

蔬菜预冷技术的研究现状

付艳武^{1,2}, 高丽朴¹, 王清¹, 韩聪^{1,2}, 董海洲², 左进华^{1,*}

(1. 国家蔬菜工程技术研究中心, 北京 100097; 2. 山东农业大学食品科学与工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 蔬菜预冷是利用低温处理方法, 将采后蔬菜的温度迅速降到工艺要求温度的过程。预冷技术可以降低蔬菜采后的新陈代谢速度, 延长贮藏期, 对保持品质及延缓成熟衰老进程有着重要作用。本文综述了水预冷、冷库预冷、真空预冷、差压预冷等预冷技术的研究现状及其相应适宜的蔬菜预冷参数, 并提出今后我国蔬菜预冷技术研究的主要方向。

关键词: 蔬菜; 预冷技术; 冰水预冷; 冷库预冷; 真空预冷; 差压预冷

Research Status on Precooling Techniques of Vegetables

FU Yan-wu^{1,2}, GAO Li-pu¹, WANG Qing¹, HAN Cong^{1,2}, DONG Hai-zhou², ZUO Jin-hua^{1,*}

(1. National Engineering Research Center for Vegetables, Beijing 100097, China;

2. College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: The vegetable precooling is a process to make the temperature of vegetables after harvest drop rapidly to the required temperature by low-temperature treatment. Precooling technology can reduce the metabolic rate of postharvest vegetables, prolong its storage life and play an important role in maintaining its quality and delaying mature and aging process. The common precooling methods are ice water precooling, cold room precooling, vacuum precooling, forced-air precooling, etc. This paper reviewed the research status of precooling techniques and prospected its development trend.

Key words: vegetable; precooling technique; ice water precooling; cold room precooling; vacuum precooling; forced-air precooling

中图分类号: S609+.3

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6221.2015.01.013

我国的蔬菜采后损失非常严重。据不完全统计, 由于采后处理不当, 贮、运、销过程中保鲜技术差, 冷藏设施严重不足, 市场营销能力低等原因^[1], 我国蔬菜的采后损失率达 20%~30%^[2]。蔬菜采后所带的田间热量相当大, 较高的品温会引起产品呼吸强度增加, 附着在产品上的有害微生物大量繁殖, 最终导致衰老变质和腐烂^[3]。预冷是保持蔬菜品质、延长货架寿命的重要措施之一^[4]。预冷的概念最早是由 Power 和他的

助手于 1904 年在美国农业部提出的。预冷是利用低温处理方法, 将采后果蔬的温度迅速降到工艺要求温度的过程^[5]。通过预冷, 可以保持产品品质, 减少产品损耗, 满足产品冷藏工艺的要求, 节约能源。因此, 预冷在整个蔬菜保鲜冷链流通和配送过程中起着极为重要的作用^[6]。

产地及时预冷对蔬菜采后品质的保持有着非常重要的作用。黄瓜在产地及时预冷后, 可以在冷库贮

基金项目: 现代农业产业技术体系项目(CARS-25); 公益性行业(农业)科研专项(201203095);

北京市农林科学院创新基金项目(201304); 北京市农林科学院青年基金(201404)

作者简介: 付艳武(1990—), 男, 汉族, 在读硕士, 主要从事蔬菜采后保鲜方面的研究工作。

*通讯作者: 左进华, 博士, 助理研究员, 主要从事农产品贮藏与加工方面的研究工作。

藏 22 d,但如果采收后经过 24 h 再进行预冷,则在贮藏第 12 天就会失去商品价值^[7]。预冷的种类很多,按预冷机理可分为热传导传热预冷和蒸发相变传热预冷两类。热传导传热预冷技术常用的传热介质有水和空气,相应的预冷方法有水预冷和空气预冷。冷库预冷和差压预冷是以空气为介质的预冷方式,真空预冷是当前蒸发相变传热预冷的主要方法^[8]。本文系统综述了国内外蔬菜预冷技术的研究现状,并对其发展趋势进行了展望。

