显著（p <0.05）。真空预冷 B 抽气速率对卷心菜贮藏过程中的维生素 C 指标始终要高于 A、C 抽气速率，且差异性显著（p <0.05）。其原因可能是较适中的抽气速率对于卷心菜这种结构的蔬菜更为合适。该结论与 He[4]的结果较为相似。He 等人通过不同抽气速率对卷心菜预冷过程及微观结果分析发现较适中的抽气速率对质膜、液泡、液泡膜、线粒体等指标破坏要小于其他的抽气速率。

3 结论

一定抽气速率下对不同部位的卷心菜温湿度图凹点出现的时间几乎是一致的，不存在延滞性。说明当压强降至饱和蒸汽压时卷心菜内外部同时蒸发降温。其中，抽气速率越大，凹点出现的时间越短，A、B、C 分别为 35、13、8 min，说明抽气速率越大，箱体绝地压强越快到使卷心菜降温。同时，抽气速率越大，物料水分损失也越大（A、B、C 分别为 2.07、2.96、3.78%），但并不意味着 C 组降温速率会快很多（C 组和 B 组数值相当，且差异性不显著），说明对于卷心菜这类结构致密的蔬菜并非抽气速率越快越好，内部水珠分布图较好地解释了该现象即快速抽气时内部的水蒸气并为被抽走而是被内外较大的温差而冷凝在表面而重新释放热量，说明其并没有起到降温的效果。以贮藏 6d 后的数据来看，B 较其他组而言，其呼吸速率 183.9 mg/(kg h)及顶端 CO_2（7.2%）含量要明显低于 A、C 组，而维生素含量 C（46 mg/kg）及顶端 O_2（2.1%）含量要明显高于 A、C 组。以上结论都较好地说明 B 组抽气速率更时候卷心菜的真空预冷。如何合理地控制抽气速率或者采用多阶段恒压技术来缓解这种温差以防止水蒸气以水珠的形式出现而降低能耗是未来的研究重点，并以此为结论推广至结构致密组织的真空预冷也是未来需要探讨的重点。

参考文献

[1] Sun D W, Zheng L Y. Vacuum cooling technology for the the agri-food industry: Past, present and future [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77: 203-214

[2] 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 and Technology, 2004, 33:263-273

[3] Cheng H P, Hsueh C F. Multi-stage vacuum cooling process of cabbage [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79: 37-46

[4] Ozturk H M, Ozturk H K. Effect of pressure on the vacuum cooling of iceberg lettuce [J]. International Jouranl of Refrigeration, 2009, 32: 402-410

[5] Wang L J, Sun D W. Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology [J]. Trends in Food Science and Technology, 2001, 12 (5-6): 174- 184

[6] 杨振生,袁唯.果蔬呼吸强度测定[J].保鲜与加工,2003, 2:24-25

YANG Zhen-sheng, YUAN Wei. Method for determining respiratiry intersity of fruit and vegetable [J]. Storage &

Process, 2003, 2: 24-25

[7] Martinon M E, Moreira R G, Castell-Perez M E, et al. Development of a multilayered antimicrobial edible coating for shelf-life extension of fresh-cut cantaloupe stored at 4 ℃ [J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 56: 341-350

[8] Donald K M, Sun D W. Effect of evacuation rate on the vacuum cooling process of a cooked beef product [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 48: 195-202

[9] 金听祥,张海川,李改莲,等.熟肉真空冷却过程中水分迁移理论分析和实验[J].农业工程学报,2008,24(8):309-312 JIN Ting-xiang, ZHANG Hai-chuan, LI Gai-lian, et al. Theoretic analysis and experimental study on the mechanism of moisture movement during vacuum cooling of cooked meat [J]. Transaction of the CSAE, 2008, 24(8): 309-312

[10] Cheng H P. Vacuum cooling combined with hydrocooling and vacuum drying on bamboo shoots [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26: 2168-2175

现代食品科技