1 蔬菜预冷方式及研究现状

1.1 水预冷

水预冷是将蔬菜浸入冷水中或者将冷水喷洒到蔬菜表面使蔬菜温度降低的一种方法。与冷风预冷相比,由于水的换热系数比空气大,所以冷水冷却比冷风冷却速度快,时间短,冷却均匀,效果好。有研究发现,在相同的流速和温差下,冷水预冷的冷却速度是冷风的 15 倍^[9]。因此冷水冷却比冷风冷却速度快,效果好,对根菜类产品还兼有清洗功能^[10]。但水预冷适用范围有限,对于一些沾水后易发生腐烂的蔬菜如花椰菜、蒜薹等并不适用。此外,水预冷最大的缺陷是,为防止积累于水冷却器循环水中病原微生物的侵染,就需要在水中加入大量防腐剂,而防腐剂本身也是对产品的污染^[11]。

冷水预冷装置有喷雾式、洒水式、浸渍式和整体式四种结构形式。喷雾式是把冷水加压到 0.8~1.0 kg/cm²,使其通过喷嘴冷却成雾状接触产品而使产品冷却。洒水式是由上悬罐筒向农产品淋洒冷水,比喷雾式水泵动力消耗小,包装好的农产品在隧道式输送机上一边传送一边洒水冷却,连续进行,自动输送。浸渍式是把农产品放在冷水槽中浸渍冷却,水与蔬菜产品完全接触,接触面积充分,不容易出现冷却不均匀的现象。整体式是浸渍式和洒水式的组合方式,先把果蔬在冷水槽中浸渍冷却,然后从冷水槽中用传送带把果蔬产品边捞边洒水冷却,具有浸渍式和洒水式的综合效果^[10]。浸泡式预冷的效率是洒水式预冷的 2 倍,具有更广泛的应用范围^[9]。

在蔬菜水预冷研究方面已经取得了很大进展。Teruel 等^[12]的研究表明,冰水冷却蔬菜的体积和时间的关系为 0.06~0.12 min·cm⁻³。Gillies 等^[13]分别用冷库预冷、顶部加冰预冷和冰水预冷对西兰花进行处理,结果表明,冰水预冷速度最快,同时西兰花的失重率低,硬度和颜色的保持比较好。Cheng^[14]采用水预冷结合真空预冷处理竹笋,结果表明,该方法可以有效地降低竹

笋的温度,减少真空系统的能量消耗。Niyomlao 等^[15]将采收后的芥蓝进行水预冷,然后在 10 °C 下放置 10 d,结果发现,进行水预冷的芥蓝比不预冷的更加新鲜,可以有效地延长贮藏期。常见适宜水预冷的蔬菜及相关参数如表 1 所示。

表 1 常见适宜水预冷的蔬菜及相关参数

Table 1 The common vegetables suitable for water precooling and related parameters

蔬菜种类	预冷温度/°C	预冷时间/min	贮运相对湿度/%
白萝卜	3~5	8~10	95~100
胡萝卜	3~5	9~11	98~100
马铃薯	3~5	15~30	90~95
芦笋	3~5	20~40	90~95
甜玉米	4~5	60~90	95~98
豌豆	2~5	20~25	95~98

1.2 冷库预冷

冷库预冷是将蔬菜放在冷库中,利用制冷机组将库内热量转移到库外,使得蔬菜降温的过程。冷库预冷适应性强,能够对大部分果蔬进行预冷,而且能够将多种蔬菜混合冷却,操作简单,但是冷却时间较长,易产生冷却不均的现象^[16]。

目前冷库的建造方式主要有三种:一是采用砌块和钢筋混凝土结构加保温建造土建冷库;二是轻钢结构加装配式冷库;三是土建或钢混结构加装配式冷库。选用的具体建造方式主要根据不同区域、地理环境、投资成本、运行成本等因素而决定^[17]。近几年来,我国冷库建设发展十分迅速,主要分布在各水果、蔬菜主产区以及大中城市郊区的蔬菜基地。截至 2013 年底,全国冷库储存能力总计约为 2 411 万 t^[18]。同时,我国冷库正进一步朝着更加环保及单层冷库越建越高的方向发展^[19]。

冷库建设在不断发展,专家也对冷库中的送风方式和温度场进行了诸多研究。郭亚丽等^[20]研究了在单一风机、一拖二风机及夹套式三种不同送风方式下的 90 m³ 微型冷库内离地面 1.5 m 处的温度场分布。结果表明,夹套式送风方式的微型预冷库具有最好的温度场分布。刘斌^[21]通过在不同送风模式下的果蔬贮藏试验表明,夹套式送风模式下的微型冷库具有最小的果蔬失重率。杨磊等^[22]运用 CFD 工具对一小型冷藏库的预冷降温过程进行了模拟仿真,并通过试验验证了仿真的精度。结果表明,模拟温度与实测温度的变化趋势一致,最大误差为 3%,二者具有较好的线性拟合度,其拟合曲线的 $R^2=0.741 2$, $SE=3.122 5$ 。汤毅等^[23]则研究发现,三维方法对冷库气流场的模拟更准

确可靠,并得到了冷库竖直和水平平面上的气流分布。谢晶等^[24]研究表明,整个冷库的流场存在一个中心大回流区,流场主流贴附边界流动,流场在拐角处速度减小。汤毅等^[25]研究发现,冷库内采用三层货物摆设的方式更优于四层摆设,具体表现为风机射流和回流更充分,货物对整体流场影响较小。刘研玲等^[26]研究发现,果蔬按中间有通道方式摆放时,室内能形成较合理的气流组织。常见适宜冷库预冷的蔬菜及相关参数如表2所示。

表2 常见适宜冷库预冷的蔬菜及相关参数
Table 2 The common vegetables suitable for cold room precooling and related parameters

蔬菜种类	预冷温度/℃	预冷时间/h	相对湿度/%
番茄	9~10	20~30	85~90
青椒	9~10	10~20	90~95
黄瓜	9~10	10~15	95~100
茄子	9~10	20~30	90~96
生菜	2~3	10~20	98~100
白菜	2~3	20~30	95~100
芹菜	2~3	10~15	98~100
青花菜	2~3	10~20	95~98
豌豆	2~3	10~15	95
菠菜	2~3	10~15	95~100

1.3 真空预冷

真空预冷是利用蔬菜在低压环境下水分的蒸发,快速吸收果蔬自身存在的田间热量,同时不断去除产生的水蒸气,使蔬菜温度得到快速降低的一种方法^[27]。真空预冷的优点:冷却时间短:一般20~30 min就可以使绝大部分预冷前经过包装的叶菜类蔬菜温度降至4~5℃^[28-29];冷却均匀,可使被冷却物品内外温度一致,其他冷却方法短时间内有较大的温差^[30];真空预冷过程中蔬菜几乎不与空气接触,更加卫生^[6]。但是,真空预冷也有其缺点,比如:适宜冷却的品种有限,一般适于单位质量表面积大的蔬菜类,如叶菜类;导致质量损失,温度每下降10℃,产品的水分会损失1.7%,对于叶菜类,影响其新鲜度^[31];成本较高,真空预冷装置的投资和运转费用较高。

真空预冷装置分间歇式、连续式、移动式 and 喷雾式四种。间歇式真空预冷装置用于小规模生产,连续式真空预冷装置用于大型加工厂,移动式真空预冷装置由于其一体化组装在汽车上而具有机动灵活的特点,可以异地使用,喷雾式真空预冷装置用于表面水分较小的果实类和根茎类果蔬预冷^[32]。

真空预冷广泛应用于食用菌采后的预冷过程中。蘑菇中含有90%的水分,蘑菇的多孔结构也容易使其

内部的水分蒸发逸出,因此比较适合用真空预冷^[33]。真空预冷可以迅速除去蘑菇自身存在的田间热,使其温度在6.5 min内由25℃下降到5℃^[34]。蘑菇在真空冷却后可以贮藏102 h,较其他冷却方法延长24 h^[35]。

真空预冷对叶菜类的冷却处理效果好,但是对根果菜类处理效果不理想。Sun^[36]对叶菜类和根果菜类进行真空预冷试验,研究结果表明,真空冷却对叶菜类非常有效,冷却叶菜类从初温20℃降到5℃只需55~155 s,而根果菜类则需要1 200 s。卷心生菜在相同条件下用真空冷却只需要20~29 min,而用传统方法冷却需要几个小时^[37]。生菜常温下的贮藏期为3~5 d,而采用真空预冷与1℃条件下贮藏相结合可以将贮藏期延长至14 d^[38]。为了解决真空预冷中蔬菜水分的损耗问题,可以在产品被放入冷却室前通过喷雾器向产品表面喷水来减少其在冷却过程中的水分损失^[9]。此外,许多试验也对真空预冷的参数进行了研究。石小琼等^[39]研究表明,芋在真空室内采用真空度650 Pa,真空预冷终温4℃,预冷时间30 min,进行真空预冷处理并配合塑料薄膜袋包装的冷藏比一般冷库保鲜效果更好。谢晶等^[39]研究发现,在卷心菜真空冷却过程中增设自动补气阀后,卷心菜中心与表面叶片的温差由原来的12.3℃减小到2.3℃。常见适宜真空预冷的蔬菜及相关参数如表3所示。

表3 常见适宜真空预冷的蔬菜及相关参数
Table 3 The common vegetables suitable for vacuum precooling and related parameters

蔬菜种类	预冷温度/℃	预冷时间/min	相对湿度/%
结球生菜	2~3	20~30	100
大白菜	3~5	20~40	95~100
菜心	2~5	12~20	95~100
芹菜	3~5	20~30	98~100
菠菜	3~5	20~30	95~100
韭菜	3~5	20~30	95~100
蘑菇	2~5	20~30	95
大葱	3~5	10~20	98~100
花椰菜	3~5	20~30	95~98
孢子甘蓝	4~6	20~30	95~100

1.4 差压预冷

差压预冷是通过对两侧带有通风孔的包装箱进行特殊码垛,利用差压风机在包装箱的两侧造成压力差,使冷空气从包装箱内部通过,直接与箱内蔬菜换热的一种方法^[4]。差压预冷缩小了生产所需空间,库容利用更加合理,其冷却速度更加迅速,且冷却均匀,适用于各种果蔬,减少了水分蒸发造成的产品表面凝缩,提高了产品品质^[40]。差压预冷投资比强制通风预

冷略高,但远低于真空预冷,有的品种略出现枯萎现象,码垛等略费工时^[7]。

差压预冷设备在国外已有较多的试验研究,并较广泛地应用于实际生产中^[41]。差压式预冷设备主要由制冷系统、加湿系统、静压箱、风机、风速控制系统、温度控制系统、包装箱及其他密封材料组成^[42]。差压式预冷设备根据用途和利用场所可以分为差压预冷库、差压预冷器和差压预冷机。差压预冷库就是在自然贮藏冷库的基础上,在库体本体上增加一套差压设备,使之在整个冷库内形成差压。差压式预冷器^[43]主要用在自然冷库内,利用自然冷库的冷量,迅速使物料冷却下来,达到预冷的目的。差压预冷机主要适用于贮藏运输车上,具有独立的制冷系统和加湿系统。差压预冷机比较节能,容易控制库内的温度和风速,且移动方便,特别适用于贮藏运输车,发展前景广阔^[42]。

许多试验针对不同工艺对蔬菜差压预冷效果的影响因素进行了研究,表明送风温度对预冷速度的影响较大。预冷时间随送风温度的降低而减少,当预定番茄预冷中心温度达 10℃时,送风温度由 9℃降到 7℃,预冷时间减少约 30%,当送风温度由 9℃降为 4℃时,预冷时间减少约 48%^[44]。风速也是影响预冷速度的主要参数。Lambrinos 等^[45]研究表明,风速从 0.2 m/s 增大到 3.6 m/s,预冷时间可以缩短到原来的 1/3~1/2,但是风速增大,风机的能耗增加。刘斌等^[46]对间隔式包装的番茄进行差压预冷试验表明,风速增大,番茄的温度降低,预冷时间缩短,随着风速的增大,番茄温度下降的速度越来越小,而压力降增加速度却加快,最佳预冷风速是 1.1 m/s。

果蔬在包装箱内的摆放方式不同,会形成不同的冷空气通道,造成不同的孔隙率,预冷速度也不相同。陈天及等^[47]对常规间隔排列和平方面隔排列方式的番茄冷却速度的测试结果表明,平方面隔排列方式由于孔隙率大,其冷却速度大于常规间隔排列,预冷时间约减少 10%~20%。包装箱的开孔方式和大小也是影响预冷效果的主要参数。刘凤珍等^[48]确定了甘蓝差压通风预冷的包装箱开孔为 35~40 mm,风量是 200~300 L/min。冀卫兴等^[49]对开孔方式进行了研究,对比五种不同外部开孔方式(28 个孔、32 个非均匀孔、32 个均匀孔、40 个孔和 50 个孔)对蔬菜预冷效果的影响,结果发现,外部开孔为 40 个孔的降温效果最好。差压预冷可以大大提高蔬菜品质。常温 20℃条件下流通的青花菜贮运寿命仅 1 d,差压预冷后无冷链流通条件的青花菜寿命却延长到 3 d。差压预冷后用发泡聚苯乙烯箱包装的青花菜的质量损失比用纸箱

包装的要低,经差压预冷在 0℃贮藏 10 d 后的青花菜颜色只有微小变化^[50]。番茄差压预冷后可以显著延缓成熟,减少失重,减少 VC 的损失^[51]。对花椰菜进行堆垛预冷、架式预冷和差压预冷,结果表明,差压预冷法预冷效果最好,可最大限度地保持花椰菜的新鲜度,样品几乎无散花、变黄及腐烂现象^[52]。常见适宜差压预冷的蔬菜及相关参数如表 4 所示。

表 4 常见适宜差压预冷的蔬菜及相关参数
Table 4 The common vegetables suitable for forced-air precooling and related parameters

蔬菜种类	预冷温度/℃	预冷时间/h	相对湿度/%
番茄	9~10	3~5	85~90
青椒	9~10	3~4	90~95
黄瓜	9~10	3~4	95~100
茄子	9~10	3~6	90~96
生菜	2~3	3~5	98~100
白菜	2~3	3~6	95~100
芹菜	2~3	3~4	98~100
青花菜	2~3	3~4	95~98
豌豆	2~3	2~3	95
菠菜	2~3	2~3	95~100

2 展望

预冷可使果蔬采后代谢活动迅速降低^[53],延缓后熟,延长贮藏期,减少贮期水分损失、营养消耗和病原菌的侵染,保持其较高硬度、脆度、弹性和新鲜度。发达国家由于冷链技术的普及,在预冷环节已做到了及时、迅速,因而产品采后品质保持较好。预冷技术在美国从理论到实践都较为成熟,已经形成生鲜食品的产地预冷、冷藏运输及流通消费连续低温冷链^[7],蔬菜采后损失率在 5%之内^[6]。我国产地预冷起步较晚,无论从硬件设备技术还是软件应用技术都储备不足^[54]。我国大部分蔬菜仍在常温下流通,冷链流通率不足 5%,导致蔬菜流通腐损率达 20%~30%,每年经济损失达到 1 000 亿元以上。因此,实施蔬菜产地预冷技术与设备研发和推广普及势在必行。

目前,关于蔬菜预冷技术的研究虽然取得了一些进展,但随着我国冷链物流的快速发展,仍有一些技术问题需要解决:冷水预冷后如何更好地去除蔬菜表面残留的水分,避免后期贮藏腐烂的发生;进一步探讨适应少量、多品种处理的有效预冷装置以及出入库操作自动化;实现预冷设备的节能并减少设备的配置数量,简化操作程序;确定蔬菜的预冷工艺后,设计、选用合理的预冷装置,调节预冷装置达到预冷工艺要求。

参考文献:

- [1] 黄海峰. 新型果蔬包装材料研究进展[J]. 中国包装, 2008(2): 83-85.
- [2] 李健, 姜微波. 预冷技术在果蔬采后保鲜中的应用研究[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2013, 30(3): 65-68.
- [3] 杨少桢. 果蔬采后预冷——不可或缺的一环[J]. 农产品加工, 2006(3): 28-29.
- [4] 王强, 李绍济. 果蔬差压通风预冷技术的应用与展望[C]// 2006年山东省制冷空调学术年会“格力杯”优秀论文集. 烟台: 山东制冷学会, 2006: 251-252.
- [5] 苗玉涛, 邹同华, 黄健. 压差预冷技术的研究现状与发展趋势[J]. 制冷空调, 2005(6): 14-18, 4.
- [6] 马骞. 果蔬真空预冷技术的研究概况[J]. 河北农业科学, 2009, 13(3): 15-16, 38.
- [7] 王强, 刘晓东. 实施蔬菜产地预冷, 完善低温冷藏链[J]. 制冷, 2001(1): 40-44.
- [8] 吕盛坪, 吕恩利, 陆华忠, 等. 果蔬预冷技术研究现状与发展趋势[J]. 广东农业科学, 2013, 40(8): 101-104.
- [9] Brosnan T, Sun D W. Precooling techniques and applications for horticultural products a review [J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(2): 154-170.
- [10] 翟家佩, 蒋伟. 冷水冷却式果蔬预冷装置设计[J]. 食品研究与开发, 2001, 22(1): 56-59.
- [11] 赵如进. 关于我国铁路蔬菜水果运输预冷环节的探讨[J]. 铁道货运, 1998(4): 40-46.
- [12] Teruel B, Kieckbusch T, Cortez L. Cooling parameters for fruits and vegetables of different sizes in a hydrocooling system[J]. Scientia Agricola, 2004, 61(6): 655-658.
- [13] Gillies S L, Toivonen P M A. Cooling method influences the postharvest quality of broccoli[J]. HortScience, 1995, 30(2): 313-315.
- [14] Cheng H P. Vacuum cooling combined with hydrocooling and vacuum drying on bamboo shoots[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(17-18): 2168-2175.
- [15] Niyomlao W, Kanlayanarat S, Maneerat C. The effects of hydrocooling and plastic bag packaging on the shelf life of *Chinese kale (Brassica albograba L.)* [C]. 19th ASEAN/1st APEC seminar on postharvest technology, 2001: 621-627.
- [16] 刘洋, 申江, 邹同华, 等. 预冷技术的发展及蔬菜真空预冷的实验研究[C]// 第3届中国食品冷藏链新设备、新技术论坛论文集. 天津: 中国制冷空调工业协会, 天津商业大学, 国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津), 2008: 56-61.
- [17] 龚海辉, 谢晶, 张青. 冷库结构与保温材料现状[J]. 物流科技, 2010(2): 121-123.
- [18] 中国物流与采购联合会冷链物流专业委员会, 中国物流技术协会, 国家农产品现代物流工程技术研究中心. 中国冷链物流发展报告(2014)[M]. 北京: 中国财富出版社, 2014.
- [19] 张保生. 中国冷库的现状与发展趋势[J]. 制冷与空调(四川), 2003(2): 21-24.
- [20] 郭亚丽, 刘斌, 沈胜强. 微型冷库内送风方式与果蔬预冷的研究[J]. 热科学与技术, 2005, 4(2): 118-122.
- [21] 刘斌. 微型冷库系统优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [22] 杨磊, 汪小昱. 冷藏库预冷降温过程中温度场的数值模拟与试验研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(9): 219-223.
- [23] 汤毅, 谢晶, 王金峰, 等. 三维计算流体力学技术用于预测小型冷库内气流分布 [C]// 第八届全国食品冷链大会论文集. 北京: 中国制冷学会, 2012: 117-123.
- [24] 谢晶, 瞿晓华, 徐世琼. 冷藏库内气体流场数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 11-16.
- [25] 汤毅, 谢晶, 王金峰, 等. 基于三维 CFD 预测大型冷库内不同货物摆放方式对气流的影响 [C]// 第八届全国食品冷链大会论文集. 北京: 中国制冷学会, 2012: 130-135.
- [26] 刘研玲, 张岩, 王世清, 等. 果蔬摆放形式对冷库内气流场分布影响的研究[J]. 青岛农业大学学报, 2008, 25(1): 24-27.
- [27] 冯圣洪, 张国强, 陈在康, 等. 果蔬真空预冷技术及其应用分析[J]. 食品科技, 2001(6): 21-22.
- [28] 王如林, 夏睿. 真空预冷技术的开发和应用[C]// 21世纪中国食品冷藏链大会暨速冻食品发展研讨会论文集. 北京: 中国制冷学会, 中国肉类协会, 1998: 75-77.
- [29] 周山涛. 果蔬贮藏学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 140-143.
- [30] 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(8): 73-75.
- [31] 王丽琼. 果蔬贮藏与加工[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008: 30-35.
- [32] 韦公远. 果蔬真空预冷装置[J]. 保鲜与加工, 2002, 2(3): 31.
- [33] Noble R. A review of vacuum cooling of mushrooms[J]. Mushroom Journal, 1985, 149: 168-170.
- [34] 陶菲, 张魁. 真空预冷对白蘑菇贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2006, 22(2): 47-48.
- [35] McDonald K, Sun D W. Vacuum cooling technology for the food processing industry: a review[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 45: 55-65.
- [36] Sun D W. Comparison of rapid vacuum cooling of leafy and non-leafy vegetables [M]. USA: American Society of Agricultural Engineering, 1999: 9085-9659.
- [37] Pasqualone S B. Experimental trials on the vacuum precooling of various vegetable and fruit products [J]. Rivistadi Frutticoltura-di Orto-oricoltura, 1986, 48(2): 45-50.
- [38] 石小琼, 邓金星, 张映斌. 真空预冷技术在芋艿冷藏保鲜上的应用研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(4): 86-90.
- [39] 谢晶, 韩志, 潘迎捷, 等. 自动补气阀对卷心菜真空冷却过程的影响[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 118-121.
- [40] 陈刚, 王兰菊, 任凝辉, 等. 果蔬差压预冷的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(8): 1491-1492, 1521.
- [41] 沈炜. 果蔬差压预冷保鲜设备的设计探讨[J]. 江西农业学报, 2009, 21(9): 128-130.

- [42] 马 征,杨 洲,赵春娥,等.果蔬差压式预冷设备研究进展[J].食品与机械,2007,23(2):114-116.
- [43] Walkins J B, Ledger S. Forced-air cooling[M]. Brisbane:Queensland Department of Primary,1990:3-5.
- [44] 刘 斌,郭亚丽,关文强.果蔬差压预冷方式研究[J].保鲜与加工,2003,3(8):16-18.
- [45] Lambrios G, Assimaki H, Mandopoulou H, et al. Air pre-cooling and hydro-cooling of Hayward kiwifruit[J]. Acta Horticulturae,1997,247:561-566.
- [46] 刘 斌,郭亚丽,邹同华.强制通风预冷风速选择研究[J].食品科学,2004,25(7):181-183.
- [47] 陈天及,郭亚丽,余本农,等.番茄差压预冷速度影响因素的试验研究[J].农业工程学报,2001,17(5):105-107.
- [48] 刘凤珍,刘晓东.甘蓝通风预冷实验研究[J].制冷,2001,20(1):6-9.
- [49] 冀卫兴,牛建会.开孔方式对甘蓝差压预冷效果影响实验研究[J].食品研究与开发,2013(2):17-21.
- [50] 刘 升,张宏力,武田吉弘.青花菜差压预冷流通保鲜技术的研究[J].制冷学报,1999(3):47-50.
- [51] Napitupulu B. Effect of precooling and storage period on ripening degree of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill)[J]. Bulletin-Penelitian-Hortikultura,1990,19(1):107-113.
- [52] 李国锋,冯毓琴,李 梅,等.花椰菜实用预冷保鲜技术研究[J].安徽农业科学,2009,37(22):10667-10669.
- [53] 李 卉,孙政国,李 阳,等.新型组合物理方法对凤凰水蜜桃的保鲜效果[J].天津农业科学,2014,20(4):31-36.
- [54] 高丽朴.蔬菜采后预冷与保鲜[J].中国蔬菜,2001(1):58-59.

收稿日期:2014-10-23